

Erstellung topographischer Karten aus hoch aufgelösten digitalen Luftbildern

Diplomarbeit

**erarbeitet am Institut für Photogrammetrie und Geoinformation der
Universität Hannover**

**Prüfer: Dr.-Ing. Karsten Jacobsen
und Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke**

**von
Ayman Sabbagh**

Hannover, Dezember 2008

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	- 1 -
2	Theoretische Grundlagen	- 3 -
2.1	Aufnahmesysteme	- 3 -
2.1.1	Photographische Aufnahmesysteme	- 3 -
2.1.1.1	Aufbau eines Filmes	- 3 -
2.1.1.2	Photographischer Prozess	- 5 -
2.1.1.3	Analoge Reihenmesskamera	- 5 -
2.1.2	Digitale Aufnahmesysteme	- 7 -
2.1.2.1	CCD-Sensoren (Charge Coupled Device).....	- 7 -
2.1.2.2	Digital Mapping Camera (DMC) von Z/I Imaging.....	- 9 -
2.1.2.3	UltraCamD und UltraCamX von Microsoft.....	- 11 -
2.2	Beschreibung der Bildqualität	- 13 -
2.2.1	Das geometrische Auflösungsvermögen.....	- 13 -
2.2.2	Modulationsübertragungsfunktion	- 16 -
2.3	Aerotriangulation	- 17 -
2.3.1	Bündelblockausgleichung	- 19 -
2.3.2	Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parameter	- 21 -
2.3.3	Zusätzliche Parameter in BLUH	- 21 -
2.3.3.1	Standardparameter in BLUH.....	- 21 -
2.3.3.2	Kameraspezifische Parameter in BLUH	- 22 -
2.4	Herstellung digitaler Orthophotos	- 24 -
3	Verwendete Datensätze	- 26 -
4	Radiometrischer und geometrischer Vergleich der Datensätze	- 29 -
4.1	Radiometrischer Vergleich.....	- 29 -
4.2	Geometrischer Vergleich.....	- 31 -
4.2.1	DMC-Datensatz.....	- 31 -
4.2.2	UltraCamD-Datensatz	- 32 -
4.2.3	UltraCamX-Datensatz	- 33 -
4.2.4	RC30-Datensatz	- 34 -

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze.....	- 36 -
5.1 Auswertung der vorhandenen Datensätze bei originaler Auflösung.....	- 38 -
5.1.1 Auswertung des RC30-Datensatzes	- 39 -
5.1.2 Auswertung des DMC-Datensatzes	- 43 -
5.1.3 Auswertung des RGB UltraCamX-Datensatzes	- 48 -
5.1.4 Auswertung des panchromatischen UltraCamX-Datensatzes	- 51 -
5.1.5 Auswertung des RGB UltraCamD-Datensatzes	- 56 -
5.1.6 Zusammenfassender Datenvergleich der verwendeten Datensätze	- 60 -
5.1.7 Wallis-Filter	- 61 -
5.2 Auswertung der Datensätze mit 10cm bzw. 20cm Objektpixelgröße.....	- 62 -
5.2.1 Auswertung der Datensätze bei einer Objektpixelgröße von 10cm.....	- 62 -
5.2.2 Auswertung der Datensätze bei einer Objektpixelgröße von 20cm.....	- 64 -
Zusammenfassende Diskussion.....	- 73 -
Abbildungsverzeichnis.....	- 77 -
Tabellenverzeichnis.....	- 82 -
Abkürzungsverzeichnis der Fachausdrücke.....	- 84 -
Literaturverzeichnis.....	- 85 -
Danksagung.....	- 88 -
Selbstständigkeitserklärung	- 89 -

Kapitel 1

Einleitung

Das Hauptziel der Photogrammetrie ist die Datenerfassung topographischer Informationen. Diese topographischen Daten werden unter anderem für die Stadt- und Landesplanung, Planung von Infrastrukturmaßnahmen, in der Verwaltung von Flächen und als Grundlage für die Erstellung thematischer Karten wie z.B. Radwanderkarten, Freizeit- und Naturparkkarten verwendet. Dabei werden in Deutschland die topographischen Informationen fast vollständig mittels analoger bzw. digitaler Luftbildkameras erstellt. Jedoch besitzen digitale Kameras im Vergleich zu analogen Luftbildkameras folgende aufgeführte Vorteile:

- 1- Kein Filmkorn bzw. Rauschen
- 2- Schnellere Verfügbarkeit der Daten
- 3- Kein Scannaufwand und somit kein radiometrischer und geometrischer Qualitätsverlust, Vermeidung zusätzlicher Kosten
- 4- Gleichzeitige Erfassung von panchromatischen und Farbbildern in 4 Spektralbereichen
- 5- Keine Messung von Rahmenmarken zur Herstellung der inneren Orientierung
- 6- Keine Filmentwicklung und Erstellung von Kontaktabzügen

Nicht zuletzt aus diesen Gründen wurden analoge Luftbildkameras schneller als noch vor wenigen Jahren erwartet aus dem Markt verdrängt und durch digitale Luftbildkameras ersetzt. Wie die **Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF)** darlegt, stellten bereits verschiedene europäische Landesvermessungsinstitutionen vollständig auf die digitale Bilddatenerfassung um [<http://www.dgpf.de/neu/projekte.htm>, Stand 05.10.2008]. Analoge Luftbildkameras werden nicht mehr hergestellt, sind aber noch im Einsatz.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen fehlen jedoch neutral durchgeführte Tests, die eine direkte Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Kamerasysteme erlauben [<http://www.dgpf.de/neu/projekte.htm>, Stand 05.10.2008]. Da sich die Pixelgröße von verschiedenen digitalen Kameras unterscheidet, ist ein direkter Vergleich der Luftbildkameras ausschließlich über die Objektpixelgröße GSD (engl; **G**round **S**ample **D**istance) möglich [Jacobsen; 2008].

1 Einleitung

Das Hauptziel dieser Diplomarbeit ist der Vergleich des Informationspotentials analoger und digitaler Luftbildkameras bzw. digitaler Luftbildkameras untereinander. Darüber hinaus wird ein radiometrischer und geometrischer Vergleich der verwendeten Kameras dargestellt. Zudem erfolgt eine vergleichende Auswertung analoger und digitaler Luftbilder in Hinblick auf die Objekterkennung. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung der Bildinformationen nach Vergrößerung der Objektpixelgröße auf 10 bzw. 20cm.

Hierfür standen zu Beginn der Diplomarbeit die Luftbilder des Testgebietes Franklin Mills in der Nähe von Philadelphia zur Verfügung. Das Testgebiet wurde mit einer analogen Luftbildreihenkamera und drei großformatigen digitalen Luftbildkameras überflogen.

Diese Diplomarbeit ist in sechs Kapitel unterteilt. Nachfolgend werden die theoretischen Grundlagen, die für diese Arbeit relevant sind, näher erläutert. Hierbei erfolgt eine grundlegende Beschreibung der verwendeten Luftbildkameras. Darüber hinaus werden das geometrische Auflösungsvermögen, das Verfahren der Kantenbildanalyse und die Grundlagen der Aerotriangulation (AT) nach der Methode der Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung dargestellt. Zudem werden die zusätzlichen Standardparameter bzw. die kamera-spezifischen Parameter des Programmsystems BLUH (**B**ündelblockausgleichung **L**eibniz **U**niversität **H**annover) beschrieben. Da die Interpretation und die Auswertung der Luftbilder auf Grundlage von Orthophotos erfolgten, wird abschließend das Grundprinzip der Herstellung digitaler Orthophotos aufgezeigt.

Im dritten Kapitel werden die vorhandenen Datensätze näher beschrieben. In Kapitel 4 erfolgen die Untersuchung der verwendeten Luftbilder mittels Kantenbildanalyse sowie die Bestimmung der Bildgeometrien durch Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Objekterkennung der jeweiligen Bildinformationen und die Daten aus dem Vergleich der analogen und digitalen Luftbilder bei Originalobjektpixelgröße aufgeführt. Anschließend werden die ermittelten Daten nach Vergrößerung der Objektpixelgröße auf 10cm bzw. 20cm präsentiert.

Das sechste Kapitel gibt eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie eine abschließende Diskussion.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Aufnahmesysteme

In der Luftbildphotogrammetrie kommen sowohl photographische als auch digitale Aufnahmesysteme zum Einsatz. Die photographischen und digitalen Aufnahmen sind ein passives Verfahren. Die Aufnahmesysteme nehmen elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Licht und im nahen infrarot im Wellenlängenbereich von $0,4\mu\text{m}$ – $1\mu\text{m}$ auf. Nachfolgend werden die beiden Aufnahmesysteme näher erklärt.

2.1.1 Photographische Aufnahmesysteme

Photographische Aufnahmesysteme arbeiten mit lichtempfindlichen photographischen Emulsionen, die als Film verwendet werden. Im Folgenden wird zuerst der prinzipielle Aufbau eines Filmes beschrieben. Danach wird der photographische Prozess dargestellt und abschließend wird die analoge Reihemesskamera näher erklärt.

2.1.1.1 Aufbau eines Filmes

Ein Schwarzweißfilm besteht aus einer lichtempfindlichen Emulsionsschicht, die auf einem $100 - 200\mu\text{m}$ dicken Schichtträger aufgebracht ist (siehe **Abbildung 2.1** auf der nächsten Seite). Die Emulsionsschicht enthält lichtempfindliche Silberbromidsubstanzen, welche in eine Gelatineschicht eingebettet sind. Die Schicht weist eine Dicke von $5 - 20\mu\text{m}$ auf, die einzelnen Silberbromidkörner haben eine Größe von ca. $0,2 - 2\mu\text{m}$. Die Lichtempfindlichkeit eines Filmes ist proportional zum Volumen der Silberbromidkörner. Das bedeutet, dass die Lichtempfindlichkeit mit der Größe der Körnigkeit der Emulsion wächst. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Lichtempfindlichkeit eines Filmes, ohne dass die Körnigkeit wesentlich zunimmt, ist

2 Theoretische Grundlagen

die Verwendung von zwei unterschiedlich lichtempfindlichen Emulsionsschichten. In der **Abbildung 2.1** ist ein schematischer Schichtaufbau mit doppelter Emulsionsschicht zu sehen. Dabei ist die dünnere und obere Emulsionsschicht lichtempfindlicher und deshalb grobkörniger, aber deutlich silberärmer. Im Gegensatz hierzu ist die dickere und untere Emulsionsschicht weniger lichtempfindlich, feinkörniger und silberreicher. Die silberarme, hochempfindliche Schicht ist dabei für die Steigerung der Allgemeinempfindlichkeit verantwortlich, ohne jedoch den visuellen Körnigkeitseindruck merkbar zu erhöhen. Die aufliegende Schutzschicht schützt die Kristalle vor mechanischer Beschädigung und Druck, während die Substratschicht der Emulsionsschicht ein gutes Anhaften ermöglicht. Durch die Lichthofschutzschicht wird verhindert, dass das einfallende Licht in die Emulsionsschichten zurückreflektiert wird [Luhmann, 2003; Marchesi, 1995].

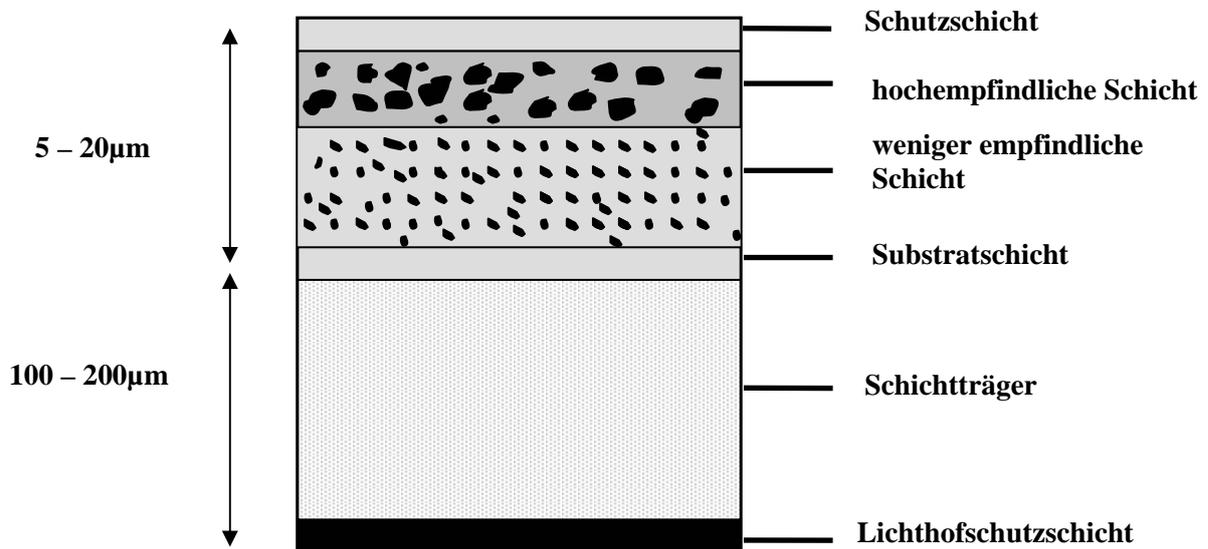


Abbildung 2.1: Schematischer Schichtaufbau eines Schwarzweißfilms [Marchesi, 1995]

Im Gegensatz zu einem Schwarzweißfilm bestehen Farbfilme nicht nur aus einer bzw. zwei Emulsionssichten, sondern aus drei übereinanderliegenden Emulsionsschichten. Jede der drei Schichten ist nur für einen bestimmten Spektralbereich empfindlich. Dabei ist die oberste Emulsionsschicht für blaues Licht im Wellenlängenbereich von $0,4 - 0,5\mu\text{m}$ die zweite Emulsionsschicht für grünes Licht im Wellenlängenbereich von $0,4 - 0,6\mu\text{m}$ und die dritte Emulsionsschicht nur für rotes Licht im Wellenlängenbereich von $0,6 - 0,7\mu\text{m}$ empfindlich. Da grün- und rot empfindliche Emulsionsschichten auch für blaues Licht empfindlich sind, ist vor

2 Theoretische Grundlagen

diesen Schichten ein Gelbfilter eingebaut. Gelb absorbiert blaues Licht und lässt grünes und rotes Licht ungehindert passieren [Marchesi, 1998; Albertz, 2007].

2.1.1.2 Photographischer Prozess

Die Silberbromidkörner der Emulsionsschichten bestehen aus positiven Silber-Ionen und negativen Bromid-Ionen. Durch die Quantenenergie, die von dem einfallenden Lichtstrahl auf die Silberbromidkörner trifft, wird von dem Bromid-Ion ein Elektron abgespalten. Das freigewordene Elektron verbindet sich mit einem Silber-Ion, das hierdurch zum neutralen Silberatom wird. Es entsteht ein latentes Bild, das aus so genannten Entwicklungskeimen aufgebaut ist. Entwicklungskeime sind belichtete Körner, die aus mindestens 10^9 Silberatomen bestehen. Bei der nachfolgenden Entwicklung des Filmes werden alle genügend belichteten Körner, die die Entwicklungskeime bilden, zu metallischem Silber reduziert. Die Entwicklung entspricht einer millionenfachen Verstärkung des latenten Bildes. Die ungenügend oder gar nicht belichteten Silberbromidkörner werden im Fixierbad in einen wasserlöslichen Komplex umgewandelt und danach ausgewaschen. Es entsteht ein Negativbild. Um ein Negativbild in ein Positivbild umzuwandeln muss das ganze Prozess nochmals durchgeführt werden [Marchesi, 1995; Heipke, Vorlesungsskript 2008; Finsterwalder, 1968].

2.1.1.3 Analoge Reihemesskamera

Reihemesskameras werden zur systematischen Aufnahme größerer Flächen aus Flugzeugen eingesetzt. Sie bestehen aus dem eigentlichen Kamerakörper, der Filmkassette, der Kameraaufhängung und Zusatzgeräten. Reihemesskameras sind großformatige und filmbasierte Kameras, die das gleiche Bildformat von $23\text{cm} \times 23\text{cm}$ aufweisen. In den letzten Jahren wurden ausschließlich Normalwinkelkameras mit einer Kamerakonstante von etwa 305mm und Weitwinkelkameras mit einer Kamerakonstante von etwa 153mm hergestellt. Die Kamerakonstante ist genähert der senkrechte Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene. Zurzeit werden die analogen Reihemesskameras nicht mehr produziert, sie sind jedoch noch im Einsatz. Die bekanntesten Hersteller analoger Kameras waren Carl Zeiss (Oberkochen) mit den Modellen RMK TOP und RMK A, Carl Zeiss (Jena) mit den Modellen LMK und MRB und Leica Geosystem mit den Serien RC10, RC20 und RC30. Beispielhaft ist in der **Abbildung 2.2** auf der nächsten Seite die RC30 von Leica Geosystem zu sehen.



Abbildung 2.2: Darstellung der analogen Reihenkamera RC30 [http://www.leica-geosystems.com/corporate/de/ndef/lgs_57632.htm, Stand 25.06.2008]

Bei analogen Luftbildkameras wird die Bildwanderung während der Belichtungszeit durch eine rechnergesteuerte Verschiebung der Filmanpressplatte in Flugrichtung mit einer Geschwindigkeit von v' kompensiert. Die Bildwanderung resultiert prinzipiell aus der Vorwärtsbewegung des Flugzeuges während der Belichtungszeit:

$$v' = \frac{v c}{hg} \quad (2.1)$$

Dabei ist v die Fluggeschwindigkeit, c ist die Kamerakonstante und hg ist die Flughöhe über dem Grund. Diese Technologie der Bildwanderungskompensation wird als FMC (engl; **F**orward **M**otion **C**ompensation = Vorwärtsbewegungskompensation) bezeichnet. Durch die Verwendung der FMC wird durch die Bildwanderung erzeugte Unschärfe im Bild, verhindert bzw. vermindert. Die Bildqualität wird somit verbessert. Der Einfluss der drei Rotationen des Flugzeuges (Längsneigung ω , Querneigung ϕ und Kantung κ) auf die Bildqualität kann bei den analogen Luftbildkameras durch die Verwendung einer kreiselstabilisierten Plattform kompensiert werden [Kraus, 2004].

Zur Gewinnung von panchromatischen, Echtfarb- und Falschfarbaufnahmen muss bei den analogen Luftbildkameras das Gebiet mehrfach unter Verwendung unterschiedlicher Filme überflogen werden. Dieses ist bei den digitalen Aufnahmesystemen nicht notwendig. Ein weiterer Nachteil der analogen Kameras besteht darin, dass die Filme mit hohem Aufwand entwickelt und gescannt werden müssen [Sandau, 2005].

2 Theoretische Grundlagen

2.1.2 Digitale Aufnahmesysteme

Im Gegensatz zu analogen Aufnahmesystemen sind bei digitalen Aufnahmesystemen anstelle eines photographischen Films ein bzw. mehrere CCD-Bildsensoren (engl; Charge Coupled Device = ladungsgekoppeltes Bauelement) installiert. Im Folgenden wird zuerst das Grundprinzip des CCD-Bildsensors näher erklärt. Danach werden verschiedene großformatige, digitale Flächenkameras (DMC von Intergraph Z/I Imaging sowie Microsoft Vexcel Imaging UltraCamD, UltraCamX und UltraCamXp), die mehrere Flächenbildsensoren besitzen, vorgestellt.

2.1.2.1 CCD-Sensoren (Charge Coupled Device)

Der CCD-Bildsensor wurde Ende der 60iger bis Anfang der 70iger Jahre von den Forschern W.S. Boyle und G.E. Smith in den Bell-Laboratorien (USA) als neues Datenspeichermedium entwickelt. Wegen seiner Eigenschaft, Licht in elektrische Signale umzuwandeln, wurde er anschließend jedoch nicht als Speicher, sondern als Fotosensor weiterentwickelt.

In diesen Bildsensoren werden durch Photonen elektrische Ladungen erzeugt. Fällt ein Photon auf einem Pixel wird dadurch ein Elektronenpaar freigesetzt. Das negativ geladene Elektron und das positive Teil werden in der Raumladungszone getrennt. Diese Raumladungszone entsteht durch Anlegen einer positiven Gatespannung gegenüber dem positiv geladenen Siliziumsubstrat. Die erzeugten negativen Elektronen werden in der Raumladungszone gesammelt. Die positiven Teile also die Defektelektronen werden mit dem Siliziumsubstrat vereinigt. Somit verbleibt nur die negative Ladung in der Raumladungszone. **Abbildung 2.3** zeigt diesen Prozess schematisch [Albert, 1996; Bobey, 2005].

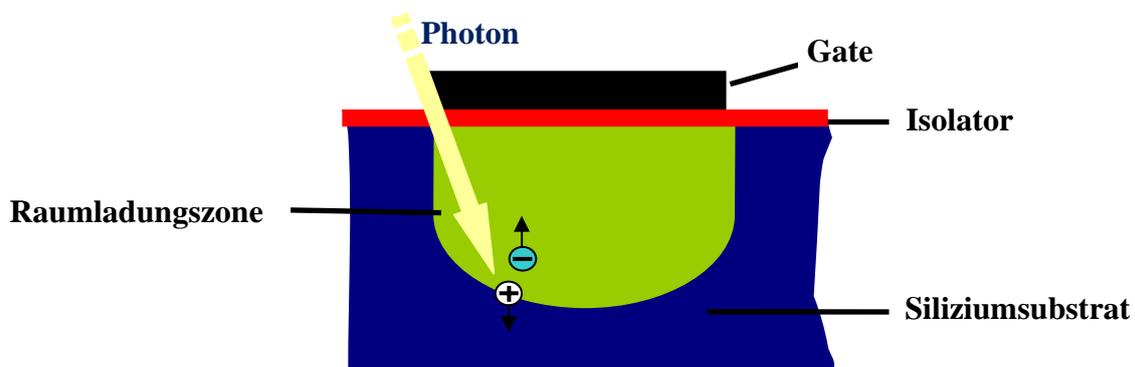


Abbildung 2.3: Umwandlung von Photonen in elektrische Ladungen [Bobey, 2005]

2 Theoretische Grundlagen

Die Anzahl der erzeugten Ladungen ist dabei proportional zu der der einfallenden Photonen. Aus den entstandenen elektrischen Ladungen werden anschließend Spannungssignale erzeugt, die elektronisch verarbeitet werden. Es entsteht ein digitales Bild.

CCD-Sensoren werden in Zeilensensoren und Flächensensoren aufgeteilt. Zeilensensoren bestehen nur aus einer einzigen Pixel-Zeile, während Flächensensoren aus einer Pixel-Matrix aufgebaut sind. Die CCD-Flächensensoren können verschiedene Architekturen, wie den Full-Frame, den Frame-Transfer und den Interline-Transfer, aufweisen. Aufgrund des vergleichsweise hohen Füllfaktors wird die Full-Frame-CCD-Architektur in der Luftbildphotogrammetrie verwendet. Der Füllfaktor stellt das Verhältnis von optisch aktiver Pixelgröße zur gesamten Pixelfläche dar. Im Folgenden wird die Full-Frame-CCD-Architektur näher beschrieben.

Full-Frame-CCD-Architektur

Bei dem Full-Frame-Bildsensor ist nahezu die gesamte Siliziumfläche optisch aktiv. Das bedeutet, dass der Füllfaktor dicht bei eins ist. Bei dieser Architektur werden nach Erzeugung des Ladungsbildes alle Ladungen um ein Pixel zum Ausleseregister verschoben und in dem Ausleseregister nacheinander ausgelesen. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis alle Pixelladungen Zeile für Zeile zum CCD-Ausgang transportiert wurden. **Abbildung 2.4** zeigt diesen Ablauf schematisch für eine CCD-Matrix mit 6×6 Pixeln. Die Verschiebung zum Ausleseregister ist durch einen senkrechten Pfeil gekennzeichnet, die Verschiebung im Ausleseregister durch einen waagerechten Pfeil. Das Ausleseregister des Bildsensors ist gelb umrahmt [Bobey, 2005; Albert, 1996].

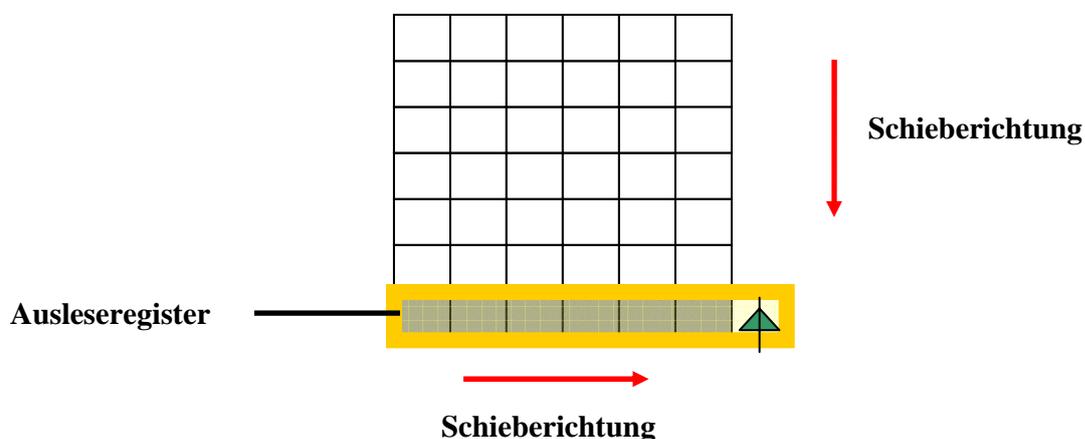


Abbildung 2.4: Prinzip des Full-Frame-CCD-Bildsensors [Bobey, 2005]

2 Theoretische Grundlagen

Ein Lichteinfall auf den Full-Frame-CCD-Bildsensor während des Auslesens wird durch Verwendung eines mechanischen Verschlusses verhindert.

2.1.2.2 Digital Mapping Camera (DMC) von Z/I Imaging

Die DMC (engl; **D**igital **M**apping **C**amera) wurde in einem Joint Venture von den beiden Unternehmen Zeiss Oberkochen und Intergraph entwickelt, später übernahm Intergraph alle Unternehmensanteile. Die Aufnahmetechnik der DMC basiert auf acht Full-Frame-CCD-Flächensensoren in jeweils einer separaten Kamera. Die Pixel haben eine Größe von $12\mu\text{m}$.

Das gesamte Kamerasystem der DMC besteht aus einem panchromatischen und einem multispektralen System. Das panchromatische System besitzt vier Kameras und jeder einzelne panchromatische Flächensensor weist eine Größe von 7.168×4.096 Pixel auf. Die panchromatischen Kameras sind in der Mitte des Kamerasystems angeordnet (siehe **Abbildung 2.5**).

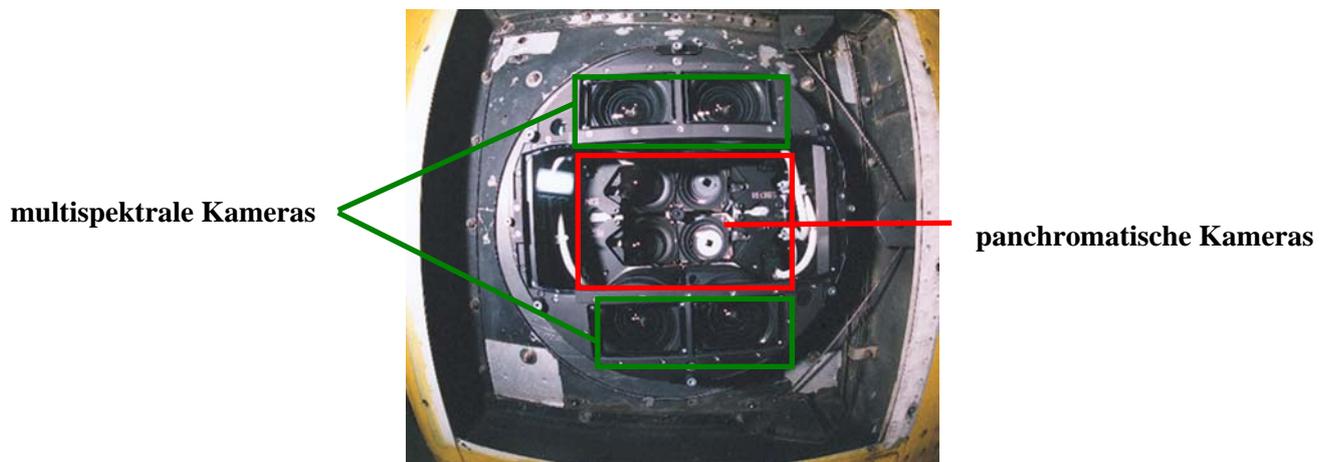


Abbildung 2.5: Darstellung der panchromatischen und multispektralen Kameras [Doerstel et al., 2002]

In der Nachbearbeitung wird aus den vier erzeugten überlappenden panchromatischen Bildern durch dreidimensionale Kombinationen der Teilbilder mittels Verknüpfungspunkten ein zentralperspektives virtuelles Messbild mit 13.824 Pixel quer zur Flugrichtung und 7.680 Pixel in Flugrichtung hergestellt (siehe **Abbildung 2.6** auf der nächsten Seite). Zur optimalen Erstellung des panchromatischen Gesamtbildes sind die vier Kameras zueinander leicht geneigt. Die gewählte Kamerakonstante beträgt 120mm .

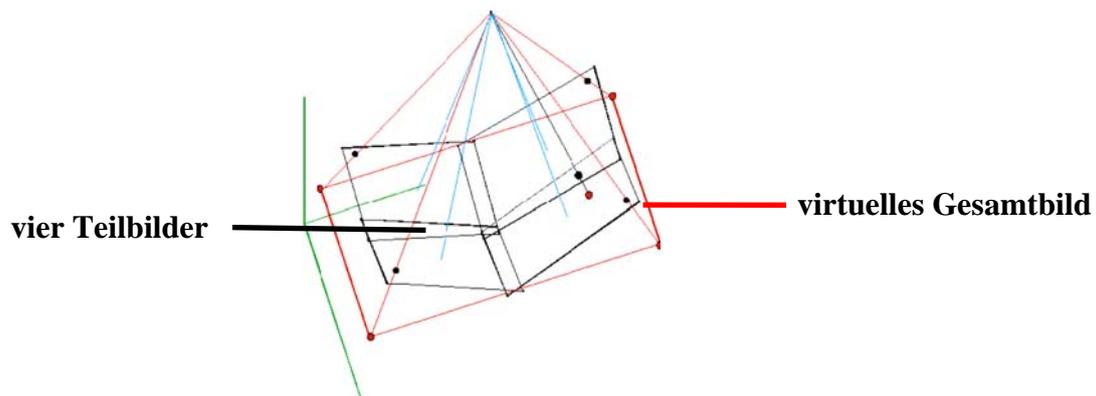


Abbildung 2.6: Prinzip der Erstellung eines virtuellen Gesamtbildes [Madani et al., 2004]

Neben dem panchromatischen System besitzt das multispektrale System drei Kameras für die Spektralbereiche Blau, Grün und Rot und eine vierte Kamera für das nahe Infrarot (siehe **Abbildung 2.5**). Der einzelne multispektrale Sensor hat eine Größe von etwa 3.000×2.000 Pixel. Mit einer Kamerakonstante von 25mm für die multispektralen Kameras wird das gleiche Bildfeld, wie mit den vier panchromatischen Kameras gemeinsam, abgedeckt. Das bedeutet, dass die multispektralen Kameras eine um den Faktor vier schlechtere Auflösung als die panchromatischen Kameras liefern und deshalb werden die hochauflösenden Farbbilder durch ein „Pansharpening“ erzeugt [Sandau, 2005].

Durch das „Pansharpening“ wird eine Fusion von panchromatischen Bilddaten hoher Auflösung mit den multispektralen Bilddaten geringerer Auflösung erzielt (siehe **Abbildung 2.7**).



Abbildung 2.7: Schematische Darstellung des „Pansharpening“ Verfahrens [Jacobsen, Vorlesungsskript]

2 Theoretische Grundlagen

Dabei werden zuerst die Multispektraldaten in den IHS-Farbraum transformiert. Der IHS-Farbraum beschreibt eine Farbe durch ihrer Intensität I (engl; **I**ntensity), ihres Farbtons H (engl; **H**ue) und ihrer Sättigung S (engl; **S**aturation). Nach der Transformation der multispektralen Daten in den IHS-Farbraum wird der Intensitätskanal (also die Schwarzweiß-Informationen) durch die panchromatischen Bilddaten höherer Auflösung ersetzt. Abschließend wird das Bild in den ursprünglichen RGB-Farbraum zurücktransformiert. Hierdurch wird ein hochauflösendes Farbbild erzeugt [Albertz; 2007].

Das Sichtfeld FOV (engl; **F**ield **O**f **V**iew) der panchromatischen und multispektralen Bildsensoren beträgt 70° in Flugrichtung und $43,6^\circ$ quer zur Flugrichtung, wobei die radiometrische Auflösung für die panchromatischen und multispektralen Bildsensoren 12 bit beträgt.

Eine Kompensation der Bildwanderung, die durch eine Fortbewegung des Flugzeuges während der Belichtung verursacht wird, kann bei der DMC durch das sogenannte TDI (engl; **T**ime **D**elay and **I**ntegration) kompensiert werden. Mit diesem Verfahren werden die erzeugten Ladungen im Pixel mit der Geschwindigkeit der Bildbewegung zum Nachbarpixel weiter verschoben und dabei analog aufsummiert. Somit verbessert sich die Bildqualität (siehe **Abbildung 2.8**) [Jacobsen, Vorlesungsskript].

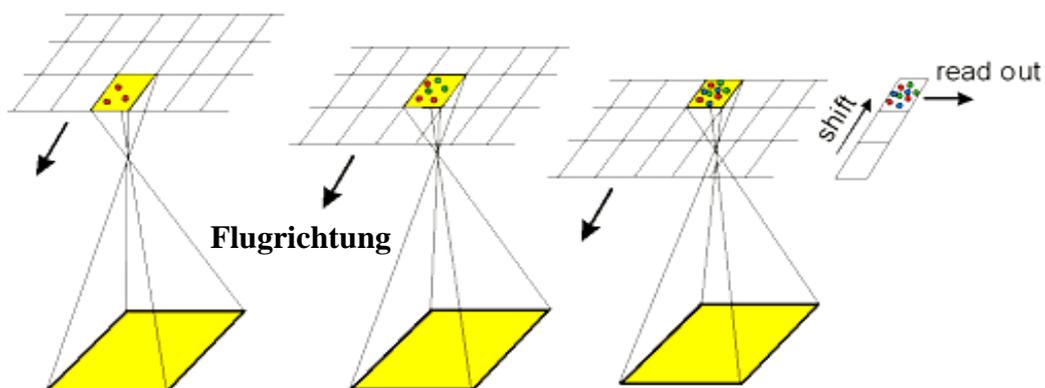


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der TDI [Jacobsen, Vorlesungsskript]

2.1.2.3 UltraCamD und UltraCamX von Microsoft

Bei der UltraCamX handelt es sich um das, der UltraCamD von Microsoft Vexcel Imaging nachfolgende Kamerasystem. Dabei ist der photogrammetrische Aufbau der Teilkameras bei

2 Theoretische Grundlagen

beiden Kamerasystemen gleich. Die UltraCamD besitzt eine Pixelgröße von $9\mu\text{m}$, die jedoch bei der UltraCamX auf $7.2\mu\text{m}$ verkleinert wurde. Die radiometrische Auflösung beträgt bei den beiden Kamerasystemen 12 bit.

Das panchromatische System der UltraCamD und der UltraCamX hat vier panchromatische Kameras mit paralleler Blickrichtung, die in der Mitte der Kamera und in Reihe angeordnet sind (siehe **Abbildung 2.9**).

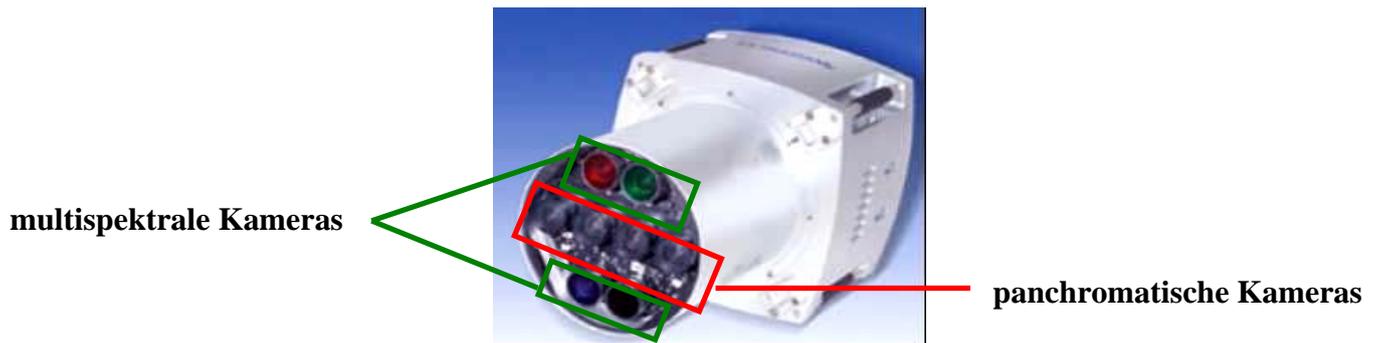


Abbildung 2.9: Darstellung der panchromatischen und multispektralen Teilkameras.[Gruber, 2007]

Die vier panchromatischen Kameras enthalten insgesamt neun CCD-Flächensensoren, wobei in der ersten Teilkamera (links) zwei Flächensensoren, in der zweiten vier, in der dritten zwei und in der rechten Teilkamera nur ein Flächensensor integriert ist. In **Abbildung 2.10** ist die Anordnung der neun panchromatischen Bilder dargestellt.

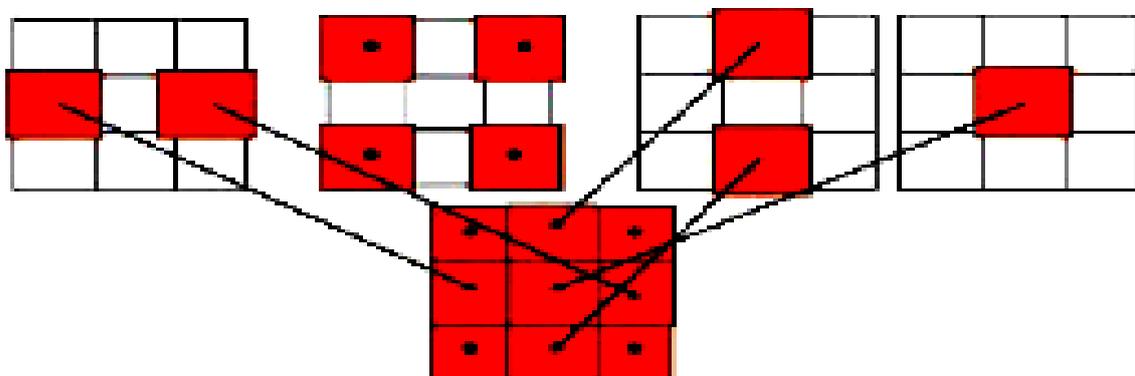


Abbildung 2.10: Darstellung der Verteilung der neun panchromatischen Bilder [Jacobsen, Vorlesungsskript]

2 Theoretische Grundlagen

Aus den erzeugten panchromatischen Bildern wird in der Nachverarbeitung ein großes virtuelles zentralperspektives Messbild erzeugt. Das erzeugte panchromatische Messbild hat bei der UltraCamD eine Größe von 7.500 Pixel in Flugrichtung und 11.500 Pixel quer zur Flugrichtung. Bei der UltraCamX ist das Messbild 9.420 Pixel in Flugrichtung und 14.430 quer zur Flugrichtung groß. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Pixelgrößen besitzen die UltraCamD und die UltraCamX dieselbe Bildgröße von 68mm in Flugrichtung und 104mm quer zur Flugrichtung. Zudem haben die panchromatischen Bildsensoren aller 4 Kameras genähert die gleiche Kamerakonstante und dasselbe Sichtfeld. Die Kamerakonstante beträgt etwa 100mm und das Sichtfeld 55° in Flugrichtung und 37° quer zur Flugrichtung.

Wie bei der DMC besteht das multispektrale System für die UltraCamD und UltraCamX aus insgesamt vier Kameras, für die vier Spektralbereiche Blau, Grün, Rot und das nahe Infrarot. Bei der UltraCamD hat ein multispektraler Sensor eine Größe von 4.008×2.672 Pixel, bei der UltraCamX betragen die Ausmaße 4.810×3.140 Pixel. Die multispektralen Sensoren der UltraCamD weisen eine Kamerakonstante von 28mm und ein Sichtfeld von 56° quer zur und 46° in Flugrichtung auf. Die Kamerakonstante beträgt bei den multispektralen Sensoren der UltraCamX 33mm und das Sichtfeld $55^\circ \times 37^\circ$. Entsprechend der DMC werden auch hier die hochaufgelösten Farbbilder durch das Verfahren des „Pansharpening“ erzeugt. Die Kompensation der Bildwanderung erfolgt wie bei der DMC durch TDI [Leberl und Gruber, 2003; Gruber, 2007; Sandau, 2005].

In 2008 wurde eine Weiterentwicklung der UltraCamX, die UltraCamXprime (UCXp) vorgestellt. Bei dieser Kamera wurde die Pixelgröße auf $6\mu\text{m}$ verkleinert. So konnte das panchromatische Bildformat auf 17.310 Pixel quer zur Flugrichtung und 11.310 Pixel in Flugrichtung vergrößert werden [<http://www.microsoft.com/ultracam/ultracam/default.msp>, Stand 15.11.2008].

2.2 Beschreibung der Bildqualität

2.2.1 Das geometrische Auflösungsvermögen

Vereinfacht beschreibt das geometrische Auflösungsvermögen (AV) bzw. die Auflösung eines Films oder eines Aufnahmesystems die Fähigkeit, eine Anzahl gegebener schwarzer und weißer Linien mit gleichem Abstand, gleicher Dicke und konstantem Kontrast voneinander getrennt abzubilden. Es stellt also ein Maß für den Informationsgehalt eines Bildes dar.

2 Theoretische Grundlagen

Vereinfacht wird die Fähigkeit der Detailwiedergabe eines Aufnahmesystems durch das Auflösungsvermögen beschrieben.

Die Einheit des Auflösungsvermögens wird in Linien pro Millimeter (L/mm) bzw. Linienpaaren pro Millimeter (lp/mm) angegeben. Grob vereinfacht entspricht ein Linienpaar zwei Pixeln, was mittels „dots per inch“ (dpi) angegeben werden kann. Da 1 inch 25,4mm entspricht, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$2 : 25,4 = AV [L/mm] : AV [dpi] \quad (2.1)$$

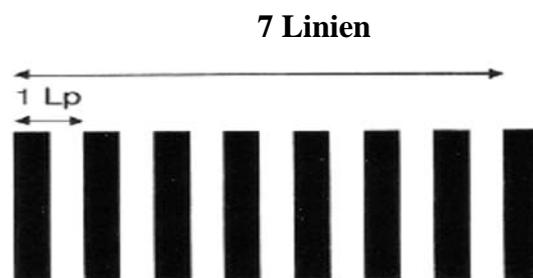


Abbildung 2.11: Darstellung eines Linienmusters [Luhmann, 2003]

Das Auflösungsvermögen kann z.B. durch die Abbildung eines Siemenssterns bestimmt werden (siehe **Abbildung 2.12**). Ein Siemensstern ist ein Kreis mit abwechselnden schwarzen und weißen Sektoren. Das maximale Auflösungsvermögen in (LP/mm) ergibt sich aus der Anzahl der schwarzen Sektoren bezogen auf den Umfang des inneren nicht mehr aufgelösten Unschärfekreises (d):

$$AV = \frac{\text{Anzahl der schwarzen Sektoren}}{\pi \times d} \quad (2.2)$$

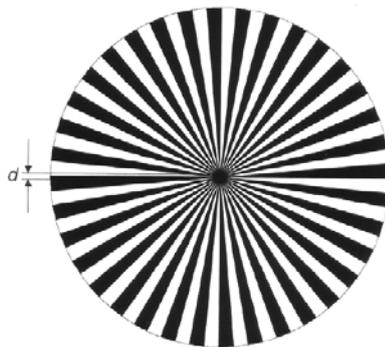


Abbildung 2.12: Darstellung eines Siemensstern [Luhmann, 2003]

2 Theoretische Grundlagen

Da photogrammetrische Auswertungen digital erfolgen, müssen analoge Bilder gescannt werden. Dieses ist bei den Digitalen Kameras nicht notwendig. In der Digitalkamera ist die Pixelgröße fest vorgegeben. Diese kann anhand der Kamerakonstante c und der Flughöhe über Grund h in eine Objektpixelgröße GSD umgerechnet werden.

$$\frac{hg}{c} = \frac{GSD}{\text{Pixelgröße}} \quad (2.3)$$

Da die Pixelgröße des Analogbildes durch die Wahl der Größe des Abtastpixels entsteht, besitzt die Analogkamera - im Vergleich mit der Digitalkamera - keine feste Pixelgröße und somit auch keine feste GSD. Das bedeutet, dass von einem Analogbild verschiedene Digitalbilder mit verschiedenen Pixelgrößen hergestellt werden können. Durch das Abtasten des Analogbildes erfolgt somit nicht nur die geometrische und radiometrische Qualitätsreduzierung sondern auch die Wahl der Abtastpixelgröße, welche für das Analogbild geeignet ist.

Abbildung 2.13 zeigt den Vergleich des Auflösungsvermögens zwischen einem gescannten Analogbild (linke Seite des Siemenssterns) und einem Digitalbild (rechte Seite des Siemenssterns). Dabei haben das Analogbild und das Digitalbild dieselbe Objektpixelgröße. Der Umfang des inneren, nicht mehr aufgelösten Unschärfekreises (d) beträgt bei dem Filmbild $265 \mu\text{m}$ und bei dem digitalen Bild nur $145 \mu\text{m}$. Das bedeutet, dass dieses Digitalbild ein um den Faktor zwei bessere Auflösungsvermögen als das Filmbild aufweist. Das höhere Auflösungsvermögen des Digitalbildes kann wahrscheinlich durch das Fehlen der Filmkörnung bzw. des Kornrauschens erklärt werden [Leberl und Gruber, 2003].

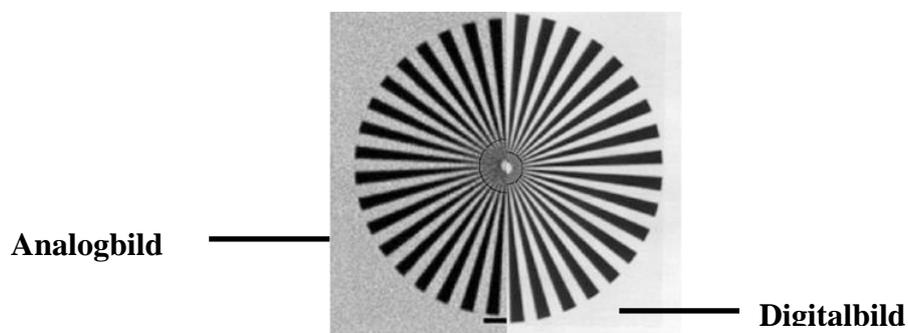


Abbildung 2.13: Darstellung einer verschiedenen aufgenommenen Siemensstern (linke Hälfte: Filmkamera; rechte Hälfte: Digitalkamera) [Leberl und Gruber, 2003]

2 Theoretische Grundlagen

2.2.2 Modulationsübertragungsfunktion

Das geometrische Auflösungsvermögen ist nicht das einzige wesentliche Kriterium für die Qualität von optischen Systemen. Ein Bild, das zwar scharf aber kontrastarm ist, befriedigt den Beobachter genauso wenig, wie ein unscharfes Bild. Das Auflösungsvermögen eines gesamten optischen Systems ist also kontrastabhängig. Der Kontrast nimmt mit zunehmender Ortsfrequenz ab, deshalb verringert sich die Fähigkeit, Signale zu übertragen. Mit Hilfe der Modulationsübertragungsfunktion MÜF (engl; MTF; **M**odulation **T**ransfer **F**unction) wird eine kontrastunabhängige Beschreibung des Auflösungsvermögens erreicht. Die MTF kann durch die Anwendung der Kantenbildanalyse bestimmt werden. Dabei wird die MTF aus einer Schwarzweiß-Kante wie z.B. an einer Schattengrenze im Luftbild abgeleitet. Die MTF wird durch die Anwendung der eindimensionalen Fourier-Transformation und Betragsbildung in Bezug auf die Punktverteilungsfunktion (engl; PSF; **P**oint **S**pread **F**unction) bestimmt. Die Punktverteilungsfunktion wird durch mathematische Ableitung des Grauwertverlaufes der abgebildeten Kante ermittelt. Dabei kann die Weite der Punktverteilungsfunktion als Maß für die Bildqualität verwendet werden. Je enger die Weite ist, desto besser die Auflösung. Mit Hilfe der Fourier-Transformation lässt sich eine Bildfunktion vom Orts- oder Zeitbereich in den Frequenzbereich abbilden. In der **Abbildung 2.15** ist das Ablaufschema der Kantenbildanalyse zur Bestimmung der MTF dargestellt [Bähr, 1998].

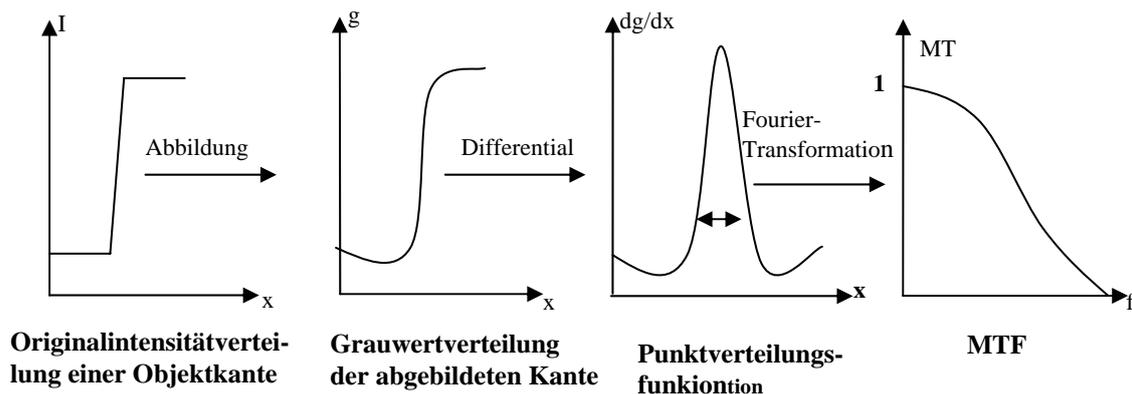


Abbildung 2.14: Ablaufschema der Kantenbildanalyse zur Bestimmung der MTF [Bähr, 1998]

Die Kurve für die MTF wird so normiert, dass die MTF für die Nullfrequenz (Objekt mit gleichmäßiger Helligkeit) gleich 1 (= 100 %) ist. Der Vorteil dieser Form der Auflösungsdar-

2 Theoretische Grundlagen

stellung besteht in der Möglichkeit einer einfachen Analyse der Wechselwirkung komplexer Systeme.

Da jede einzelne Komponente eines optischen Systems eine eigene MTF besitzt, ergibt sich die Gesamtfunktion eines Systems aus dem Produkt der einzelnen MTFs:

$$MTF_{gesamt} = MTF(\text{Objektiv}) \times MTF(\text{Sensor}) \times MTF(\text{Bildbewegung}) \times MTF(\text{Atmosphäre}) \times \dots \quad (2.4)$$

Die Bestimmung der MTF wird z.B. durch das optische System, die CCD-Bildsensor, durch die Kornstruktur der photographischen Schichten und auch durch ein „Pansharpening“ beeinflusst. Dabei ist die MTF allgemein in Bezug auf die Bildmitte besser als am Bildrand, da die Wirkung der optischen Abbildungsfehler und die Auswirkung der Atmosphäre von der Bildmitte zum Bildrand zunimmt. Ein optischer Abbildungsfehler wird als die Abweichung des tatsächlichen Objektbildes von der idealen optischen Abbildung definiert. Bei einem idealen Objektiv treffen sich diejenigen Lichtstrahlen, die von einem bestimmten Objektpunkt ausgehen, nach dem Durchgang durch das Objektiv des Aufnahmemediums in einem einzigen Bildpunkt wieder. Durch verschiedenartige Abbildungsfehler kommt es bei Objektiven jedoch zu Abweichungen. Häufig auftretende optische Abbildungsfehler sind die sphärische Aberration, die chromatische Aberration, Asymmetriefehler, Astigmatismus und Beugung [Pedrotti, 2004].

2.3 Aerotriangulation

Die Aerotriangulation (AT) wurde als Verfahren zur Bestimmung der äußeren Orientierung von Messbildern eines größeren Bildverbandes in Gebieten mit einer geringeren Anzahl von Passpunkten entwickelt. Sie wird auch als Verfahren der photogrammetrischen Punktbestimmung bezeichnet. Passpunkte sind Objektpunkte, deren Koordinaten im Objektkoordinatensystem (Landeskoordinatensystem) bekannt sind. Die Passpunkte müssen in Luftbildern eindeutig identifiziert werden. Dabei wird zwischen Vollpasspunkten (Objektkoordinaten X, Y, Z), Lagepasspunkten (Objektkoordinaten X, Y) und Höhenpasspunkten (Objektkoordinate Z) unterscheiden.

Die äußere Orientierung beschreibt die Position (X_0, Y_0, Z_0) und Orientierung (Längsneigung ω , Querneigung Φ und Kantung κ) des Projektionszentrums zur Zeit der Aufnahme (siehe **Abbildung 2.15** auf der nächsten Seite) [Kraus, 2004; Hildebrandt, 1996].

2 Theoretische Grundlagen

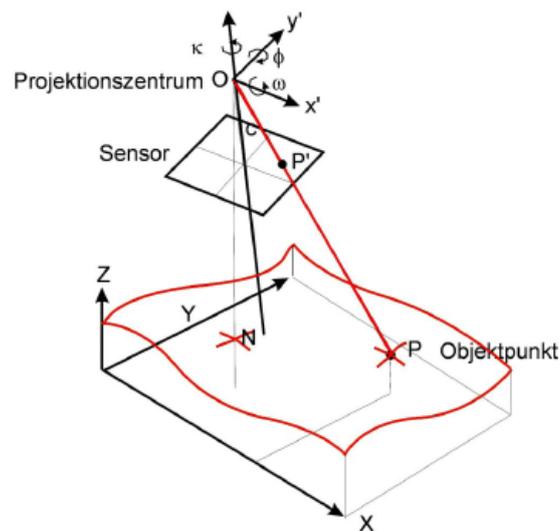


Abbildung 2.15: Darstellung der Elemente der äußeren Orientierung [Jacobsen, Vorlesungsskript]

Bei Bildflügen mit einer analogen Reihenmesskamera sind am Blockrand Vollpasspunkte (rot dargestellt) im Abstand von vier bis sechs Basislängen (b) erforderlich. Als Basislänge wird der Abstand zwischen den Projektionszentren zweier in Flugrichtung benachbart erzeugter Aufnahmen bezeichnet. Zusätzlich zu den Vollpasspunkten sind Höhenpasspunkte im Bereich der Querüberdeckung (grün dargestellt) aller vier Basislängen notwendig (siehe **Abbildung 2.16**). Darüber hinaus kann bei Bildflügen mit einer digitalen Luftbildkamera der Abstand der Vollpasspunkte auf sechs bis acht Basislängen vergrößert werden. Das heißt, mit einer digitalen Luftbildkamera kann die Anzahl der Vollpasspunkte reduziert werden.

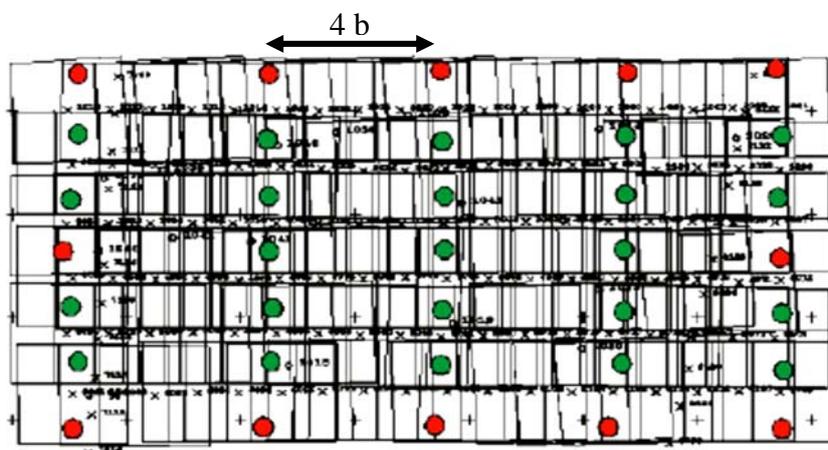


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung der Verteilung der Voll- und Höhenpasspunkte für einen Blockverband [Jacobsen, Vorlesungsskript]

2 Theoretische Grundlagen

Mit Hilfe der direkten Positionierung der Projektionszentren durch die Verwendung von GPS (engl; **G**lobal **P**ositioning **S**ystem) kann die Anzahl der erforderlichen Passpunkte weiter verringert werden. Dieser Verfahren wird GPS- gestützte AT genannt. Mit dem Verfahren der direkten Georeferenzierung, also mit Hilfe von GPS und IMU (engl; **I**nertial **M**easurement **U**nit), können die Elemente der äußeren Orientierung direkt bestimmt werden. Dieses macht die Bestimmung der Passpunkte prinzipiell überflüssig. In der Praxis empfiehlt sich jedoch, die GPS- und IMU- Informationen nur zur Unterstützung der Aerotriangulation zu verwenden. Dieses Verfahren heißt dann auch GPS und IMU gestützte Aerotriangulation [Sandau, 2005; Kraus 2004].

Bei der Aerotriangulation ist heute die Bündelblockausgleichung, auch Bündelmethode genannt, das Standardverfahren. Im Folgenden wird dieses Verfahren näher erklärt.

2.3.1 Bündelblockausgleichung

Eine Voraussetzung der Anwendung des Verfahrens der Bündelblockausgleichung ist die Luftbildaufnahme eines Blockes mit mindestens 60% Längsüberdeckung und 20% Querüberdeckung. Bei erforderlicher höherer Genauigkeit kann auch eine Querüberdeckung von 60% verwendet werden. Die Beziehungen zwischen den Bildkoordinaten und den Objektkoordinaten können durch die Kollinearitätsgleichung ausgedrückt werden. Das heißt, dass der Objektpunkt, der Bildpunkt und das Projektionszentrum auf einer Gerade liegen (siehe **Abbildung 2.15**). Die Bildkoordinaten sind die Eingangsgrößen für die Berechnungen. Das Messbild ist somit eine Recheneinheit.

Mit der Kollinearitätsgleichung (2.5) kann also eine Transformation von Objektkoordinaten (X, Y, Z) in entsprechende Bildkoordinaten (x', y') bzw. von Bildkoordinaten in entsprechende Objektkoordinaten (wenn der Punkt in mindestens zwei Bildern liegt oder die Höhe bekannt ist) unter Kenntnis der Parameter der inneren Orientierung (x'_0, y'_0, c) und der Parameter der äußeren Orientierung $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$ eines Bildes durchgeführt werden.

$$x' = x'_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Kollinearitätsgleichung (2.5)

$$y' = y'_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

2 Theoretische Grundlagen

Die innere Orientierung beschreibt durch ihre drei Parameter x'_0 , y'_0 und c die Lage des Projektionszentrum im Bildkoordinatensystem, wobei x'_0 und y'_0 die Bildkoordinaten des Bildhauptpunkt und c die Kamerakonstante darstellen. Die Größen r_{nm} sind die Koeffizienten der Rotationsmatrix. Die Rotationsmatrix enthält die drei Rotationswinkel ω , ϕ und κ .

In **Abbildung 2.17** ist das Grundprinzip der Bündelblockausgleichung zu sehen. Dabei definieren die Bildkoordinaten und das dazugehörige Projektionszentrum ein räumliches Strahlenbündel. Die Strahlenbündel jeder Luftbildaufnahme werden durch Verschieben ihrer Projektionszentren in X-, Y- und Z-Richtung und durch Drehungen mit ω , ϕ , κ um die drei Achsen des Bildkoordinatensystems so verändert, dass sich homologe Strahlen aller Verknüpfungspunkte schließlich mit bester Näherung schneiden. Gleichzeitig dazu werden homologe Strahlen der Passpunkte bestmöglichst deren Objektkoordinaten angepasst. Verknüpfungspunkte sind Objektpunkte, die in mindestens zwei Aufnahmen identifizierbar sind. Durch die Verknüpfungspunkte werden die Luftbilder im und zwischen den Bildstreifen miteinander verknüpft.

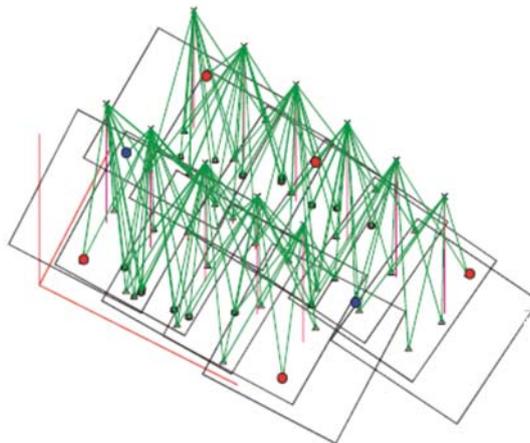


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung des Grundprinzips der Bündelblockausgleichung [Jacobsen, Vorlesungsskript]

Als Beobachtungen der Aerotriangulation müssen nach der Bündelmethode die Bildkoordinaten von Pass- und Verknüpfungspunkten, die Objektkoordinaten von Passpunkten und die innere Orientierung jedes Luftbildes zur Verfügung stehen. In der digitalen Photogrammetrie werden die Verknüpfungspunkte durch automatische Bildzuordnung bestimmt. Deshalb wird von einer automatischen Aerotriangulation (AAT) gesprochen. Die Messung der Bildkoordinaten der Passpunkte wird jedoch bei der AAT manuell bzw. halbautomatisch durchgeführt.

2 Theoretische Grundlagen

Die Ergebnis dieser Durchführung sind die Elemente der äußeren Orientierung aller beteiligten Messbilder und die Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte [Kraus, 2004; Hildebrandt, 1996].

2.3.2 Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parameter

Das mathematische Modell der Zentralperspektive, das durch die Kollinearitätsgleichung beschrieben wird, stellt eine gute Näherung, aber keine ausreichende Beschreibung der reell vorhandenen geometrischen Situation dar. Die Abweichungen zwischen dem mathematischen Modell der Zentralperspektive und der tatsächlichen Bildgeometrie werden als systematische Bildfehler bzw. Fehler in dem mathematischen Modell bezeichnet. Geometrische Bildfehler entstehen z.B. durch Temperatureinflüsse, durch Auswirkung der Optik auf die Sensor- bzw. Filmgeometrie und durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten zwischen den CCD-Flächensensor und dem Kamerakörper. Die systematischen Bildfehler können durch Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern bestimmt werden. Dieses Verfahren wird als Selbstkalibrierung mit zusätzlichen Parametern bezeichnet. Diese zusätzlichen Parameter sind reine mathematische Ansätze oder physikalisch begründet.

Das Hannoversche Programm der Bündelblockausgleichung (BLUH) von Herrn Dr.-Ing. Karsten Jacobsen ist durch einen eigenen Ansatz von zusätzlichen Parametern gekennzeichnet, der eine Kombination von physikalisch und mathematisch begründeten Parametern darstellt [Jacobsen, 2008a; Sandau, 2005].

2.3.3 Zusätzliche Parameter in BLUH

Da bei den neu entwickelten digitalen Flächenkameras (DMC und UltraCam) einige systematische Bildfehler mit den Standardparametern nicht erfasst werden konnten, wurde das Programmsystem BLUH um einige kameraspezifische zusätzliche Parameter zur Erfassung dieser Bildfehler erweitert. Im Folgenden werden die Standardparameter und die speziellen zusätzlichen Parameter näher in BLUH beschrieben.

2.3.3.1 Standardparameter in BLUH

Die Standardparameter des Programmsystems BLUH sind P1 bis P12 (siehe **Abbildung 2.18** auf der nächsten Seite). Der Parameter 1 beschreibt eine Scherung und der Parameter 2 eine

2 Theoretische Grundlagen

affine Deformation. Mit den Parametern 3 bis 6 sowie 12 werden allgemeine Deformationen erfasst. Mit den Parametern 7 und 8 wird eine tangentielle Verzeichnung kompensiert. Die tangentielle Verzeichnung wird durch Dezentrierung der Linsen im Objektiv verursacht. Parameter 9, 10, und 11 erfassen die radialsymmetrische Verzeichnung. Die radialsymmetrische Verzeichnung besitzt den größten Einfluss unter den oben beschriebenen systematischen Bildfehlern auf die Bildgeometrie. Sie entsteht durch Brechungsänderungen an den Linsen des Objektivs.

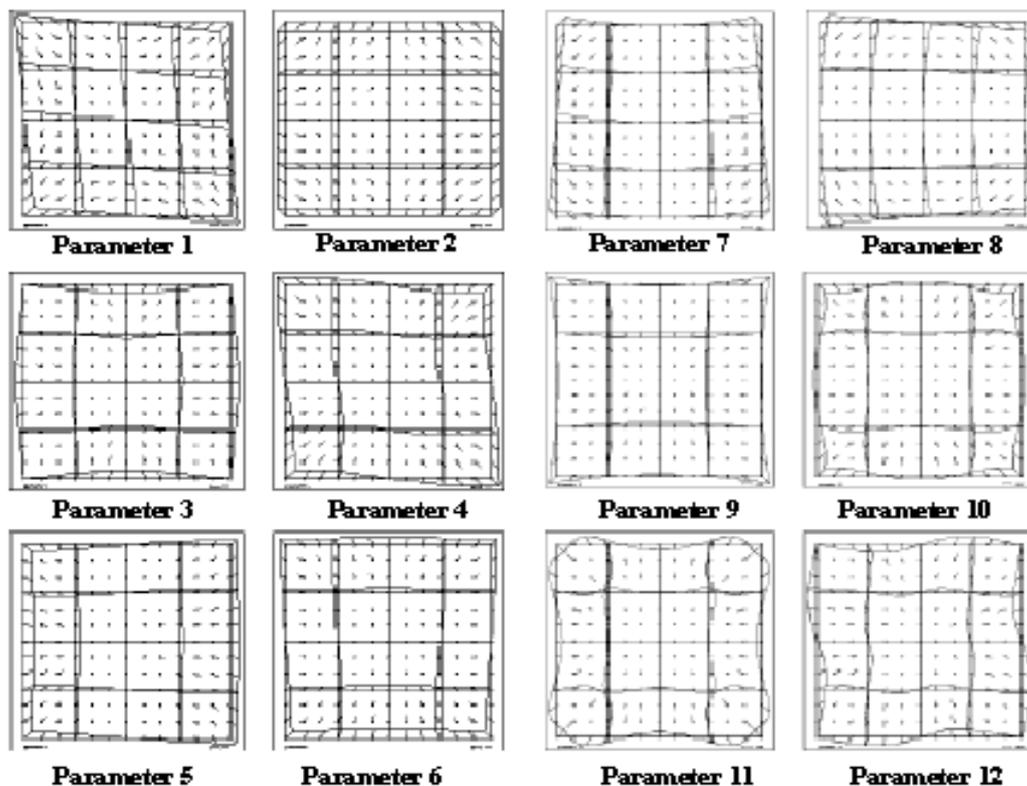


Abbildung 2.18: Darstellung des Einflusses der einzelnen Standardparameter des Programmsystems BLUH [Jacobsen, Vorlesungsskript]

2.3.3.2 Kameraspezifische Parameter in BLUH

Neben diesen Standardparametern besitzt BLUH für die neuen großformatigen, digitalen Luftbildkameras (DMC und UltraCam) spezielle zusätzliche Parameter.

Das virtuelle panchromatische Bild der UltraCam- und der DMC-Kameras besteht aus der Kombination von 9 bzw. 4 Teilbildern (siehe auch **Abschnitt 2.1.2.2.** und **Abschnitt 2.1.2.3**)

Da die UltraCamD und die UltraCamX sehr ähnliche Bild- und Teilbildformate aufweisen,

2 Theoretische Grundlagen

wird im BLUH für die UltraCam-Kameras der gleiche Ansatz zusätzlicher Parameter verwendet. Diese sind hier die Parameter 42 – 73. Sie beschreiben Verschiebungen in x- und y-Richtungen, Maßstabsänderungen und Rotationen der acht Teilbilder gegenüber dem zentralen Teilbild (siehe **Abbildung 2.19**). Das bedeutet, dass für jedes der acht Teilbilder, zwei Verschiebungen, eine Maßstabsänderung und eine Rotation zur Verfügung stehen. Daraus ergeben sich 32 Parameter.



Abbildung 2.19: Darstellung der 9 Teilbilder der UltraCam [Jacobsen, Vorlesungsskript]

Die zusätzlichen Parameter für die DMC sind die Parameter 30 – 41, 74 – 77 und 79 – 80. Mit den Parametern 30 bis 33 werden die Synchronisationsfehler der vier Teilkameras erfasst. Die Parameter 34 – 37 bzw. 38 – 41 berücksichtigen die Orientierungsfehler in Y- bzw. in X-Richtung. Die radialsymmetrische Verzeichnung der Teilkameras wird mit den Parametern 74 – 77 erfasst (siehe **Abbildung 2.20**).

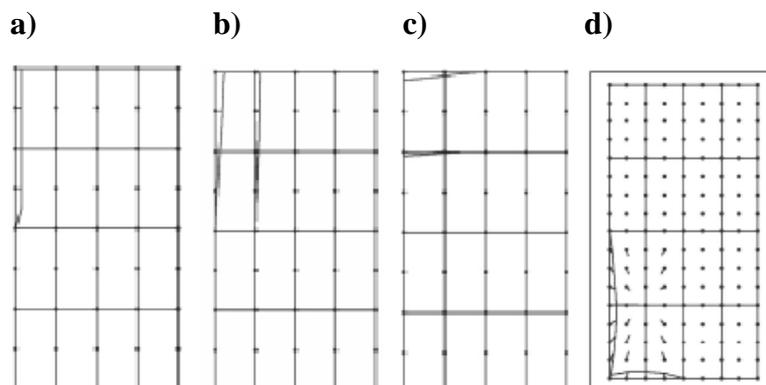


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung des Einflusses der zusätzlichen Parameter für die DMC; **a:** Parameter 32 ; **b:** Parameter 36; **c:** Parameter 40; **d:** Parameter 75 [Jacobsen, Vorlesungsskript]

2 Theoretische Grundlagen

Da sich die vier Teilkameras der DMC sehr ähnlich verhalten, konnten mit dem Parameter 79 gleiche Veränderungen der Kamerakonstanten für alle vier Teilkameras kompensiert werden. Zudem wird mit dem Parameter 80 die gleiche radialsymmetrische Verzeichnung für die vier Teilkameras erfasst (siehe **Abbildung 2.21**).

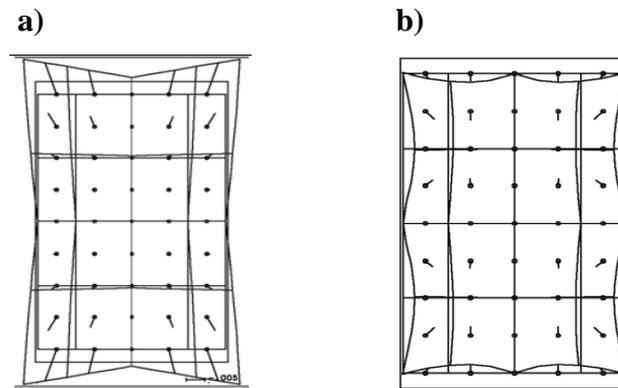


Abbildung 2.21: Schematische Darstellung des Einflusses der zusätzlichen Parameter der DMC; **a:** Parameter 79; **b:** Parameter 80.

Um eine Überparameterisierung bei der Bündelblockausgleichung zu vermeiden, werden bei BLUH zuerst die oben beschriebenen zusätzlichen Parameter automatisch auf Erfordernis und Bestimmbarkeit überprüft. Dabei werden nicht erforderliche Parameter automatisch aus der Berechnung eliminiert [Jacobsen, 2007; Jacobsen 2008a]

2.4 Herstellung digitaler Orthophotos

Digitale Orthophotos (DOP) sind verzerrungsfreie, maßstabsgetreue Luftbilder. Sie besitzen die geometrischen Eigenschaften wie eine Karte. In einer Karte ist das Gelände senkrecht auf die horizontale Bezugsebene abgebildet. Im Gegensatz dazu stellt das Luftbild eine Zentralperspektive Abbildung dar. Bei der photogrammetrischen Aufnahme entstehen Luftbildverzerrungen durch Zentralprojektion sowie durch Höhenunterschiede im Gelände.

Digitale Orthophotos stellen einen Bestandteil eines ATKIS (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informations-System) dar. Sie werden mit Hilfe der Elemente der inneren und äußeren Orientierungen sowie anhand eines digitalen Geländemodells (DGM) hergestellt. Digitale Geländemodelle sind geocodierte Punkte, die in regelmäßigen quadratischen Gittern in Lage und Höhe angeordnet sind und die Geländeformen der Erdoberfläche beschreiben.

2 Theoretische Grundlagen

Die Herstellung digitaler Orthophotos erfolgt indirekt (siehe **Abbildung 2.22**). Für jedes Pixel des Orthophotos wird der entsprechende Grauwert aus dem Luftbild entnommen. Dabei wird zuerst für jedes Orthophotopixel (X, Y) die Z -Koordinate aus dem vorhandenen DGM interpoliert. Danach werden mit Hilfe der Kollinearitätsgleichung und der gegebenen inneren und äußeren Orientierung die zu den Koordinaten X, Y und Z gehörenden Bildkoordinaten berechnet. Anschließend wird anhand der berechneten Bildkoordinaten aus dem Digitalbild der passende Grauwert ermittelt. Da die berechneten Bildkoordinaten nicht genau in das Zentrum der Pixel des digitalen Bildes fallen, ist eine Grauwertinterpolation erforderlich. Abschließend wird der interpolierte Grauwert an der Position des Orthophotopixels abgespeichert [Kraus, 2004; Luhmann, 2003; Albertz, 2007; Heipke, 1996].

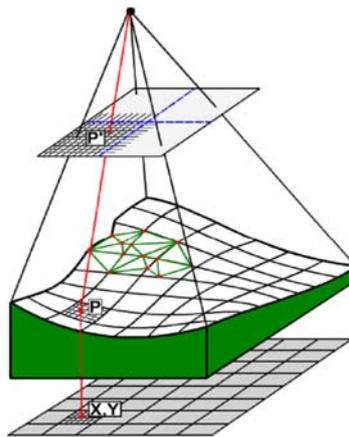


Abbildung 2.22: Schematische Darstellung des Prinzips der digitalen Orthophotoherstellung [Heipke, Vorlesungsskript]

Kapitel 3

Verwendete Datensätze

Für den Vergleich des Informationspotentials analoger und digitaler Luftbildkameras bzw. digitaler Luftbildkameras untereinander standen die Luftbilder des Testgebietes Franklin Mills in der Nähe von Philadelphia zur Verfügung. Das Testgebiet ist in der **Abbildung 3.1 b** rechts zu sehen. Das Testgebiet wurde mit einer analogen Reihenmesskamera RC30, sowie den digitalen Kameras DMC, UltraCamD und UltraCamX überflogen. Die Luftbilder wurden mit einer 60 %igen Längs- bzw. Querüberdeckung aufgenommen. In der **Abbildung 3.1 a** links ist die Blockkonfiguration der DMC-Aufnahmen zu sehen. Die Konfigurationen der UltraCam und der RC30 entsprechen der Blockkonfiguration der DMC. Mit der DMC wurden 72 Bilder, mit der UltraCam 66 Bilder und mit der RC30 35 Bilder aufgenommen. In dem Testgebiet befanden sich 42 signalisierte Passpunkte, die mit einer Standardabweichung von kleiner als 2 cm vorlagen.

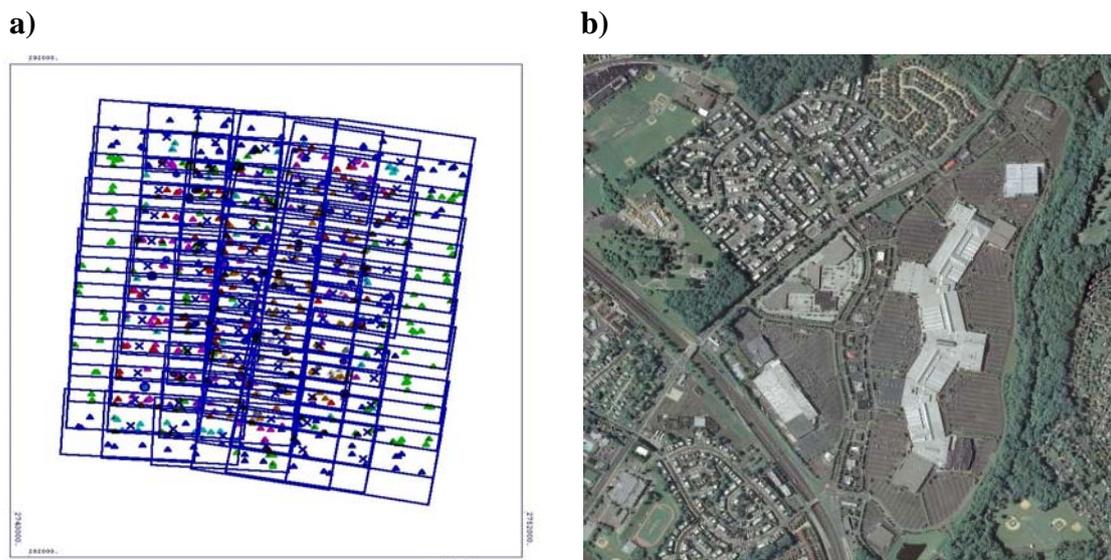


Abbildung 3.1: a: Darstellung der Blockkonfiguration der DMC im Testgebiet Franklin Mills; b: Darstellung des Testgebietes

3 Verwendete Datensätze

In der **Tabelle 3.1** sind die technischen Daten der verwendeten Kameras dargestellt. Um die RC30-Luftbilder in eine digitale Form umzuwandeln, wurden sie mit einer Pixelgröße von $12,5\mu\text{m}$ gescannt. Somit beträgt die Anzahl der Pixel eines RC30-Luftbilds ($230\text{mm} \times 230\text{mm}$)/ $12,5\mu\text{m} = 18.400 \times 18.400$ Pixel.

Kamera	Pixelgröße [μm]	Kamerakonstante [mm]	Bildgröße [Pixel]
DMC	12,0	120,0	7680×13824
UltraCamD	9,0	105,2	7500×11500
UltraCamX	7,2	100,5	9420×14430
RC30	12,5	151,3	18400×18400

Tabelle 3.1: Technische Daten der verwendeten Kameras [Jacobsen, 2008a]

Um einen genaueren Vergleich der Bildinformationen analoger bzw. digitaler Luftbilder zu erzielen, wären Zeitgleiche Aufnahmen wünschenswert gewesen. Dieses konnte jedoch nicht realisiert werden. Die Luftbilder des Testgebietes Franklin Mills wurden in verschiedenen Jahren bzw. zu verschiedenen Jahreszeiten aufgenommen. Die DMC-Luftbilder wurden im Juli 2007, die UltraCamD-Luftbilder im Februar 2006 und die RGB RC30-Luftbilder im September 2007 aufgenommen. Die Aufnahme der RGB UltraCamX-Bilder wurde im April 2007 durchgeführt und die der panchromatischen UltraCamX-Bilder erfolgte im Februar 2007. Die Sonnenhöhe zur Zeit der Aufnahmen betrug bei den DMC- 43° , bei den RC30- 46° und bei den UltraCam-Aufnahmen 27° . In diesem Zusammenhang wird hier bereits darauf hingewiesen, dass die Sonnenhöhe und somit auch die Helligkeit einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Untersuchungen haben. Je niedriger die Sonnenhöhe desto geringer die Bildqualität. Die Objektpixelgröße der Luftbilder des Testgebietes betrug bei den DMC- 54mm, bei den RC30- 49mm, bei den UltraCamD- 42mm und bei den UltraCamX-Aufnahmen 37mm. Somit besaßen die einzelnen Luftbilder ungefähr die gleiche Objektpixelgröße. Dieses ermöglichte einen direkten Vergleich der Informationen der digitalen und analogen Bilder miteinander (siehe **Tabelle 3.2** auf der nächsten Seite).

Bei einer Objektpixelgröße von 54mm ergibt sich bei der DMC einen Bildmaßstab von 1:4.500. Entsprechend ist der Bildmaßstab bei der UltraCamD 1:4.700, bei der UltraCamX 1:5.100 und bei der RC30 1:3.920 (siehe **Tabelle 3.3** auf der nächsten Seite). Der Bildmaßstab hat wegen unterschiedlicher Pixelgröße für digitale Luftbilder allerdings keine Bedeutung.

3 Verwendete Datensätze

Kamera	Bildtyp	Bildflug	Sonnenhöhe	Objektpixelgröße [mm]
DMC	Panchromatisch	Juli 2007	43°	54
UltraCamD	RGB	Februar 2006	27°	42
UltraCamX	RGB	April 2007	27°	37
UltraCamX	Panchromatisch	Februar 2007	27°	37
RC30	RGB	September 2007	46°	49

Tabelle 3.2: Bildflüge im Testgebiet Franklin Mills

Kamera	Objektpixelgröße [mm]	Maßstab	Flughöhe Über Grund [m]
DMC	54	1:4500	540
UltraCamD	42	1:4700	490
UltraCamX	37	1:5100	516
RC30	49	1:3920	590

Tabelle 3.3: Bildflüge im Testgebiet Franklin Mills

Kapitel 4

Radiometrischer und geometrischer Vergleich der Datensätze

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden die DMC-, UltraCamD-, UltraCamX- und RC30-Aufnahmen des Testgebietes Franklin Mills durch radiometrische und geometrische Untersuchungen miteinander verglichen. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Vergleiche dargestellt.

4.1 Radiometrischer Vergleich

Um die visuell unterschiedliche Bildqualität und die Nebeneinflüsse auf die geometrischen Auswertungen der DMC-, UltraCamD-, UltraCamX- und RC30- Bildsätze zu berücksichtigen, wurden diese durch eine Kantenbildanalyse untersucht. Hierfür wurden bei den verschiedenen Bildsätzen in der Bildmitte und am Bildrand mehrere Schwarzweißkanten (Schattengrenze) ausgewertet. Dabei ist die Weite der Punktverteilungsfunktion ein Maß für die Auflösung bzw. den Faktor der effektiven Pixelgröße (siehe **Abschnitt 2.2.2**). Je größer der berechnete Faktor, desto schlechter die Auflösung. Die Auswertung erfolgte mit dem Programm EDGE. In der **Abbildung 4.1** ist eine Kante im RC30-Bild, ihr entsprechendes Grauwertprofil und die Punktverteilungsfunktion dargestellt.

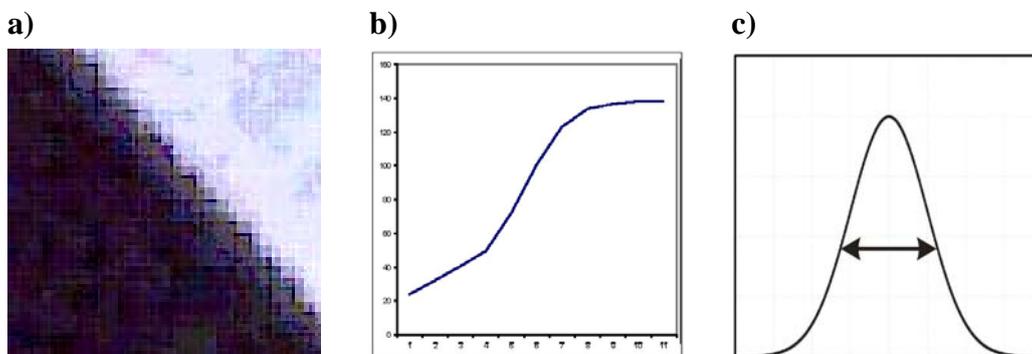


Abbildung 4.1: a: Kante im RC30-Bild; b: ihre Grauwertprofil; c: Punktverteilungsfunktion

4 Radiometrische und geometrischer Vergleich der Datensätze

In der **Tabelle 4.1** sind die Ergebnisse der Auswertung abgebildet. Aus der Tabelle geht hervor, dass die RC30-Bilder geringere effektive Auflösung als die digitalen Bilder lieferten. Der Faktor für die effektive Pixelgröße beträgt für die RC30-Bilder 1,43, bei der DMC ist der Faktor jedoch 0,92. Prinzipiell sollte dieser Wert nicht unter eins liegen. Jedoch sind alle Bilder kontrastverstärkt geliefert worden. Kontrastverstärkungen sind aus den Grauwertprofilen erkennbar. Durch Analyse der Grauwertprofile wurden festgestellt, dass alle untersuchten Bilder vergleichbare Kontrastverstärkungen aufwiesen. Die RGB-UltraCam Bilder besitzen eine geringere Auflösung als die panchromatischen UltraCam-Bilder. Darüber hinaus entspricht die Auflösung in den Bildecken der panchromatischen UltraCam-Bilder etwa der der RGB UltraCam-Bilder.

Kamera	Bildtyp	Faktor für effektive Pixelgröße	Effektive Pixelgröße [µm]	Effektives GSD [mm]
RC30	RGB	1,43	18	70
DMC	Panchromatisch	0,92	12	42
UltraCamX (Bildmitte)	Panchromatisch	1,03	7,4	38
UltraCamX (Bildecken)	Panchromatisch	1,24	8,9	46
UltraCamX	RGB	1,23	8,9	46
UltraCamD	RGB	1,16	10,4	49

Tabelle 4.1: Darstellung der Ergebnisse des radiometrischen Vergleichs

Die gescannten RC30-Bilder haben eine Pixelgröße von $12,5\mu\text{m}$. Daraus resultiert für ein RC30-Bild eine effektive Pixelgröße von $12,5\mu\text{m} \times 1,43 = 18\mu\text{m}$. Die Untersuchungen von Herrn Dr.-Ing. Karsten Jacobsen und die Ergebnisse der Diplomarbeit von Oswald (2007) zeigten einen um den Faktor 1,5 geringeren Informationsgehalt der gescannten Luftbilder. Das liegt daran, dass die Bildqualität analoger Luftbilder durch den Filmkorn und einen niedrigen Bildkontrast beeinflusst wird. Bei Berücksichtigung dieses Faktors ergibt sich eine effektive Pixelgröße für die RC30 von $18\mu\text{m} \times 1,5 = 27\mu\text{m}$. Somit besitzt ein analoges RC30-Bild etwa einen Informationsgehalt von 8520×8520 Pixel anstatt 18.400×18.400 Pixel.

4 Radiometrische und geometrischer Vergleich der Datensätze

Zwar weist ein RC30-Bild weniger Informationsgehalt auf als die DMC- und ein UltraCamX-Bild, es liegt aber auf dem Niveau eines Bildes der UltraCamD [Jacobsen, 2008a].

4.2 Geometrischer Vergleich

Für die Bündelblockausgleichung müssen die Bildkoordinaten von Pass- und Verknüpfungspunkten sowie die Objektbildkoordinaten der Passpunkte zur Verfügung stehen (siehe **Abschnitt 2.3.1**). Die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte wurden mit der Software LPS (engl; Leica **Photogrammetry Suite**) gemessen. Die Durchführung der Analyse der Bündelblockausgleichungen mit Selbstkalibrierung erfolgte mit dem Programm BLUH.

Um die Auswirkung nicht erfasster systematischer Bildfehler deutlicher anzeigen zu können bzw. um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die Bündelblockausgleichungen ohne Unterstützung von GPS- bzw. GPS- und IMU-Informationen durchgeführt. Dabei wurden zuerst Bündelblockausgleichungen mit 8, 15 und allen Passpunkten berechnet. Im Falle von 8 und 15 Passpunkten wurden die verbliebenen Passpunkte als unabhängige Vergleichpunkte verwendet. Dabei konnten nicht immer die gleichen Passpunkte gemessen werden, da einzelne Punkte durch parkende Autos verdeckt waren. Die Ergebnisse der Bündelblockausgleichungen mit 15 Passpunkten unterschieden sich nicht stark von den Ergebnissen mit 8 Passpunkten. Deshalb werden im Folgenden nur die Ergebnisse der Bündelblockausgleichungen mit 8 Passpunkten dargestellt.

4.2.1 DMC-Datensatz

In der **Tabelle 4.2** auf der nächsten Seite sind die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung mit 8 Passpunkten zu sehen. Dabei ist SX bzw. SY das Quadratmittel der Widersprüche an unabhängigen Vergleichspunkten der X- bzw. Y-Koordinaten. SZ stellt die Höhengenaugigkeit unabhängiger Vergleichspunkte dar. Der Parameter σ_0 stellt die ermittelte Standardabweichung der Gewichtseinheit dar. Wie aus der **Tabelle 4.2** hervorgeht, konnte durch die Selbstkalibrierung mit den Standardparametern 1 – 12 bzw. mit den kameraspezifischen Parametern nur eine geringere Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden. Der Hauptgrund für die geringere Verbesserung ist die begrenzte Blockgröße des Testgebiets Franklin Mills. Die besten Ergebnisse wurden mit den Standardparametern 1 – 12 und den gemeinsamen DMC-spezifischen Parameter 79 und 80 erzielt. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 liegt im Subpixelbereich von 3,51 – 3,48 μ m [Jacobsen 2008a]

4 Radiometrische und geometrischer Vergleich der Datensätze

DMC	SX [cm]	SY [cm]	SZ [cm]	σ_0 [μm]
ohne Selbstkalibrierung	2,5	1,8	3,4	3,51
Parameter 1 - 12	2,4	1,7	3,4	3,49
Parameter 1 - 12, 79 - 80	2,4	1,7	3,0	3,48
Parameter 1 - 12, 30 - 41, 74 - 77	2,5	1,8	3,4	3,48

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der DMC mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte

4.2.2 UltraCamD-Datensatz

In der **Tabelle 4.3** sind die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung für die acht Passpunkten dargestellt.

UltraCamD	SX [cm]	SY [cm]	SZ [cm]	σ_0 [μm]
ohne Selbstkalibrierung	4,3	3,0	8,3	4,32
Parameter 1 - 12	3,2	2,6	7,9	4,27
Parameter 1-12, 42-73	3,8	2,5	8,0	4,18

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der UltraCamD mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte

Die **Tabelle 4.3** zeigt, dass bei der UltraCamD die Selbstkalibrierung eine deutliche Genauigkeitssteigerung bringt. Mit den UltraCam-kameraspezifischen Parametern 42 – 73 konnten die Lagegenauigkeit der Y-Koordinaten und die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ_0 nur geringfügig verbessert werden. Im Gegensatz dazu verschlechterte sich die Lagegenauigkeit in Bezug auf die X-Koordinaten und in die Z-Koordinaten. Das bedeutet, dass die 32 zusätzlichen kameraspezifischen Parameter in diesem Datensatz nicht vorteilhaft sind. Die systematischen Bildfehler der UltraCamD sind im Vergleich mit den systematischen Bildfehlern der DMC deutlich größer (siehe **Abbildung 4.2** auf der nächsten Seite) [Jacobsen 2008a].

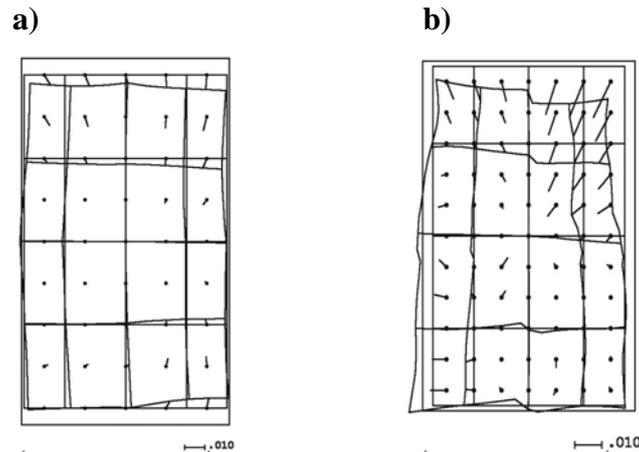


Abbildung 4.2: Einfluss zusätzlicher Parameter; **a:** DMC (Parameter 1 - 12, 79 und 80); **b:** UltraCamD (Parameter 1 - 12, 42 - 73); Vektormaßstab 10 μ m

4.2.3 UltraCamX-Datensatz

Die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung mit 8 Passpunkten der RGB bzw. der panchromatischen UltraCamX-Bilder sind in der **Tabellen 4.4** und **4.5** dargestellt.

UltraCamX (RGB)	SX [cm]	SY[cm]	SZ [cm]	σ_0 [μ m]
Ohne Selbstkalibrierung	4,3	3,0	8,3	3,06
Parameter 1 - 12	2,0	1,6	3,8	2,98
Parameter 1 - 12, 42 - 73	2,8	1,7	4,2	2,99

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der RGB UltraCamX-Bilder mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte

UltraCamX (panchromatisch)	SX [cm]	SY [cm]	SZ [cm]	σ_0 [μ m]
Ohne Selbstkalibrierung	2,8	1,9	8,7	2,98
Parameter 1 - 12	1,5	1,4	4,7	2,94
Parameter 1 - 12, 42 - 73	1,6	1,4	5,3	2,88

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der UltraCamX (panchromatisch) mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte

4 Radiometrische und geometrischer Vergleich der Datensätze

Entsprechend des UltraCamD-Datensatzes wurde hier ebenfalls eine deutliche Genauigkeitssteigerung durch die Selbstkalibrierung erzielt. Im Vergleich zu den RGB Bildern zeigen die Ergebnisse der panchromatischen Bilder eine bessere Lagegenauigkeit, im Gegensatz dazu besitzen sie jedoch eine schlechtere Höhengenaugigkeit. Die Verbesserung der Lagegenauigkeit ist zumindest auf die bessere Auflösung der panchromatischen Bilder zurückzuführen. Dadurch konnte die manuelle Messung der Bildkoordinaten von Pass- und die automatische Bestimmung der Verknüpfungspunkte verbessert werden. Die geringfügige Verschlechterung der Höhengenaugigkeit kann durch Sub-Pixel-Einflüsse der Teilbildzusammenfügung erklärt werden. In **Abbildung 4.3** sind die systematischen Bildfehler der UltraCamX-Bilder dargestellt [Jacobsen 2008a].

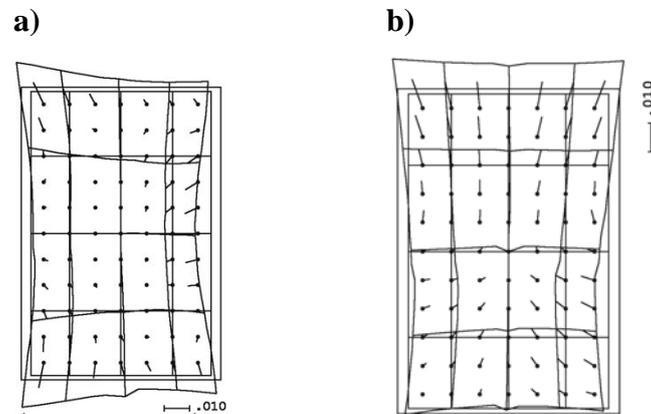


Abbildung 4.3: Einfluss der zusätzlichen Parameter der UltraCamX (1 - 12 und 42 - 73); **a:** RGB; **b:** Panchromatisch; Vektormaßstab 10 μ m

4.2.4 RC30-Datensatz

In der **Tabelle 4.6** sind die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung für die 8 Passpunkten dargestellt.

RC30	SX [cm]	SY [cm]	SZ [cm]	σ_0 [μ m]
Ohne Selbstkalibrierung	2,4	3,6	4,1	6,02
Parameter 1-12	2,6	3,7	4,5	5,94

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der RC30 mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte

4 Radiometrische und geometrischer Vergleich der Datensätze

Im Gegensatz zu den DMC- und den UltraCam-Aufnahmen konnte hier durch die Selbstkalibrierung mit den Standardparametern keine Verbesserung der Ausgleichung erzielt werden. Bei einem Wert der Standardabweichung der Gewichtseinheit von ungefähr $6\mu\text{m}$ sind die systematischen Bildfehler zu klein. Die Relation zwischen der Lage- und der Höhengenaugigkeit ist nicht weit von dem Höhen-Basis-Verhältnis (h / b) von 1,6 entfernt. In der **Abbildung 4.4** sind die systematischen Bildfehler der RC30 abgebildet. Im Vergleich mit den DMC- und den UltraCamX-Aufnahmen besitzen die Aufnahmen mit der RC30 schlechtere Lagegenauigkeiten, allerdings weist die DMC eine bessere Höhengenaugigkeit auf als die RC30 [Jacobsen 2008a].

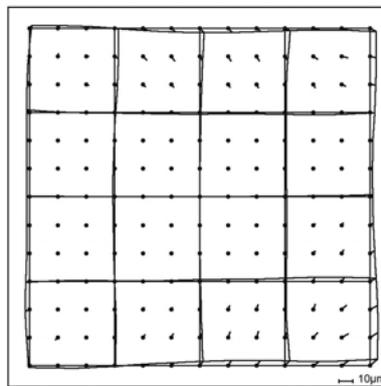


Abbildung 4.4: Systematische Bildfehler der RC30 Aufnahmen; Vektormaßstab $10\mu\text{m}$

Kapital 5

Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Die Verwendung von Orthophotos hat den Vorteil, ein verzerrungsfreies Abbild der Erdoberfläche mit den geometrischen Eigenschaften einer Karte aufzuweisen (siehe **Abschnitt 2.4**). Im Rahmen der Diplomarbeit wurden Orthophotos mit der Software LPS erstellt. Die notwendigen inneren und äußeren Orientierungen und ein digitales Geländemodell, die für die Erzeugung der Orthophotos erforderlich sind, waren vorhanden. In **Abbildung 5.1 a** ist ein digitales Geländemodell für das Testgebiet Franklin Mills als Grauwertbild zu sehen. Das digitale Geländemodell wurde mit einem regelmäßigen 4m Raster erzeugt. Im Grauwertbild sind die Höhenwerte in Form von Grauwerten (0 – 255) dargestellt. Je heller der Grauwert an einer Stelle, desto höher ist das Gebiet. Nach der Erstellung der Orthophotos im Testgebiet wurden zwei Wohnblöcke für die nähere Untersuchung ausgewählt. Die Lage der zwei ausgesuchten Wohnblöcke ist in **Abbildung 5.1 b** in rot gekennzeichnet.

a)



b)

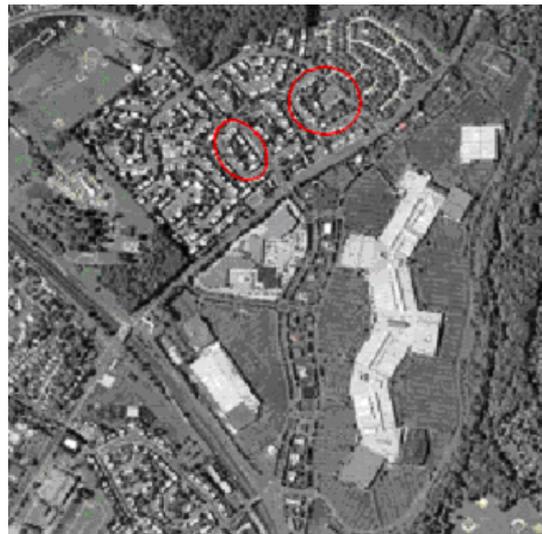


Abbildung 5.1: **a:** Darstellung des digitalen Geländemodells; **b:** Darstellung der Lage der ausgesuchten Wohnblöcke

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Zuerst wurden Orthophotos mit originaler Objektpixelgröße erstellt. Um zu zeigen, wie sich die untersuchten Bilddaten bei Vergrößerung der Objektpixelgröße verhalten bzw. bis zu welcher Objektpixelgröße kleinere Gegenstände wie z.B. Laternen bzw. Strommasten, Kontrollschächte und Abflüsse noch eindeutig identifiziert werden können, wurden außerdem Orthophotos mit 10cm und 20cm Objektpixelgröße erstellt.

Die Auswertung und der manuelle Vergleich der Bildinformationen wurden mit der Software ArcView GIS 3.2a von ESRI (engl; Environmental Systems Research Institute) durchgeführt. Die erkennbaren künstlichen und natürlichen Gegenstände im ausgewähltem Bereich des Testgebietes (wie z.B. Dachflächen, Straßen, Hauseinfahrten bzw. Fußwege, Grünflächen, Bäume, Hecken bzw. Sträucher, Swimmingpools, Balkone, Terrassen, Dachvorsprünge, Gewächshäuser, Sitzflächen, Bodenflächen, Zäune bzw. Mauern, Abflüsse, Kontrollschächte und Laternen bzw. Strommasten) wurden in separaten Shape-Dateien (shp-Datei) klassifiziert. Eine shp-Datei dient zur Speicherung der Geometrie- und Semantikdaten. Bei der Auswertung wurde allgemein die Digitalisierung der Gebäude anhand der Abgrenzung der Dachflächen vorgenommen. Objekte bzw. Flächen, für die die Bildinformationen keine eindeutigen Zuweisungen zuließen, wurden nicht klassifiziert und als nicht identifizierbare Fläche dargestellt. Die Bildflächen, die im Schattenbereich lagen, wurden mit der Software ERDAS Imaging in verschiedenen Kontrast- und Helligkeitsstufen erstellt. In **Abbildung 5.2** ist die Legende, die für die Auswertung der zwei Wohnblöcke verwendet wurde, dargestellt.



Abbildung 5.2: Legende für die Auswertung

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Im Folgenden werden zuerst die Ergebnisse der Auswertungen mit originaler Objektpixelgröße dargestellt. Für eine bessere Analyse der Schattenbereiche, wurden die Orthophotos nachträglich mit einem Wallis-Filter bearbeitet. Danach werden die Auswertungsergebnisse mit einer Objektpixelgröße von 10cm bzw.20cm präsentiert.

5.1 Auswertung der vorhandenen Datensätze bei originaler Auflösung

Wie in **Abschnitt 2.2** bzw. **Abschnitt 4.1** beschrieben, besitzen analoge Bilder aufgrund von Filmkörnigkeit und niedrigem Bildkontrast im Vergleich zu den digital aufgenommenen Bildern eine schlechtere Bildqualität bzw. Auflösung. Aus diesem Grund wurde zuerst der analoge RC30-Datensatz mit einer nominellen Objektpixelgröße von 49mm und einer effektiven von 70mm ausgewertet. Danach erfolgte die Auswertung der digital aufgenommenen Luftbilder. Dabei wurden zuerst der panchromatische DMC-Datensatz bei einer nominellen und effektiven Objektpixelgröße von 54mm, der RGB UltraCamX-Datensatz bei einer nominellen Objektpixelgröße von 37mm und einer effektiven von 46mm, der panchromatische UltraCamX-Datensatz bei einer nominellen Objektpixelgröße von 37mm und einer effektiven von 38mm bis 46mm ausgewertet. Anschließend wurde der RGB UltraCamD-Datensatz bei einer nominellen Objektpixelgröße von 42mm und einer effektiven von 49mm analysiert (siehe **Tabelle 5.1**).

Kamera	Bildtyp	Sonnenhöhe	Nominelle Objektpixelgröße [mm]	Effektives GSD [mm]
RC30	RGB	46°	49	70
DMC	Panchromatisch	43°	54	54
UltraCam X	RGB	27°	37	46
UltraCam X	Panchromatisch	27°	37	38 - 46
UltraCam D	RGB	27°	42	49

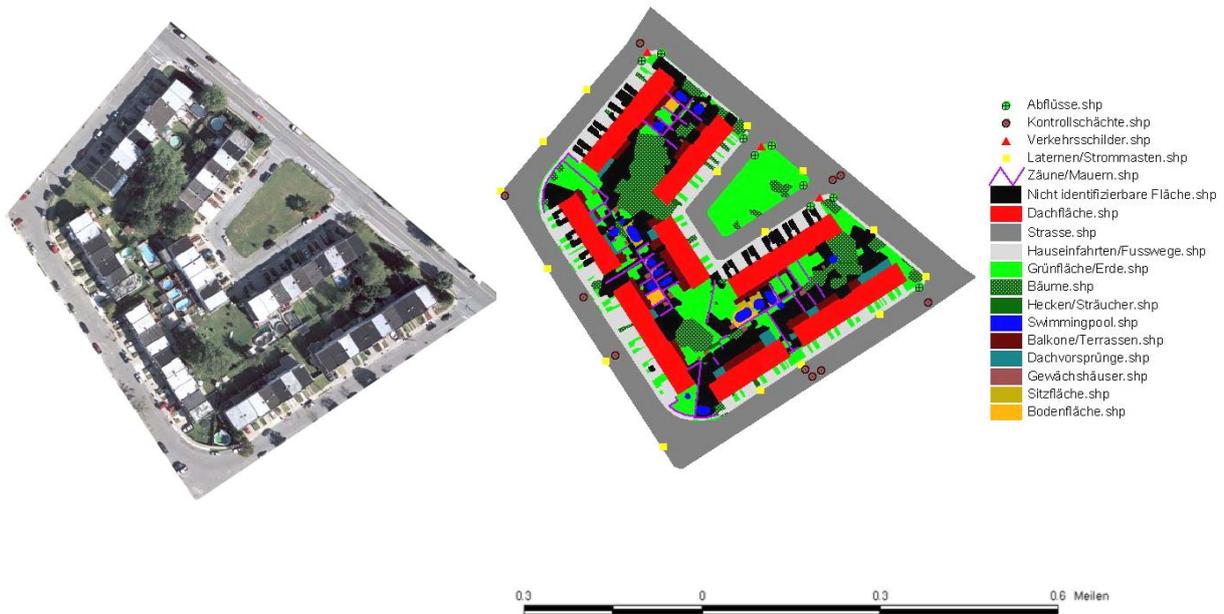
Tabelle 5.1: Reihendarstellung der ausgewerteten Datensätze

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

5.1.1 Auswertung des RC30-Datensatzes

Die beiden ausgewählten Wohnblöcke und die entsprechenden Klassifizierungen sind in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen.

a)



b)

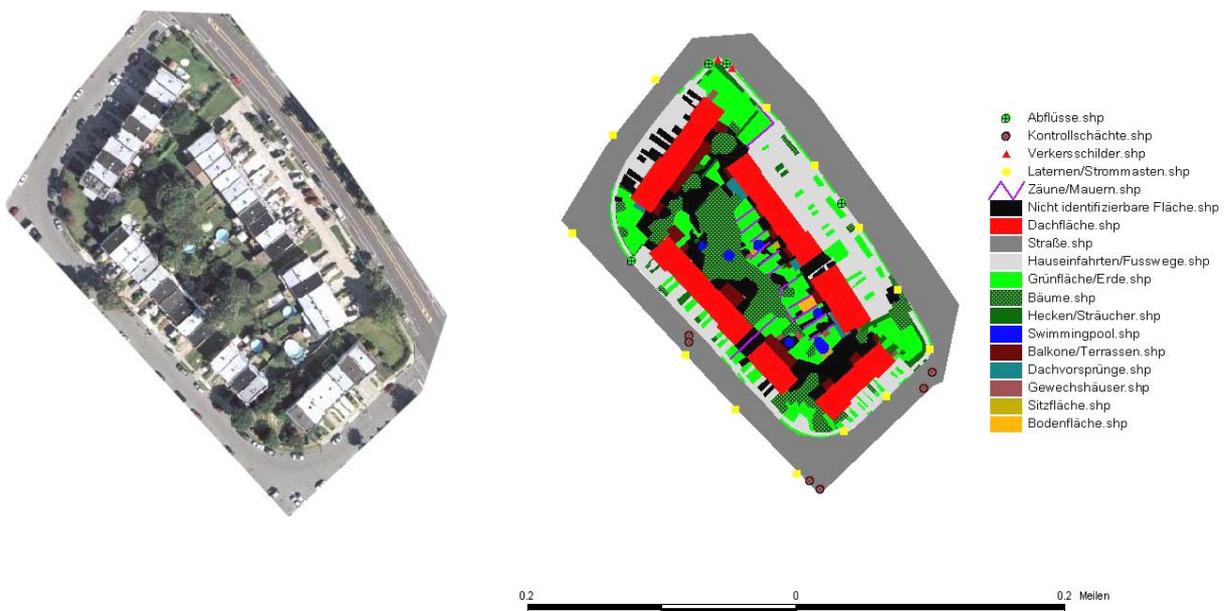


Abbildung 5.3: a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks mit den entsprechenden Klassifizierungen für die RC30; nominelle Objektpixelgröße: 49mm

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Bei den erzeugten Orthophotos handelte es sich um hochaufgelöste Bilder. Neben der Erkennung und der eindeutigen Identifizierung größerer Objekte wie Dachflächen, Straßen, Grünflächen, Bäume und Swimmingpools, konnten bei näherer Betrachtung kleinere Objekte in ihrer Form erkannt und klassifiziert werden. So waren auf den Dachflächen der Gebäude Antennen und Schornsteine zu sehen. Die Straßenmarkierungen (Pfeile, Fahrradwege, Bushaltemarkierungen und Fahrbahnbegrenzungen) waren deutlich erkennbar. Autos, Laternen bzw. Strommasten, Verkehrsschilder, Abflüsse am Straßenrand, Kontrollschächte und Mauern bzw. Zäune wurden ebenfalls in ihrer Form identifiziert. In **Abbildung 5.4** sind einige Objekte der RC30-Bilder zu sehen.

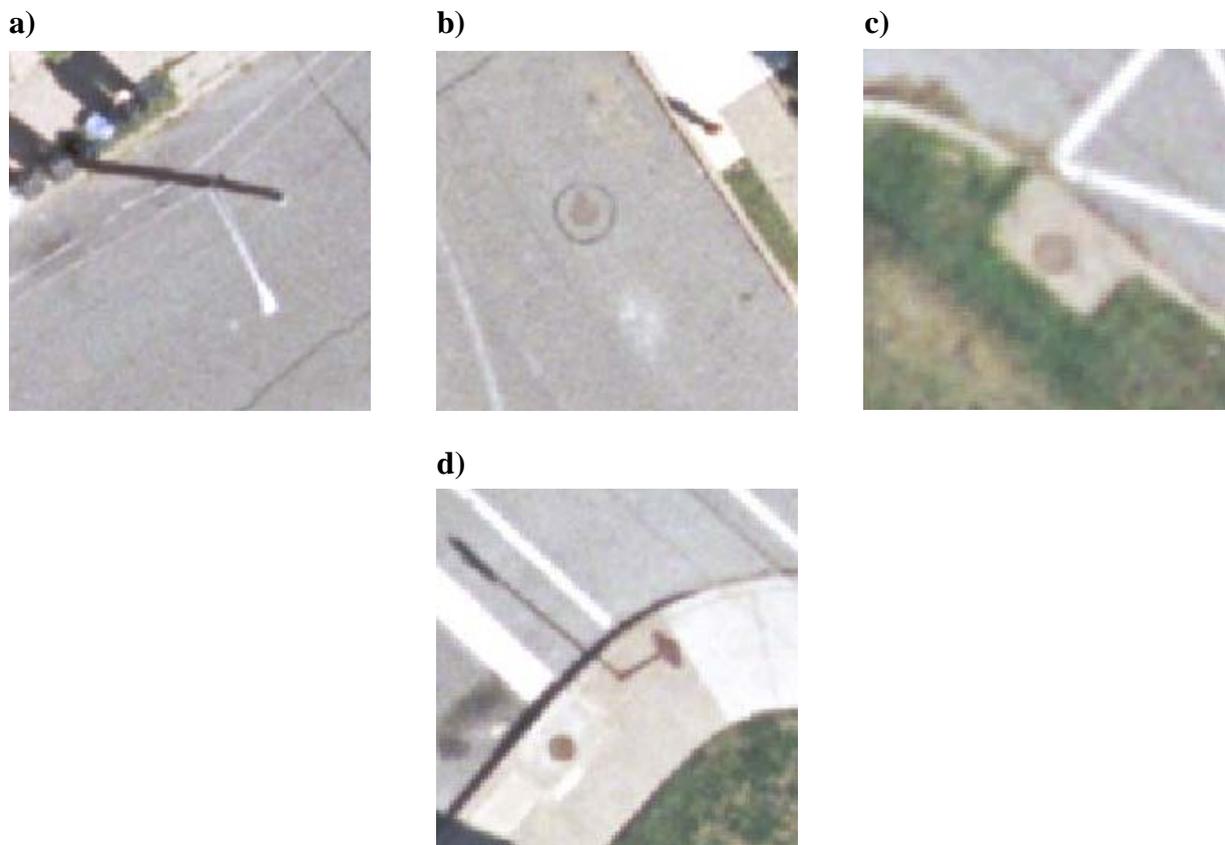


Abbildung 5.4: erkennbare Objektdetails **a:** Laterne bzw. Strommasts; **b:** Kontrollschacht; **c:** Abfluss am Straßenrand; **d:** Verkehrsschildes

Verkehrsschilder konnten entweder direkt erkannt oder aufgrund ihres Schattenwurfs identifiziert werden. Das bedeutet, dass die Identifizierung von Verkehrsschildern von der Aufnahme­richtung der Bilder abhängig ist. Stromleitungen waren an einigen Stellen des Bildaus-

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

schnitts wie z.B. über Bäumen bzw. im Schattenbereich nur schwer erkennbar (siehe **Abbildung 5.5**)



Abbildung 5.5: Abbildung einer Stromleitung in einer RC30-Aufnahme

Trotz der Erkennbarkeit von kleinen Details im Bild wie z.B. Laternen bzw. Strommasten, Kontrollschächten und Verkehrsschildern, traten mehrere Probleme bei der Auswertung der zwei ausgewählten Wohnblöcke auf. Der erste Punkt war der trotz Kontrastverstärkung schwache Kontrast. Die einzelnen Objekte waren unscharf voneinander getrennt. Bei dem zweiten Punkt handelte es sich um den Schattenbereich, der im analysierten Bildbereich groß war. Der Schattenbereich wurde durch Gebäude und Bäume verursacht. Trotz Änderung von Kontrast- und Helligkeit mit der Software ERDAS Imaging, konnten keine zusätzlichen Bildinformationen erkannt werden. Darüber hinaus war der Filmkorn bzw. das Rauschen im Schattenbereich besonders deutlich ausgeprägt. Dieser war bereits bei geringeren Vergrößerungen des Bildausschnittes deutlich zu sehen. Dadurch wurde die Auswertung im Schattenbereich zusätzlich erschwert. Dennoch konnten im Schattenbereich Objekte wie z.B. Balkone, Dachvorsprünge und Swimmingpools klassifiziert werden (siehe **Abbildung 5.6** auf der nächsten Seite). Zudem waren auch einige Zäune und Mauern sichtbar. Die Unterscheidung zwischen verschiedenen Vegetationsflächen war im Schattenbereich nicht immer eindeutig erkennbar. Deshalb wurden diese Flächen als nicht identifizierbare Flächen eingestuft.



Abbildung 5.6: a bzw. b: Darstellung eines Bildausschnittes im Schattenbereich

In der **Tabelle 5.2** sind die statischen Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke aufgeführt. Die nicht identifizierbare Fläche im ersten Wohnblock beträgt 11 % und in dem zweiten Wohnblock 8,3 %. Die Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung der identifizierten Bereiche ist im ersten Wohnblock 35.392m und im zweiten Block 24.520m. Die meisten nicht identifizierbaren Flächen liegen im Schattenbereich.

RC30	Nicht identifizierbare Fläche im Wohnblock [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
Erstes Wohnblock	11,0	35.392
Zweites Wohnblock	8,3	24.520

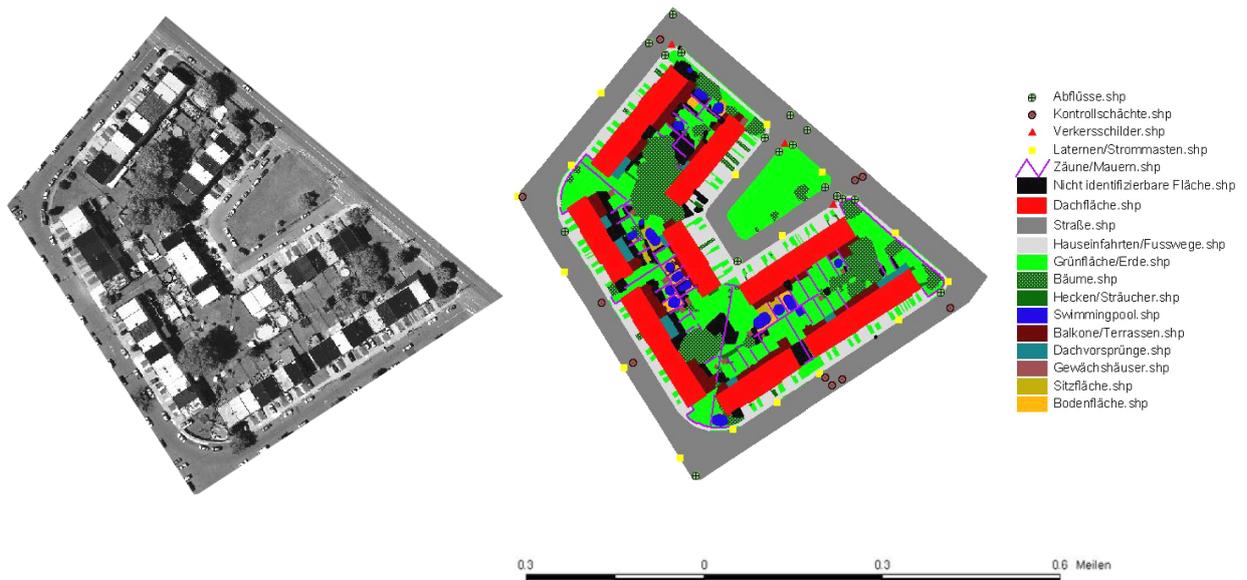
Tabelle 5.2: Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der RC30-Aufnahmen

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

5.1.2 Auswertung des panchromatischen DMC-Datensatzes

Die beiden ausgewählten Wohnblöcke und die entsprechenden Klassifizierungen sind in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen.

a)



b)

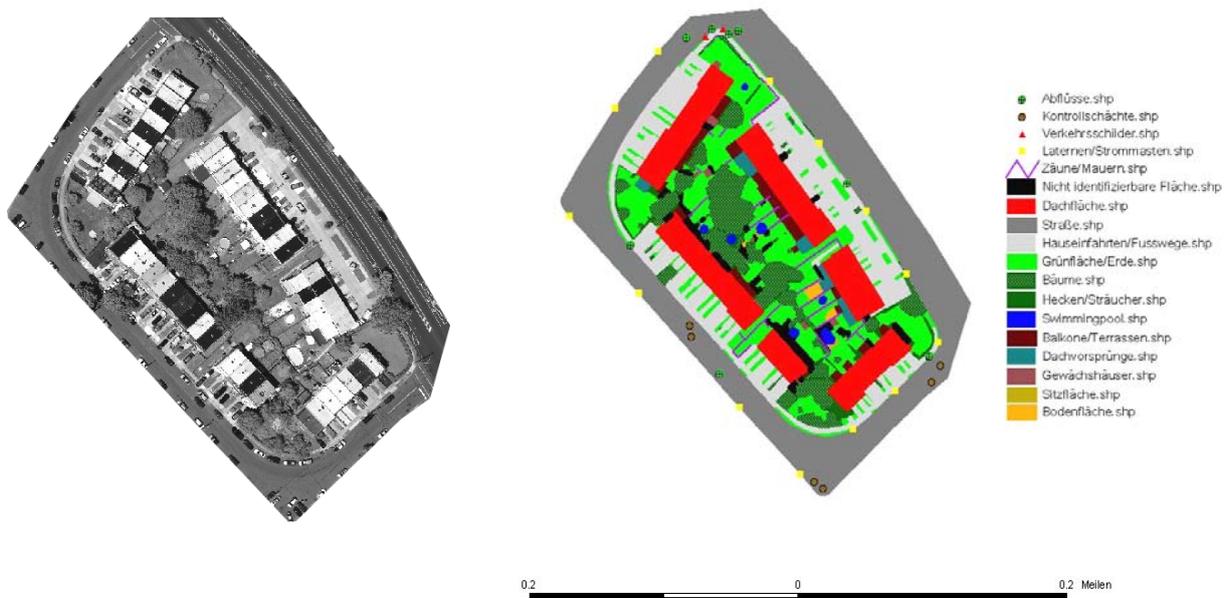


Abbildung 5.7: a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen der DMC; Objektpixelgröße: 54mm

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Bei dem DMC-Datensatz konnten ebenfalls kleinere Objekte wie Laternen bzw. Strommasten, Kontrollschächte, Abflüsse am Straßenrand, und Verkehrsschilder erkannt werden. Einige Verkehrsschilder wurden nur durch ihren Schattenwurf identifiziert. (siehe **Abbildung 5.8**).

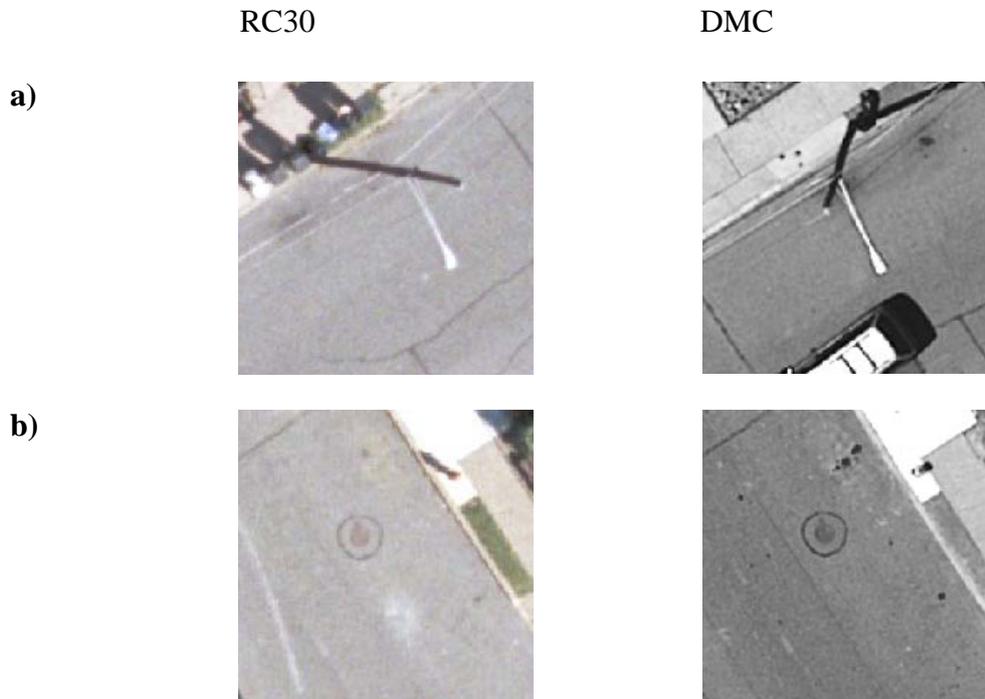


Abbildung 5.8: Vergleich der RC30- und DMC-Bilder; **a:** Laterne bzw. Strommast; **b:** Kontrollschacht

Im Gegensatz zu der analogen RC30-Kamera konnten zusätzlich zu den Abflüsse am Straßenrand einige Abflüsse auf der Straße klar identifiziert werden (siehe **Abbildung 5.9**).

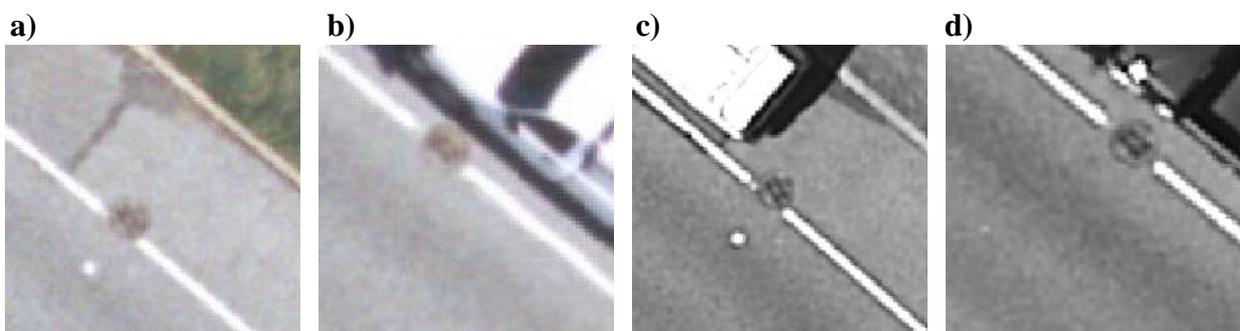


Abbildung 5.9: Vergleich der Abflüsse auf der Straße; **a** und **b:** RC30; **c** und **d:** DMC

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Jedoch war die Erkennbarkeit und Identifizierung von den kleinen Abflüssen mit ihrer Gitterstruktur auf der Straße sehr schwierig. Aus diesem Grund mussten nähere Beobachtungen sowie Vergrößerungen des Bildausschnittes durchgeführt werden. Stromleitungen konnten nur in einigen bestimmten Bildausschnitten über Bäumen bzw. im Schattenbereich gesehen werden (siehe **Abbildung 5.10**).

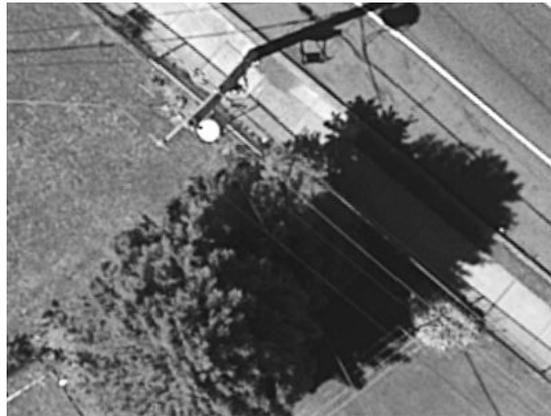


Abbildung 5.10: Darstellung der Stromleitungen bei der DMC

a)



b)

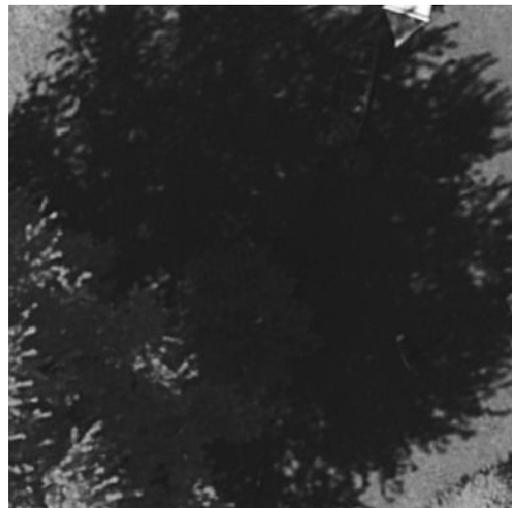


Abbildung 5.11: a bzw. b: Schattenbereich einer DMC-Aufnahme

Da sowohl die nominelle Objektpixelgröße als auch die Sonnenhöhe bei dem DMC- und dem analogen RC30-Datensatz ungefähr gleich waren, konnten beide ohne Einschränkungen miteinander verglichen werden. Der DMC-Datensatz wies eine viel höhere Bildqualität und einen stärkeren Bildkontrast als der analoge RC30-Datensatz auf. Alle Bildinformationen waren

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

schärfer abgebildet. Zudem wurde durch das Wegfallen der Filmkörnigkeit die Auswertung stark vereinfacht. Das einzige Problem bei der Auswertung dieses Datensatzes war der Schattenbereich. Alle nicht identifizierbaren Flächen lagen im Schattenbereich. An manchen Stellen des Bildausschnittes herrschte Dunkelschatten (siehe **Abbildung 5.11**) vor. Nach Änderung der Helligkeit und des Kontrastes konnten an manchen Stellen des Bildausschnittes einige Bilddetails deutlicher erkannt werden (siehe **Abbildung 5.12**). Prinzipiell kann für die verbesserte Erkennbarkeit von Bilddaten im Schattenbereich auch der Wallis-Filter verwendet werden (siehe **Abschnitt 5.1.7**).

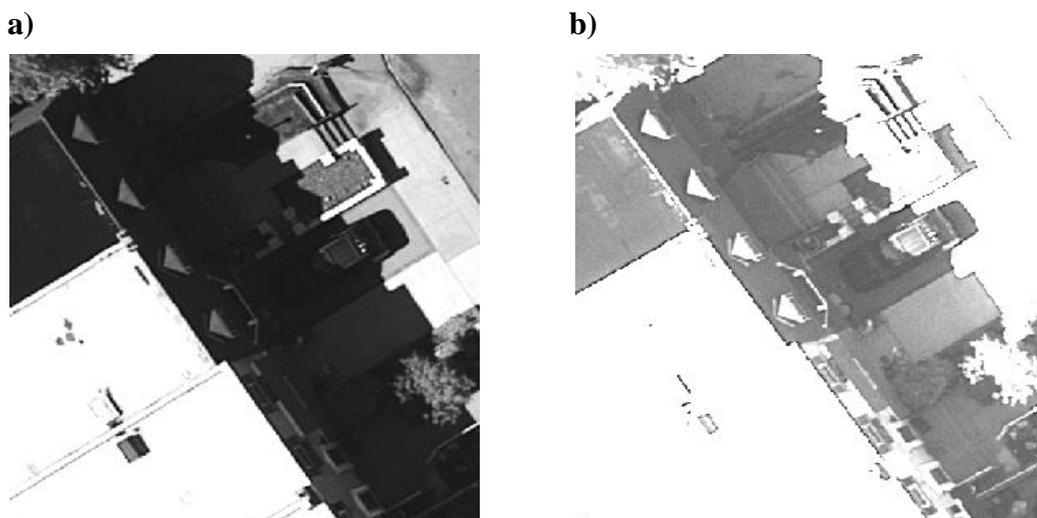


Abbildung 5.12: **a:** Bildausschnitt im Schattenbereich; **b:** Bildausschnitt nach Änderung der Helligkeit und des Kontrastes

In der **Tabelle 5.3** bzw. **Tabelle 5.4** auf der nächsten Seite sind die statistischen Daten der Auswertung nach Änderung bzw. ohne Änderung der Helligkeit und des Kontrastes dargestellt.

DMC	Nicht identifizierbare Fläche im Wohnblock [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
Erster Wohnblock	3,5	42.454
Zweiter Wohnblock	1,6	31.019

Tabelle 5.3: Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der DMC-Aufnahmen (nach Änderung der Helligkeit und des Kontrastes)

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

DMC	Nicht identifizierbare Fläche im Wohnblock [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
Erster Wohnblock	4,1	41.761
Zweiter Wohnblock	1,9	30.854

Tabelle 5.4: Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der DMC-Aufnahmen (ohne Änderung der Helligkeit und des Kontrastes)

Wie aus den beiden oben dargestellten Tabellen hervorgeht, konnten durch Änderung der Helligkeit und des Kontrastes 0,6 % (erster Wohnblock) bzw. 0,3 % (zweiter Wohnblock) Fläche mehr identifiziert werden.

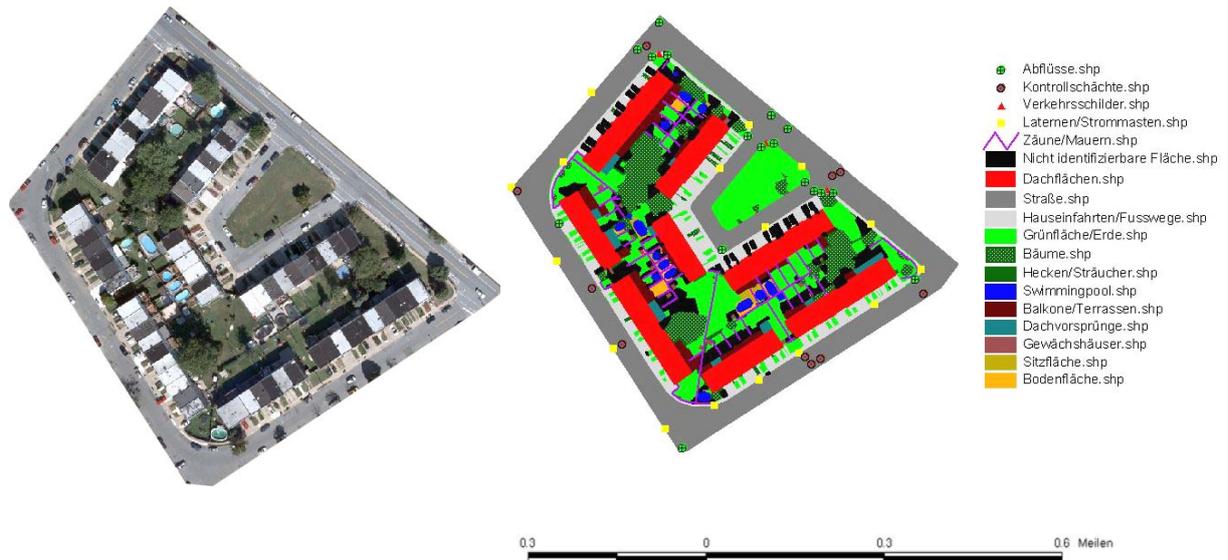
Im Vergleich mit dem RC30-Datensatz wurde die nicht identifizierbare Fläche der beiden Wohnblöcke im Quadratmittel des ersten und des zweiten Wohnblocks ungefähr um den Faktor vier verringert. Zudem ist die Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung größer.

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

5.1.3 Auswertung des RGB UltraCamX-Datensatzes

Die beiden ausgewählten Wohnblöcke und die entsprechenden Klassifizierungen sind in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen.

a)



b)

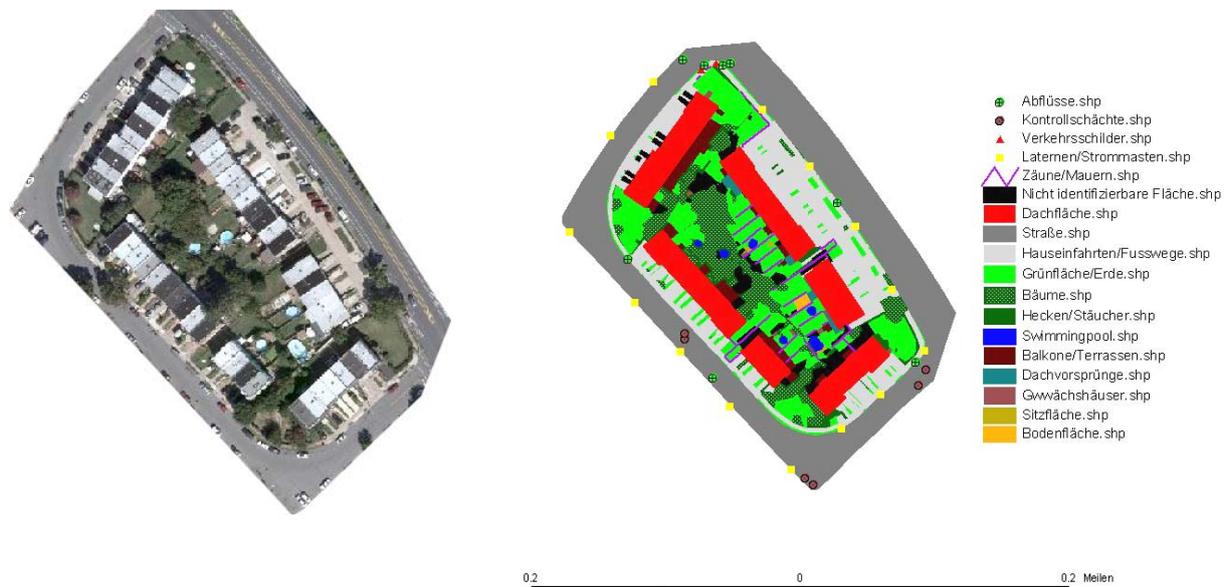


Abbildung 5.13: a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen aus RGB UltraCamX-Aufnahmen; nominelle Objektpixelgröße 37mm

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Wie aus den oben dargestellten Abbildungen hervorgeht, konnten bei diesem Datensatz ebenfalls Laternen bzw. Strommasten, Kontrollschächte, Verkehrsschilder sowie Abflüsse am Straßenrand bzw. auf der Straße identifiziert werden (siehe **Abbildung 5.14**). Abflüsse auf der Straße waren teilweise deutlicher dargestellt als bei dem DMC-Datensatz. Der Grund könnte eine bei der UltraCamX im Vergleich mit der DMC kleinere Objektpixelgröße sein. Entsprechend des RC30- sowie des DMC-Datensatzes konnten Stromleitungen nur über Bäumen bzw. im Schattenbereich identifiziert werden.

RC30



UltraCamX



Abbildung 5.14: Vergleich der RC30 und der RGB UltraCamX Bilder; **a** und **d**: Laterne bzw. Strommast; **b** und **e**: Kontrollschacht; **c** und **f**: Abfluss auf der Straße

Auch hier stellt, wie bei allen bisher beschriebenen Datensätzen, der Schattenwurf die größte Problematik in der Auswertung dar. Im Gegensatz zu der DMC konnten hier durch Änderung der Helligkeit und des Kontrastes keine deutliche Verbesserung der Bilddaten erzielt werden. Das heißt, dass bei der RGB UltraCamX die Erkennbarkeit von Bildinformationen im Schattenbereich sehr stark von der schattigen Fläche wie von der Intensität des herrschenden Schattens abhängig ist. Allgemein gilt jedoch und wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit bestätigt, dass bei den digitalen Luftbildkameras aufgrund des besseren Bildkontrastes und des Weg-

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

fallens der Filmkörnigkeit im Schattenbereich mehr Bilddetails als bei dem analogen RC30-Datensatz identifiziert werden können. In **Abbildung 5.15** ist hierfür ein Beispiel dargestellt.

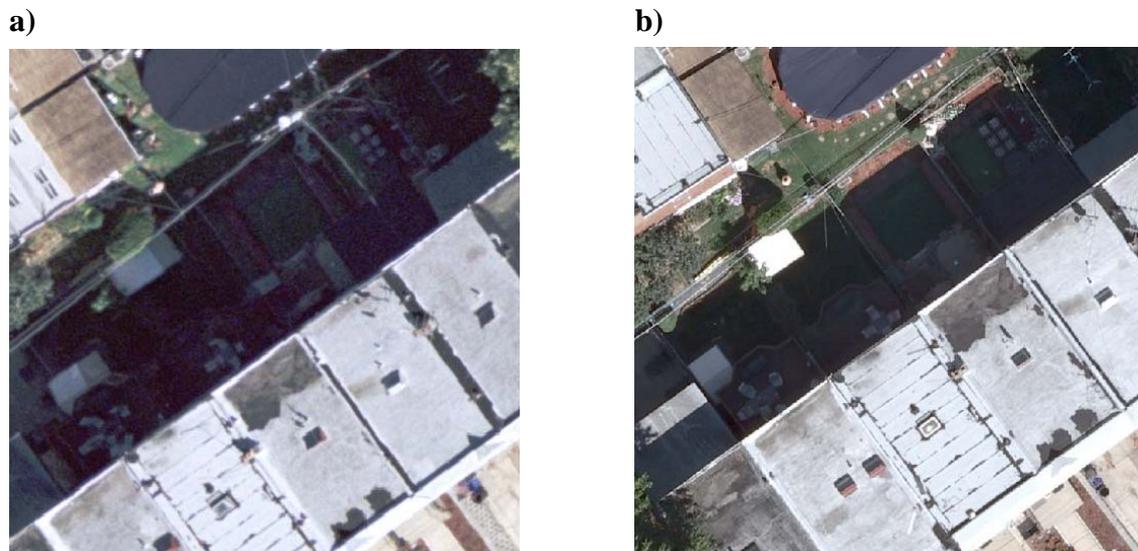


Abbildung 5.15: Vergleich des Schattenbereichs der RC30 und der UltraCamX; **a:** RC30; **b:** UltraCamX

Im Vergleich zu dem analogen RC30-Datensatz ist die nicht identifizierbare Fläche bei der UltraCamX deutlich geringer. Jedoch war mit den UltraCamX-Bilddaten weniger Fläche als bei der DMC identifizierbar. Die Differenz zu den DMC-Daten lag bei 2.5 % (erster Wohnblock) bzw. 2 % (zweiter Wohnblock). In der **Tabelle 5.5** sind die statistischen Daten der Auswertung dargestellt. Die nicht identifizierbaren Flächen lagen auch hier im Schattenbereich.

UltraCamX (RGB)	Nicht identifizierbare Fläche im Wohnblock [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
Erster Wohnblock	6	39.056
Zweiter Wohnblock	3,6	28.430

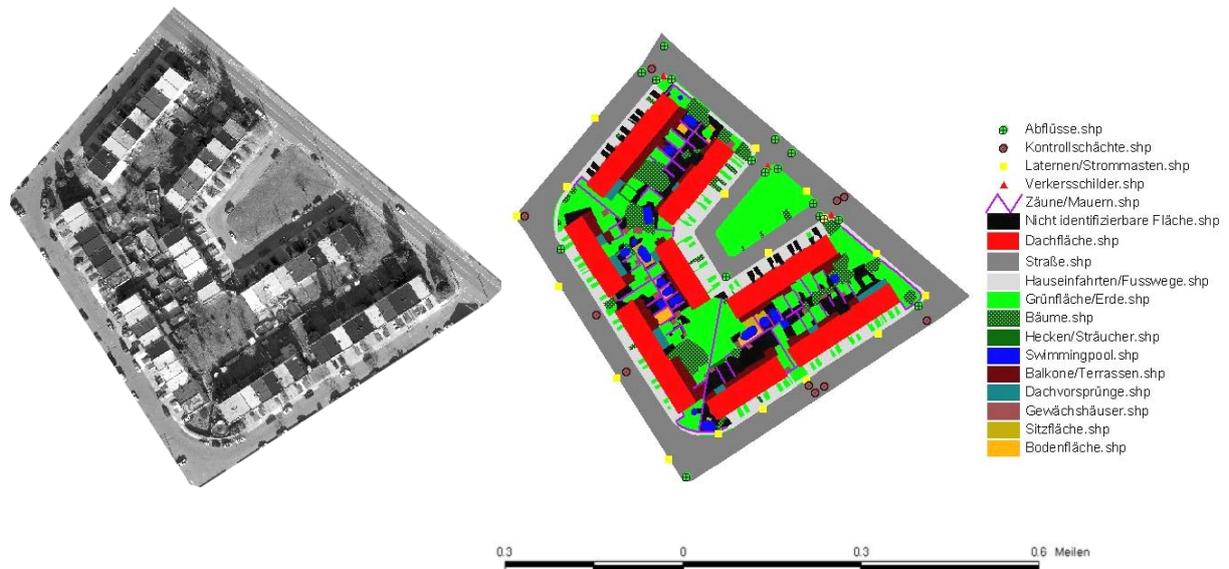
Tabelle 5.5: Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der RGB UltraCamX-Aufnahmen

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

5.1.4 Auswertung des panchromatischen UltraCamX-Datensatzes

Die beiden ausgewählten Wohnblöcke und die entsprechenden Klassifizierungen sind in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen.

a)



b)

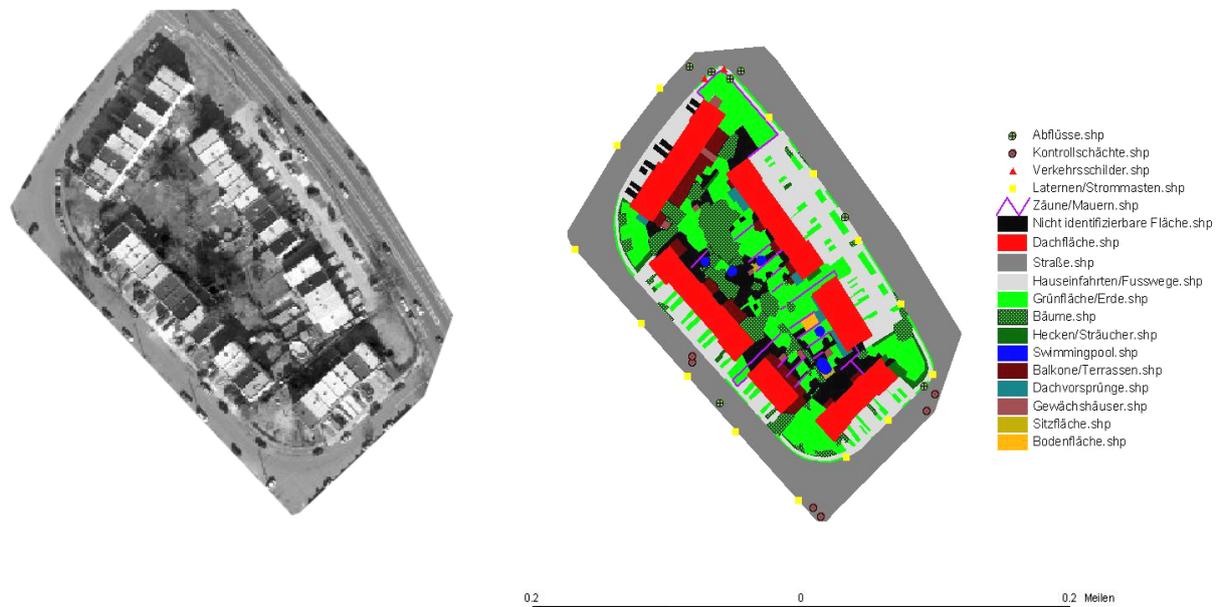


Abbildung 5.16: a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen mittels panchromatischer UltraCamX-Aufnahmen; nominelle Objektpixelgröße 37mm

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Die Auswertung dieses Datensatzes erfolgte, um die durch das Verfahren des „Pansharpening“ (siehe **Abschnitt 2.1.2.2**) erzeugten RGB-Bilddaten mit den panchromatischen Bildern zu vergleichen. In diesem Zusammenhang wird erneut darauf hingewiesen, dass die RGB bzw. die panchromatischen Bilder zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen wurden. In der **Abbildung 5.17** ist zum Vergleich eine Laterne, ein Kontrollschacht und ein Abfluss auf der Straße aus den RGB- bzw. den panchromatischen UltraCamX-Bildern abgebildet. Allgemein waren jedoch keine Unterschiede in der Erkennbarkeit der dargestellten Gegenstände ersichtlich.

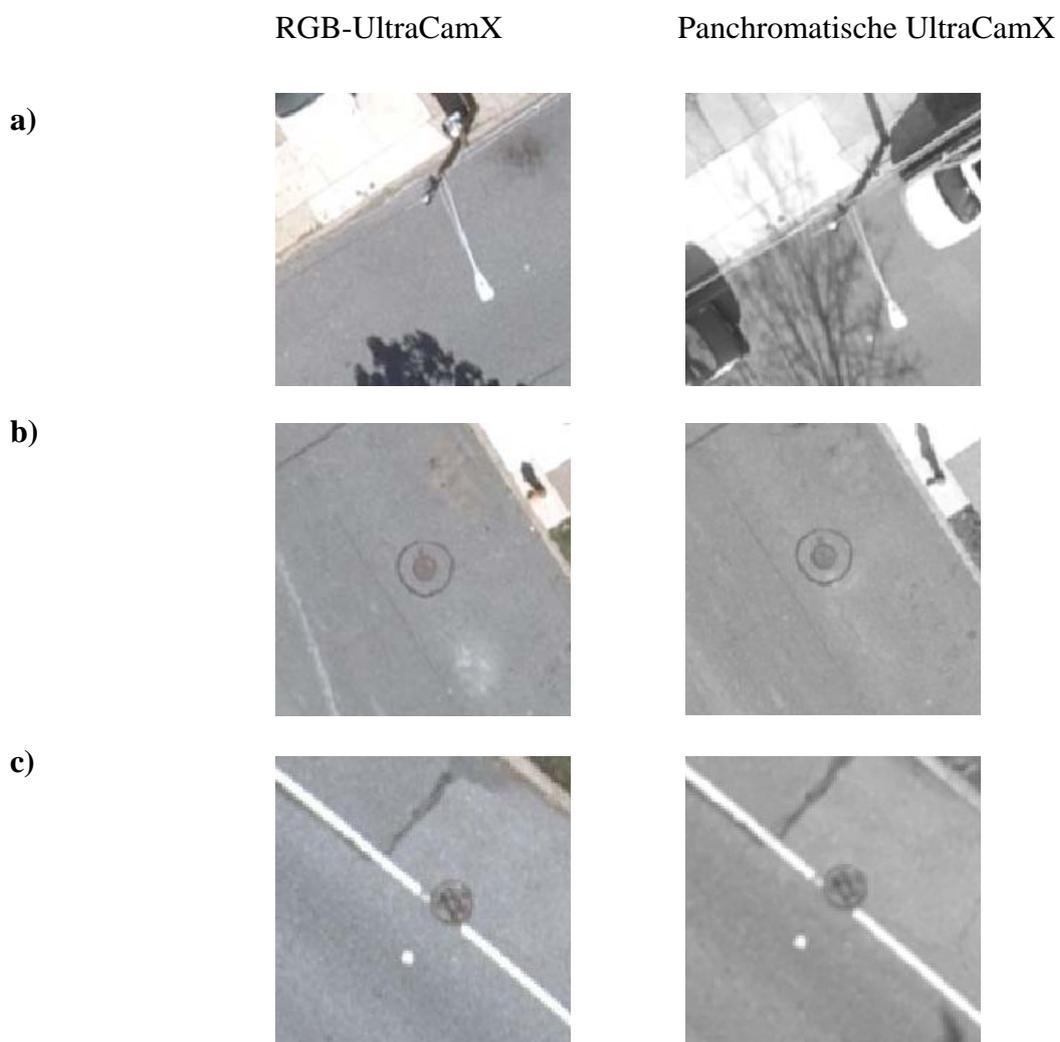


Abbildung 5.17: Vergleich der RGB- bzw. der panchromatischen UltraCamX-Bilder; **a:** Laterne bzw. Strommast; **b:** Kontrollschacht; **c:** Abfluss auf der Straße

Der panchromatische und der RGB UltraCamX-Datensatz besitzen zwei gemeinsame charakteristische Eigenschaften. Zum einen haben sie die gleiche Objektpixelgröße von 37 mm und

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

zum anderen beträgt die Sonnenhöhe zur Zeit der Aufnahme 27° . Jedoch wurden die RGB-Bilder im April, die panchromatischen Bilder im Januar aufgenommen. Aus diesem Grund ist der Schattenbereich bei den panchromatischen UltraCamX-Bilddaten ungefähr doppelt so groß wie bei den RGB UltraCamX-Bildern. Der Schattenwurf wurde größtenteils durch Gebäude verursacht (siehe **Abbildung 5.18**).



Abbildung 5.18: Vergleich der Länge des Schattenwurfes; **a:** Bildausschnitt der UltraCamX (RGB); **b:** Bildausschnitt der UltraCamX (panchromatisch)



Abbildung 5.19: **a:** Darstellung eines Bildausschnittes der RGB UltraCamX; **b:** Darstellung eines Bildausschnittes der panchromatischen UltraCamX

Da die RGB UltraCamX-Bilder, nicht jedoch die panchromatischen Bilder, während der Vegetationsphase aufgenommen wurden, war die Erkennbarkeit und Identifizierung besonders von kleinen Vegetationsflächen bei den panchromatischen Bilddaten schwieriger. Somit

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

konnten vor allem im Schattenbereich Vegetationsflächen nicht identifiziert werden (siehe **Abbildung 5.19**). Trotz mehrerer Analysen und Vergrößerungen konnten viele dieser Informationen nicht eindeutig klassifiziert werden und wurden somit als nicht identifizierbare Fläche eingestuft.

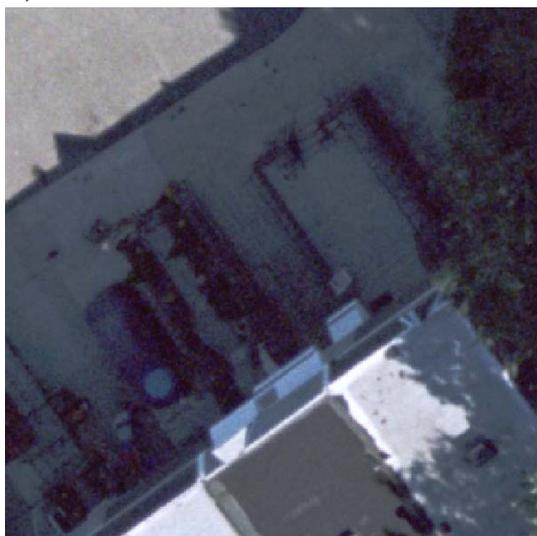
Die Auswertung und Identifizierung des panchromatischen Datensatzes war aufgrund des Aufnahmezeitpunktes im Winter sowie durch das Fehlen von Farbinformationen erschwert. Andererseits konnten bei den panchromatischen Bildern aufgrund des Fehlens der Belaubung mehrere ansonsten unter den belaubten Bäumen nicht sichtbare Gegenstände klassifiziert werden. Auch bei diesem Datensatz konnte durch Veränderung der Helligkeit und des Kontrastes eine nur geringfügige Verbesserung der Bildinformationen im Schattenbereich erzielt werden. Somit lagen auch bei diesen Daten alle nicht identifizierbaren Flächen im Schattenbereich. Die Ergebnisse der Auswertung der zwei ausgewählten Wohnblöcke sind in **Tabelle 5.6** dargestellt. Aufgrund der zuvor ausgeführten Punkte konnte mit der RGB UltraCamX mehr Fläche klassifiziert werden als mit den panchromatischen UltraCamX-Bilddaten (siehe **Tabelle 5.5** bzw. **Tabelle 5.6**). Für einen direkten Vergleich der RGB UltraCamX-Bilder mit den panchromatischen UltraCamX-Bildern wären jedoch zeitgleiche Aufnahmen erforderlich gewesen.

UltraCamX (panchromatisch)	Nicht identifizierbare Fläche im Wohnblock [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
Erster Wohnblock	7,0	37.058
Zweiter Wohnblock	6,1	27.070

Tabelle 5.6: Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der panchromatischen UltraCamX-Aufnahmen

Im Gegensatz zu den analogen Bilddaten war aber auch bei diesem Datensatz trotz der niedrigen Sonnenhöhe, der schlechtern Erkennbarkeit von Vegetationsflächen im Schattenbereich und des schwachen Lichteinfalls durch Befliegung im Winter, eine deutliche Verbesserung der identifizierten Fläche erreichbar. **Abbildung 5.20** auf der nächsten Seite zeigt den Vergleich des RC30- und des panchromatischen UltraCamX-Datensatzes im Schattenbereich.

a)



b)



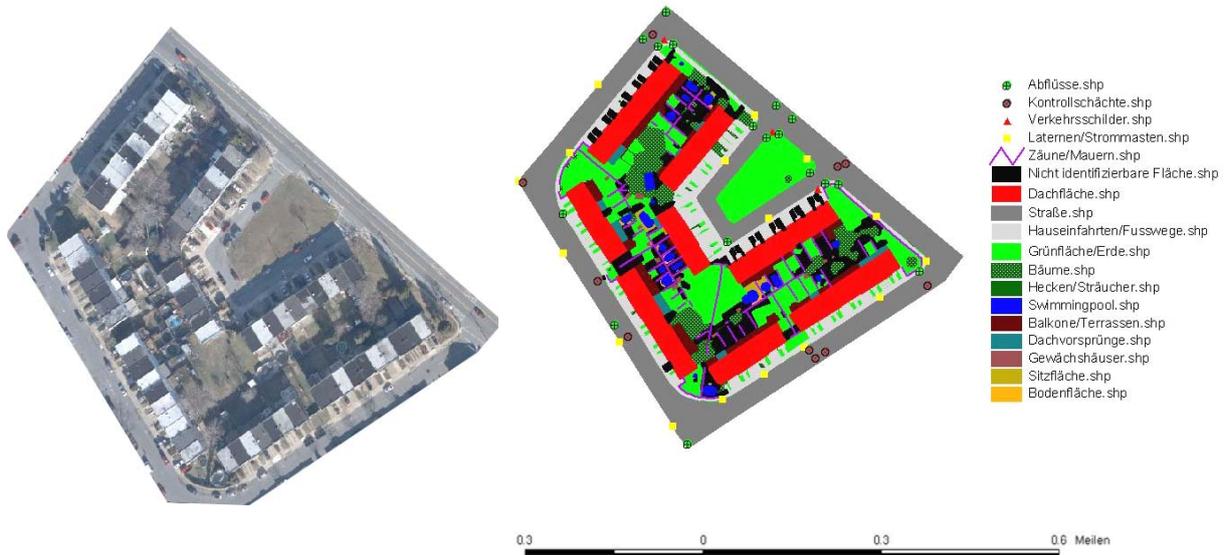
Abbildung 5.20: Vergleich des Schattenbereichs der RC30- und der panchromatischen UltraCamX-Bilder; **a:** RC30; **b:** UltraCamX

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

5.1.5 Auswertung des RGB UltraCamD-Datensatzes

Die beiden ausgewählten Wohnblöcke und die entsprechenden Klassifizierungen sind in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen.

a)



b)

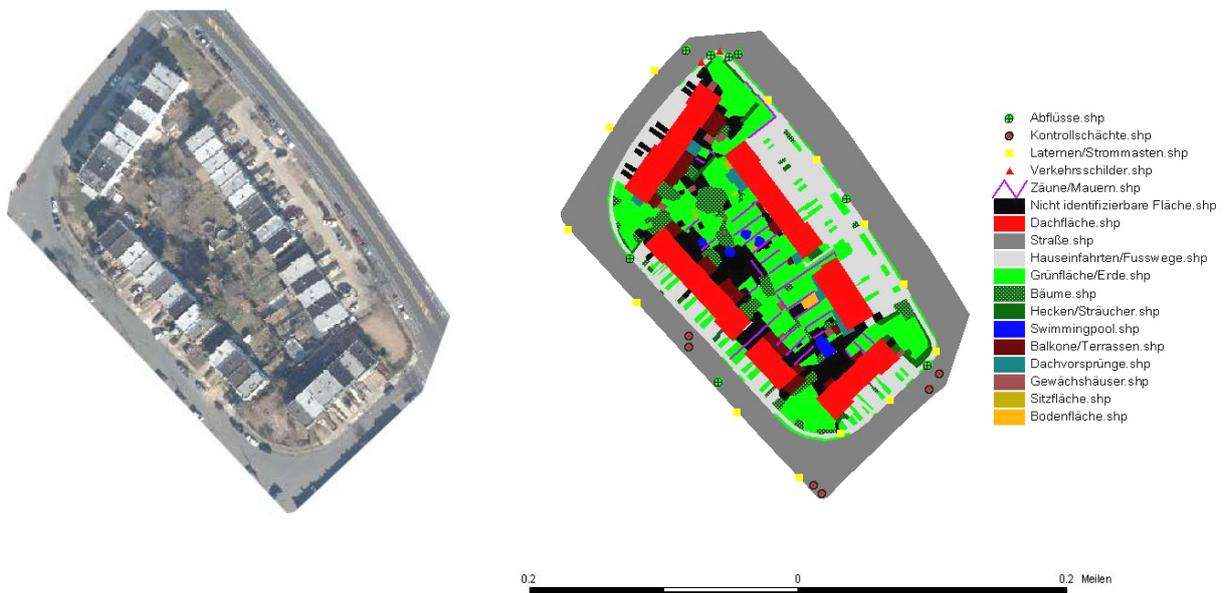


Abbildung 5.21: a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen der RGB UltraCamD-Aufnahmen, nominelle Objektpixelgröße 42mm

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

In **Abbildung 5.22** ist ein Vergleich einer Laterne bzw. Strommast, eines Kontrollschachtes und eines Abflusses auf der Straße von den RGB UltraCamD- und den RGB UltraCamX-Bildern dargestellt.



Abbildung 5.22: Vergleich der RGB UltraCamD- und der RGB UltraCamX-Bilder; **a:** Laterne bzw. Strommast; **b:** Kontrollschacht; **c:** Abfluss auf der Straße

Die Sonnenhöhe zur Zeit der Aufnahme der UltraCamD-Bilder entsprach der bei der RGB bzw. der der panchromatischen UltraCamX-Bilder (27°). Zudem war die Länge des Schattenwurfes des panchromatischen UltraCamX-Datensatzes ungefähr gleich der Länge des UltraCamD-Datensatzes. Somit kann vermutet werden, dass die RGB UltraCamD- bzw. die panchromatischen UltraCamX-Bilder unter vergleichbaren Bedingungen aufgenommen wurden (siehe **Abbildung 5.23** auf der nächsten Seite). Wie aus der **Abbildung** hervorgeht, wurden die RGB UltraCamD - wie die panchromatischen UltraCamX-Bilder - nicht während

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

der Vegetationsphase aufgenommen. Dadurch wurde auch hier die Erkennbarkeit und Klassifizierung von kleinen Vegetationsflächen im Schattenbereich erschwert bzw. konnten diese in manchen Bildausschnitten nicht klassifiziert werden (siehe **Abbildung 5.24**). Nach mehreren Änderungen der Helligkeits- und Kontrasteinstellungen konnte innerhalb des Schattenbereiches nur eine geringere Verbesserung der Bildinformationen erreicht werden. Entsprechend lagen auch bei diesem Datensatz die nicht identifizierbaren Flächen im Schattenbereich.



Abbildung 5.23: Darstellung der Länge des Schattenwurfs; **a:** UltraCamD (RGB); **b:** UltraCamX (panchromatisch)



Abbildung 5.24: Vergleich der Erkennbarkeit der Vegetationsflächen **a:** UltraCamX; **b:** UltraCamD

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Auch bei diesem digitalen Datensatz wurde eine allgemein erhöhte Erkennbarkeit von Bild-details im Schattenbereich als bei den analogen RC30-Luftbildern festgestellt. Ein Beispiel ist in **Abbildung 5.25** zu sehen.

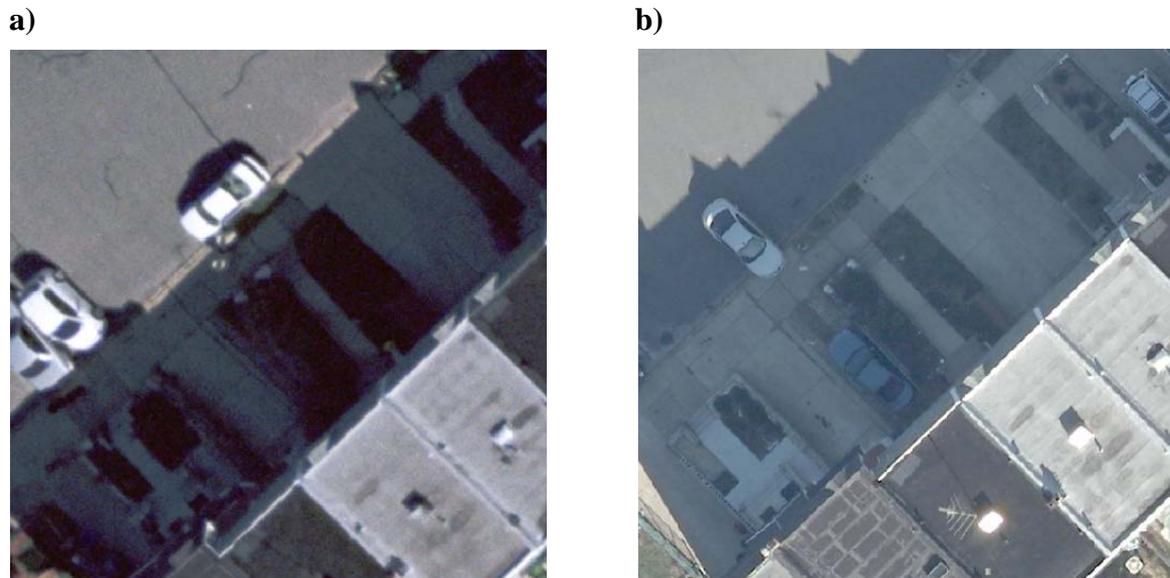


Abbildung 5.25: Vergleich des Schattenbereichs der RC30- und der UltraCamD-Bilder; **a:** RC30; **b:** UltraCamD

In der **Tabelle 5.7** sind die Ergebnisse der Auswertung der beiden ausgewählten Wohnblöcke aufgelistet.

UltraCamD (RGB)	Nicht identifizierbare Fläche im Wohnblock [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
Erster Wohnblock	7,3	39.256
Zweiter Wohnblock	6,2	28.388

Tabelle 5.7: Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der UltraCamD-Aufnahmen

Die Ergebnisse der Auswertung von den RGB UltraCamD-Bildern (**Tabelle 5.7**) mit denen der panchromatischen UltraCamX (**Tabelle 5.6**) waren für die nicht identifizierbare Fläche der zwei ausgewerteten Wohnblöcke ungefähr gleich.

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

5.1.6 Zusammenfassender Datenvergleich der verwendeten Datensätze

In den **Tabellen 5.8** bzw. **5.9** sind die Ergebnisse der Auswertung des ersten bzw. des zweiten Wohnblocks für alle Datensätze zu sehen. Die Ergebnisse sind nach der Größe (in Prozent) der nicht identifizierbaren Fläche sortiert.

Kamera	Bildtyp	GSD nominell / effektiv [mm]	Nicht identifi- zierbare Fläche [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
DMC	Panchromatisch	54 / 54	3,5	42.454
UltraCamX	RGB	37 / 46	6	39.056
UltraCamX	Panchromatisch	37 / 38-46	7,0	37.058
UltraCamD	RGB	42 / 49	7,3	39.256
RC30	RGB	49 / 70	11	35.392

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Auswertung des ersten Wohnblocks

Kamera	Bildtyp	GSD nominell / effektiv [mm]	Nicht identifi- zierbare Fläche [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
DMC	Panchromatisch	54 / 54	1,6	31.019
UltraCamX	RGB	37 / 46	3,6	28.430
UltraCamX	Panchromatisch	37 / 38-46	6,1	27.070
UltraCamD	RGB	42 / 49	6,2	28.388
RC30	RGB	49 / 70	8,3	24.520

Tabelle 5.9: Ergebnisse der Auswertung des zweiten Wohnblocks

5.1.7 Wallis-Filter

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit ausgewerteten Bilddaten verdeutlichten, dass viele Informationen im Schattenbereich des Bildes nicht identifiziert werden konnten. Aus diesem Grund wurden die Orthophotos zusätzlich mit dem Wallis-Filter bearbeitet.

Der Wallis-Filter ist ein lokaler und nicht linearer statistischer Filter [Jacobsen, 2008b]. Anhand dieses Filters wird das Bild an vorgegebene Sollwerte angepasst. Dabei werden die Soll- und die Ist-Werte des Mittelwertes als auch der Standardabweichung der Grauwerte innerhalb von Teilbildern berechnet. Dieses Verfahren dient der Veränderung des lokalen Kontrastes insbesondere im Schattenbereich eines Bildes.

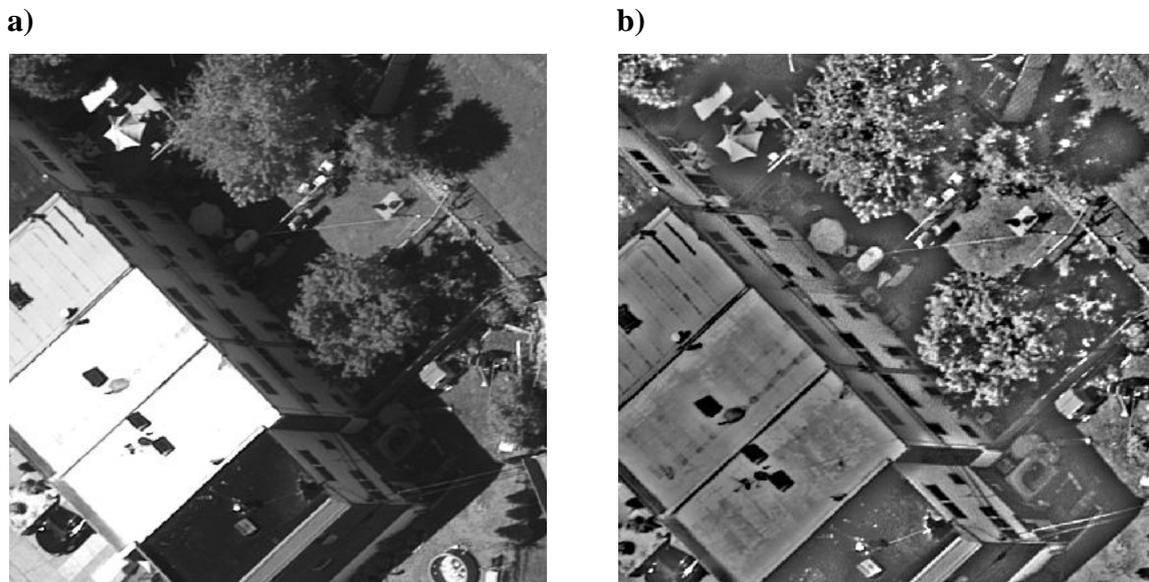


Abbildung 5.26: a) Bildausschnitt der DMC; b) Bildausschnitt der DMC nach der Bearbeitung mit dem Wallis-Filter

Beispielhaft ist in **Abbildung 5.26** für die DMC ein Bildausschnitt vor und nach der Verwendung des Wallis-Filters dargestellt. Die Anwendung des Filters resultierte in einer deutlich gesteigerten Erkennbarkeit von im Schattenbereich liegenden Gegenständen. Jedoch war auch hierdurch keine klare Erkennbarkeit und Abgrenzung von Flächen wie z.B. einer Grünfläche und einer Terrasse möglich. Wesentliche Verbesserungen in der Identifizierbarkeit von Bilddaten durch Anwendung des Wallis-Filters traten für die weiteren während der Diplomarbeit untersuchten Datensätze nicht auf.

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

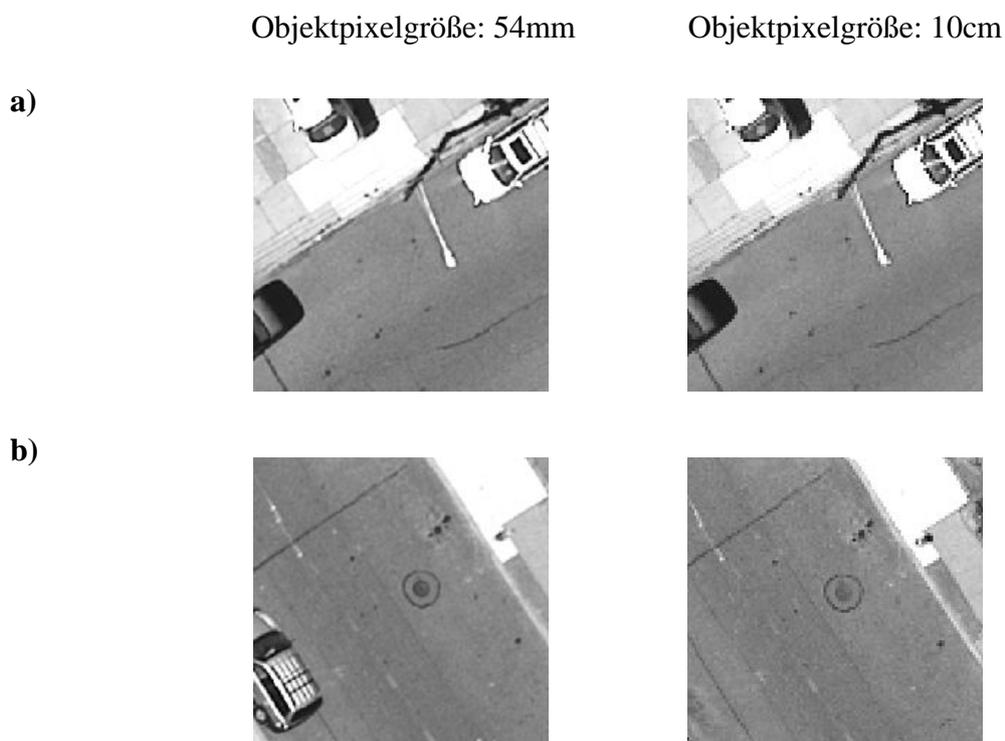
5.2 Auswertung der Datensätze mit 10cm bzw. 20cm Objektpixelgröße

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vorhandenen Datensätze (RGB RC30, panchromatische DMC, RGB UltraCamX und RGB UltraCamD) bei einer Objektpixelgröße von 10cm bzw. 20cm dargestellt. Bei den panchromatischen UltraCamX-Bildern konnte die Auswertung bei 10 und 20cm Objektpixelgröße aufgrund eines Fehlers im Rahmen der Diplomarbeit nicht durchgeführt werden.

5.2.1 Auswertung der Datensätze bei einer Objektpixelgröße von 10cm

Die Vergrößerung der Objektpixelgröße auf 10cm erfolgte bei der Herstellung von Orthophotos mit LPS.

Durch Beobachtungen und Vergleiche dieser Bilddaten mit denen der Originalobjektpixelgrößen konnten im Allgemeinen kaum bzw. keine deutlichen Unterschiede festgestellt werden. Deshalb wurden für die in der Diplomarbeit ausgewerteten Wohnblöcke keine Klassifizierungen vorgenommen. Selbst bei einer Objektpixelgröße von 10cm waren die einzelnen Pixel erst nach mehreren Vergrößerungsschritten erkennbar. Auch hier waren Bildgegenstände wie Laternen bzw. Strommasten, Kontrollschächte, Abflüsse am Straßenrand, Verkehrsschilder und Mauern bzw. Zäune identifiziert (siehe **Abbildung 5.27**).



5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

c)

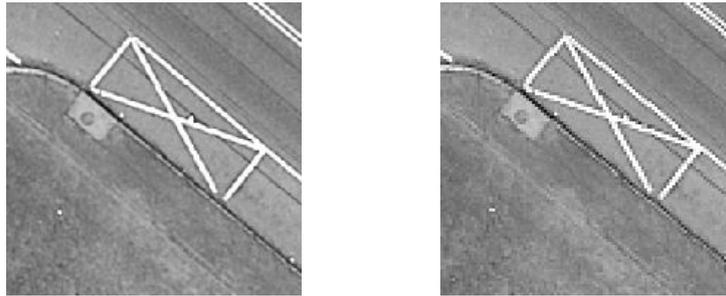


Abbildung 5.27: Vergleich der DMC-Bilder mit 54mm und 10cm Objektpixelgröße; **a:** Laterne bzw. Strommast; **b:** Kontrollschacht; **c:** Abfluss am Straßenrand

Jedoch konnten durch Vergrößerung der Objektpixelgröße bei allen Datensätzen Unterschiede in der Identifizierbarkeit von Straßenabflüssen festgestellt werden. Der Grund hierfür ist, dass die Gitterstruktur der Abflüsse kleiner als eine Objektpixelgröße von 10cm ist. Am Beispiel der RGB UltraCamX ist dieses in **Abbildung 5.28** dargestellt.

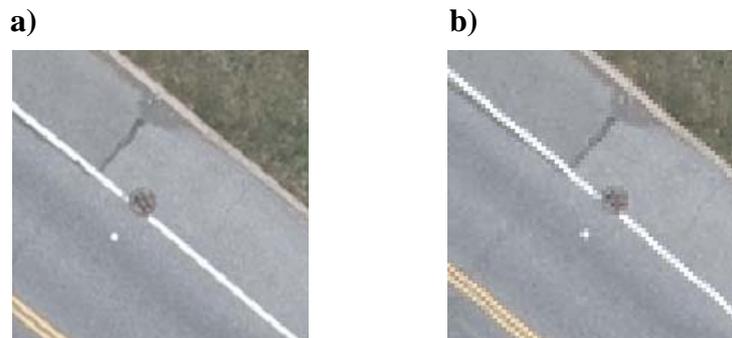


Abbildung 5.28: Darstellung eines Abflusses der RGB UltraCamX; **a:** 37mm Objektpixelgröße; **b:** 10cm Objektpixelgröße

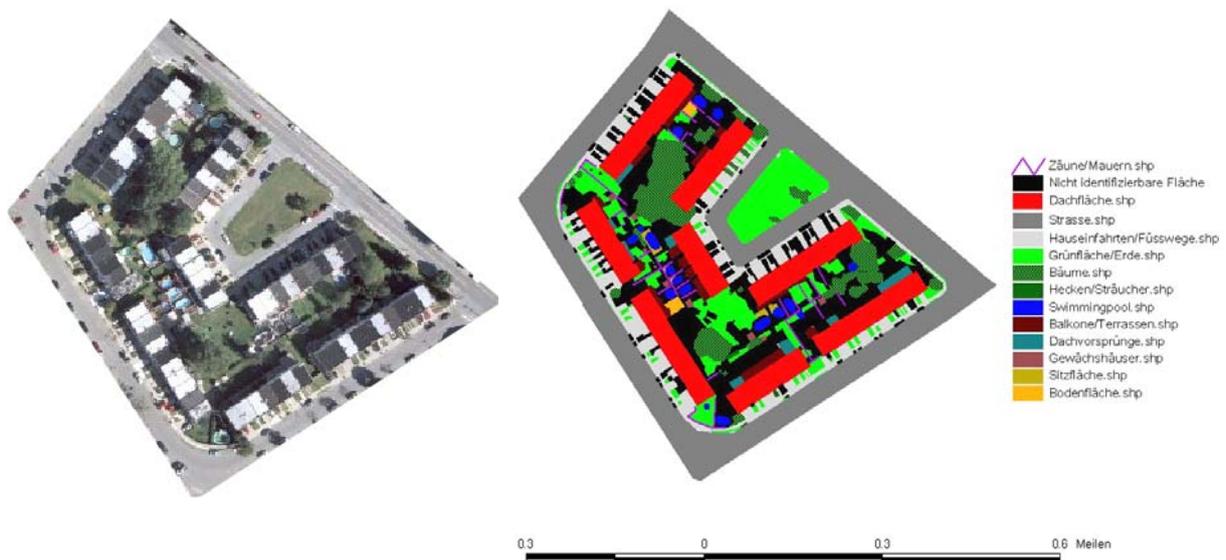
5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

5.2.2 Auswertung der Datensätze bei einer Objektpixelgröße von 20cm

Eine Vergrößerung der Objektpixelgröße auf 20cm erfolgte auch hier bei der Herstellung von Orthophotos mit der LPS.

In den nachfolgenden Abbildungen sind für die einzelnen Datensätze die Ergebnisse der Auswertungen für beide Wohnblöcke dargestellt.

a)



b)

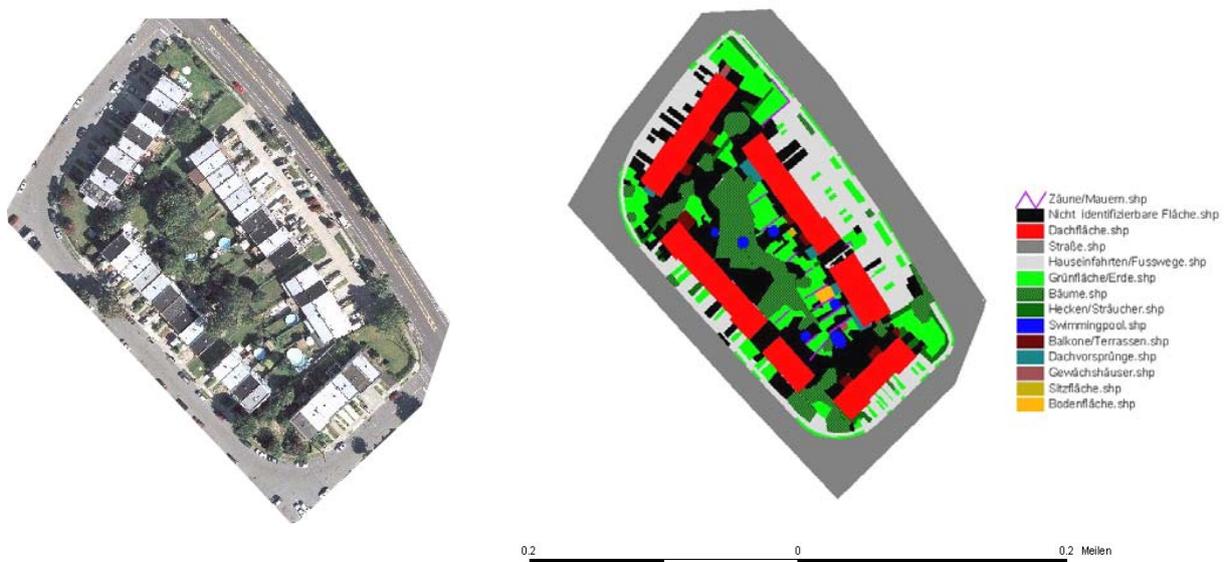
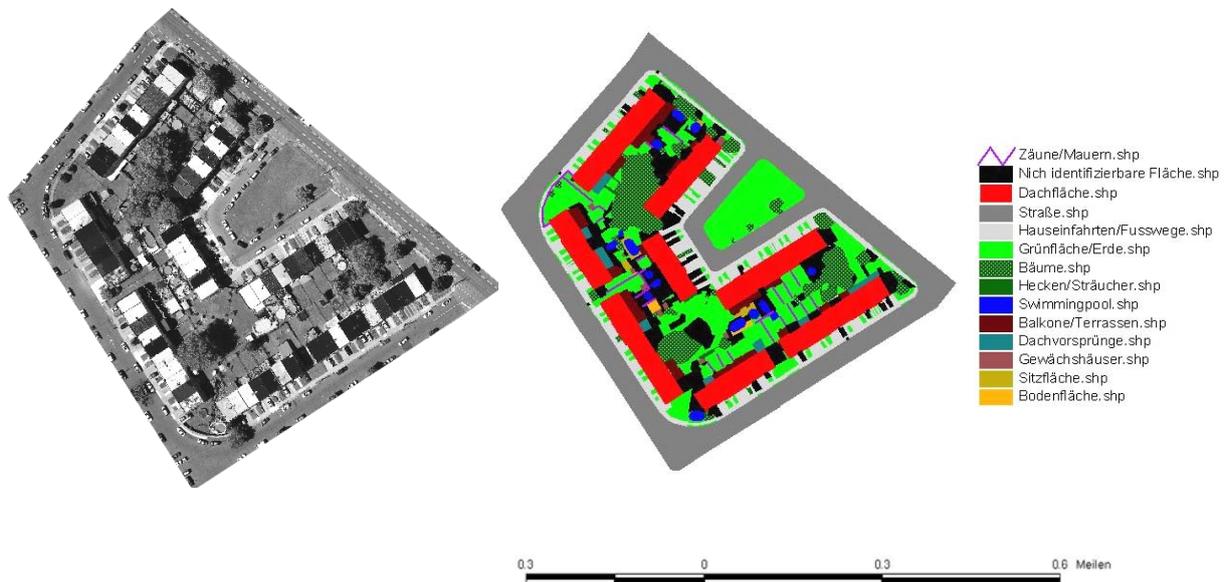


Abbildung 5.29: a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen mit RC30-Aufnahmen; Objektpixelgröße 20cm

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

a)



b)

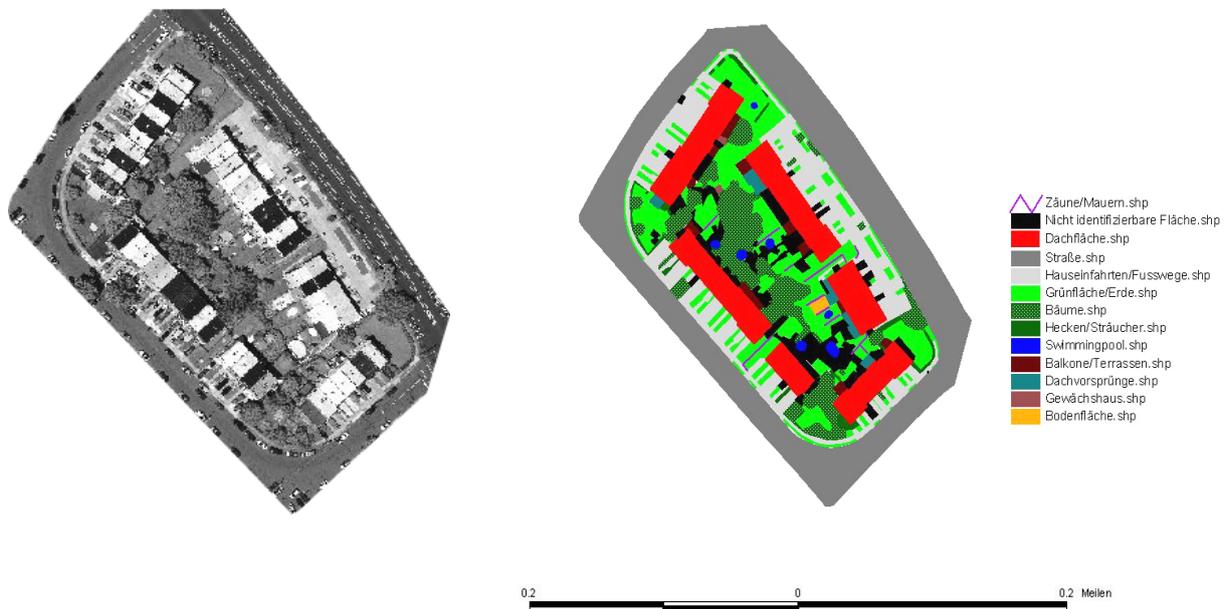
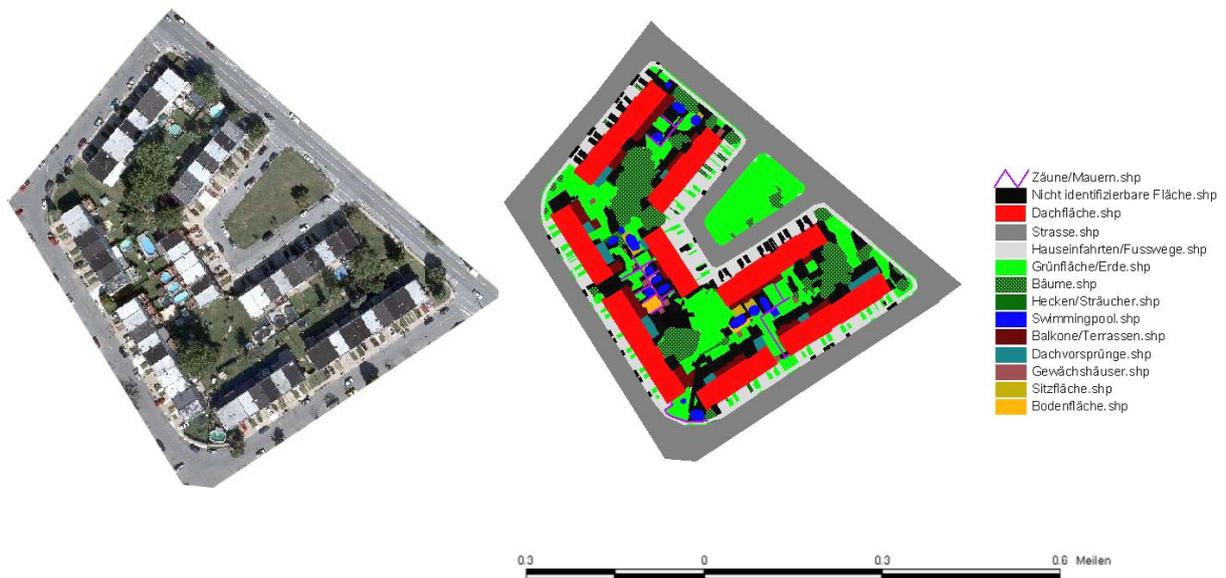


Abbildung 5.30: a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen mit DMC-Aufnahmen; 20cm Objektpixelgröße

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

a)



b)

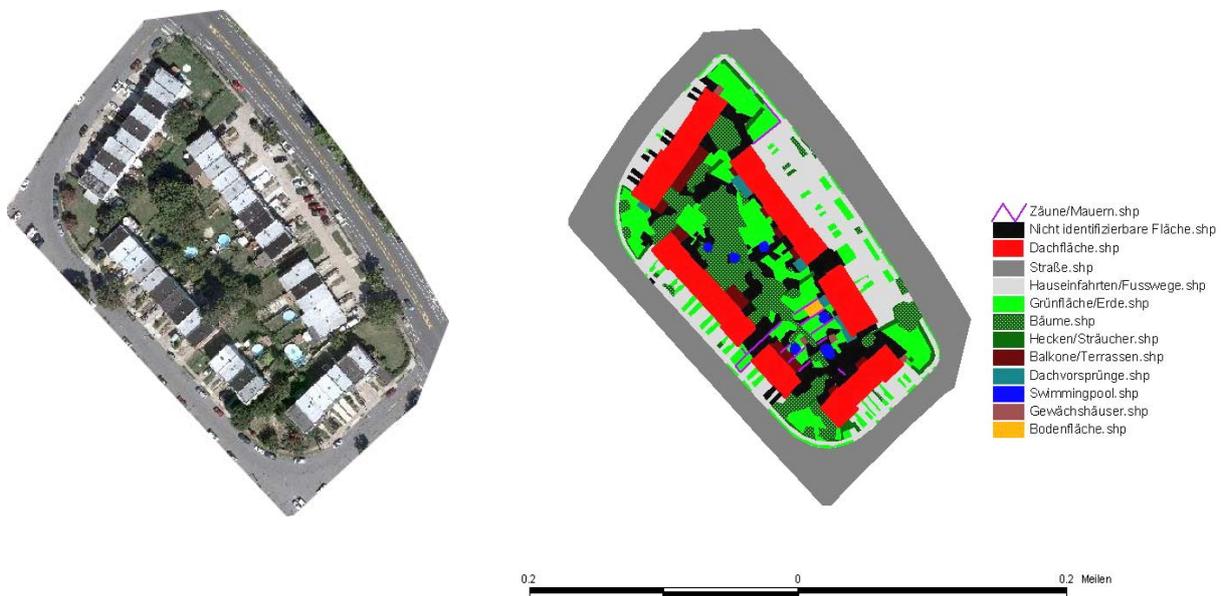
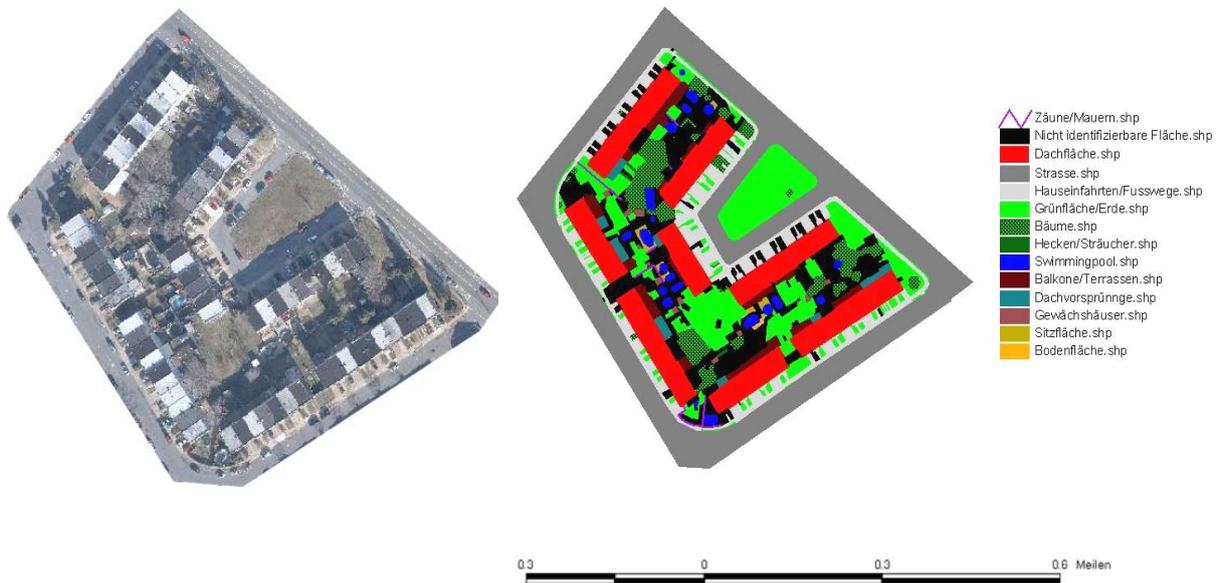


Abbildung 5.31: a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen der UltraCamX-Aufnahmen; 20cm Objektpixelgröße

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

a)



b)

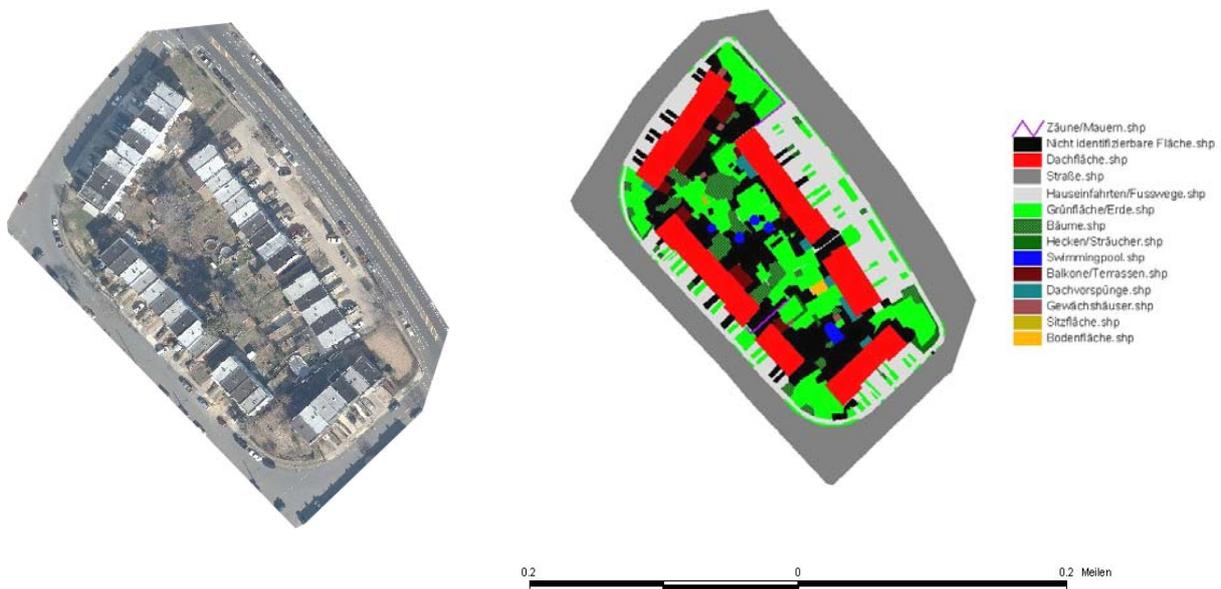


Abbildung 5.32: a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen mit UltraCamD-Aufnahmen; 20cm Objektpixelgröße

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Allgemein konnte bei einer Objektpixelgröße von 20cm eine deutliche Verschlechterung der erzeugten Bilddaten beobachtet werden. Dabei war bereits bei geringer Vergrößerung des Bildausschnittes die Pixelstruktur der Objekte zu erkennen. Darüber hinaus waren viele Objekte nicht mehr eindeutig identifizierbar. Laternen bzw. Strommasten, Kontrollschächte, Abflüsse am Straßenrand bzw. Abflüsse auf der Straße, Verkehrsschilder sowie Schornsteine und Antennen waren in ihrer Objektstruktur nicht mehr zu klassifizieren. Es konnten ausschließlich Pixel bzw. Pixelgruppen, die sich in Farb- bzw. Grauwertabstufungen vom Hintergrund abhoben, gesehen werden. Zäune bzw. Mauern waren allgemein als eine Reihe von Pixel zu sehen. Die Richtung der Pfeile und die Zeichnungen der Fahrradwege auf der Straße waren nicht mehr eindeutig zu erkennen.

Im Folgenden werden einige Vergleiche mit Originalobjektpixelgröße, 10cm Objektpixelgröße und 20cm Objektpixelgröße gezeigt.

DMC:



RGB UltraCamX:

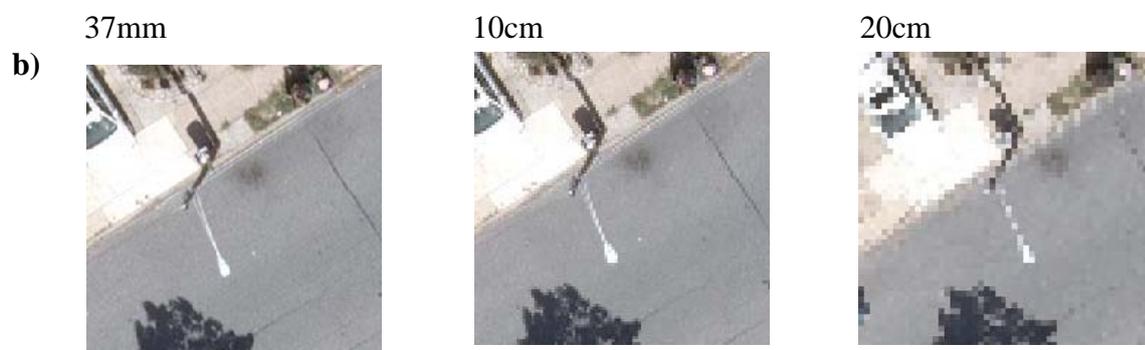
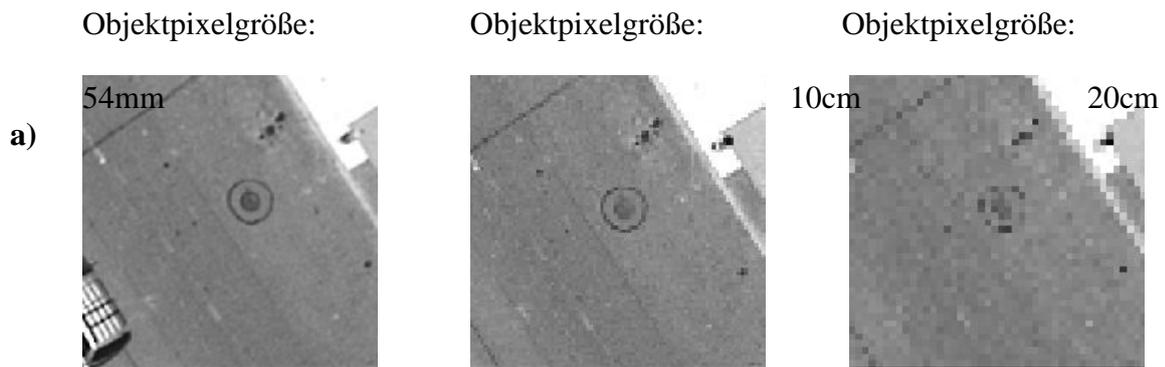


Abbildung 5.33: a Laterne bzw. Strommast in panchromatischen DMC-Bildern; b: Laterne bzw. Strommast in RGB UltraCamX-Bildern

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

DMC:

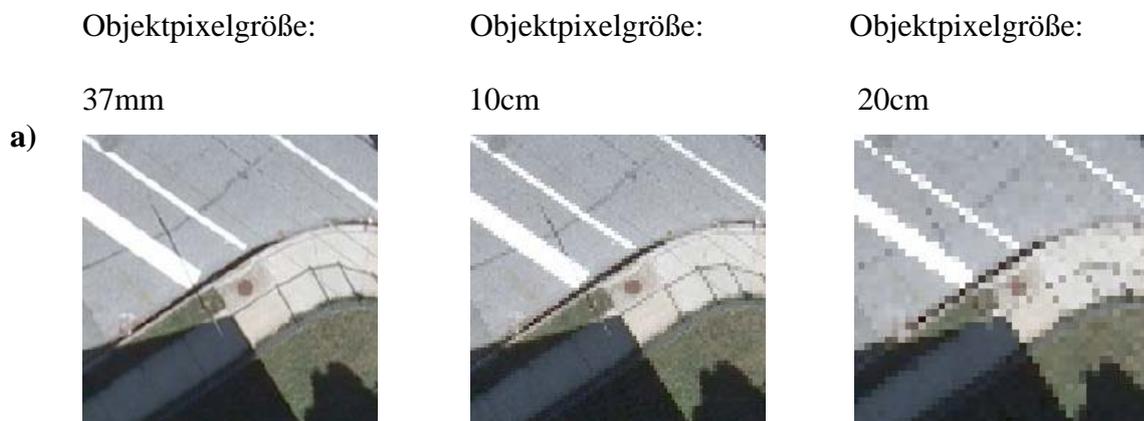


RGB UltraCamX:



Abbildung 5.34: a: Kontrollschacht in panchromatischen DMC-Bildern; b: Kontrollschacht in RGB UltraCamX-Bildern

RGB UltraCamX:



5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

b)



Abbildung 5.35: a: Abfluss am Straßenrand bzw. b: Abfluss auf der Straße in RGB Ultra-CamX-Bildern

Nach Vergrößerung der Objektpixelgröße auf 20cm waren Bildinformationen auch außerhalb des Schattenbereiches nicht mehr eindeutig zu identifizieren (siehe **Abbildung 5.36**). Im Gegensatz zu den Bildern mit Originalobjektpixelgröße, bei denen einige Flächen bzw. Gegenstände auch im Schattenbereich klassifiziert werden konnten, war dieses bei dieser Auswertung nicht mehr möglich. Besonders bei der UltraCamD (siehe **Abschnitt 5.1.5**) konnten in manchen Bildausschnitten die Erkennbarkeit und Abgrenzung von Bäumen, Hecken bzw. Grünflächen nicht eindeutig festgelegt werden. Zudem wurden einige Bäume nur durch ihren Schattenwurf klassifiziert. Die Differenzierung der Vegetationsflächen bei den UltraCamD-Bildern mit einer Objektpixelgröße von 20cm war zusätzlich erschwert.

DMC:

Objektpixelgröße:

54mm

a)



Objektpixelgröße:

20cm



5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

RGB UltraCamD



Abbildung 5.36: a :Bildausschnitt der DMC; b: Bildausschnitt der UltraCamD

In den **Tabellen 5.10** bzw. **5.11** sind die statistischen Daten der Auswertungen des ersten bzw. des zweiten Wohnblocks aufgelistet.

Kamera	Bildtyp	Nicht identifizierbare Fläche im Wohnblock [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
DMC	Panchromatisch	8,3	35.351
UltraCamX	RGB	9,9	33.998
UltraCamD	RGB	12,4	32.628
RC30	RGB	15,5	30.416

Tabelle 5.10: Statistische Daten des ersten Wohnblocks; Objektpixelgröße 20cm

Kamera	Bildtyp	Nicht identifizierbare Fläche im Wohnblock [%]	Gesamtlänge der Vektoren der Klassifizierung [m]
DMC	Panchromatisch	5,7	26.274
UltraCamX	RGB	8,0	25.343
UltraCamD	RGB	12,3	24.208
RC30	RGB	13,4	22.910

Tabelle 5.11: Statistische Daten des zweiten Wohnblocks; Objektpixelgröße 20cm

5 Vergleich der Bildinformationen der Datensätze

Aus diesen Daten geht hervor, dass die nicht identifizierbare Fläche bei einer Objektpixelgröße von 20cm vergrößert war. Für den ersten und zweiten ausgewerteten Wohnblock betrug der Mittelwert der Differenz zwischen Originalobjektpixelgröße und 20cm Objektpixelgröße für die DMC 4,5 %, für die UltraCamX 4,2 %, für die UltraCamD 5,6 % und für die RC30 4,8 %.

Kapitel 6

Zusammenfassende Diskussion

Das Hauptziel dieser Diplomarbeit war der Vergleich des Informationspotentials von analogen und digitalen Luftbildkameras bzw. von digitalen Luftbildkameras untereinander. Darüber hinaus wurden die verwendeten Datensätze des Testgebietes Franklin Mills radiometrisch und geometrisch untersucht. Zudem wurde eine vergleichende Auswertung der Bildinformationen in Hinblick auf die Objekterkennung durchgeführt. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Diplomarbeit war die Untersuchung der Bildinformationen nach Vergrößerung der Objektpixelgröße auf 10 bzw. 20cm.

Generell zeigt sich, dass bei ähnlicher Objektpixelgröße die Objekterkennung mittels digitaler Luftbilder besser ist als mit analogen Luftbildern. So zeigten auch die Ergebnisse aus dem radiometrischen Vergleich mittels Kantenbildanalyse (siehe **Abschnitt 4.1**), dass die analogen Luftbilder eine Bildauflösung besitzen, die einer Pixelgröße von $18\mu\text{m}$ entspricht und nicht der Pixelgröße von $12,5\mu\text{m}$. Die panchromatischen DMC-Luftbilder zeigen die beste Auflösung. Eine Abnahme der Bildqualität von der Bildmitte zum Bildrand war bei der DMC im Vergleich zu der panchromatischen UltraCamX vernachlässigbar. Eine Erklärungsmöglichkeit hierfür ist die aufwendige Optik der DMC und der kleine Öffnungswinkel der Kamera, durch den die Abbildungsfehler am Bildrand minimiert werden konnten [Jacobsen, 2008]. Generell weisen die RGB UltraCam-Bilder eine geringere Auflösung auf als die panchromatischen UltraCam-Bilder. Durch die deutliche Abnahme der Bildqualität der panchromatischen UltraCamX-Aufnahmen zum Bildrand hin ist die Bildqualität der panchromatischen UltraCam-Bilder am Bildrand geringer als die der RGB UltraCam-Bilder (siehe **Tabelle 4.1**). Für die analogen RC30-Luftbilder wurde ein geringerer Informationsgehalt als für die DMC- und die UltraCamX-Bilder festgestellt. Der Informationsgehalt entspricht jedoch dem der UltraCamD [Jacobsen 2008a].

Die Ergebnisse der geometrischen Untersuchung zeigten, dass mit den DMC- und den UltraCamX-Luftbildern höhere Lagegenauigkeiten als mit den analogen Weitwinkel-RC30-Luftbildern erreicht werden konnten. Obwohl das Höhen-Basis-Verhältnis bei der analogen

6 Zusammenfassende Diskussion

RC30 geringer ist, konnte mit der digitalen DMC eine bessere Höhengenaugigkeit erzielt werden. Die geometrischen Untersuchungen wurden des Programms BLUH durchgeführt (siehe **Abschnitt 4.2**). Bei den DMC-Luftbildern konnte durch Verwendung der kamera-spezifischen zusätzlichen Parameter 79 und 80 eine leichte Steigerung der Genauigkeit erzielt werden. Die Anwendung weiterer Parameter führte jedoch nicht zu einer zusätzlichen Genauigkeitssteigerung (siehe **Tabelle 4.2**). Die eingeschränkte Verbesserung durch die Selbstkalibrierung könnte dadurch erklärt werden, dass die Bildblöcke des Testgebietes Franklin Mills nicht ausreichend groß sind, um die Vorteile der Selbstkalibrierung deutlich zu zeigen.

Aus demselben Grund führte der Einsatz von kameraspezifischen zusätzlichen Parametern bei den UltraCam-Bildern nicht in einer Verbesserung der Ergebnisse gegenüber einer Ausglei-chung mit dem Standardparametersatz (siehe **Tabellen 4.3, 4.4 und 4.5**). Abgesehen davon konnten mit der UltraCamX mit dem neuen Teilbildzusammenfügungsprogramm von Vexcel Imaging bessere Genauigkeiten erzielt werden als mit der UltraCamD. Dabei basieren Bilder der UltraCamD auf der alten Vexcel Imaging-Software zur Vereinigung der Teilbilder. Durch die für die UltraCamX benutzte neue Software konnten geometrische Schwächen der Ultra-CamD-Luftbilder verringert werden.

Der Vergleich der panchromatischen mit den RGB UltraCamX-Bildern ergab für die pan-chromatischen UltraCamX-Daten eine bessere Lagegenauigkeit (siehe **Tabellen 4.4 und 4.5**). Im Gegensatz dazu besitzen sie jedoch eine schlechtere Höhengenaugigkeit. Die ermittelte hö-here Bildqualität der panchromatischen Bilder ist zumindest teilweise auf die Verkleinerung der systematischen Bildfehler zurückzuführen. Dadurch konnte auch die manuelle Messung der Bildkoordinaten der Passpunkte und die automatische Bestimmung der Verknüpfungs-punkte optimiert werden. Die geringfügige Verschlechterung der Höhengenaugigkeit kann durch Sub-Pixel-Einflüsse der Teilbildzusammenfügung erklärt werden.

Für die analoge RC30 konnte mittels Selbstkalibrierung generell keine Verbesserung der Er-gebnisse erzielt werden (siehe **Tabelle 4.6**) [Jacobsen 2008a].

Darüber hinaus wurden die Bildinformationen analoger und digitaler Luftbilder miteinander verglichen. Die im Rahmen dieser Diplomarbeit erzielten Ergebnisse zeigten, dass der Pro-zentsatz der nicht identifizierbaren Fläche bei den digitalen Luftbildern geringer war als bei den analogen. So waren beispielsweise 3,5 % (erster Wohnblock) bzw. 1,6 % (zweiter Wohn-block) der Fläche bei der DMC, jedoch 11 % (erster Wohnblock) bzw. 8,3 % (zweiter Wohn-block) der Fläche bei der analogen RC30 nicht identifizierbar eingestuft (siehe **Tabellen 5.8**

6 Zusammenfassende Diskussion

und 5.9). Dabei lagen bei den analogen und digitalen Bilddaten alle nicht klassifizierten Flächen im Schattenbereich.

In den digitalen Datensätzen konnten Abflüsse auf der Straße eindeutig identifiziert werden. Diese Abflüsse waren bei den analogen Luftbildern nicht klar erkennbar (siehe **Abbildungen 5.9** und **5.14**). Die Erkennbarkeit weiterer Objekte wie Laternen bzw. Strommasten, Kontrollschächte, Verkehrsschilder und Abflüsse am Straßenrand ergab jedoch keine wesentlichen Unterschiede zwischen digitalen und analogen Datensätzen. So sind Stromleitungen sowohl bei der analogen als auch bei den digitalen Luftbildern nur in bestimmten Bildausschnitten mit dunklem Hintergrund wie z.B. über Bäumen und in schattigen Bereichen erkennbar (siehe beispielsweise **Abbildungen 5.5** und **5.10**).

Prinzipiell können ohne das Filmkorn, die höhere Lichtempfindlichkeit und den höheren Bildkontrast der digitalen Kameras gegenüber den analogen Luftbildern mehr Bilddetails im Schattenbereich der digitalen Luftbilder erfasst werden. Hierdurch können Luftbildaufnahmen auch bei niedriger Sonnenhöhe erstellt werden. Durch die Möglichkeit der ganzjährig auch im Winter durchführbaren Luftbildaufnahmen wird so die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessert.

Die Veränderung der Objektpixelgröße auf 10cm ergab im Vergleich mit der originalen Objektpixelgröße keine wesentliche Verringerung der Erkennbarkeit von Bildobjekten. Unterschiede waren ausschließlich bei der Identifizierbarkeit von Straßenabflüssen festzustellen (siehe **Abbildung 5.28**). Eine weitere Vergrößerung der Objektpixelgröße auf 20cm führte allerdings bei allen Luftbildern zu einer deutlichen Abschwächung der Erkennbarkeit aller Objekte. So erhöhte sich der Prozentsatz der nicht identifizierbaren Fläche bei der DMC mit Originalobjektpixelgröße von 3,5 % (erster Wohnblock) bzw. 1,6 % (zweiter Wohnblock) auf 8,3 % (erster Wohnblock) bzw. 5,7 % (zweiter Wohnblock) nach Vergrößerung auf 20cm Objektpixelgröße (siehe **Tabellen 5.10** und **5.11**). Insbesondere in Hinblick auf die Ergebnisse mit einer Objektpixelgröße von 10cm kann angenommen werden, dass die Luftbildflüge aus einer nahezu doppelten Flughöhe ohne wesentliche Verluste der Objekterkennbarkeit durchgeführt werden könnten. Dieses würde zu einer Verringerung der Anzahl von notwendigen Flugstreifen führen und damit zu einer Kostenminimierung.

Die Diplomarbeit zeigt, dass die Auswertung von Farbbildern einfacher durchzuführen waren. So war die Identifizierung von Objekten mittels der RGB UltraCamX-Bilddaten im Vergleich zu den panchromatischen UltraCamX-Daten leichter.

6 Zusammenfassende Diskussion

In einer abschließenden Bewertung soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass die einzelnen Datensätze zu unterschiedlichen Jahreszeiten mit unterschiedlichen Sonnenständen aufgenommen wurden (siehe **Tabelle 3.2**). Dieser Aspekt sollte bei der vergleichenden Auswertung berücksichtigt werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Schichtaufbau eines Schwarzweißfilmes [Marchesi, 1995].....	4
2.2	Darstellung der analogen Reihenschichtkamera RC30 [http://www.leica-geosystems.com/corporate/de/ndef/lgs_57632.htm ,Stand 25.06.2008].....	6
2.3	Umwandlung von Photonen in elektrische Ladungen [Bobey, 2005].....	7
2.4	Prinzip des Full-Frame-CCD-Bildsensors [Bobey, 2005].....	8
2.5	Darstellung der panchromatischen und multispektralen Kameras [Doerstel et al., 2002].....	9
2.6	Prinzip der Erstellung eines virtuellen Gesamtbildes [Madani et al., 2004].....	10
2.7	Schematische Darstellung des „Pansharpening“ Verfahrens [Jacobsen, Vorlesungsskript].....	10
2.8	Schematische Darstellung der TDI [Jacobsen, Vorlesungsskript].....	11
2.9	Darstellung der panchromatischen und multispektralen Teilkameras.[Gruber, 2007].....	12
2.10	Darstellung der Verteilung der neun panchromatischen Bilder [Jacobsen, Vorlesungsskript].....	12
2.11	Darstellung eines Linienmusters [Luhmann, 2003].....	14
2.12	Darstellung eines Siemenssterns [Luhmann, 2003].....	14
2.13	Darstellung einer verschiedenen aufgenommenen Siemensstern (linke Hälfte: Filmkamera; rechte Hälfte: Digitalkamera) [Leberl und Gruber, 2003].....	15
2.14	Ablaufschema der Kantenbildanalyse zur Bestimmung der MTF [Bähr, 1998].....	16

Abbildungsverzeichnis

2.15	Darstellung der Elemente der äußeren Orientierung [Jacobsen, Vorlesungsskript]..18
2.16	Schematische Darstellung der Verteilung der Voll- und Höhenpasspunkte für einen Blockverband [Jacobsen, Vorlesungsskript].....18
2.17	Schematische Darstellung des Grundprinzips der Bündelblockausgleichung [Jacobsen, Vorlesungsskript].....20
2.18	Darstellung des Einflusses der einzelnen Standardparameter des Programmsystems BLUH [Jacobsen, Vorlesungsskript].....22
2.19	Darstellung der 9 Teilbilder der UltraCam [Jacobsen, Vorlesungsskript].....23
2.20	Schematische Darstellung des Einflusses der zusätzlichen Parameter für die DMC; a: Parameter 32 ; b: Parameter 36; c: Parameter 40; d: Parameter 75 [Jacobsen, Vorlesungsskript].....23
2.21	Schematische Darstellung des Einflusses der zusätzlichen Parameter der DMC; a: Parameter 79; b: Parameter 80.....24
2.22	Schematische Darstellung des Prinzips der digitalen Orthophotoherstellung [Heipke, Vorlesungsskript].....25
3.1	a: Darstellung der Blockkonfiguration der DMC im Testgebiet Franklin Mills; b: Darstellung des Testgebietes26
4.1	a: Kante im RC30-Bild; b) ihre Grauwertprofil; c: Punktverteilungsfunktion.....29
4.2	Einfluss zusätzlicher Parameter; a: DMC (Parameter 1 - 12, 79 und 80); b: Ultra-CamD (Parameter 1 - 12, 42 - 73); Vektormaßstab 10µm.....33
4.3	Einfluss der zusätzlichen Parameter der UltraCamX (1 - 12 und 42 - 73); a: RGB; b: Panchromatisch; Vektormaßstab 10µm34
4.4	Systematische Bildfehler der RC30 Aufnahmen; Vektormaßstab 10µm35
5.1	a: Darstellung des digitalen Geländemodells; b: Darstellung der Lage der gesuchten Wohnblöcke.....36

Abbildungsverzeichnis

5.2	Legende für die Auswertung.....	37
5.3	a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks mit den entsprechenden Klassifizierungen für die RC30; Objektpixelgröße: 49mm.....	39
5.4	erkennbare Objektdetails a: Laterne bzw. Strommasts; b: Kontrollschacht; c: Abfluss am Straßenrand; d: Verkehrsschildes	40
5.5	Abbildung einer Stromleitung in einer RC30-Aufnahme	41
5.6	a: bzw. b: Darstellung eines Bildausschnittes im Schattenbereich.....	43
5.7	a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen der DMC; Objektpixelgröße: 54mm.....	43
5.8	Vergleich der RC30 und DMC Bilder; a: Laterne bzw. Strommast; b: Kontrollschacht.....	44
5.9	Vergleich der Abflüsse auf der Straße; a und b: RC30; c und d: DMC.....	44
5.10	Darstellung einer Stromleitungen bei der DMC.....	45
5.11	a bzw. b: Schattenbereich einer DMC-Aufnahme.....	45
5.12	a: Bildausschnitt im Schattenbereich; b: Bildausschnitt nach Änderung der Helligkeit und des Kontrastes.....	46
5.13	a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen der RGB UltraCamX-Aufnahmen; nominelle Objektpixelgröße 37mm.....	48
5.14	Vergleich der RC30 und der RGB UltraCamX Bilder; a und d: Laterne bzw. Strommast; b und e Kontrollschacht; c und f: Abfluss auf der Straße.....	49
5.15	Vergleich des Schattenbereichs der RC30 und der UltraCamX; a: RC30; b: UltraCamX.....	50

Abbildungsverzeichnis

5.16	a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen der panchromatischen UltraCamX-Aufnahmen; nominelle Objektpixelgröße 37mm.....	51
5.17	Vergleich der RGB- bzw. der panchromatischen UltraCamX-Bilder; a: Laterne bzw. Strommast; b: Kontrollschacht; c: Abfluss auf der Straße.....	52
5.18	Vergleich der Länge des Schattenwurfes; a: Bildausschnitt der UltraCamX (RGB); b: Bildausschnitt der UltraCamX (panchromatisch).....	53
5.19	a: Darstellung eines Bildausschnittes der RGB UltraCamX; b: Darstellung eines Bildausschnittes der panchromatischen UltraCamX.....	53
5.20	Vergleich des Schattenbereichs der RC30- und der panchromatischen UltraCamX-Bilder; a: RC30; b: UltraCamX.....	55
5.21	a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen der RGB UltraCamD-Aufnahmen, nominelle Objektpixelgröße 42 mm.....	56
5.22	Vergleich der RGB UltraCamD- und der RGB UltraCamX-Bilder; a: Laterne bzw. Strommast; b: Kontrollschacht; c: Abfluss auf der Straße.....	57
5.23	Darstellung der Länge des Schattenwurfs; a: UltraCamD (RGB); b: UltraCamX (panchromatisch).....	58
5.24	Vergleich der Erkennbarkeit der Vegetationsflächen a: UltraCamX; b: UltraCamD.....	58
5.25	Vergleich des Schattenbereichs der RC30- und der UltraCamD-Bilder; a: RC30; b: UltraCamD.....	59
5.26	a: Bildausschnitt der DMC; b: Bildausschnitt der DMC nach der Bearbeitung mit dem Wallis-Filter.....	61
5.27	Vergleich der DMC-Bilder mit 54mm und 10cm Objektpixelgröße; a: Laterne; b: Kontrollschacht; c: Abfluss am Straßenrand.....	63

Abbildungsverzeichnis

5.28	Darstellung eines Abflusses der RGB UltraCamX; a: 37mm Objektpixelgröße; b:10 cm Objektpixelgröße.....	63
5.29	a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen mit RC30-Aufnahmen; Objektpixelgröße 20cm.....	64
5.30	a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen mit DMC-Aufnahmen; 20cm Objektpixelgröße.....	65
5.31	a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen mit UltraCamX-Aufnahmen; 20cm Objektpixelgröße.....	66
5.32	a: Darstellung des ersten bzw. b: des zweiten Wohnblocks und die entsprechenden Klassifizierungen mit UltraCamD-Aufnahmen; 20cm Objektpixelgröße.....	67
5.33	a: Laterne bzw. Strommast in panchromatischen DMC-Bildern; b: Laterne bzw. Strommast in RGB UltraCamX-Bildern.....	68
5.34	a: Kontrollschacht in panchromatischen DMC-Bildern; b: Kontrollschacht in RGB UltraCamX-Bildern	69
5.35	a: Abfluss am Straßenrand bzw. b: Abfluss auf der Straße in RGB UltraCamX-Bildern.....	70
5.36	a:Bildausschnitt der DMC; b: Bildausschnitt der UltraCamD.....	71

Tabellenverzeichnis

3.1	Technische Daten der verwendeten Kameras.....	27
3.2	Bildflüge im Testgebiet Franklin Mills.....	28
3.3	Bildflüge im Testgebiet Franklin Mills.....	28
4.1	Darstellung der Ergebnisse des radimetrischen Vergleichs.....	31
4.2	Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der DMC mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte	32
4.3	Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der UltraCamD mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte	32
4.4	Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der RGB UltraCamX-Bilder mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkt.....	33
4.5	Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der UltraCamX (pan) mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte.....	33
4.6	Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der RC30 mit 8 Passpunkten – Quadratmittel der Widersprüche unabhängiger Vergleichspunkte	34
5.1	Reihendarstellung der ausgewerteten Datensätze.....	38
5.2	Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der RC30-Aufnahmen.....	42
5.3	Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der DMC-Aufnahmen (nach Änderung der Helligkeit und des Kontrastes).....	46
5.4	Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der DMC-Aufnahmen (ohne Änderung der Helligkeit und des Kontrastes).....	47

Tabellenverzeichnis

5.5	Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der RGB UltraCamX-Aufnahmen.....	50
5.6	Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der panchromatischen UltraCamX-Aufnahmen.....	54
5.7	Statistische Daten der zwei ausgewerteten Wohnblöcke der UltraCamD-Aufnahmen.....	59
5.8	Ergebnisse der Auswertung des ersten Wohnblocks.....	60
5.9	Ergebnisse der Auswertung des zweiten Wohnblocks.....	60
5.10	Statistische Daten des ersten Wohnblocks; Objektpixelgröße 20cm.....	71
5.11	Statistische Daten des zweiten Wohnblocks; Objektpixelgröße 20cm.....	71

Abkürzungsverzeichnis der Fachausdrücke

AAT	Automatischen Aerotriangulation
AT	Aerotriangulation
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
AV	Auflösungsvermögen
BLUH	Bündelblockausgleichung Leibniz Universität Hannover
CCD	Charge Coupled Device (Ladungsgekoppeltes Bauelement)
DGM	Digitales Geländemodell
DMC	Digital Mapping Camera
DOP	Digital Orthophoto
ERSI	Environmental Systems Research Institute
FMC	Forward Motion Compensation (Vorwärtsbewegungskompensation)
FOV	Field Of View (Das Sichtfeld)
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sampling Distance
H	Hue (Farbton)
I	Intensity (Intensität)
IMU	Inertial Measurement Unit
LPS	Leica Photogrammetry Suite
MTF	Modulation Transfer Function
MÜF	Modulationsübertragungsfunktion
PSF	Point Spread Function (Punktverteilungsfunktion)
S	Saturation (Sättigung)
TDI	Time Delay and Integration
UCXp	UltraCamXprime

Literaturverzeichnis

- [1] J.P. Albert: Solid-state imaging with charge-coupled devices. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [2] J. Albers: Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 3. Auflage, 2007.
- [3] H.P. Bähr, T. Vögtle: Digitale Bildverarbeitung. Herbert Wichmann Verlag, 3. Auflage, 1998.
- [4] K. Bobey, L. Brekerbom: CCD versus CMOS - Bildsensoren und Kameras. In: Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D Messtechnik (T. Luhmann), Tagungsband Oldenburger 3 D Tage, 2005.
- [5] C. Dörstel, W. Zeitler, K. Jacobsen: Geometric calibration of the DMC: Method and results. International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing (34) Part I Com I, S. 324 – 333, Denver, 2002.
- [6] R. Finsterwalder, W. Hofmann: Photogrammetrie. Walther de Gruyter Verlag, 3. Auflage, 1968.
- [7] M. Gruber: UltraCamX, the new digital aerial camera system by Microsoft Photogrammetry. Photogrammetrische Woche Stuttgart, 2007.
- [8] C. Heipke: Vorlesungsskript. Photogrammetrie II, III, 2008.
- [9] C. Heipke: Digitale photogrammetrische Arbeitsstation. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C 450, 1996.
- [10] G. Hildebrandt: Fernerkundung und Luftbildmessung. Herbert Wichmann Verlag, 1. Auflage, 1996.

- [11] K. Jacobsen (2008): Tells the number of pixels the truth? - Effective Resolution of large size digital frame cameras. ASPRS Annual Convention, Portland, 2008.
- [12] K. Jacobsen (2008a): Geometrisches Potential und Informationsgehalt von großformatigen digitalen Luftbildkameras. Interner Bericht über Datenanalysen, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation Universität Hannover, 2008.
- [13] K. Jacobsen (2008b): Program RADCOR radiometric correction of images + Wallisfilter. Interner Bericht, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation Universität Hannover, 2008.
- [14] K. Jacobsen: Vorlesungsskript. Photogrammetrische Bildorientierungen, 2008
- [15] K. Jacobsen: Geometric handling of large size digital airborne frame camera images. Optical 3D Measurement Techniques, Band VIII, Zürich, S.164 - 171, 2007.
- [16] M. Köpfl, E. Kruck, M. Gruber: Geometric calibration of the digital large format aerial camera UltraCamD. ISPRS Commission III, Theory and Algorithms, 2004.
- [17] K. Kraus: Photogrammetrie. Band 1, Walther de Gruyter Verlag, 7. Auflage, 2004.
- [18] F. Leberl, M. Gruber: Flying the new large format digital aerial camera UltraCam. Photogrammetrische Woche Stuttgart, 2003.
- [19] T. Luhmann: Nahbereichphotogrammetrie. Herbert Wichmann Verlag Heidelberg, 2. Auflage, 2003.
- [20] M. Madani, C. Dörstel, C. Heipke, K. Jacobsen: DMC practical experience and accuracy assessment. International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Band XXXV, Teil B2. Istanbul, S. 396 - 401, 2004.
- [21] J.J. Marchesi: Handbuch der Photographie. Band 2, Photographie Verlag, 1. Auflage, 1995.
- [22] J.J. Marchesi: Handbuch der Photographie. Band 3, Photographie Verlag, 1. Auflage, 1998.

- [23] H.C. Oswald: Potential digitaler photogrammetrischer Luftbildkameras. Diplomarbeit Leibniz Universität Hannover, <http://www.ipi.uni-hannover.de> (Lehre, Master- u. Diplomarbeiten, 2007), Stand Juli 2008.
- [24] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, H. Schmidt: Optik für Ingenieure. Springer Verlag, 3. Auflage, 2004.
- [25] R. Sandau: Digitale Luftbildkamera. Herbert Wichmann Verlag, 2005.
- [26] http://www.leica-geosystems.com/corporate/de/ndef/lgs_57632.htm, Stand 25.06.2008.
- [27] <http://www.microsoft.com/ultracam/ultracam/default.aspx>, Stand 15.11.2008.

Danksagung

Nun ist es an der Zeit, einen Dank auszusprechen.

Bei Herr Dr.-Ing. Karsten Jacobsen möchte ich mich für die sehr gute Unterstützung während der Diplomarbeit bedanken. Vielen Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke dafür, dass ich meine Diplomarbeit im Institut für Photogrammetrie und Geoinformation anfertigen durfte. Ich möchte mich auch bei den Mitarbeitern des Instituts bedanken. Dabei gilt ein besonderer Dank Dipl.-Ing. Adelheid Elmhorst und Dipl.-Ing. Ulla Wißmann.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, bei meinen Geschwistern und meinen Eltern, die im Herzen bei mir sind.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln erstellt zu haben.

Hannover, den 15. November 2008

(Ayman Sabbagh)