



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Genauigkeiten digitaler flugzeuggestützter Bilddaten matrix- und zeilenbasierter Sensorsysteme“

- Untersuchung am Beispiel der HRSC-AX, UltraCamD und MFC 3 -

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Corinna Brüßhaber
U1250, UNIGIS MSc Jahrgang 2006

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:
Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Berlin, 30. Juni 2008

Kurzfassung

Aufgezeigt wird insbesondere die Abbildungsgenauigkeit verschiedener Kamerasysteme aus Sicht eines möglichen Anwenders in Wirtschaft, Industrie, Wissenschaft, Bildung oder öffentlicher Verwaltung. Ergänzend zeigen die Ergebnisse die Vor- und Nachteile matrix- und zeilenbasierter Sensorsysteme auf und mögliche Anwendungsbereiche. Die vorliegende Untersuchung stützt sich auf digitale Produkte der Zeilenkameras HRSC-AX und MFC 3, sowie der Matrixkamera Vexcel UltraCam_D. Auf der Basis der Orthobilder in RGB für die spektrale Information und des digitalen Oberflächenmodells (DOM) zur Ableitung der räumlichen Angaben werden die Datensätze, anhand der Gebäude auf die Genauigkeitsmerkmale Lage, Höhe und Fläche untersucht. Die Auswertung der Messwerte wird mit Hilfe statistischer Streuungsmaße realisiert. Das ausgewählte Testgebiet liegt in der Berliner Innenstadt und zeichnet sich durch eine klare Bauwerksstruktur aus. Als Referenz der resultierenden Daten dienen amtliche Lage- und Höheninformationen - die Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) von Berlin, die amtlich eingemessenen Höhenfestpunkte und ein Ausschnitt aus dem digitalen Berliner 3D-Innenstadtmodell des Senats von Berlin. Durchgeführt wird diese Untersuchung mit gängiger Bildverarbeitungssoftware zur Optimierung der Rasterdatensätze und mit dem Geoinformationssystem ArcGIS 9.2 von ESRI zur Verarbeitung und Generierung der Vektordatensätze. Für die abschließende statistische Auswertung kommt die Software MS Excel 2003 zum Einsatz.

Abstract

The present thesis points out the accuracy of different camera systems from view of a possible user in economics, industry, science, education and public administration. In addition, the results show the assets and drawbacks of matrix and line based sensor systems and suggest possible areas of application. The investigation relies on digital products generated using the line cameras HRSC-AX and MFC 3, as well as the matrix camera Vexcel UltraCam_D. The orthoimages in RGB for the spectral information and the digital surface models (DSM) to derive spatial data will be examined using the datasets of buildings in terms of the accuracy characteristics position, altitude and area. The obtained values are evaluated by means of statistic quantiles. The selected test area is situated in the city centre of Berlin and is characterized by a clear building structure. As reference of the derived position and altitude information official data records serve. These are the automated real estate map of Berlin (ALK Berlin), the ordinance datum and a subset from the 3D-city model provided by the senate of Berlin. The investigation is accomplished using appropriate image processing software for the optimization of the raster data records. The processing and generation of the vectors is done by the geographical information system ArcGIS 9.2 from ESRI. For the concluding statistic evaluation the calculation software MS Excel 2003 is used.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Josef Strobl für die Realisierung des Themas dieser Arbeit und dem gesamten UNIGIS-Lehrgangsteam der Universität Salzburg - Zentrum für Geoinformatik - für die Betreuung und Motivation im gesamten Fernstudium.



Ich danke meinen Kollegen und Vorgesetzten am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. in Berlin-Adlershof. Besonders danke ich Dipl.-Geol. Frank Lehmann für das Möglichmachen des Masterstudiums. Ich danke meinen Kollegen Dipl. Ing. Sebastian Pless, Dipl.-Ing. (FH) Michael Neid und vielen mehr für die fachliche Unterstützung. Außerdem Dipl.-Ing. Frank Preusker vom Institut für Planetenforschung für die fachliche Unterstützung und die Generierung der HRSC-AX-Daten in 16bit.

Dipl.-Ing. Takis Sgouros, Leiter der Architekturwerkstatt der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin für die Bereitstellung des Ausschnitts aus dem digitalen 3D-Innenstadtmodell von Berlin.

Dipl.-Ing. Albert Wiedemann - Projektleiter bei der BSF Swissphoto Group - für die Informationen zur UltraCam_D-Befliegung von Berlin 2006.

Der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, Abt. I für die Bereitstellung der ALK und ich danke Dipl.-Ing. Kathana Ung für die fachlichen Auskünfte.

Ein Dank geht an das Bezirksamt Berlin-Mitte und Bezirksamt Friedrichshain-Kreuzberg, der Abt. Landesvermessung für die Bereitstellung der Höhenfestpunkte und zugehöriger Informationen.

Der größte Dank gilt meinen Eltern für den starken Rückhalt und meinem Bruder Thilo für die viele Unterstützung während der Master Thesis und im gesamten Studium.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig ohne fremde Hilfe verfasst und nur die angegebene Literatur und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Berlin, 30. Juni 2008

Corinna Brüßhaber

ArcGIS ist eine eingetragene Marke der ESRI Corporation (Environmental Systems Research Institute). MS Excel und UltraCam_o sind eingetragene Marken der Microsoft Corporation. ERDAS IMAGINE ist eine eingetragene Marke der Leica Geosystems GmbH. RSI ENVI ist eine eingetragene Marke der Research Systems Corporation. Die Verwendung dieser und anderer Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Produktnamen oder eingetragener Warenzeichen ohne besondere Kennzeichnung geschieht ohne missbräuchliche Absicht. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese eventuell nicht frei von Schutzrechten Dritter sind. Deshalb berechtigt die Verwendung auch nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu erachten wären und deshalb frei verwendet werden dürfen. Die angeführten Warenzeichen, Namen und Symbole sind eingetragene Schutzmarken und somit gesetzliches Eigentum der jeweiligen Inhaber.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel	2
1.3	Gegenstand der Untersuchung	2
1.4	Eigener Beitrag.	3
1.5	Struktur der Arbeit	4
2	Technologie und Aufnahmeprinzip	5
2.1	Prinzip der Zeilenkamera	6
2.1.1	Optoelektronische Zeilenkamera	6
2.1.2	Der Multispektralscanner HRSC-AX	8
2.1.2.1	Aufnahmesystem und Funktionsweise	9
2.1.2.2	Photogrammetrische Prozessierung	11
2.1.2.3	Generierung des Digitalen Oberflächenmodells	13
2.1.2.4	Generierung des Orthobildes.	13
2.1.3	Der Zeilensensor MFC 3.	15
2.1.3.1	Aufnahmesystem und Funktionsweise	15
2.1.3.2	Photogrammetrische Prozessierung	17
2.2	Prinzip der Matrixkamera	19
2.2.1	Optoelektronische Matrixkamera	19
2.2.2	Der Flächensensor Vexcel UltraCam _D	20
2.2.2.1	Aufnahmesystem und Funktionsweise	20

2.2.2.2	Photogrammetrische Prozessierung	23
3	Beschreibung der Datensätze	24
3.1	Datenformate.	24
3.1.1	Rasterdaten.	24
3.1.2	Vektordaten	26
3.2	Untersuchungsgebiet.	27
3.2.1	Geographische Ausdehnung	27
3.2.2	Gebietsstruktur und Merkmale.	28
3.3	Bilddaten vorliegender Sensorsysteme	29
3.3.1	Bilddaten der HRSC-AX.	30
3.3.1.1	HRSC-AX Befliegung 2003	30
3.3.1.2	HRSC-AX Befliegung 2005	32
3.3.2	Bilddaten der Vexcel UltraCam _D 2006	35
3.3.3	MFC 3-Befliegung 2008.	36
3.4	Referenzdatensätze von Berlin.	38
3.4.1	Automatisierte Liegenschaftskarte Berlin (ALK) 2004	38
3.4.2	Digitales 3D-Innenstadtmodell Berlin 2008.	41
3.4.3	Amtliche Höhenfestpunkte	42
3.4.4	Passpunkte des Untersuchungsstandortes Berlin-Adlershof.	44
4	Untersuchung der Bilddaten.	45
4.1	Methodik und Kriterien	45
4.1.1	Software	46
4.1.1.1	Digitale Bildverarbeitung	46
4.1.1.2	Geoinformationssystem (GIS)	48
4.1.1.3	Tabellenkalkulation	49
4.1.2	Visuelle Analyse der Orthobilder und Oberflächenmodelle.	50
4.1.3	Lagegenauigkeit im RGB-Orthobild.	50
4.1.4	Höhengenauigkeit im Oberflächenmodell.	51
4.1.5	Ableitung der Flächen im RGB-Orthobild.	51
4.1.6	Evaluation der Genauigkeiten	52
4.2	Durchführung	53

INHALTSVERZEICHNIS

4.2.1	Projektionstransformation	53
4.2.2	Visuelle Analyse der Sensordaten	54
4.2.2.1	HRSC-AX	54
4.2.2.2	MFC 3	55
4.2.2.3	UltraCam _D 2006	56
4.2.3	Lagegenauigkeiten	57
4.2.3.1	Bestimmung der Gebäudeeckpunkte.	62
4.2.3.2	Berechnung der Punktkoordinaten in ArcGIS 9.2	62
4.2.3.3	Berechnung der Lageabweichung mit MS Excel	64
4.2.3.4	Lageverschiebung in Abhängigkeit der Gebäudehöhe	66
4.2.4	Höhengenauigkeiten	67
4.2.4.1	Parameter der Höhenfestpunkte	67
4.2.4.2	Höhen im DOM	68
4.2.5	Flächengenauigkeiten	75
4.2.5.1	Flächenberechnung in ArcGIS Desktop 9.2	75
4.2.5.2	Berechnung der Flächenabweichung mit MS Excel	76
5	Ergebnisse	79
5.1	Auswertung der visuellen Betrachtung	79
5.2	Auswertung der Lagegenauigkeit	80
5.3	Auswertung der Höhengengenauigkeit	83
5.4	Auswertung der Flächen	85
5.5	Fazit	86
6	Zusammenfassung	87
7	Ausblick	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Technische Daten der HRSC-AX	11
Tabelle 2.2: Technische Daten der MFC 3 (Quelle: DLR, 2007).	17
Tabelle 2.3: Technische Daten der UltraCam _D	21
Tabelle 3.1: Geschätzte Gebäudehöhe nach Anzahl der ALK-Geschosse.	40
Tabelle 4.1: VBA-Statements zur Berechnung der x, y-Koordinaten	63
Tabelle 4.2: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen in m.	64
Tabelle 4.3: Abweichung $_{\min/\max}$ zur ALK in m.	65
Tabelle 4.4: Mittlere Abweichung zur ALK in m..	65
Tabelle 4.5: Standardabweichung scheinbarer Verbesserungen abhängig der Höhe..	66
Tabelle 4.6: Höhenfestpunkte im Testgebiet.	67
Tabelle 4.7: Abgeleitete Höhen aus dem Oberflächenmodell.	70
Tabelle 4.8: Höhen in Adlershof vs. Höhen im DOM der MFC3 in m.	71
Tabelle 4.9: Standardabweichung scheinbarer Verbesserungen, mittlere Abweichung.	72
Tabelle 4.10: VBA-Statement für die Berechnung der Fläche.	76
Tabelle 4.11: Flächen der Gebäude im Rasterbild und der ALK in qm.	76
Tabelle 4.12: relative Flächenabweichungen der ALK.	76
Tabelle 4.13: Absolute Flächendifferenz zur ALK in Abhängigkeit der Geschosse .	77
Tabelle 4.14: Relative Abweichung zur ALK gesamt.	77
Tabelle 4.15: Flächen der Gebäude im Rasterbild (MFC 3) und der ALK in qm. . .	77
Tabelle 4.16: relative Flächenabweichungen der ALK zur MFC 3..	78
Tabelle 4.17: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen der Flächen..	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Aufnahmeprinzip einer Mehrzeilenkamera	6
Abbildung 2.2: HRSC-AX.	8
Abbildung 2.3: Pushbroom-Prinzip der HRSC-AX	9
Abbildung 2.4: Nadir-Mosaik einer HRSC-AX-Befliegung von Berlin-Adlershof. . .	12
Abbildung 2.5: MFC 3	16
Abbildung 2.6: Stereo-Epipolar-Geometrie	18
Abbildung 2.7: Aufnahmeprinzip einer Matrixkamera	19
Abbildung 2.8: UltraCam _D	22
Abbildung 3.1: QP71 - Wohnungsbauserie aus den 1970er Jahren.. . . .	29
Abbildung 3.2: Kartenblatt 423D, DOM der HRSC-AX 2003.	32
Abbildung 3.3: Gebietsabdeckung der Innenstadt Berlin mit der HRSC-AX 2005. . .	33
Abbildung 3.4: RGB-Mosaik der Berliner Innenstadt mit HRSC-AX 2005.	34
Abbildung 3.5: Flugplanung für die MFC 3-Befliegung in Adlershof.	36
Abbildung 3.6: Ausschnitt der MFC 3 von Berlin-Adlershof in RGB.	37
Abbildung 3.7: MFC 3 Oberflächenmodell Adlershof gesamt	37
Abbildung 3.8: Untersuchungsgebiet dargestellt in der ALK 2004.. . . .	39
Abbildung 3.9: Digitales Innenstadtmodell des Berliner Senats, Stand März 2008. . .	41
Abbildung 3.10: Festpunktbeschreibung zum Punkt 61019, Blatt 41818 der K10. . .	43
Abbildung 3.11: Ausschnitt aus Passpunkten am Standort Adlershof.	44
Abbildung 4.1: ERDAS IMAGINE 9.1 - <i>Reproject Image</i>	53
Abbildung 4.2: HRSC-AX-typische Abbildung bewegter Objekte	55
Abbildung 4.3: MFC 3 2008 - Artefakte bei der Kantendarstellung.	56

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 4.4: MFC 3 2008 Artefakt im DOM.	56
Abbildung 4.5: UltraCam _D Berlin 2006 - Versätze im RGB.	57
Abbildung 4.6: HRSC-AX 2003, Darstellung der Gebäudekanten.	58
Abbildung 4.7: HRSC-AX 2005, Darstellung der Gebäudekanten.	59
Abbildung 4.8: UltraCam _D 2006, Darstellung der Gebäudekanten.	59
Abbildung 4.9: MFC 3, DLR-Standort Berlin-Adlershof.	60
Abbildung 4.10: MFC 3 Artefakt in der Kantendarstellung.	61
Abbildung 4.11: UltraCam _D , digitalisierte Kanten und Eckpunkte.	62
Abbildung 4.12: Lageverschiebung der Datensätze zueinander.	63
Abbildung 4.13: ArcGIS 9.2, Attributtabelle der Gebäudeeckpunkte.	64
Abbildung 4.14: Höhenfestpunkte im Testgebiet Innenstadt (DOM).	68
Abbildung 4.15: Geoidundulation	69
Abbildung 4.16: Höhenableitung im DOM der UltraCam _D	69
Abbildung 4.17: Verteilung der Passpunkte in Adlershof (DOM).	72
Abbildung 4.18: Horizontales Profil (in x) des HRSC-AX-DOMs 2003.	73
Abbildung 4.19: Vertikales Profil (in y) des HRSC-AX-DOMs 2003.	73
Abbildung 4.20: Horizontales Profil (in x) des UltraCam _D -DOMs 2006.	74
Abbildung 4.21: Vertikales Profil (in y) des UltraCam _D -DOMs 2006	74
Abbildung 4.22: Field Calculator in ArcGIS 9.2, VBA Statement für <i>Area</i>	75
Abbildung 5.1: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen in m	81
Abbildung 5.2: HRSC-AX 2003, Standardabweichung abhängig der Höhe in m.	82
Abbildung 5.3: MFC 3 2008, Standardabweichung abhängig der Höhe in m.	83
Abbildung 5.4: Graphische Darstellung der Höhen im DOM.	84
Abbildung 5.5: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen der Flächen	85

Formelverzeichnis

Formel 4.1: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen.	52
--	----

Abkürzungsverzeichnis

ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
AT	Aerotriangulation
BSF	Berliner Spezialflug
CCD	Charge Couple Device
CCNS4	Computer Controlled Navigation System, 4th generation
CCU	Central Computer Unit
CDU	Command and Display Unit
CIR	ColorInfraRot
DGPS	Differential Global Positioning System
DLR e.V.	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DHHN92	Deutsches Haupthöhennetz 1992
DN	Digital Number
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DOY	Day of Year
ESA	European Space Agency
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FEE	Front End Electronic
FoV	Field of View
FMC	Forward Motion Compensation
GIS	Geoinformationssystem <i>oder</i> Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sampling Distance
HG	Höhe über Grund

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

HRSC-AX	High Resolution Stereo Camera-Airborne Extended
ID	Identification Number
IGI	Ingenieur Gesellschaft für Interfaces mbH
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigations System
IR	InfraRot
LR	Lower Right
MEX	Mars Express
MFC	Multi Functional Camera Head <i>oder</i> Modular Functional Camera
MS	Microsoft
NIR	Nahes InfraRot
NHN	Normalhöhennull
NN	Normal Null
P_B	Photometrie Backward
P_F	Photometrie Forward
PAN	panchromatisch
RAW	Rohdatenformat
RGB	Rot Grün Blau
ROI	Region of Interest
RSI	Research Systems
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst
S_B	Stereo Backward
SenStadt	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung
S_F	Stereo Forward
TDI	Time Delayed Integration
TIFF	Tagged Image File Format
UCD	UltraCam _D
UL	Upper Left
UTC	Universal Coordinated Time
UTM	Universal Tranverse Mercator
VICAR	Video Image Communication And Retrieval
WBS70	Wohnungsbauserie 70
WGS84	World Geodetic System 1984

1 Einleitung

„Die Erfassung der Umgebung mit Hilfe geeigneter Sensoren und die Ableitung von geometrischen, radiometrischen und spektralen Parametern aus den Sensordaten sind für viele wissenschaftliche, hoheitliche und industrielle Aufgabenstellungen von großer Bedeutung.“ (Börner et al., 2006)

Dieses einleitende Kapitel gibt einen Einblick in die Thematik, die Datengrundlage und das wissenschaftliche Umfeld der Arbeit. Erläutert wird die Motivation zur Auswahl dieses Themas, der zu untersuchende Gegenstand, das Ziel und der eigene Beitrag, der zum Gelingen dieser Untersuchung führt. Gegeben wird ein Überblick über die Technologie, die angewandte Methodik und die abschließende Durchführung.

1.1 Motivation

Digitale flugzeuggestützte Erdfernerkundungsdaten und die daraus abgeleiteten digitalen Oberflächenmodelle zur Errechnung geometrisch genauer Bilddaten sind für viele Fachbereiche zunehmend interessanter und zukunftsweisend.

Die bisher aufwendige terrestrische Landesvermessung für die Aufnahme geographischer Details könnte künftig durch das hochgenaue Messen in digitalen Bilddaten ihre Ablösung finden. Hauptanliegen der Entwicklung hochauflösender Sensorsysteme ist die Umsetzung dieses Anspruchs und die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit in der Erfassung zwei- und dreidimensionaler Informationen. Der Einsatz multispektraler Bilddaten für die Durchführung der Bestandsaufnahme in

urbanen Bereichen und zur Realisierung von Klassifikationen für umweltrelevante Fragestellungen ist bereits weit verbreitet. Die Produkte flugzeuggestützter, digitaler Sensorsysteme sind durch ihr hohes Auflösungsvermögen, die schnelle Generierbarkeit im Vergleich zu analogen Bildaufnahmesystemen und den damit verbundenen interdisziplinären Informationsgehalt besonders für die Integration in ein GI-System geeignet.

1.2 Ziel

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den geometrischen Genauigkeiten zugrunde liegender Bilddatensätze mit der Untersuchung und Auswertung von Lage-, Höhen- und Flächengenauigkeiten am Beispiel geeigneter Gebäude in einem urbanen Gebiet. Daneben wird auf die charakteristischen Eigenschaften der hier beschriebenen optoelektronischen Aufnahmesysteme hingewiesen und die visuellen und radiometrischen Merkmale der verwendeten Bilddaten aufgezeigt.

Das Gewinnen von Information aus flugzeuggestützten Aufnahmesystem wird meist durch die Draufsicht eines Objektes gewonnen. So auch bei der Ableitung von Gebäudegeometrien, die nur so präzise sein können, wie die Darstellung im aufgenommenen Bild.

Das hier als Referenz verwendete digitale 3D-Innenstadtmodell von Berlin dient dem Berliner Senat als Planungsgrundlage und könnte in Zukunft auf Basis luftgestützter Erdfernerkundungsdaten generiert werden. Möglich wird das auf Grundlage präziser Höheninformation und exakter Gebäudegeometrien und das Extrahieren spektraler Fassadeninformation für die Textur von Gebäuden.

Ziel der Arbeit ist die Feststellung der Genauigkeit der Produkte matrix- und zeilenbasierter Sensorsysteme. Die Systeme und deren Produkte sind nachfolgend beschrieben.

1.3 Gegenstand der Untersuchung

Für die Untersuchung der Genauigkeit werden hochaufgelöste Orthobilder des Stadtgebiet Berlins des Multispektralscanners HRSC-AX aus Befliegungen der Jahre 2003 und 2005 herangezogen. Um Unterschiede herauszustellen, die möglicherweise

auf dem Aufnahmeprinzip beruhen, fließt der Datensatz der Matrixkamera Vexcel UltraCam_D einer Befliegung der Innenstadt Berlin 2006 ein. Abschließend und zugleich dokumentiert ein Bildausschnitt von Berlin-Adlershof, aufgenommen mit der modularen Zeilenkamera MFC 3, den Stand der Technik in der Forschung digitaler Sensoren. Sie repräsentiert die aktuellste Entwicklung der Einrichtung *Optische Informationssysteme* am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Berlin-Adlershof. Zur Analyse liegen für alle Systeme die radiometrisch korrigierten und kartenprojizierten Orthobilder in Echtfarbe (RGB) und das dazugehörige Digitale Oberflächenmodell (*kurz* DOM) vor. Als Referenz dienen neben den Vektoren der ALK als Lage- und Flächenreferenz in der Berliner Innenstadt auch für die Höheninformationen amtlich eingemessene Höhenfestpunkte der Berliner Bezirksverwaltungen. Für den Gebietsausschnitt Berlin-Adlershof dienen hier manuell eingemessene Lagepasspunkte mit der durch GPS ermittelten Höheninformation.

Sowohl die Planung des Bildfluges und dessen Durchführung als auch die abschließende photogrammetrische Bildprozessierung für die Zeilenscanner HRSC-AX und MFC 3 sind am DLR e.V. durchgeführt. Auf besondere Details dieser Verarbeitungskette wird hier gesondert eingegangen. Die Befliegung zur Generierung der Bilddaten der Matrixkamera UltraCam_D wurde im Jahr 2006 durch die BSF Luftbild GmbH, heute die BSF Swisphoto Group organisiert und durchgeführt.

1.4 Eigener Beitrag

Teil dieser Arbeit ist die Entwicklung der geeigneten Untersuchungsmethode und die Bestimmung entsprechender Kriterien für die Ableitung und Bewertung der Genauigkeiten. Dies geschieht unter Verwendung der beschriebenen Rasterdatensätze der matrix- und zeilenbasierten Aufnahmesysteme. Besonderes Interesse liegt auf der Methodik zur Bestimmung der Lage- Höhen- und Flächengenauigkeiten. Realisiert wird die Untersuchung mit dem Geoinformationssystem ArcGIS 9.1 und der Bilderverarbeitungssoftware ERDAS IMGAGINE 9.2 und RSI ENVI 3.6. Parallel werden spezifische sensorabhängige radiometrische und geometrische Auffälligkeiten beschrieben und deren Auswirkung auf die Qualität der abgeleiteten Produkte analysiert. Abschließend wird die Eignung der beschriebenen Sensoren in Anwendung verschiedener wirtschaftlicher- und wissenschaftlicher Fragestellungen dargelegt.

1.5 Struktur der Arbeit

Dieser Abschnitt gibt einen kurzen Überblick zur Struktur der vorliegenden Untersuchung.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit den zwei grundlegenden Aufnahmekonzepten für die digitalen Luftbildkameras, dem Matrix- und dem Zeilenkonzept. Beschrieben sind die nach diesen Konzepten arbeitenden optoelektronischen Sensorsysteme der Zeilenkamera HRSC-AX, der MFC 3 und der Matrixkamera Vexcel UltraCam_D mit ihren Komponenten für Bildaufnahme, Navigation und Datenspeicherung. Zusätzlich besteht ein Überblick über die Funktionsweise dieser Systeme und die daraus resultierenden Abbildungsmerkmale. Beschrieben wird auch die photogrammetrische Verarbeitung der Daten die zur Generierung der digitalen Oberflächenmodelle und abgeleiteten Orthobilder führt.

Kapitel 3 beschreibt die Gründe für die Wahl des Testgebietes in der Innenstadt von Berlin mit der für diese Untersuchung geeigneten Gebäudestruktur.

Den Hauptteil dieses Kapitels bildet die detaillierte Beschreibung der hier verwendeten Datensätze. Dazu gehören neben den Bilddatensätzen mit ihren spezifischen Parametern aus Flugplanung, Flugdurchführung und photogrammetrischer Prozessierung auch die Referenzdatensätze, die präzise Lage- und Höheninformationen gewährleisten.

Im Zuge dieses Kapitels werden die Eigenschaften der Raster- und Vektordatenmodelle erläutert und die für die Fernerkundung gängigen Datenformate aufgezeigt.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der eigentlichen Methodik der visuellen und geometrischen Bilddatenanalyse und beschreibt systematisch die Durchführung. Während der Untersuchung auftretende Probleme und die erzielten Resultate der Datensatzverarbeitung werden dokumentiert.

Die Bewertung der statistischen Ergebnisse wird im Kapitel 5 sowohl textlich als auch graphisch belegt und mit dem Fazit bekräftigt. Die Zusammenfassung und der Ausblick schließen die Untersuchung ab.

2 Technologie und Aufnahmeprinzip

Zu den in dieser Arbeit aufgeführten digitalen Aufnahmesystemen gehören auch jeweils alle die Komponenten, die an der Bilderzeugung, Bildkompensation und deren Übertragung auf ein entsprechendes Speichermedium beteiligt sind. Es werden in diesem Kapitel die Funktionsweise, das Prinzip der Bildaufnahme digitaler Kameras und die zugehörige kameraspezifische Technologie beschrieben. Begleitend werden typische Bildeigenschaften, die aus den hier dargestellten Aufnahmeprinzipien resultieren aufgezeigt.

Die Sensoreinheiten moderner photogrammetrischer Luftbildkameras bestehen aus einer Vielzahl von Bilddetektoren. Jedes dieser spektral hochempfindlichen Detektorelemente erzeugt proportional zur empfangenen Lichtmenge elektrische Ladung, die anschließend elektronisch ausgelesen, aufbreitet und digitalisiert wird. (Vgl. Albertz, 2007)

Diese Halbleiterelemente, bei Zeilensensoren, bevorzugt aus Silizium, decken einen Spektralbereich von 400 bis 1100 nm ab. (Vgl. Sandau (Hrsg.), 2005 & Kraus, 2004) und eignen sich daher besonders für die digitale Bildaufzeichnung der optischen Strahlung, dem Bereich des sichtbaren Lichtes und des nahen Infrarots. (Vgl. Kraus, 2004)

Bei der HRSC-AX, der MFC 3 und der UltraCam_D erfolgt die Erfassung der Bildinformation mittels dieser optoelektronischen Sensoren. Ein aber wesentlicher Unterschied, der nachfolgend beschriebenen großformatigen, digitalen Luftbildkameras, liegt in dem Aufnahmeprinzip, das sich durch zwei Grundkonzepte, dem Matrix- und dem Zeilenkonzept, voneinander unterscheiden.

2.1 Prinzip der Zeilenkamera

Heutige digitale Zeilenkameras basieren auf dem auf Otto Hofmann zurückzuführenden Konzepts der digitalen Dreizeilenkamera. (Vgl. Hofmann, 1982)

Nach diesem Prinzip werden alle Objektbodenpunkte in einem Flugstreifen genau dreimal aus drei verschiedenen Richtungen d. h. aus drei unabhängigen Blickwinkeln abgebildet. Eine erste Zeile ist in einer Ebene leicht nach vorne geneigt angeordnet, die zweite Zeile schaut senkrecht nach unten und die dritte Zeile analog zur ersten Zeile leicht geneigt nach hinten. (Vgl. Albertz, 2007) Dies ermöglicht die räumliche Rekonstruktion eines Objektes innerhalb eines Flugstreifens. Das Vorhandensein zweier Flugstreifen zur dreidimensionalen Darstellung ist, wie bei einer einfachen Zeilenkamera, mit nur einer Blickrichtung und einem Sichtstrahl nicht mehr zwingend gegeben.

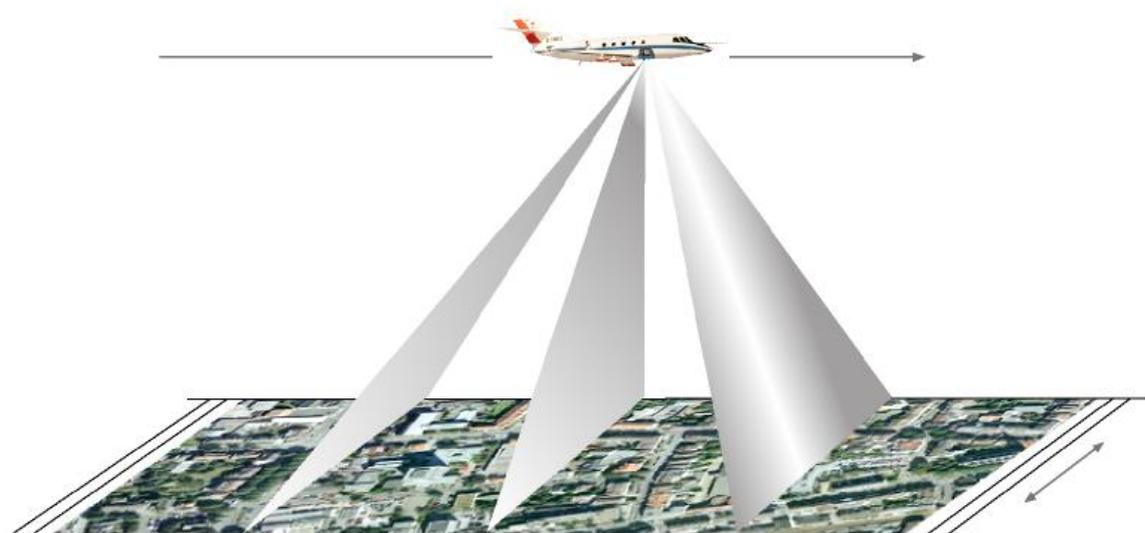


Abbildung 2.1: Aufnahmeprinzip einer Mehrzeilenkamera

2.1.1 Optoelektronische Zeilenkamera

Bei dem Aufnahmeverfahren optoelektronischer Zeilenkameras registriert das System kontinuierlich nur die von kleinen Flächenelementen des Geländes ausgehende Strahlung. Zur Bildaufnahme von Flugzeugen oder Satelliten werden Zeilen von CCD Sensoren in der Bildebene (oder Fokalebene) eines einzigen Objektivs angeordnet.

Damit ist es möglich, alle Pixel einer zur Flugrichtung orientierten Bildzeile gleichzeitig zu erfassen. (Vgl. Albertz, 2001)

Das Prinzip der Zeilenkamera baut auf der Anwendung von Zeilensensoren auf und ermöglicht somit ein Aufzeichnen unendlich langer kontinuierlicher Bildflugstreifen. Über die Flughöhe und dem Öffnungswinkel wird gleichzeitig die zweite Dimension, die Streifenbreite definiert. Digitale Zeilenscanner bieten bezüglich der Aufnahmegeometrie den Vorteil, dass die zeilenweise Abdeckung eines Geländestreifens bei entsprechender Aufnahmefrequenz über die Fortbewegung des Sensorträgers entsteht und demzufolge in Flugrichtung eine Abbildung in Parallelperspektive bzw. in einer Zeilenperspektive erfolgt.

Auch die HRSC-AX gehört zu den optoelektronischen Multispektralscannern bei der das so genannte Pushbroom-Prinzip (Vgl. Pushbroom-Prinzip in Bähr/Vögtle (Hrsg.), 2005) welches in Flugrichtung eine Abbildung in Parallelprojektion gewährleistet, eingesetzt wird. Abbildung 2.1 veranschaulicht diesen Vorgang.

Das im Nadir, als senkrecht nach unten gerichteter Sensor, aufgenommene Bild hat damit nach Korrektur der Flugbewegung bereits die Qualität eines Orthobildes. Die Verklappungen in den nadirnahen Farbzeilen sind gering. Radiale Bildpunktversetzungen treten in der Nadirzeile nur innerhalb der Zeile auf und sind auf die Bildbereiche quer zur Flugrichtung beschränkt. (Vgl. Scholten et al., 2002) Die Größe von abgeschatteten Bereichen, insbesondere in Gebieten mit dichter Bebauung, ist folglich minimiert. Die sonst benötigten Passpunkte zur Generierung der Orthobilder sind hier nicht gefordert, lediglich zur Kontrolle. (Vgl. Krüger, 2003)

Bei optoelektronischen Zeilenkameras tritt keine Panoramaverzerrung auf, da alle Bildelemente einer Zeile in gleichen Streckeninkrementen und gleichzeitig registriert werden. (Vgl. Albertz, 2007)

Eine weitere Besonderheit der Zeilenkamera liegt darin, dass sich die sechs Elemente der äußeren Orientierung beim Vorgang des Scannens der Erdoberfläche permanent von Bildzeile zu Bildzeile ändern. (Vgl. Kraus, 2004) Erfasst werden diese Positions- und Orientierungsdaten bei der HRSC-AX und der MFC 3 über die direkte Sensororientierung mit Hilfe der GPS/INS-Systeme der Firma Applanix und IGI auf das im folgenden Abschnitt genauer eingegangen wird.

2.1.2 Der Multispektralscanner HRSC-AX

Die High Resolution Stereo Camera-Airborne Extended (*kurz* HRSC-AX) wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt am Institut für Planetenforschung Berlin-Adlershof für die russische Mission Mars96 konzipiert und entwickelt. Nach Scheitern dieser Mission wurde die Kamera für die Erdfernerkundung modifiziert und in verschiedenen Ausführungen, u. a. als HRSC-A und HRSC-AXW weiterentwickelt und in vielen Anwendungen eingesetzt. (Vgl. Hoffmann et al., 2000) Eine neue Version der Mars-HRSC befindet sich seit Juli 2003 erfolgreich an Bord der ESA-Mission Mars Express (*kurz* MEX) und übermittelt täglich neue Bilddaten. Das Bildaufnahmesystem der HRSC-AX beinhaltet als Hauptkomponente die eigentliche Kamera sowie Peripheriekomponenten für Stabilisierung, Datenspeicherung, Kamerasteuerung und für die Aufzeichnung der Navigationsdaten (Vgl. Scholten et al., 2001).



Abbildung 2.2: HRSC-AX

(Quelle: DLR)

Die HRSC wurde soweit modifiziert, dass sie für den Flugzeugeinsatz notwendige Komponenten eines flugzeugspezifischen Systems erhielt. Dazu gehört ein Sony Hochgeschwindigkeits-Bandrecorder zur Aufzeichnung eingehender Bilddaten.

In aktuelleren Befliegungen der Jahre 2006 und 2007 kam ferner ein Festplattensystem erfolgreich zum Einsatz. Betrieben wird die HRSC-AX nun in einer Stabilisierungsplattform der Firma Zeiss. Zur fortlaufend Registrierung der Positions- und Orientierungsdaten, kommt ein System, bestehend aus einem GPS-Empfänger und einem Inertialnavigationssystem (*kurz* INS) zum Einsatz.

Um die Genauigkeit der Bilddaten zu steigern erhielt das Kamerasystem eine neue Optik und neue Filter. Zusätzlich wurde durch Verbesserung der Signaloptik die maximal mögliche Zeilenfrequenz, mit der der Boden während der Aufnahme abgetastet wird, vervierfacht. Diese ermöglicht Aufnahmen mit einer Pixelgröße in Flugrichtung von nur wenigen Zentimetern. Überdies wurde die radiometrische Auflösung auf 12bit gesteigert (Vgl. Neukum et al., 2000), die standardmäßig im Zuge der Prozessierung auf 8bit reduziert wird.

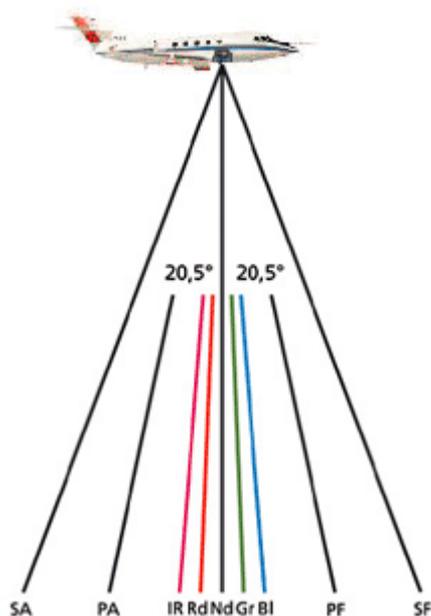


Abbildung 2.3: Pushbroom-Prinzip der HRSC-AX
(Quelle: DLR)

2.1.2.1 Aufnahmesystem und Funktionsweise

Die HRSC-AX ist eine digitale, multispektrale Stereo-Luftbildkamera für photogrammetrische und allgemeine Anwendungen in der Fernerkundung. Ihr Mehrzeilensystem basiert auf dem bereits diskutierten Dreizeilenkonzept und

ermöglicht damit die gleichzeitige Erzeugung kontinuierlicher Bildstreifen für alle Kanäle. Die Ableitung von Höhen- und Lageinformationen für verschiedene Fragestellungen ist darüber hinaus möglich. Das System der HRSC-AX ermöglicht sowohl panchromatische, multispektrale Orthobilder, als auch digitale Oberflächenmodelle entsprechender Genauigkeit zu erzeugen. Ein entscheidender Vorteil des optoelektronischen Systems ist die Möglichkeit eines schnellen Zugriffs auf digitale Daten. Die Aufnahme von Rohdaten zur späteren Erzeugung der True-Orthobilder, Echtfarbenbilder, Falschfarbenbilder mit Infrarot und die Erzeugung eines digitalen Oberflächenmodells erfolgt während einer einzigen Befliegung.

Die HRSC-AX arbeitet nach dem Pushbroom-Prinzip. Dabei sind neun CCD-Zeilen Detektoren hintereinander parallel auf einer Fokalebene bei Nutzung einer gemeinsamen Optik montiert (Vgl. Mayer, 2004). Das System verfügt über fünf Stereokanäle und vier multispektrale Kanäle von Blau bis zum nahen Infrarot. Vier der neun CCDs sind mit unterschiedlichen Farbfiltern bestückt. Dazu gehören Rot, Grün, Blau und das nahe Infrarot (*kurz* NIR). Sie dienen zur Gewinnung der Multispektraldaten. Die restlichen fünf CCD-Zeilen sind panchromatisch lichtempfindliche Kanäle für die photogrammetrische Verarbeitung. Die unterschiedlichen Stereowinkel dienen der Stereoauswertung und sind Voraussetzung für die anschließende Generierung des Digitalen Oberflächenmodells (*kurz* DOM). Bei der Vorwärtsbewegung des Flugzeugs über den Boden werden diese neun sich überlappenden Bildstreifen unter unterschiedlichen Blickwinkeln bzw. Aufnahmewinkeln parallel aufgezeichnet. (Vgl. Scholten et al., 2002)

Die empfangenen Bildinformationen werden gemäß Standard fortlaufend auf einem Sony Hochgeschwindigkeits-Bandrecorder mit einer Geschwindigkeit von 256 Mbit/s aufgezeichnet. Die Kamera ist auf einer kreiselstabilisierten Plattform montiert, um die hochfrequenten Bewegungen, die mechanischen Schwingungen und Vibrationen des Flugzeuges zu dämpfen und durchgängig den nadirnahen Blickwinkel der optischen Achse des Objektivs zu gewährleisten. Wegen der hohen Flugdynamik werden Position, Lage und Orientierung während des Fluges von einem integrierten Navigationssystem mit integriertem GPS-Empfänger und INS der Firma Applanix kontinuierlich gemessen und registriert.

Für den Empfang differentieller GPS-Daten werden Daten von einer Boden-GPS-Station eingeholt. Beim *Differentiellen Globalen Positionierungssystem* (*kurz* DGPS) werden relative Koordinaten zwischen zwei oder mehreren Empfängern, die gleichzeitig

dasselbe GPS-Signal empfangen, berechnet (Vgl. Kraus, 2004). Die während dieser Prozedur aufgezeichneten Daten erlauben später in der automatisierten Datenprozessierung die Georeferenzierung der Bilddaten der HRSC-AX.

Um auch minimale Bewegungen der Kamera während der Bildaufnahme nachvollziehen zu können, ist das INS direkt auf dem Kamerakopf montiert. Die so gewonnenen Orientierungsdaten der Kamera können zu jeder Zeit nach Aufnahme reflektiert und nach der Prozessierung mit einer absoluten Genauigkeit von 2-3 cm festgestellt werden (Vgl. Scholten et al., 2001).

Die HRSC-AX besitzt die folgenden technischen Details:

Brennweite	151mm
Anzahl der CCD-Zeilen	5 Stereo/ 4 Farbe
Pixel je CCD-Sensor	12172
CCD-Pixelgröße	6,5µm
Öffnungswinkel	29° / 41°
Stereowinkel in Grad	20,5°
Streifenbreite (3000m Flughöhe)	1572m
Radiometrische Auflösung	12bit
Auslesefrequenz	1640 Zeilen/s
Datenformat	RAW
Gewicht	20 kg

Tabelle 2.1: Technische Daten der HRSC-AX
(Quelle: DLR)

2.1.2.2 Photogrammetrische Prozessierung

Die systematische Vorverarbeitung von HRSC-Bilddaten beinhaltet die Generierung der Eingangsdaten für die photogrammetrische Prozessierung. Die hierzu notwendigen Arbeitsschritte werden vollautomatisch durchgeführt (Vgl. Scholten et al., 2002).

Das am ehemaligen Institut für Weltraumsensorik und Planetenerkundung, heutiges Institut für Planetenforschung, entwickelte HRSC-Gesamtsystem beinhaltet die Komponenten der Bildaufnahme und der digitalen Verarbeitung (Vgl. Scholten et al., 2002).

Diese Prozessierungskette wurde von Franz Wewel entwickelt. (Vgl. Wewel et al., 1998) Der Verarbeitung der Rohdaten ist in zwei Arbeitsschritte untergliedert. So findet vor der eigentlichen photogrammetrischen Prozessierung eine Vorprozessierung statt. Dazu gehört das Auslesen der Original-Tapes, das De-Multiplexen der Aufnahmedaten zu Bilddaten der neun einzelnen Sensoren, die Anwendung der radiometrischen Kalibrationsdaten, sowie die Auswertung der Navigationsdaten. (Vgl. Wewel et al., 1998)

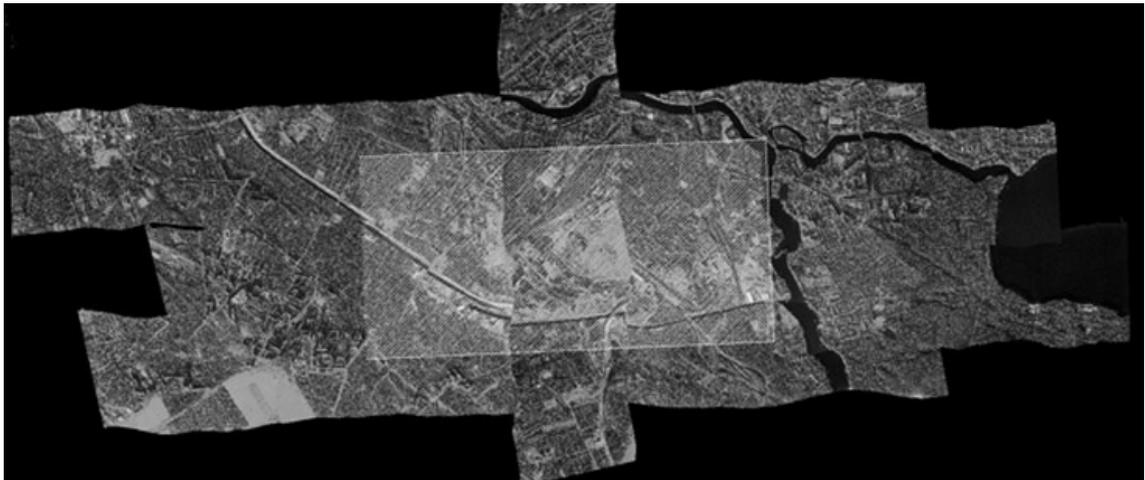


Abbildung 2.4: Nadir-Mosaik einer HRSC-AX-Befliegung von Berlin-Adlershof
(Quelle: DLR)

Die Abbildung der Oberfläche in fünf verschiedenen Stereo-Kanälen und vier multispektral ausgelegten Kanälen erlaubt die komplette Erzeugung der photogrammetrischen Basis-Produktpalette. Dazu zählt die Generierung Digitaler Oberflächenmodelle, die Herstellung von True-Orthobildern, in Form von Grauwertbildern einzelner Spektralkanäle oder beliebiger Farbkompositionen, insbesondere Echtfarbbildern in RGB und Farbinfrarotbildern (*auch* CIR) in hoher Auflösung und auch die Erzeugung von Anaglyphen d. h. Bilder mit einem durch Stereoskopie erzeugten dreidimensionalen Bildeffekt. Die digitale Bilddatenaufnahme und die präzise Erfassung der Orientierungsdaten stellen dabei die Grundvoraussetzung für einen hochautomatisierten Prozessierungsablauf dar. (Vgl. Scholten et al., 2002)

2.1.2.3 Generierung des Digitalen Oberflächenmodells

Die HRSC-AX bietet durch ihre fünf Photometriekanäle verschiedener Blickrichtung und korrespondierender Bildpunkte die Erzeugung eines grauwertkodierten digitalen Oberflächenmodells. Nach der geometrischen Verknüpfung der Bilddaten mit den Navigationsdaten werden die Bilddaten der fünf Stereokanäle, zur Eliminierung hochfrequente Bildstörungen, fluglagekorrigiert. In diesen vorkorrigierten Bilddaten der fünf Stereosensoren sind über Sichtstrahlen unzählige homologe Punkte für die Berechnung des DOMs einander zugeordnet. Als Objektpunkte bestehen während der anschließenden Generierung des Oberflächenmodells nur solche Punkte, die in mindestens drei der fünf Stereobilder gefunden werden. Bei der Ableitung des Oberflächenmodells wird aus der Objektpunktwolke ein regelmäßiges Raster interpoliert und anschließend in eine Kartenprojektion auf ein Bezugsellipsoid transformiert (Vgl. Wewel et al., 1998).

2.1.2.4 Generierung des Orthobildes

Die so gewonnenen digitalen Oberflächenmodelle werden als Grundlage für die sich anschließende Generierung des True-Orthobildes verwendet. Das im Nadir aufgenommene lagekorrigierte Bild weist im Wesentlichen schon die Charakteristik eines Orthobildes auf. Nach der Berechnung des Digitalen Oberflächenmodells liegen die Bilddaten in einer Kartenprojektion auf einem frei wählbaren Bezugsellipsoid vor. Da die Farbsensoren der HRSC-AX jeweils unterschiedliche Blickwinkel aufweisen, ist die Generierung des Orthobildes für die Kombination der verschiedenen Farbkanäle notwendig. Da es sich bei einem Zeilenscanner um kein Photo sondern vielmehr um eine gescannte Oberfläche handelt, wird weniger von einem Photo gesprochen. Es handelt sich um keine Momentaufnahme sondern um eine fortlaufende Bildaufzeichnung.

True-Ortho-Prinzip

Herkömmliche Luftbilder weisen aufgrund der Aufnahmetechnik eine Zentralperspektive auf, dies führt zu einem Radialversatz, besonders zu erkennen bei Objekten die sich von der Erdoberfläche abheben z. B. hohe Bebauung und Vegetation.

Bei diesem Prozess werden durch das Relief Lagefehler verursacht, die sich als Stauchung oder Streckung auswirken. Ist die Geländehöhe bekannt, so ist es möglich mit Hilfe der Differentialentzerrung diese Verzerrungen und Lagefehler zu korrigieren. Alle Strahlen stehen folglich senkrecht zur Projektionsebene. Das heißt, es entsteht geometrisch eine weitgehend orthogonale Projektion der Objekte auf eine abwickelbare Bezugsfläche und zugleich eine Transformation auf ein orthogonales Koordinatensystem (Vgl. Pflug et al., 2004). Das entstandene Bild weist damit die geometrischen Eigenschaften einer Karte auf und wird durch die vorherrschende Orthogonalprojektion als Orthobild bezeichnet. Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren ist jedoch, Bodenpunkte sind im Bild maßstabsgetreu wiedergegeben, höhere Objekte wie Gebäude oder Bäume aber nach wie vor mit Lagefehlern versehen sind. Die perspektivische Ansicht von Gebäuden bleibt ebenso erhalten und dies führt zu Abschattungen bzw. sichttoten Bereichen (Vgl. Pflug et al., 2004).

Um diesen Effekt zu korrigieren kommt das True-Ortho-Prinzip zum Einsatz. Dafür wird ein flächendeckendes und hochaufgelöstes digitales Oberflächenmodell verwendet. „Das Digitale Oberflächenmodell ist die aus einem primären digitalen Oberflächenmodell mit Hilfe eines mathematischen Ansatzes abgeleitete digitale Darstellung der Objektoberfläche durch ein engmaschiges Punktraster. Es ist die äußerste Umhüllende bei der Aufnahme durch einen Scanner, die somit die Vegetations- und Bebauungsoberfläche darstellt.“ (Vgl. Geoinformatiklexikon der Universität Rostock). Die Generierung der Orthobilder unter Verwendung hochauflösender DOM stellt eine Sonderform der Entzerrung dar, bei der nicht nur die Form der abgebildeten Geländeoberfläche, sondern auch Einflüsse durch Bebauung und Bewuchs berücksichtigt werden. Dadurch werden auch Bilddaten, die unter unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen aufgenommen werden, stets lagerichtig im Rahmen der Genauigkeit des digitalen Oberflächenmodells in der geforderten Kartenprojektion abgebildet (Vgl. Scholten et al., 2002).

2.1.3 Der Zeilensensor MFC 3

Der Kameratyp MFC zählt zu den aktuellen Entwicklungen der Einrichtung Optische Informationssysteme des DLR e.V. in Berlin-Adlershof. Zu dieser Baureihe gehören die MFC1, MFC 3 und die MFC 5, wobei diese Untersuchung auf Daten der MFC 3 basiert. Der *Multifunktionale Kamerakopf* oder auch *Modular Functional Camera Head* (kurz MFC) ist ein zeilenbasiertes modulares optoelektronisches Sensorsystem und wurde für terrestrische und flugzeuggestützte Anwendungen in der 2D und 3D-Fernerkundung entwickelt. Die MFC 3 ist durch ihren modularen Aufbau dazu ausgelegt, in Kombination mit Systemen wie Laser-, Radar- oder Panoramakamerasystemen eingesetzt zu werden. (Vgl. Börner et al., 2006)

2.1.3.1 Aufnahmesystem und Funktionsweise

Die MFC 3 besitzt drei Kanäle, den Nadir, der senkrecht nach unten ausgerichtet ist, einen vorwärts blickenden und ein nach hinten blickenden Kanal, auch als *Backward* und *Forward* bezeichnet. Aus diesen drei Blickwinkeln lassen sich im Optimalfall mindestens drei homologe Punkte zur Stereoauswertung und zur anschließenden Erzeugung des digitalen Oberflächenmodells ermitteln. Je nach Anwendung können bis zu drei CCD-Einzelzeilenmodule mit variabler Anzahl RGB-Module integriert und gleichzeitig betrieben werden. Resultierend daraus ist der Stereowinkel je nach Aufgabenstellung veränderbar.

Es können Farbbilder mit jeweils 14bit radiometrischer Auflösung pro Kanal erzeugt werden. Das Kamerasystem ist zudem auf den Einsatz verschiedener Inertialmesseinheiten (kurz IMU) etwa Applanix oder IGI über verschiedene mechanische und elektronische Schnittstellen ausgerichtet.

Kernstück des Systems sind die Zeilemodule, die sich aus einer RGB-Zeile, einer Strukturkeramik und der gesamten Front-End-Elektronik (kurz FEE) zusammensetzen. Als Detektoren werden gegenwärtig CCD-Zeilen der Firma Kodak mit 2k, 6k, 8k, 10k und 14k Detektorelementen eingesetzt. Durch den modularen Aufbau der MFC 3 erhält das System eine hohe Flexibilität und ist somit für viele Anwendungen geeignet und kann nicht nur als Stand-Alone-System sondern auch als Zusatzgerät - wie in aktuellen Experimenten am DLR - eingesetzt werden. Justage- und Kalibrierungsprozesse werden

außerdem deutlich vereinfacht, nicht zuletzt durch den modularisierten Zeilenansatz und unterscheiden sich dadurch deutlich von klassischen Fokalebene. Der MFC-Kamerakopf besitzt gleichzeitig den Massenspeicher und alle notwendigen Ein- und Ausgabeinterfaces. (Vgl. Eckardt, 2006)



Abbildung 2.5: MFC 3

(Quelle: DLR)

Das analoge Ausgangssignal der CCD-Zeilen wird in der FEE digitalisiert. Systematische Fehler werden zudem in Echtzeit korrigiert, anders als bei der HRSC.

In bisherigen Testaufnahmen, eingebaut in Kleinflugzeugen und bei Innenaufnahmen konnte die MFC 3 bereits überzeugen. Sie ist sowohl für den terrestrischen, als auch für den luftgestützten Einsatz durch ihren modularen Aufbau in Kombination mit Zusatzgeräten konzipiert. Voraussetzung ist eine präzise Kalibrierung, um alle Systeme räumlich und auch zeitlich referenzieren zu können. Die geometrische, radiometrische und spektrale Kalibrierung der Kameras wird in den Laboren des DLR durchgeführt. Die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung erfolgt pixelweise durch Beleuchtung einzelner Detektorelemente durch einen kollimierten Laserstrahl. (Vgl. Schuster & Braunecker, 2000)

2.1.3.2 Photogrammetrische Prozessierung

Die gesamte Verarbeitungskette der MFC 3 wurde in der Einrichtung Optische Informationssysteme des DLR - Institut für Robotik und Mechatronik in Berlin-Adlershof und Oberpfaffenhofen entwickelt und auch dort vollständig durchgeführt. Die geometrische Kalibrierung der MFC wird durch eine Einzelpixelvermessung mittels eines Kollimatorstrahls und eines Zwei-Achsen-Manipulators umgesetzt. So kann die innere Orientierung, die Blickrichtung jedes Pixels der Zeile, in einer idealen fiktiven Fokalebene bestimmt werden. (Vgl. Scheibe, 2006)

Das Kamerasystem wird während der Kalibrierung auf einem Manipulator bewegt und simuliert darüber die Bewegung der Kamera im Einsatz und den damit verbundenen Einfall der reflektierten Strahlung auf die Optik und die sich dahinter befindende Detektoreinheit. Die Parameter der äußeren Orientierung werden über standardisierte Modelle zur Bündelblockausgleichung bestimmt. (Vgl. Börner et al., 2006)

Die MFC 3 besitzt die folgenden technischen Details:

Anzahl der Sensoren	3 (Vorblick, Nadir, Rückblick)
Sensoraufbau	3 Sensorzeilen (R,G, B > 400-700nm)
Sensorzeilenlänge	72 mm
Einzelementgröße	9µm
CCD-Elemente pro Zeile	6.000
Anzahl der Pixel	8.002
Brennweite des Objektivs	80 mm
Radiometrische Dynamik	14bit
Öffnungswinkel quer zur Flugrichtung	max. ± 24° im Nadir; 48,5° gesamt
Öffnungswinkel in Flugrichtung	max. 25,8°
Blickwinkel der Stereosensoren	12° im Nadir
Auflösung aus 900 m Flughöhe	10 cm (Fluggeschwindigkeit 110 kn [185 km/h], Integrationszeit 2,5ms)
Datenformat	RAW/JPEG
Gewicht	~15 kg

Tabelle 2.2: Technische Daten der MFC 3 (Quelle: DLR, 2007)

Gewinnung eines Oberflächenmodells

Hier kommt ein Algorithmus zum Tragen, der am DLR-Standort in Oberpfaffenhofen, Institut für Robotik und Mechatronik entwickelt wurde. Dieser Algorithmus ist ein pixelbasiertes Verfahren zum Auffinden korrespondierender Bildpunkte in mindestens zwei Kanälen eines Flugstreifens. Grundlage, allgemein auch in der Fernerkundung, sind orientierte Luftbilder mit bekannter innerer und äußerer Orientierung, bei denen entlang einer rekonstruierten Epipolarlinie nach diesem übereinstimmenden Pixel gesucht werden kann. Die Epipolargeometrie beschreibt diese Abhängigkeit der korrespondierenden Bildpunkte, die durch einen realen Objektbodenpunkt in den beiden zueinander orientierten Luftbildern erzeugt werden. (Vgl. Schreier, 2005) In der Abbildung 2.6 wird dies verdeutlicht, wobei P der Objektbodempunkt, P_L und P_R die Bildpunkte, E_L und E_R die Epipole sind, durch die die dazugehörige Epipolarlinie verläuft und O_L und O_R den jeweiligen Kameraprojektionszentren entsprechen. Eingegrenzt wird die Suche durch das Bekanntsein einer Höheninformation des gesuchten Objektbodempunktes. Genauere Ausführungen finden sich in Hirschmüller, 2005 und 2006.

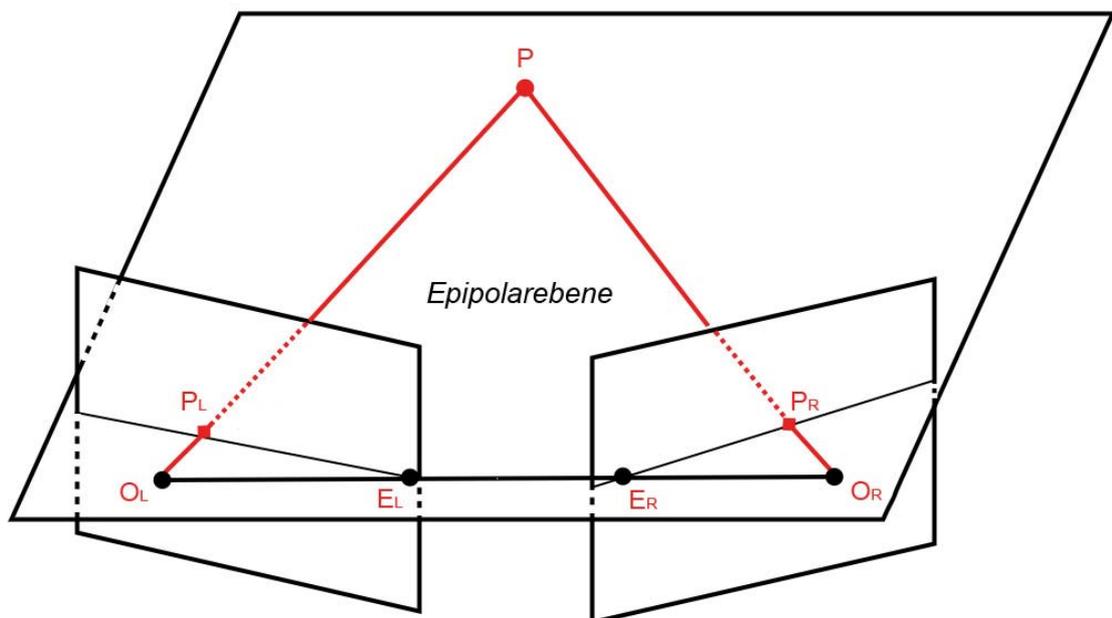


Abbildung 2.6: Stereo-Epipolar-Geometrie

2.2 Prinzip der Matrixkamera

2.2.1 Optoelektronische Matrixkamera

Matrixkameras werden in der Literatur häufig auch als Frame- oder Flächenkameras bezeichnet. In dieser Arbeit wird der Begriff der Matrixkamera beibehalten, nicht zuletzt um das Aufnahmeprinzip und die Funktionsweise im Vordergrund zu behalten. Matrixkameras, die die Aufnahme eines Bildes mittels digitaler matrixförmiger Flächensensoren über eine Zentralprojektion realisieren, beschränken sich auf einen rechteckigen, meist quadratischen Bildausschnitt. Diese Bildausschnitte können mithilfe entsprechender Überlappungsbereiche zu einem einzigen Flugstreifen zusammengeführt werden. Die Länge des Flugstreifens steht in Abhängigkeit zur gewünschten Gebietsabdeckung. Die Anzahl der dafür benötigten quadratischen oder rechteckigen Bilder werden in erster Linie über die verlangte Auflösung, die damit verbundene Flughöhe und den gewählten Überlappungsbereichen bestimmt. Anschließend können diese Flugstreifen zu einem Bildblock bzw. Bildverband über die zuvor festgelegte Quer- und Längsüberdeckung verknüpft und im Zuge der Prozessierung als Gesamtmosaik ausgegeben werden.

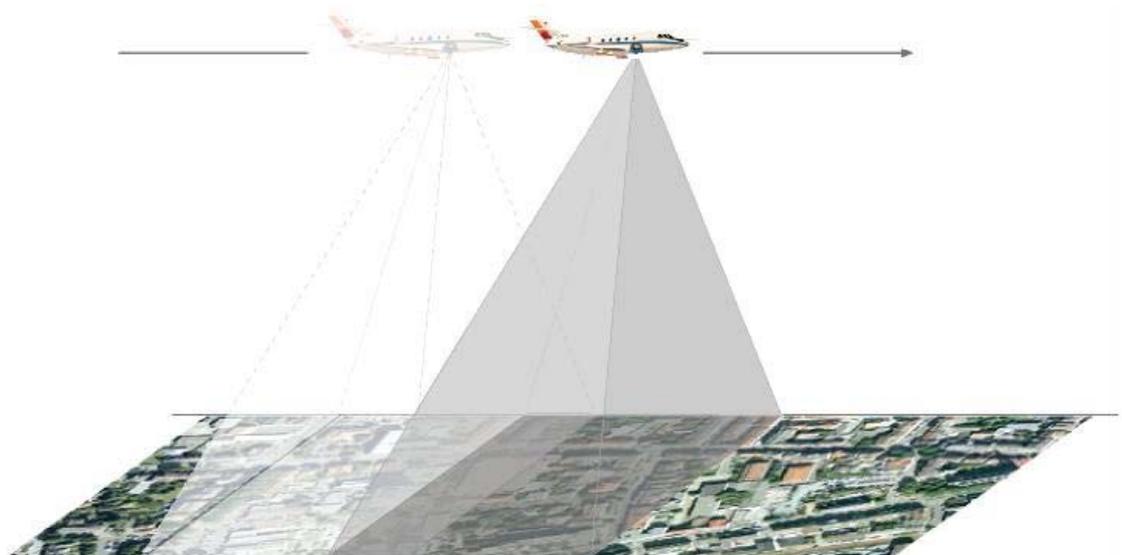


Abbildung 2.7: Aufnahmeprinzip einer Matrixkamera

Bei einer Matrixkamera wird die Stereofähigkeit durch einen Überlappungsbereich von in Flugrichtung etwa 60 % aus drei Bildern realisiert. Dies simuliert drei unabhängige

Blickwinkel und gewährleistet so die drei Sichtstrahlen zur Auffindung der benötigten homologen Punkte für die Generierung einer stabilen räumlichen Szene und eines Oberflächenmodells. Allerdings werden immer nur so viele Objekte in die Berechnung integriert, wie im definierten Überlappungsbereich der maximal drei Szenen erfasst werden. Dies unterscheidet sich vom Prinzip der Mehrzeilenkamera bei der tatsächlich jeder Punkt am Boden mindesten dreimal abgebildet wird.

Unter Verwendung mehrerer Objektive mit entsprechenden Spektralfiltern gelingt die Gewinnung der Farbinformation in geringerer Auflösung. Um auch im Farbkomposit eine hohe Auflösung zu erzielen, erfolgt anschließend eine Steigerung der Auflösung in den Farbkanälen durch das so genannte *Pansharpening* (Vgl. Sandau (Hrsg.), 2005 & Albertz, 2007), das Addieren eines höher aufgelösten panchromatischen Kanals.

Bei einer Matrixkamera ändern sich die Eigenschaften der äußeren Orientierung von Bild zu Bild d. h. (Vgl. Kraus, 2004) pro Bildaufnahme entsteht eine eigenständige äußere Orientierung. Durch die Abbildung in Zentralperspektive entstehen Verklappungen radial zu den Bildrändern. Eine Korrektur des Radialversatzes ermöglicht analog zum Zeilenscanner das digitale Oberflächenmodell. Das Ergebnis weist im Anschluss ebenfalls die Eigenschaften einer Karte auf und das Ableiten von tatsächlichen Entfernungsmesswerten in entsprechender Genauigkeit ist möglich.

2.2.2 Der Flächensensor Vexcel UltraCam_D

Der Flächensensor UltraCam_D ist ein Produkt der Vexcel Imaging GmbH mit ihrem Firmensitz in Graz, Österreich und gehört damit zu den vorwiegend kommerziellen, der hier beschriebenen Systeme. Gegründet wurde das Unternehmen 1993 von Franz Laberl und ist seit dem Jahr 2006 durch die Firma Microsoft übernommen.

2.2.2.1 Aufnahmesystem und Funktionsweise

Die UltraCam_D ist ein großformatiger, multispektraler und digitaler Flächensensor. Das hochauflösende panchromatische Bild wird von neun Matrixdetektoren hinter vier Objektiven mosaikartig zusammengesetzt (Vgl. Sandau (Hrsg.), 2005).

Die UltraCam_D besitzt die folgende technischen Details:

Bildgröße PAN	11500 x 7500; 103,5 x 67,5 mm
Bildgröße (RGB/NIR)	3680 x 2400; 23 cm x 15 cm bei 18 µm Bildformat
Einzelementgröße	9 µm
Objektivbrennweite	101,5 mm
Öffnungswinkel in Flugrichtung	55°
Öffnungswinkel quer zur Flugrichtung	37°
Verschlusszeiten	1/60 – 1/500
Bildwiederholrate	1,3 Bilder pro Sek.
Geometrische Auflösung	10 cm bei 1100 m über Grund; 0,9 km ² Abdeckung pro Bild 5 cm bei 560 m über Grund; 0,2 km ² Abdeckung pro Bild
Radiometrische Auflösung	12 bis 14bit
Geometrische Genauigkeit	< 2 µm
Datenformat	JPEG, TIFF für 8/ 16 bit
Speicher	1,5 TB
Bildkapazität	2692
Gewicht	30 kg
Kameradimension	45 cm x 45 cm x 60 cm

Tabelle 2.3: Technische Daten der UltraCam_D

(Quelle: Vexcel)

Das System verwendet zur Bildaufnahme neun CCD-Matrizen der Größe 4008 x 2672 Detektorelemente, um ein panchromatisches Bild der Größe 11500 x 7500 Pixel (23 x 15 cm) zu erzeugen. Die vier anderen Bilder mit geringerer Auflösung in Rot, Grün, Blau und IR werden mit vier weiteren Matrixdetektoren hinter vier zusätzlichen Kameraobjektiven mit Brennweiten von 28 mm erzeugt. Anschließend erfolgt eine Erhöhung der Auflösung in den Multispektralkanälen durch das bereits diskutierte *Pansharpening*. (Vgl. Sandau (Hrsg.), 2005 & Albertz, 2007) Die Kamera verfügt insgesamt über 13 CCD-Sensoren.

Die geometrische Auflösung ergibt sich aus der zuvor festgelegten Flughöhe. Bei einer Höhe von 1100 m über Grund wird eine Auflösung von 10 cm erreicht, bei 550 m können sogar 5 cm realisiert werden. Die radiometrische Auflösung beträgt 12 bis 14bit. (Vgl. BSF Swissphoto Group *ehemals* BSF Luftbild, 2007)

Gegenüber der hier nicht diskutierten analogen Bildaufnahme können RGB-, CIR- und PAN-Bilder standardmäßig in einem Flug erzeugt werden. In Kombination mit dem Flugführungssystem CCNS4 von IGI und dem Inertialnavigationssystem (*kurz* INS) AEROcontrol wird der Sensor direkt orientiert. (Vgl. BSF Swissphoto Group *ehemals* BSF Luftbild, 2007)



Abbildung 2.8: UltraCam_D
(Quelle: Vexcel)

Das Flugführungssystem CCNS4 (*für* Computer Controlled Navigation System, 4th generation) besteht aus der CCU (*für* Central Computer Unit), der L1/L2 GPS-Antenne, einem GPS Empfänger und der CDU (*für* Command and Display Unit). Im Zusammenwirken mit dem Inertialnavigationssystem kann das Projektionszentrum der Kamera durch das GPS in jeder Aufnahme direkt bestimmt, als Rohdaten aufgezeichnet und im Zuge der photogrammetrischen Bildprozessierung ausgewertet werden (Vgl. IGI Systems, 2008). Die Ausgabe der Positions- und Orientierungsdaten erfolgt in x, y, z - Koordinaten über WGS84 oder wenn gefordert auch in einem gebräuchlichen übergeordneten Landeskoordinaten. (Vgl. IGI Systems, 2008)

Künftige Befliegungen werden mit einem leistungsstärkeren Nachfolger der gleichen Baureihe, der UltraCamX durchgeführt. Diese bietet eine Auflösung von 14430 x 9420 Pixel und ermöglicht ggf. eine höhere Wirtschaftlichkeit.

2.2.2.2 Photogrammetrische Prozessierung

Die photogrammetrische Verarbeitung der Rohdaten der UltraCam_D zum gewünschten Endprodukt findet ebenfalls in Teilen bei der BSF Swissphoto Group am Standort Berlin-Schönefeld statt. Anwendung findet hier eine Aerotriangulation, bei der die digital aufgezeichneten Einzelbilder zu einem festen Bildverband unter Einbeziehung von Passpunkten und hochpräziser Orientierungsdaten verknüpft werden. Albertz (2007) definiert Passpunkte als: „Punkte, die in den Bilddaten eindeutig identifizierbar sind und deren Koordinaten im übergeordneten Referenzsystem [...] bekannt sind.“

Über das GPS wird fortlaufend die Flugbahn des Sensorträgers und mit Hilfe des integrierten INS die ständige Position der Kamera und deren Bewegung während des Messvorgangs erfasst. Nach Aufzeichnung der Spektraldaten und dazugehöriger Orientierungs- und Navigationsdaten wird eine kombinierte Aerotriangulation zur direkten Sensororientierung mit direkter Georeferenzierung durch GPS, IMU und zusätzlicher Passpunkte erreicht. Kraus (2007) spricht dabei auch von einer integrierten Sensororientierung.

3 Beschreibung der Datensätze

Datengrundlage dieser Arbeit sind abgeleitete True-Orthobilder, ausgegeben als GeoTIFF der Matrixkamera Vexcel UltraCam_D im damaligen Betrieb der BSF Luftbild GmbH und der Zeilensensoren HRSC-AX und MFC 3 aus der Entwicklungsreihe des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Berlin-Adlershof.

Die HRSC-AX und die MFC 3 sind zugleich repräsentativ für die fortschrittliche experimentelle Entwicklung im Bereich digitaler zeilenbasierter Flugzeugsensoren. Für die HRSC-AX liegen außerdem Daten aus unterschiedlichen Befliegungsjahren vor, die vor allem hinsichtlich der zwei verschiedenen, in der Standardprozessierung angewandten Algorithmen, aufschlussreich sein könnten.

3.1 Datenformate

Im nun folgenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick über die hier im wesentlichen verwendeten Datenformate, basierend auf den zwei Datenstrukturen Raster und Vektor gegeben.

3.1.1 Rasterdaten

Rasterdaten stellen raumbezogene, meist geographische Daten geometrisch dar. Die Struktur dieser Rasterdaten, zusammengesetzt aus so genannten Rasterzellen wird fast immer durch quadratische Zellengitter repräsentiert. Diese Zeilen und Spalten implizieren so eine räumliche Positionsangabe. Der Wert einer einzelnen Zelle definiert

das Attribut eines geographischen Merkmals. Jeder Zelle kann auch nur ein einziger Wert zugeordnet werden. Gruppierete Rasterzellen mit gleichem Attribut stellen darüber ein bestimmtes geographisches Merkmal dar. Bezeichnet werden diese Zellen i. d. R. als Pixel. Die Kantenlängen dieser Pixel gelten als Maß für die geometrische Auflösung. Je kleiner diese Bildelemente, desto höher die Auflösung und die Erkennbarkeit der abgebildeten Details im Rasterbild. (Vgl. Albert, 2007)

RAW

RAW ist ein Rohdatenformat für Bilddaten hoch entwickelter digitaler Kamerasysteme. Dabei wird die Bildinformation direkt von einem integrierten CCD-Sensor ausgehend gespeichert. Die so verfügbaren Rohdaten werden unbearbeitet und unkomprimiert gehalten. Der Vorteil liegt in der Kontrolle durch den Anwender und nachträglicher Anpassung, u. a. der Helligkeit, des Weißabgleichs oder der Bildschärfe. Nachteilig ist der oft erhöhte Speicherbedarf, der aus der fehlenden Komprimierung resultiert.

VICAR

Das Rasterformat VICAR (*für* Video Image Communication And Retrieval) wird am Institut für Planetenforschung des DLR speziell für die Speicherung multi-dimensionaler, planetarer Bilddaten genutzt. In einer zugehörigen label-Datei der .lbl werden neben den radiometrischen und geometrischen Details auch Informationen zur Georeferenz gehalten. Dieses Format ist ein aus dem RAW hervorgegangenes Datenformat (Vgl. Saiger, 2007)

GeoTIFF

Das GeoTIFF ist eine Erweiterung des Tagged Image File Format (*kurz* TIFF) und ist darauf ausgelegt georeferenzierte Bilddaten zu speichern. Neben der Art der Speicherung, der Angabe zur Anzahl der Zeilen und Spalten, der Auflösung, der Bittiefe enthält das GeoTIFF Zusatzinformationen zur Georeferenz. Dazu zählen die geographische Ausdehnung, die Projektion und das Bezugssystem. (Vgl. LV Baden-Württemberg)

3.1.2 Vektordaten

Das Datenmodell der Vektordaten dient allgemein zur Darstellung linearer Merkmale durch Vektoren. Diese Vektoren sind durch die Angabe von mindestens zwei Koordinaten repräsentiert, die darüber Länge und Richtung dieses Vektors definieren. Die Basisdatentypen in einem Vektordatenmodell sind Punkt, Linie und Fläche, über die ein Geo-Objekt der realen Welt modelliert wird. Im Wesentlichen dient der Punkt, als Träger der grundlegenden Koordinateninformation. Bei der 2D-Darstellung sind dies die x,y-Koordinaten. Die Geo-Objekte erhalten die beschreibenden Attribute.

ESRI-Shape

Das Shape ist ein von der ESRI Geoinformatik GmbH eingeführtes Format für Geodaten. Heute gilt dieses Format als Quasistandard für Desktop-GIS-Systeme. (Vgl. Saiger, 2007) Neben der .shp-Datei zur Speicherung der Geometriedaten wird mindestens eine .shx-Datei zur Speicherung der Indexinformation für die Geometrie und eine .dbf-Datei zur Speicherung der Sachdaten parallel erzeugt. (Vgl. Geoinformatiklexikon Universität Rostock) Zusätzlich kann optional u. a. eine .prj-Datei zur Haltung der Projektionsparameter und eine .sbx- und .sbn-Datei für die Indizes der Tabellenverknüpfungen gespeichert werden. (Vgl. Saiger, 2007) ESRI-Shapes werden im ArcCatalog etwa in Form eines Punkt-, Polygon-, oder eines Polyline-Shapes erstellt, je nach Typ der darzustellenden Geometrie.

DXF

Bei dieser Schnittstelle, die in der Literatur als *Drawing Exchange Format* bezeichnet wird, handelt es sich um einen Standard der Firma Autodesk, der zum Austausch von CAD-Dateien entwickelt wurde. Das DXF ist besonders geeignet zum Transfer von Dateien zwischen CAD-Softwarepaketen untereinander aber auch von diesen zu GI-Systemen. Daher wird die DXF auch als vermittelndes Dateiformat bezeichnet. Nachteilig ist, dass keine fachlichen Attribute übertragen werden können. Der Austausch gängiger Geometrien etwa Punkt, Linie, Kreis, Spline etc. stellt keine Probleme dar.

3.2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet im Innenstadtbereich von Berlin qualifiziert sich durch eine geometrisch gut erfassbare Gebäudestruktur und die Garantie des Vorhandenseins von flächendeckenden und präzisen Referenzdatensätzen. Aufgrund verkürzter Lade- und Rechenzeiten beschränkt sich diese Untersuchung auf einen kleinen, aber durchaus repräsentativen Gebietsausschnitt in der City von Berlin. Für die MFC 3 wird ein Ausschnitt aus einem Orthobild und DOM von Berlin-Adlershof verwendet. Dies begründet sich darin, dass die geplante Befliegung im Frühjahr 2008 über der Innenstadt von Berlin aus technischen Gründen und aufgrund der nicht stabilen Wetterlage mehrmalig abgebrochen und verschoben werden musste. Zusätzlich gelten seit einigen Jahren verschärfte Regelungen und Genehmigungsverfahren, die den Berliner Luftraum, besonders im Bereich der Innenstadt und dem nahe gelegenen Regierungsviertel, sichern. Genehmigungsverfahren verzögern zunehmend Testbefliegungen und das einhalten bestimmter Fluglevel ermöglicht oft geforderte Auflösungsbereiche nicht.

3.2.1 Geographische Ausdehnung

Das planmäßige Testgebiet liegt im nord-östlichen Teil des Kartenblatts 423D des Berliner Landeskoordinatensystem Soldner und befindet sich mit einer Ausdehnung von etwa 1,4 x 1,4 Kilometer in den Stadtbezirken Berlin Friedrichshain und dem angrenzenden Bezirk Mitte. Der Gebietsausschnitt umfasst ca. 400 Gebäude und schließt in seiner Mitte den Strausberger Platz ein.

Die geographische Ausdehnung variiert zwischen den verschiedenen Bilddatensätzen und wird hier zur Orientierung nur als gerundete Koordinatenwerte angegeben:

UL: 25.820 E / 22.000 N LR: 27.200 E / 20.500 N

Die Ausdehnung des Gebietes in Berlin-Adlershof beträgt 1,7 x 1,2 Kilometer und hat eine geographische Ausdehnung im Berliner Landeskoordinatensystem Soldner von:

UL: 32.950 E / 12100 N LR: 34620 E / 10940 N

Das Landeskoordinatensystem Soldner Berlin hat die folgenden Eigenschaften. Der fiktive Koordinatenursprung liegt 40.000 m westlich und 10.000 m südlich vom Trigonometrischen Punkt Müggelberg, dem Koordinatenanfangspunkt des Bezugssystems Soldner-Berlin. Das Bessel-Ellipsoid (*auch* Bessel 1841) als Bezugsfläche und der Zentralpunkt Rauenberg dienen hier als geodätische Grundlage.

3.2.2 Gebietsstruktur und Merkmale

Da es sich um einen Innenstadtbereich von Berlin handelt, werden die wesentlichen Informationen der Analyse aus den dargestellten Gebäuden abgeleitet. Der überwiegende Gebäudebestand besteht aus Typenbauten, repräsentativ für den Wohnungsbau aus der Vorwendezeit Ostberlins. Dazu zählt u. a. die Wohnungsbauserie aus den 1970er Jahren WBS70 oder QP71. Diese Gebäudetypen zeichnen sich zum einen durch eine sehr klar strukturierte, leicht erfassbare Geometrie und einheitliche, systematische Größe in Tiefe und Breite aus, zum anderen durch die Ausgestaltung der Dächer, die über wenig oder gar keinen Dachüberstand verfügen. Dachabschlusskante und Gebäudefußpunkt sind im Idealfall identisch. Eine Ableitung exakter Gebäudeflächen in den Orthobildern und ein Messen in den Datensätzen mit Kenntnis bekannter Maße aus Gebäudegrundrissen, u. a. aus der ALK ist demnach zum anschließenden Vergleich möglich.

Im Testgebiet gibt es neben diesen einfach strukturierten Gebäudetypen auch architektonisch ausgeprägte Bauwerke, wie Kirchen, Schulen und auch Wohngebäude im so genannten „stalinistischen Zuckerbäckerstil“.

Zusätzlich spielt der Aspekt der Bauwerkshöhe eine interessante Rolle, so befinden sich im Testgebiet neben eingeschossigen Gebäuden ebenso Hochhausbauten weit über 11 Stockwerke einfacher Geschosshöhe. Die Höhe der Gebäude ist, wie im folgenden Kapitel beschrieben, ein Kriterium zur Ableitung der Höhengenaugkeit vorliegender Oberflächenmodelle.

Für die spätere Untersuchung und die Betrachtung der Qualität werden ausnahmslos Gebäude mit einem Flachdach ohne einen Dachüberstand und sonstiger Dachaufbauten ausgewählt. Dies ermöglicht im Idealfall eine durchgängig konstante Höhe des Gebäudes im Oberflächenmodell. Abweichungen von der tatsächlichen Höhe sind so direkter und damit auch genauer feststellbar.

Im Idealfall liegt eine klar erfassbare Geometrie als mögliche Grundfläche des Gebäudes vor. Gebäudekanten, hier die Dachabschlusskanten sind bei diesen Gebäudetypen durch die Art der Bauweise i. d. R. deutlich hervorgehoben.

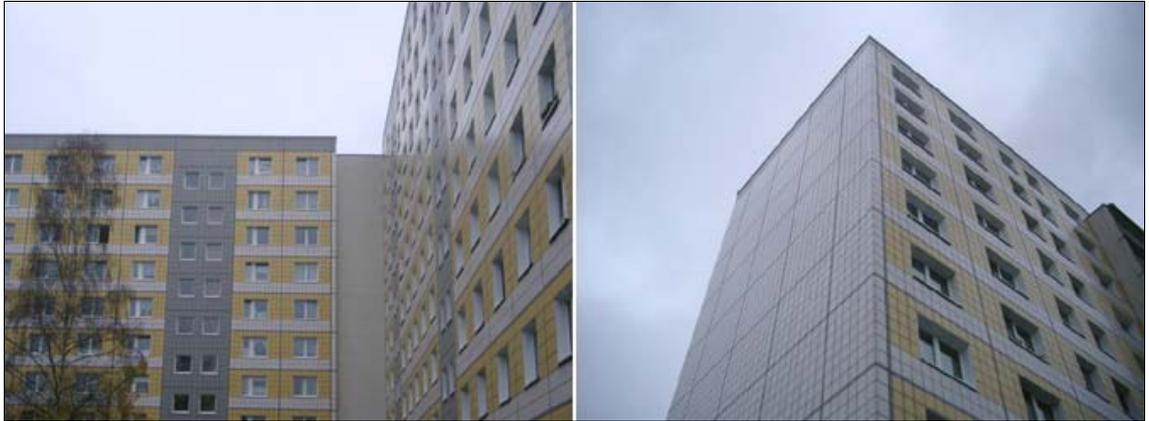


Abbildung 3.1: QP71 - Wohnungsbauserie aus den 1970er Jahren.

Das für die MFC 3 gewählte Testgebiet in Berlin-Adlershof beinhaltet ausschließlich Neubaubestand mit ebenso einfacher Gebäudestruktur, das die Kriterien für diese Untersuchung im vollen Umfang gewährleistet.

3.3 Bilddaten vorliegender Sensorsysteme

Ursprünglich liegen die Bilddaten nach der Aufzeichnung in Form unbearbeiteter, nicht optimierter und nicht komprimierter Rohdaten im dafür gängigen RAW-Format separat für jeden aufgezeichneten und gespeicherten Kanal vor. Diese rohen Daten werden anschließend als dreikanalige Bilder, etwa in RGB-Kombination, für die späteren Fernerkundungszwecke in einem gängigen Bildformat als GeoTIFF mit angefügter räumlicher Information ausgegeben. Für die Daten der HRSC-AX wurde am Institut für Planetenforschung im Zuge der Mission „Mars Express“ insbesondere für die Haltung und Ausgabe planetarer Daten, das Bilddatenformat VICAR entwickelt. Dies betrifft in dieser Untersuchung speziell die Daten der Befliegung aus 2003, die ursprünglich in diesem VICAR-Format vorlagen. Darauf wurde im Abschnitt Datenformate dieses Kapitels bereits gesondert eingegangen.

3.3.1 Bilddaten der HRSC-AX

Für die Untersuchung der HRSC-AX Daten liegen Datensätze aus den Jahren 2003 und 2005 vor. Das Aufnahmesystem und die Funktionsweise arbeiteten dabei in unveränderter Weise, modifiziert ist lediglich die Weiterverarbeitung der Bilddaten hinsichtlich der Erzeugung des digitalen Oberflächenmodells bei der photogrammetrischen Standardprozessierung und des daraus abgeleiteten True-Orthobildes. Demnach liegen zwei Datensätze vor, die aufgrund der Prozessierung unterschiedliche Genauigkeiten in Lage und Höhe aufweisen können. Neben dem modifizierten Prozessierungsalgorithmus liegen weitere Unterschiede in der Flugplanung, der Gebietsabdeckung mit veränderter Flughöhe und den daraus resultierenden Auflösungsbereichen und der Anzahl der Flugstreifen mit unterschiedlicher Breite quer zur Flugrichtung vor. Geändert haben sich ebenso der Zeitpunkt der Aufnahme, damit verbunden veränderte Sonnenstände und entsprechend angepasste Signalverstärkungen durch den Operator während des Bildfluges. Zugleich gibt es erkennbare Unterschiede im Zielgebiet mit abweichendem Belaubungszustand der Vegetation, sowie vereinzelt Veränderungen im städtebaulichen Bestand. Die genannten Punkte werden berücksichtigt und bilden ein nicht unwesentliches Kriterium für die spätere Untersuchung der Rasterdatensätze.

3.3.1.1 HRSC-AX Befliegung 2003

Der Bildflug der Berliner Innenstadt im Sommer 2003 wurde am 07. Juni (DOY 158) am Morgen zwischen 7:40 Uhr und 10:00 Uhr UTC durchgeführt. Der jahreszeitliche Aufnahmezeitpunkt gibt u. a. Auskunft über den vorliegenden Vegetationsbestand, dessen Entwicklung um diese Zeit in diesen Breiten bereits kurz vor Abschluss ist. Ursprünglich wurde dieser Datensatz im Zuge einer Biotopskartierung geplant und befliegen, was diesen Umstand begründet. Der frühe Zeitpunkt im Tagesverlauf gibt Hinweise auf das Vorhandensein von Schatten, die sich auf das Erkennen der Bildinformation auswirken können. Die Sonnenstände liegen in dieser Befliegung zwischen $40,4^\circ$ und $56,8^\circ$. Die Bildflugstreifen wurden daher vor der Weiterverarbeitung einer Sonnenstandskorrektur unterzogen. Idealerweise finden Bildflüge um die Mittagszeit statt, wenn die Sonne in einem idealen Winkel steht. So kann eine konstante Beleuchtung und eine entsprechende Bildinformation garantiert

werden. Um ungünstige Beleuchtungseffekte dennoch korrigieren zu können, ist es sinnvoll nach Einlesen der Daten eine Korrektur durchzuführen. Die spezifischen Korrekturfaktoren lassen sich präzise für jedes Zielgebiet aus dem Zeitpunkt der Aufnahme, dem Datum und der geographische Lage d. h. der geographische Länge und Breite ableiten. Schlagschatten lassen sich damit jedoch nicht eliminieren. Erreichbare Resultate sind lediglich ein besserer Kontrast und eine konstante Helligkeit.

Geflogen wurde in einer Höhe von 4120 m über NN. Das ergibt unter Einbeziehung der durchschnittlichen Geländehöhe im Zentrum von Berlin mit rund 30 m eine Flughöhe von 4090 m über Grund. Das gesamte Zielgebiet umfasst 204 qkm bei einer Streifenüberlappung von 60 Prozent.

Laut der Kontrolle der eingegangenen Daten gab es keine weiteren Unregelmäßigkeiten, keine Wolken, keine auffälligen Atmosphäreneffekte, keine Störsignale und keine signifikanten Ausfälle bei der Datenaufzeichnung. Ebenso fand bei der Aufnahme eine auf die Gegebenheiten angepasste adäquate Aussteuerung statt. Vereinzelt auftretende Sättigungseffekte in den hellen Bildbereichen sind dennoch ausgehend von Dachflächen, von Wasserflächen, von Glasfassaden oder -dächern und sogar durch Reflektion von auffälligen Kieshügeln auf Baustellen zu verzeichnen.

Ebenso deutlich in den Statistiken, die parallel beim Einlesen der Daten ausgegeben werden, sind die fortlaufenden Flugrichtungswechsel erkennbar. Damit ändern sich automatisch auch der Beleuchtungseinfall auf den Sensor und die Intensität der Grauwerte in den aufgenommen Bildflugstreifen. Der Anstieg des registrierten maximalen DN-Wertes im Verlauf der Datenaufzeichnung innerhalb jedes Flugstreifens korreliert mit der Zunahme des Sonnenstandes. Geplant und anschließend geflogen wurden insgesamt 11 Flugstreifen und 1 Querstreifen, der für die spätere geometrische und zeitliche Korrektur wesentlich ist.

Orthobild in RGB in 8bit und Digitales Oberflächenmodell

Das Resultat der Befliegung ist ein Orthobild mit einer Auflösung in x, y von 20 cm und einem 8bit Dynamikumfang. Das zugrunde liegende grauwertkodierte Digitale Oberflächenmodell hat eine x, y- Auflösung von 50cm und eine Höhenauflösung in z- von 10cm. Angaben der Höhen im DOM werden standardgemäß in Dezimeter über WGS84 vorgenommen. Die Genauigkeit im Oberflächenmodell ist so gewählt, das 1 DN (*für* Digital Number) genau 1 Dezimeter in der Höhe darstellt.



Abbildung 3.2: Kartenblatt 423D, DOM der HRSC-AX 2003.
(Originalpixel 50 cm)

3.3.1.2 HRSC-AX Befliegung 2005

Die Durchführung des Bildfluges über der Berliner Innenstadt aus einer Flughöhe von 4600 m über NN fand im Spätsommer, am 16. und 18. August 2005 (DOY 228 und DOY 230) statt und erstreckt sich damit über zwei Befliegungstage. Unterbrochen wurde der erste Befliegungstag durch das Aufziehen von Quellwolken, die die Fortsetzung einer zufrieden stellenden Datenaufzeichnung unmöglich machten. Wolken verdecken zum einen die Sicht auf die Objekte am Boden, verändern die Beleuchtung innerhalb der Daten und verursachen zuletzt auch Wolkenschatten, die Bereiche im Bild abdunkeln können. Geplant wurden 22 Streifen zzgl. eines Querstreifens über das gesamte Zielgebiet, das entspricht einer Gebietsabdeckung von etwa 600 qkm. Unterbrochen wurde der Bildflug bei Streifen 17, in Abbildung 3.3 verdeutlicht, der am folgenden Befliegungstag bei perfektem Flugwetter im Zuge der weiteren Datenaufzeichnung wiederholt geflogen wurde. Die ersten 5 Streifen wurden zwischen 7:40 Uhr und 08:51 Uhr UTC aufgenommen, die restlichen 17 Streifen des folgenden

Flugtages zwischen 7:58 Uhr und 11:18 Uhr UTC auf Grund der hohen Datenmenge auf 3 Sony-Bändern aufgezeichnet. Die Uhrzeit gibt auch hier Rückschlüsse auf deutliche Schattengebiete in den Daten. Die Sonnenstände liegen am ersten Tag zwischen 33,0° bis 41,3°, am zweiten Flugtag zwischen 34,8° und 50,5°. Für das gesamte beflogene Gebiet wurde eine Sonnenstandskorrektur durchgeführt. Die Signalverstärkung an beiden Flugtagen blieb gleich, um möglichst homogene Bilddaten zu erhalten.

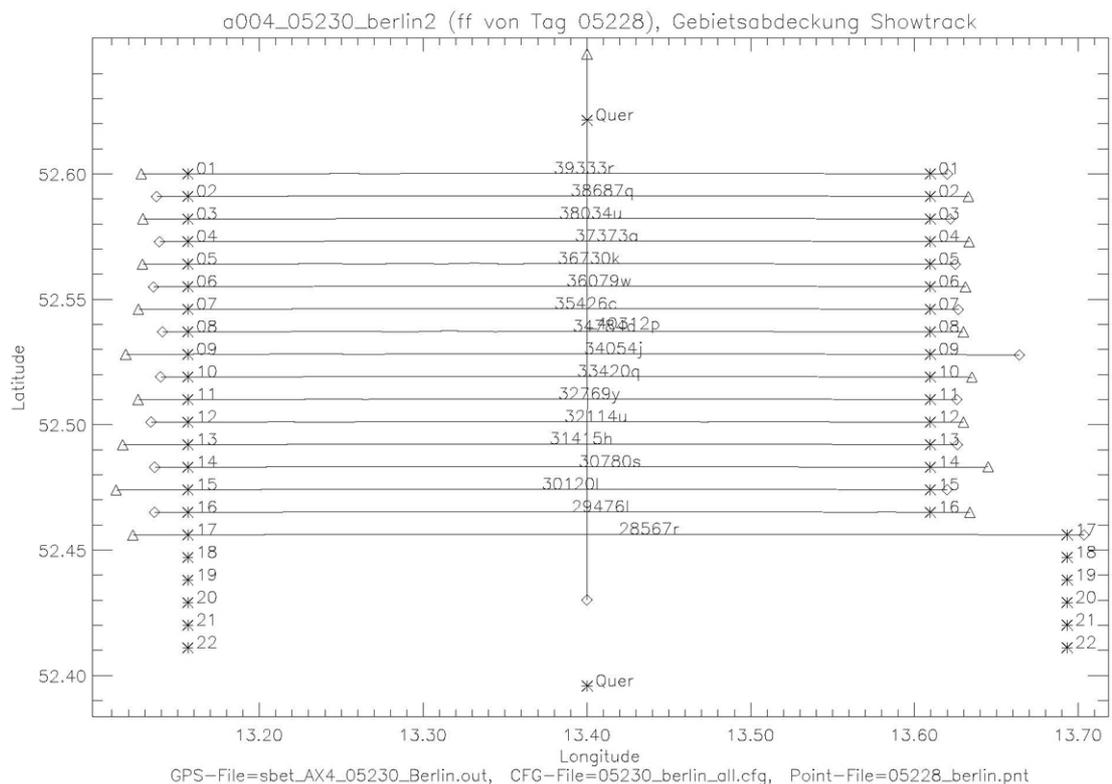


Abbildung 3.3: Gebietsabdeckung der Innenstadt Berlin mit der HRSC-AX 2005.

Wegen des ungünstigen Sonnenstands zum Zeitpunkt des Bildfluges in 2005 und der resultierenden deutlichen Schattenbereiche wurde dieser Datensatz sowohl in 8bit als auch 16bit radiometrischer Auflösung generiert. So ist es möglich Informationen auch noch aus stark schattierten Bereichen abzuleiten. Üblicherweise werden Sonnenstände während der Bildflüge, die Schattenlängen größer als das 3,5-fache der Objekthöhen hervorrufen, für die Erzeugung von Luftbilderzeugung nicht akzeptiert. (Kraus, 2004)

Orthobild in RGB in 8bit

Die vorliegenden True-Orthobilder sind aus dem hier ebenfalls zugrunde liegenden Digitalen Oberflächenmodell in 20 cm geometrischer Auflösung generiert. Dies entspricht dem panchromatischen Kanal (Nadir). Die Auflösung der Farbkanäle liegt bei 40 cm. Der radiometrische Farbumfang wird im Zuge der photogrammetrischen Prozessierung standardgemäß, aber an jedes Zielgebiet spezifisch angeglichen, von 12bit auf 8bit reduziert. Durch die Reduktion des Dynamikumfangs auf 8bit gehen unter Umständen wesentliche Details verloren. Dies sowohl in den hellen, als auch in den dunkleren oder verschatteten Bildbereichen. Ein 12bit Dynamikumfang ermöglicht es einen Helligkeitsumfang von hohen Reflektanzen bis zu geringen Reflektanzen in den Schattenbereichen in einem Bild zu erfassen. (Sandau (Hrsg.), 2005)



Abbildung 3.4: RGB-Mosaik der Berliner Innenstadt mit HRSC-AX 2005.
(Originalpixel 20 cm)

Orthobild in RGB in 16bit

Wie bereits beschrieben weist der in 2005 geflogene Datensatz eine hohe Beeinträchtigung durch Schlagschatten auf. Besonders nachteilig ist dies im Umkreis

hoher Objekte, die das Erkennen von benachbarten im Schatten liegenden Details verschlechtern bis unmöglich machen. Bilddaten mit einem 16bit-Farbumfang erweisen sich an dieser Stelle als geeigneter. Die Reduktion des Dynamikumfangs von 12bit auf 8bit wird damit aufgehoben. Der größere Dynamikbereich erlaubt es nun, Details sowohl in den dunkel erscheinenden Gebieten, als auch in den hellen Gebieten aufzulösen (Fricker et al., 2000). Die geometrische Auflösung liegt auch für dieses Orthobild in x, y-Richtung bei 20cm.

Digitales Oberflächenmodell in 16bit

Die Auflösung des Oberflächenmodells beträgt 20 cm in x und y. Die Auflösung in der Höhe z beträgt 10 cm, wobei im Oberflächenmodell 1 Grauwert, also 1 DN gleich 1dm (10 cm) entspricht.

3.3.2 Bilddaten der Vexcel UltraCam_D 2006

Die BSF-Luftbild GmbH ist seit 2000 Mitglied der Swissphoto Group mit Sitz am Flughafen Berlin-Schönefeld und seit Januar 2008 auch unter BSF Swissphoto bekannt. Seit 2005 wird dieses System bei der BSF Swissphoto standardgemäß für Befliegungen eingesetzt. Die Befliegung des Stadtgebiet Berlins mit dem Flächensensor Vexcel UltraCam_D wurde im Spätsommer am 21. September 2006 von der BSF Luftbild GmbH zwischen 08:38 Uhr und 11:08 Uhr UTC durchgeführt. Aus der geringen Flughöhe von 853 m über Grund (*oder* 2800 ft.) und der Geländehöhe von ca. 30 m resultiert eine Gebietsabdeckung von 25 Bildflugstreifen, die sich in der anschließenden Verknüpfung ergeben. Der Bildflug fand bei sehr gutem Flugwetter statt, so dass keine Wolkenschatten und auch keine auffälligen Beleuchtungsunterschiede in den Bilddaten zu verzeichnen sind.

Orthobild in RGB in 12bit und Digitales Oberflächenmodell in 16bit

Das Orthobild der UltraCam_D-Befliegung hat lateral eine Auflösung von 7cm. Das dazugehörige Digitale Oberflächenmodell hat in x und y eine Auflösung von 20 cm.

3.3.3 MFC 3-Befliegung 2008

Die Untersuchung der MFC3-Bilddaten bezieht sich auf einen Ausschnitt von Berlin-Adlershof, dem Wissenschafts-, Wirtschafts- und Medienstandort, in dem sich ebenfalls der Standort des DLR befindet. Die Gründe für das Ausweichen auf dieses Gebiet wurden bereits zu Beginn dieses Kapitels diskutiert. Die Befliegung von Berlin-Adlershof fand am 30. März 2008 (DOY 92) statt. Geplant wurden 5 Flugstreifen mit einer Länge von 5 km zzgl. eines Streifens quer über das geplante Gebiet von 2,5 km, aufgenommen aus einer Flughöhe von nur 727 m (*oder* 2500 ft.) über Gelände unter Berücksichtigung der Geländehöhe von 35 m. Die Streifenbreite beträgt 654,5 m unter Beachtung der nötigen Überlappung benachbarter Streifen von 54 Prozent. Daraus resultiert daraus eine Nettostreifenbreite von 301 m. Bei einer Fluggeschwindigkeit von 100 Knoten (*oder* 185 km/h) und einer Auslesefrequenz von 2,3 ms ergibt sich eine errechnete Auflösung in Flugrichtung von 11,8 cm und 8,2 cm quer zur Flugrichtung.

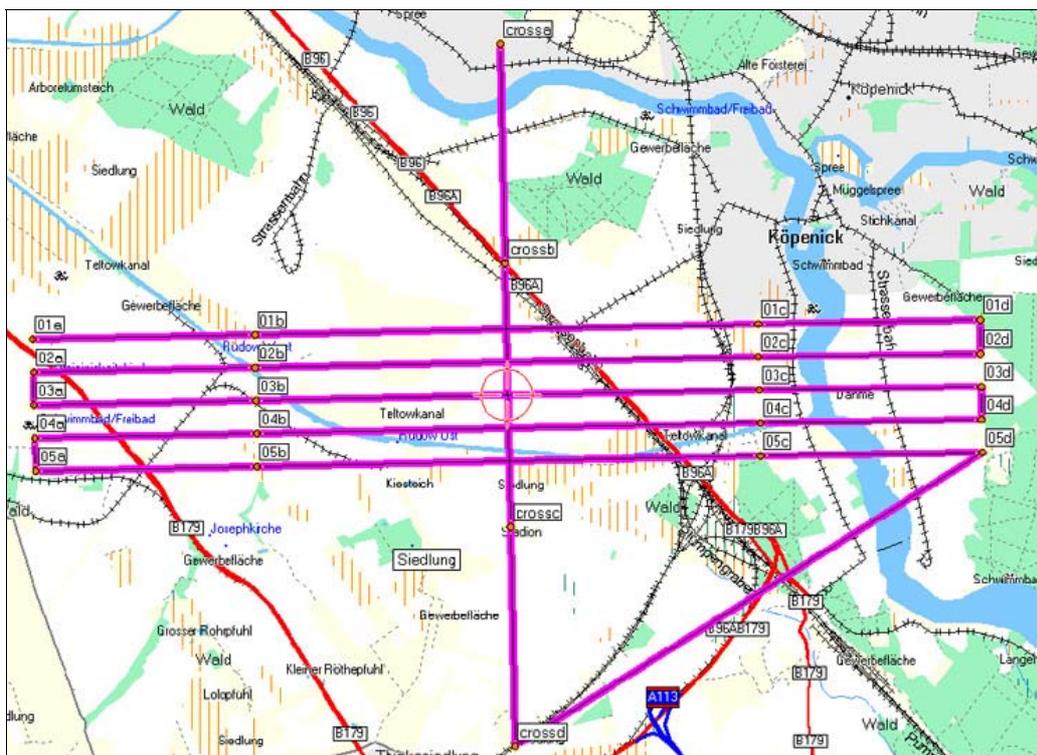


Abbildung 3.5: Flugplanung für die MFC 3-Befliegung in Adlershof.

Die Durchführung des Fluges fand vormittags zwischen 10:38 Uhr und 12:03 Uhr UTC unter einer dichten Wolkendecke statt. Die vorherrschende Bewölkung bewirkt eine konstante, aber gedämpfte Beleuchtung im gesamten Bild und das Ausbleiben von

störenden Schlagschatten durch Sonneneinstrahlung und Schatten durch einzelne vereinzelt Quellwolken. Durch die hohe Lichtempfindlichkeit des Sensors ergibt sich dennoch ein ausreichend hoher Kontrast in den Bilddaten.

Orthobild in RGB und digitales Oberflächenmodell in 8bit



Abbildung 3.6: Ausschnitt der MFC 3 von Berlin-Adlershof in RGB.
(Originalpixel 12,5 cm)

Die geometrische Auflösung des DOM und des RGB beträgt in x- und y-Richtung 12,5 cm. Die Auflösung in z im DOM beträgt 10cm.

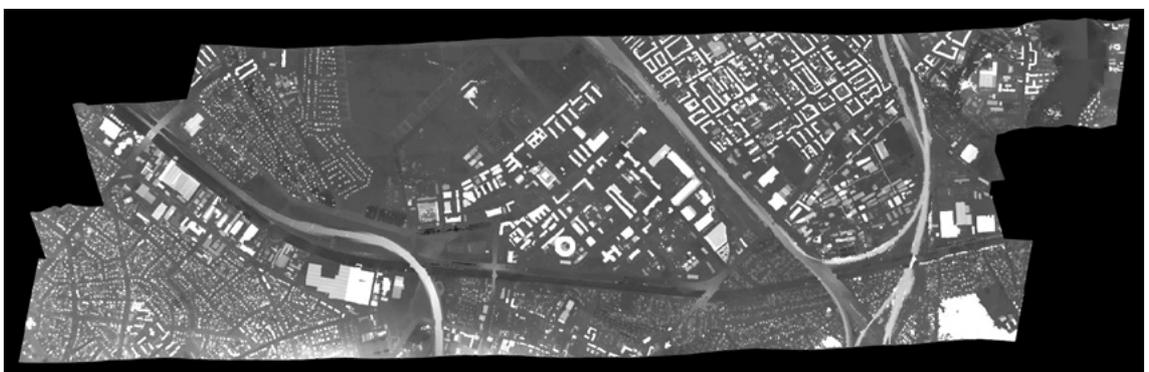


Abbildung 3.7: MFC 3 Oberflächenmodell Adlershof gesamt
(Originalpixel 12,5 cm)

3.4 Referenzdatensätze von Berlin

Um diese Untersuchung amtlich zu stützen werden als Referenz drei Datensätze des Berliner Senats und zuständiger Bezirksämter hinzugezogen. Dazu dient neben der amtlich vermessenen und laufend fortgeführten Automatisierten Liegenschaftskarte (*kurz* ALK) von Berlin von Oktober 2004, ein aus der ALK zum Teil abgeleitetes aktuelleres Berliner 3D-Innenstadtmodell von Februar 2008 und aktuelle und amtlich eingemessene Höhen in Form von Festpunkten des Bezirks Mitte und Friedrichshain-Kreuzberg.

3.4.1 Automatisierte Liegenschaftskarte Berlin (ALK) 2004

Als Referenzdatensatz zur Ableitung und zum Vergleich der Gebäudegeometrien in den Rasterdaten dient ein Ausschnitt der amtlichen Automatisierten Liegenschaftskarte von Berlin im Vektorformat. Die ALK enthält die gesamten Liegenschaften des Landes Berlin und liegt flächendeckend als geschlossene Polygone für das gewählte Testgebiet im Landeskoordinatensystem Soldner vor. Die Genauigkeit der Lage bewegt sich unter 0,5 Meter Abweichung und eignet sich somit als stabile Referenz. Zudem ist ihr Datenbestand im Rahmen der zu realisierenden Aktualisierungszeiträume zu hundert Prozent vollständig. Die ALK besteht aus Vektoren, vorteilhaft besonders zur Darstellung linearer Merkmale. Die dafür verwendeten Basistypen sind Punkt, Linie und die Fläche. Dies garantiert der ALK, dass sie u. a. in ihrer Ausprägung ebenso gebäudescharf, grundstücks- und blockscharf ist. Die verschiedenen thematischen Ebenen der ALK liegen für den verwendeten Ausschnitt in Form verschiedener ESRI-Shapes vor, die u. a. die Informationen zur Gebäudegeometrie und zur Gebäudeausgestaltung beinhalten. Für diese Untersuchung ist die Begrenzungsgeometrie der Gebäude, Folie 11 der ALK, von übergeordneter Bedeutung. Details der Gebäudeausgestaltung sind in diesem Auflösungs-bereichen weniger zu berücksichtigen. Höhen können nur indirekt über die Anzahl der Geschosse abgeleitet werden, die in den Folien der ALK als römische Ziffern angegeben sind (Geschosszahl \times geschätzte Geschosshöhe). I steht für ein Geschoss, (I) steht für ein Geschoss, gibt aber gleichzeitig an, dass es sich nicht um ein reguläres Gebäude handelt, sondern um eine Kirche, Lagerhalle oder ähnliche Bauwerke, die in der Regel über abweichende

Gebäudehöhen verfügen. Ein negatives Vorzeichen, wie etwa -1 kennzeichnet ein Gebäude, welches unterirdisch liegt, wie etwa eine Tiefgarage unter einem Platz oder einer Grünfläche. Dieser Fall ist besonders zu berücksichtigen, wenn in der ALK ein Gebäude verzeichnet ist, das im Orthobild scheinbar nicht vorhanden ist.

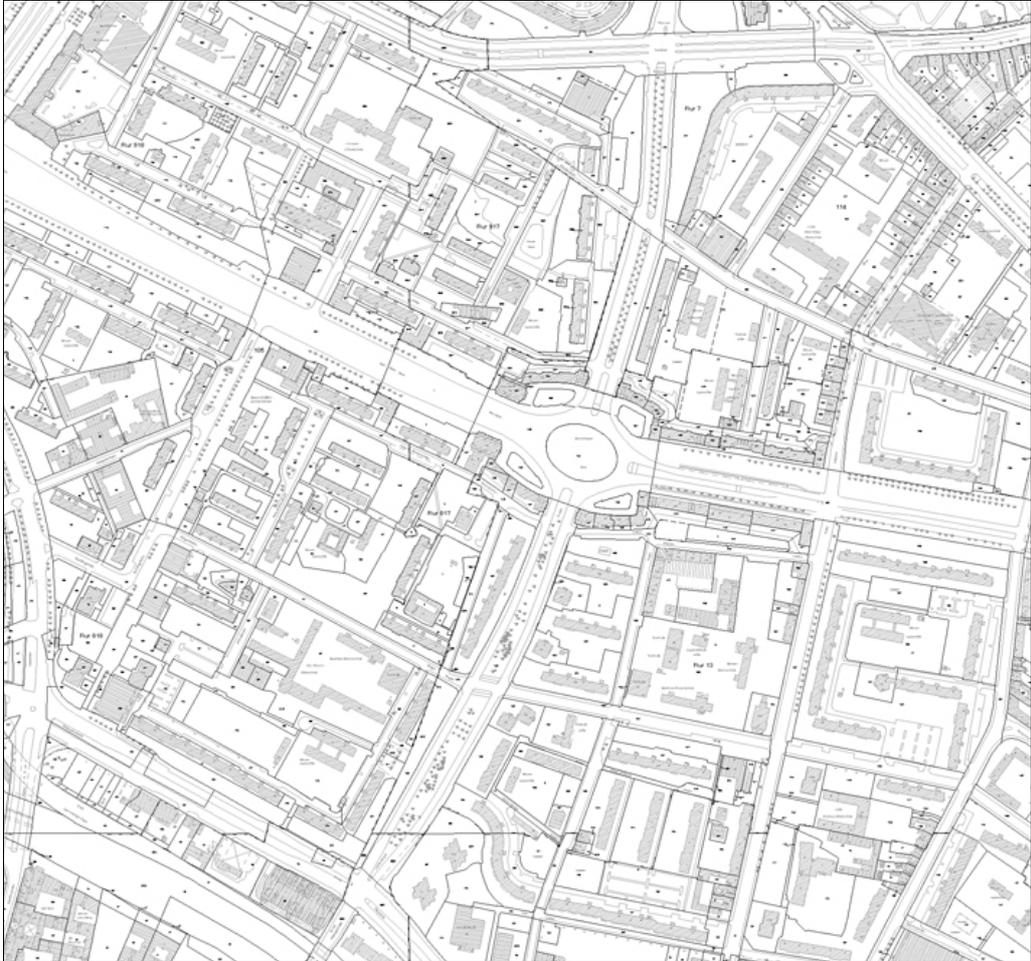


Abbildung 3.8: Untersuchungsgebiet dargestellt in der ALK 2004.

Die ALK beschränkt sich hier in der horizontalen Ausdehnung auf die 1,96 qkm des Untersuchungsgebiets. Die vertikale Ausdehnung variiert allgemein im Berliner Stadtgebiet von zwischen 30 m minimaler Höhe und 115 m maximaler Höhe. Im Untersuchungsgebiet beträgt die Höhe etwa 36 m über NHN. Da es sich hier jedoch ausschließlich um Gebäudegeometrien handelt sind diese Höhen in den zugrunde liegenden Vektoren der ALK nicht speziell vermerkt. Die Geschoszzahlen dienen zum einen dazu, die Qualität der Bilddaten in direktem Bezug zum Einflussfaktor Höhe zu beurteilen und zum anderen um die Genauigkeit der Gebäudehöhe aus den verschiedenen Datensätzen zueinander abzuleiten.

Anzahl der Geschosse	Durchschnittliche Höhe Neubau in m	Durchschnittliche Höhe Gründerzeitbau in m
I	4	
II	7-9	
III	10-12	14
IV	14-16	18
V	19	22
VI	22	
VII	25	
VIII	28	
IX	32	
X	35	
XI	39	
XII	42	
XIII	46	
XIV	49	
XV	53	
XVI	56	
XVII	59	
XVIII	63	
XIX	67	
XX	70	

Tabelle 3.1: Geschätzte Gebäudehöhe nach Anzahl der ALK-Geschosse.

(Quelle: SenStadt, 2004)

Die in der Tabelle aufgezeigten Gebäudehöhen stellen Durchschnitts- bzw. genäherte Höhenwerte dar. Diese finden Anwendung in der Erstellung des digitalen 3D-Innenstadtmodells von Berlin, gelten für diese Untersuchung jedoch wegen der hohen Ungenauigkeit nur als Orientierung. Da in dieser Untersuchung ausnahmslos neuere Gebäude verwendet werden, gelten die Angaben für die berlintypische Wohnbebauung aus der Gründerzeit, hier nur zur Vollständigkeit aufgeführt, und können in der weiteren Untersuchung vernachlässigt werden. Für das Testgebiet in Berlin-Adlershof, im Bezirk Treptow-Köpenick (amtliche ID des Bezirks ist 09) liegt ein aktuellerer Ausschnitt der Folie 11 aus 2008 dieser Untersuchung zu Grunde.

3.4.2 Digitales 3D-Innenstadtmodell Berlin 2008

Das vorliegende digitale 3D-Innenstadtmodell präsentiert das Leitbild des beschlossenen *Planwerk Innenstadt* Berlins zwischen dem historischen Zentrum im Ostteil der Stadt und der City West (SenStadt Berlin, 2008). Das Stadtmodell basiert auf der Automatisierten Liegenschaftskarte, beinhaltet aber neben dem tatsächlichen Gebäudebestand abgestimmte Planungen und noch in der Planung befindliche Projekte. Das Innenstadtmodell integriert demnach ebenso realisierte, als auch noch nicht existierende Objekte. Es beruht dort nur auf Ideen und Planungsunterlagen und ist in diesen Bereichen demnach noch nicht durch amtlich bestellte Vermessungsingenieure abschließend vermessen.

Umgesetzt wird dieses Modell von der Architekturwerkstatt des Berliner Senats mit der Architektursoftware ArchiCAD von *Grafisoft* und wird wahlweise in den Formaten DXF, DWG (*für* AutoCAD) und PLA (*für* ArchiCAD) ausgegeben.

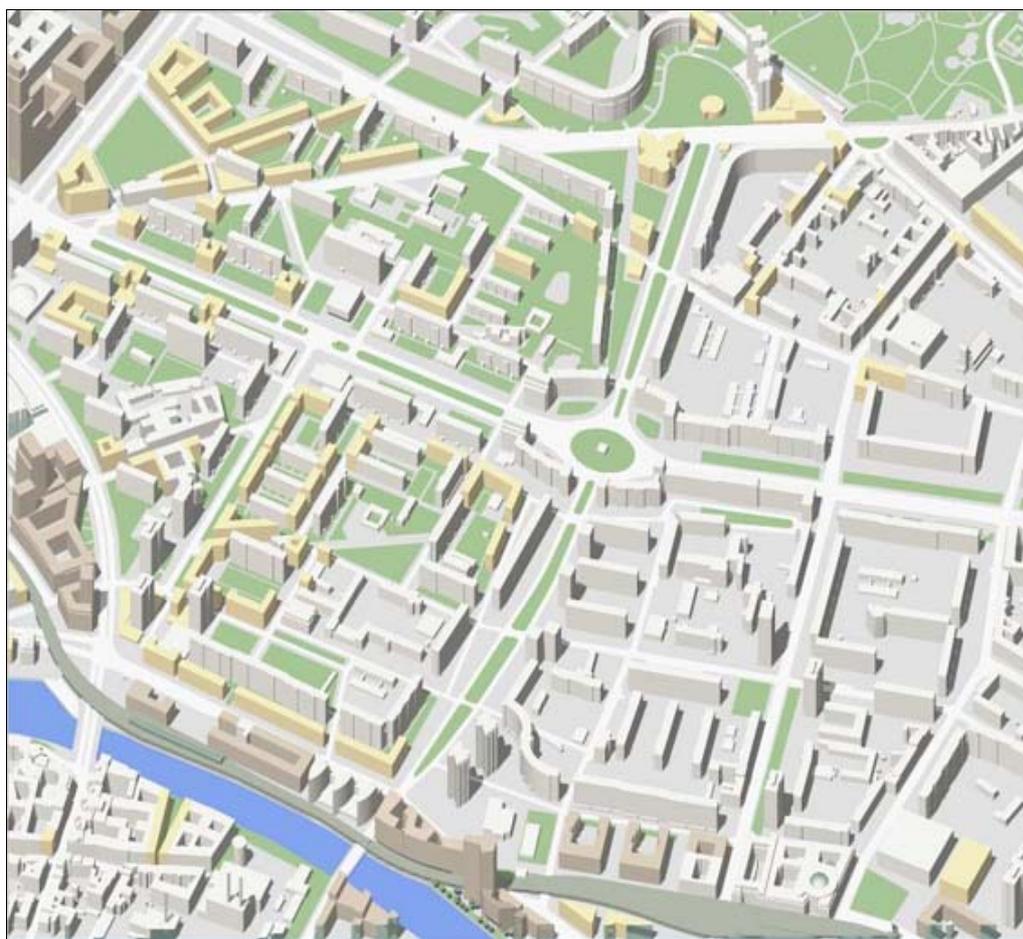


Abbildung 3.9: Digitales Innenstadtmodell des Berliner Senats, Stand März 2008.

Die Höhen der Gebäude basieren auf Geschosszahlen, aus denen wiederum die gebäudetypischen Höhen abgeleitet werden. (Geschosszahl x geschätzte Geschosshöhe). Ein Wohnhaus aus den 1990er Jahren mit 5 Etagen ist demnach niedriger, als eines mit gleicher Anzahl an Stockwerken aus den 1890er Jahren. Es ist demzufolge auch immer die spezifische Charakteristik eines Gebäudes für die Bestimmung der Höhe heranzuziehen. Bei einzelnen architektonisch markanten Gebäuden, wie etwa der französische Dom am Gendarmenmarkt, wird auf eine Objektbibliothek zurückgegriffen, um die realitätsnahe Abbildung zu gewährleisten.

Ein im Kartenblatt 423D, um den Strausberger Platz gelegener 216 Hektar großer Ausschnitt des digitalen 3D-Innenstadtmodells des Berliner Senats liegt der Untersuchung zugrunde. Es gilt hierfür als weitere amtliche und in Einzelfällen, neben der ALK, als eine noch aktuellere Referenz. Das 3D-Innenstadtmodell wird in unregelmäßigen Abständen von der Architekturwerkstatt des Berliner Senats auf Basis des 2D-Innenstadtplans aktualisiert.

Zukünftig soll zur Bestimmung der Gebäudehöhen auf abgeleitete Höhen aus Oberflächenmodellen zurückgegriffen werden. Da es sich bei dem 3D-Innenstadtmodell jedoch um ein offizielles und amtliches Planungsinstrument der Berliner Verwaltung handelt, sind deutliche Abweichungen von den realen Höhen nicht akzeptabel.

3.4.3 Amtliche Höhenfestpunkte

Die terrestrisch vermessen Höhenfestpunkte für Berlin werden jeweils von den zuständigen Vermessungsämtern der Bezirke verwaltet und kostenpflichtig zur Verfügung gestellt. Dieser Untersuchungsbereich fällt in den Verwaltungsbereich des Bezirksamtes Berlin-Mitte und des Bezirksamtes Friedrichshain-Kreuzberg. Für den in dieser Arbeit zu untersuchenden Bereich liegen nur sehr wenige Höhenfestpunkte vor. Dies ist u. a. dadurch begründet, dass das Höhenfestpunktfeld von Berlin in den letzten Jahren kontinuierlich auf eine Gesamtzahl von 6000 Höhenfestpunkten ausgedünnt wurde. Unterschieden wird zwischen Höhenfestpunkt und übergeordnetem Höhenfestpunkt, abhängig der Maschenweite im Höhenfestpunktfeld. Die hier erforderlichen Festpunkte für Berlin-Mitte befinden sich in den Kartenblättern 41918 und 41818 des Landeskartenwerk K10 im Maßstab 1:10.000. Dies beinhaltet den westlichen Bereich um den Strausberger Platz und enthält 6 amtlich vermarkte

Höhenfestpunkte. Die K10 gehört zu einem Landeskartenwerk für Berlin und ist speziell für den Großstadtgebrauch ausgerichtet. Die Besonderheit dieser Kartengrundlage ist, die K10 enthält Grundstücksgrenzen, Straßennamen und Grundstücksnummern. Für den östlichen Bereich um den Strausberger Platz, dem Bezirk Friedrichshain liegen 5 amtlich vermarkte Höhenfestpunkte vor. So ist das gesamte Untersuchungsgebiet mit einer repräsentativen Verteilung abgedeckt.

Das Merkmal dieser Höhenfestpunkte ist, dass es sich dabei u. a. um so genannte Mauerbolzen handelt, die i. d. R. wenige Zentimeter meist ca. 20 cm über Grund verankert sind. Dies ist in der späteren Auswertung zu berücksichtigen. Außerdem liegt eine detaillierte Punktbeschreibung für jeden einzelnen Festpunkt mit präziser Beschreibung der topographischen Lage, einem Einmessriss für die Position am Objekt vor. Dazu zählt die Höhe des Punktes über Grund, die exakte Höhe über NHN (*für* Normalhöhenull), welche die Dimension des Höhenbezugssystem DHHN92 darstellt, eine Angabe der Höhe über NN (*für* Normal Null) ausgehend vom Amsterdamer Pegel, die aber in dieser Untersuchung vernachlässigt wird und die geographische Lage der Festpunkte in Koordinaten des Soldner-Berlin. Zur eindeutigen Identifizierung erhält der Punkt eine Punktlagesignatur in der K10 und eine fünfstellige Punktnummer.



Abbildung 3.10: Festpunktbeschreibung zum Punkt 61019, Blatt 41818 der K10.

3.4.4 Passpunkte des Untersuchungsstandortes Berlin-Adlershof

Dazu existieren in diesem Teil des Berliner Stadtgebietes zunächst zwei amtlich vermarkte Lagepasspunkte, die anschließend mit Hilfe des Global Positioning Systems (*kurz* GPS) auf Basis der Referenzstationen des Satellitenpositionierungsdienstes (*kurz* SAPOS) in Berlin, ihre Höheninformation erhalten haben.

Die hier verwendeten Passpunkte erhalten dabei Höhen über WGS84, dem an die gesamte Erdkugel angepassten Referenzellipsoiden und haben damit ellipsoidische Höhenwerte. Für das Berliner Stadtgebiet sind dies Werte, die um eine Höhe von etwa 75 m schwanken. Alle weiteren nicht amtlichen Passpunkte wurden im Vorfeld dieser Untersuchung für die verschiedensten experimentellen Anwendungen von Mitarbeitern des DLR e.V. an markanten Bodenpunkten aufgenommen und detailliert dokumentiert. Eine kleinere Stichprobe von 23 Passpunkten wird im Folgenden verwendet.

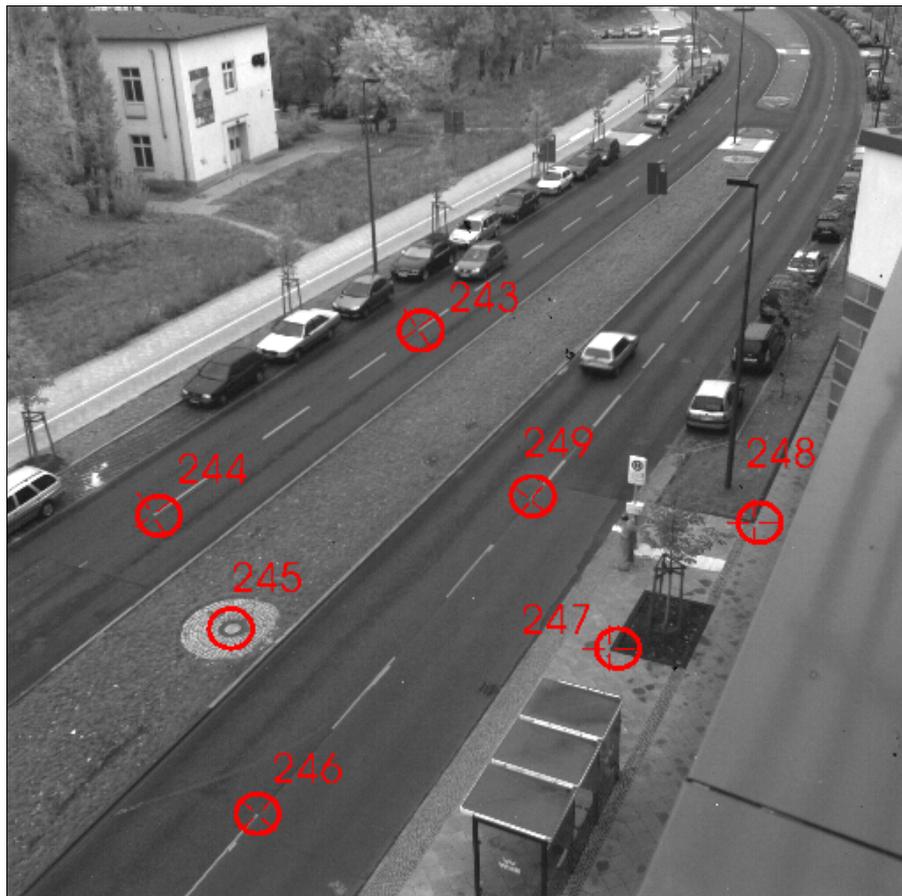


Abbildung 3.11: Ausschnitt aus Passpunkten am Standort Adlershof.

4 Untersuchung der Bilddaten

4.1 Methodik und Kriterien

Im diesem Abschnitt wird auf die verwendete Methodik und die zugrunde liegenden Kriterien der eigentlichen Untersuchung eingegangen.

In der anschließenden Durchführung werden die Orthobilder in RGB und die dazugehörigen grauwertkodierte digitalen Oberflächenmodelle aller drei Aufnahmesysteme nach den nun genannten Kriterien analysiert.

Es werden Gebäudegeometrien aus dem Orthobild abgeleitet und anschließend hinsichtlich der verschiedenen Aspekte untersucht. Auf die dafür besonders geeigneten Gebäudetypen wurde im vorherigen Kapitel eingegangen. Dennoch ist an dieser Stelle anzumerken, dass ausschließlich Gebäude mit einem flachen Dach verwendet werden. So lassen sich die tatsächliche Gebäudefläche und ggf. ein stabiler durchschnittlicher Höhenwert für das gesamte Gebäude ermitteln. Außerdem werden nur solche Gebäude in diese Untersuchung einfließen, die eine klare Bauwerksstruktur aufweisen. Ein mehrfach vertretener Montagebautyp in dem Testgebiet bringt den Vorteil, dass mehrere Gebäude dieses Typs die gleichen Parameter aufweisen. Eine Gegenüberstellung der einzelnen Gebäudemaße und der aus den verschiedenen Datensätzen abgeleiteten Geometrien wird beständiger und vergleichbarer. Gebäude mit besonders kleiner Grundfläche und auch solche mit einer Höhe unter zwei Geschossen werden hierbei zunächst vernachlässigt, da die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass diese durch Vegetation oder Schattenwurf in mindestens einem der vier Datensätze verdeckt sind. Auf den tatsächlich erfassbaren Gebäudebestand wird hier nicht eingegangen, da

es sich ausschließlich um die Genauigkeiten der Darstellung in der parallelen Betrachtung und in Abhängigkeit zur ALK handelt.

Für die visuelle Analyse, wie die Betrachtung der Bildschärfe, werden zusätzlich Elemente am Boden, etwa Straßenführungsmarkierungen einbezogen. Der Gebäudebestand wird zunächst ausführlich gesichtet und nach Eignung unter Betrachtung aller Datensätze selektiert. Es werden nur solche Objekte in die Untersuchung integriert, die in allen Datensätzen eindeutig und vollständig abgebildet werden. Sehr flache Gebäude sind oft in Teilen oder auch vollständig durch Vegetation verdeckt. Auch stark durch Schatten beeinträchtigte Gebäude, bei denen keine oder nur unzureichend deren Gebäudekanten und -ecken erkennbar sind, werden nicht einbezogen.

4.1.1 Software

Die technische Realisierung der Untersuchung findet mit dem Geoinformationssystem ESRI ArcGIS 9.2 statt. Zum einen ist dies besonders geeignet, um die Vektoren der ALK darzustellen und zu verarbeiten, zum anderen ist das Generieren und Überlagern eigener Geometrien und das Integrieren und Verarbeiten von Rasterdaten sehr gut möglich. In der integrierten Datenbank, die ein GIS besonders auszeichnet lässt sich außerdem eine hohe Vielzahl von Attributen zu den Gebäudepolygonen ablegen und für die räumlichen und statistischen Abfragen und Auswertungen heranziehen.

ERDAS IMAGINE 9.1 und RSI ENVI 3.6 werden für die Aufbereitung der Rasterdaten verwendet. Dazu zählt das Ändern der Projektion in den Bilddaten, das Zuschneiden dieser auf die benötigte Gebietsausdehnung und auch zur Erstellung von Histogrammen, Profil- und Geländeschnitten. Zur Auswertung der Messwerte kommt die Software Excel 2003 von Microsoft zum Einsatz. Die verwendete Software wird im Folgenden mit ihren Eigenschaften und Fähigkeiten kurz näher erläutert.

4.1.1.1 Digitale Bildverarbeitung

„Bildverarbeitung kann stets als die Transformation eines Eingabebildes in ein Ausgabebild verstanden werden. [...] bedient sich die Digitale Bildverarbeitung mathematischer Transformationsfunktionen.“ (Albertz, 2007) Unterschieden wird

zwischen der geometrischen und radiometrischen Transformation. Die geometrische Transformation ist zutreffend, wenn ein Rasterbild georeferenziert oder auch auf einen Ausschnitt zugeschnitten wird. Bei diesem Schritt bleiben die Grauwerte im Ausgabebild gegenüber dem Eingabebild vollständig erhalten. Daneben steht die radiometrische Transformation, bei der sich die Grauwerte ändern, die geometrischen Eigenschaften des Eingabebildes aber gänzlich in das Ausgabebild übernommen werden. (Vgl. Albertz, 2007) Die radiometrische Transformation mit den im Folgenden genannten Softwaretechnologien dient hauptsächlich zur Optimierung der Bildinformationen, u. a. zur Kontrastanpassung oder Eliminierung atmosphärischer Störeinflüsse und wird meist vor Beginn der eigentlichen Bildinterpretation oder -auswertung durchgeführt.

ERDAS IMAGINE 9.1

ERDAS IMAGINE 9.1 ist ein rasterorientiertes Programmpaket der Leica GEOSYSTEMS GmbH und dient zur Visualisierung, Manipulation und Analyse von Luft- und Satellitenbildern, sowie geographischer Datensätze. Komponenten dieser Bildverarbeitungssoftware, speziell auf die Bereiche der Fernerkundung ausgelegt, sind Entzerrungen, Rasteranalysen speziell Klassifikationen, verschiedene GIS-Funktionalitäten, Kartengestaltung und die 3D-Visualisierung. (Vgl. GEOSYSTEMS, 2008) Anwendung findet dieses Softwarepaket neben wissenschaftlicher Anwendung, im Bereich Bildung und in der Industrie.

ENVI/IDL 3.6

ENVI/IDL 3.6. ist eine Software der Firma Research Systems Inc. (*kurz RSI*). ENVI, abgekürzt für *Environment for Visualisation Images* ist ein Bildverarbeitungssystem für den wissenschaftlichen Einsatz und wurde insbesondere für die Verarbeitung von Satelliten- und Fernerkundungsbilddaten entwickelt, ursprünglich aber überwiegend für die Verarbeitung von Hyperspektraldaten. Eine Integration von Vektordaten ist ebenfalls gegeben. (Vgl. RSI, 2008)

4.1.1.2 Geoinformationssystem (GIS)

Bill (1999) definiert „Ein Geo-Informationssystem, als [...] ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden.“ Es bezieht sich auf räumliche Informationen planetarer Oberflächen mit ihren darauf existierenden Infrastrukturen und topographisch natürlichen Gegebenheiten. Gehalten werden diese Informationen als Geometrie- und Sachdaten, die für verschiedene Aspekte und Fragestellungen analysiert werden können. (Vgl. Bartelme, 2005)

Geometriedaten

„Geometriedaten sorgen für den Raumbezug sowie die geometrische Definition eines raumbezogenen Objekts. Für die geometrische Darstellung können sowohl Vektordaten als auch Rasterdaten dienen“ (Bill, 1999) Auf die Definition von Raster- und Vektordaten wurde bereits zu Beginn des Kapitel *Beschreibung der Datensätze* eingegangen.

Sachdaten

In einem GI-System wird standardgemäß zu jeder Geometrie mindestens ein Attribut, die ID in der angebenen Datenbank gehalten. Damit wird das GIS mit Anbindung dieser Sachdaten definitionsgemäß komplettiert. „Sachdaten geben den thematischen Inhalt eines raumbezogenen Objekts wieder und stellen somit die Klasse der nichtgeometrischen Daten dar.“ (Bill, 1999)

ArcGIS Desktop 9.2

Diese spezielle Technologie der ESRI Geoinformatik GmbH (*kurz für* Environmental Systems Research Institute) besteht aus verschiedenen Software-Produkten, mit denen analog zur Definition eines GI-Systems raumbezogene Daten erzeugt, vervielfältigt, ausgegeben und analysiert werden können. ArcGIS Desktop 9.2 besteht aus ArcMap und ArcCatalog. ArcMap stellt die zentrale Anwendung für das Editieren, Analysieren und das Erstellen von Karten dar. Durch die Ebenenstruktur in der Datenansicht können raumbezogene Daten beliebig kombiniert und konzipiert werden. Der ArcCatalog dient

u. a. zur Verwaltung der zugrunde liegenden Datensätze und dient zusätzlich zur Erzeugung der ESRI-Shapes. (Vgl. ESRI Germany, 2008)

4.1.1.3 Tabellenkalkulation

Diese Art der Datenverarbeitung bietet sich an dieser Stelle besonders an, da ArcGIS 9.2 die Option erlaubt, Sachdaten abgelegt in den Attributtabelle in einer softwareinternen Datenbank in Form einer Datenbankdatei, des Data Base Files (*kurz* .dbf) zu exportieren und in einer Tabellenkalkulationssoftware zu integrieren und zu verarbeiten.

MS Excel 2003

MS Excel ist ein Produkt aus der Microsoft-Office-Suite und speziell auf die Tabellenkalkulation basierend auf Formeln und Funktionen für umfangreiche Berechnungen ausgelegt. Die graphische Darstellung der Werte ist durch Diagramme möglich. Abgelegt werden diese Werte in Zellen, gebildet aus einer Zeilen- und Spaltenstruktur. Eine einzelne Excel-Datei ist als Arbeitsmappe definiert und wird als Excel-Arbeitsblatt im Datenformat .xls gehalten. Eine Arbeitsmappe integriert zudem eine beliebige Anzahl Tabellenblätter, der so genannten Register. (Vgl. Microsoft Office Online, 2008)

4.1.2 Visuelle Analyse der Orthobilder und Oberflächenmodelle

Vorab erfolgt eine optische Analyse der Bilddaten. Vorhandene Artefakte geben dabei unter Umständen bereits Rückschlüsse auf Schwächen in der Verarbeitungskette. Dazu gehört die photogrammetrische Prozessierung, aber auch Unregelmäßigkeiten bei der Durchführung des Bildfluges.

Zudem erfolgt in diesem Teil der Untersuchung die Betrachtung und Beschreibung der Gebäudekanten und ihrer optischen Besonderheiten im Orthobild. Kriterien für die Analyse im RGB-Orthobild sind die Farbgebung, die Bildschärfe, vorhandene Schattenbereiche und die Abbildung von bewegten Objekten. Die Abbildung der Objektkanten, speziell die der Gebäude zzgl. des Vorhandenseins von Farbsäumen, wird besonders ausführlich untersucht. Ferner die Erkennbarkeit von Details am Boden, dazu zählen Gehwegmarkierungen, Farbgebung, Helligkeit und Kontrast und unvorhersehbare Artefakte. Das Oberflächenmodell wird in diesem Teil vor allem zur Untersuchung und Verifizierung der Gebäudegeometrie herangezogen.

4.1.3 Lagegenauigkeit im RGB-Orthobild

Das Prüfen und die Ableitungen der Lage erfolgt über die Bildung der Differenzen in x,y-Richtung digitalisierter Gebäudeeckpunkte. Um dieses zu ermöglichen werden Gebäudekanten in den Orthobildern vektorisiert. Anschließend die Eckpunkte der entstandenen Polygone identifiziert, digitalisiert und gesondert in einem weiteren Punkt-Shape abgelegt. Vorhandene Differenzen in der Lage werden anschließend für jedes vektorisierte Gebäude berechnet.

Verifiziert wird die Lage der Bildinformation mit Gebäudegeometrien der ALK, der Folie 11. Dazu findet eine Überlagerung der Bilddaten und der daraus digitalisierten Geometrien mit den Vektoren aus der ALK statt. Ergänzend dazu das 3D-Innenstadtmodell, im Falle fehlender Geometrie in diesem Bereich.

Die Abschlusskante auch bei Dächern ohne direkt erkennbaren Dachüberstand kann einen minimalen Vorsprung verursachen.

Das Kriterium für die in dieser Untersuchung involvierten Gebäude ist die Anzahl der Gebäudeecken. Beschränkt wird sich auf eine rechteckige Grundform, um für jedes untersuchte Gebäude maximal 4 Eckkoordinaten zu erhalten. Dies ist ausreichend, um

eine mögliche Verschiebung der Lage der Objekte innerhalb der verschiedenen Datensätze abzuleiten. Im Anschluss an das Digitalisieren wird nochmals entschieden, welche Gebäude oder Gebäudeteile endgültig in die Betrachtung der Lagegenauigkeit einfließen. Die Gebäudepolygone werden bewusst aus dem Orthobild und nicht aus dem DOM abgeleitet, da der mögliche Nutzer in der Anwendung meist nur über das Endprodukt Orthobild oder auch True-Orthobild verfügt und das Erkennen der Kanten durch die spektrale Bildinformation einfacher und genauer ist. Erst der Aspekt der Höhe benötigt später das digitale Oberflächenmodell.

4.1.4 Höhengenaugigkeit im Oberflächenmodell

Dieser Untersuchungsabschnitt umfasst die Ableitung und den Vergleich von Höhen und möglicher Differenzen zwischen den verschiedenen Oberflächenmodellen in z-Richtung. Die gemessenen Höhen an markanten Stellen des Untersuchungsgebietes werden anschließend mit amtlich vermarkten Höhenfestpunkten verifiziert. Hier ist zu berücksichtigen, dass für jedes Oberflächenmodell ein unterschiedlicher Skalierungsfaktor existiert. Dieser Faktor muss bekannt sein und anschließend in die Berechnung der Höhen einbezogen werden. Ferner gibt es Oberflächenmodelle, die die Höhen unter Berücksichtigung der Geoidundulation ausgeben, die ebenso berücksichtigt und im Zuge der Untersuchung erläutert wird. Überdies liegen verschiedene Darstellungssysteme der Höhe und Bezugssysteme vor.

Zur Visualisierung und zum Vergleich der Oberflächenmodelle werden in ERDAS IMAGINE 9.1 Profile im Bereich markanter und aussagekräftiger Bildbereiche angefertigt. Dazu zählen u. a. als Sonderfall dicht beieinander stehende Gebäude und Gebäude mit Innenhöfen.

4.1.5 Ableitung der Flächen im RGB-Orthobild

In diesem Teil der Untersuchung wird auf die Ableitung und Gegenüberstellung der Flächeninhalte eingegangen. In diesem Kontext wird für jedes Gebäude der Flächeninhalt bestimmt. In diesem Analyseteil wird eine kleinere Stichprobe verwendet. Dazu zählen Gebäude verschiedener Höhen mit einfacher geometrischer Grundfläche, die zufällig über das Testgebiet verteilt sind. Typengleiche Gebäude bieten den Vorteil

gleicher Grundflächen. Dies wird für jeden Datensatz wiederholt durchgeführt und anschließend mit der ALK und den darin ermittelten Flächen abgeglichen, Differenzen werden abgeleitet und bewertet. Die Ableitung der Flächenmaße findet unter Verwendung der Software ArcGIS 9.2 statt.

4.1.6 Evaluation der Genauigkeiten

Im letzten Schritt der Durchführung werden die Ergebnisse der visuellen Analyse, der Ableitung der Höhen- und Lagegenauigkeit und der Flächen neben anderen auch auf statistischem Wege unter Anwendung typischer statistischer Größen abgeleitet, zusammengefasst und tabellarisch oder in Form von Abbildungen und Diagrammen dargestellt. Systematische Fehler treten hierbei nicht auf. Sie wurden bereits im Vorfeld der Untersuchung eliminiert. Neben der Angabe der maximalen, minimalen und mittleren Abweichungen bedient sich die statistische Auswertung der Anwendung von Streuungsmaßen. Dazu gehört primär die Berechnung der *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen*. Hier wird von einer Stichprobe ausgegangen, wobei (siehe Formel 4.1) v die scheinbare Verbesserung und n die Anzahl der Messwerte ist.

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v^2} = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$$

Formel 4.1: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen.
(Gruber, 1998)

Die *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen* findet dann Anwendung, wenn die Messwerte mit einem anzunehmenden oder bekannten Messwert, hier die ALK und die amtliche Höhen, verifiziert werden. „Ist nur der wahrscheinlichste Wert bekannt, so wird der mittlere Fehler aus scheinbaren Verbesserungen bestimmt.“ (Plessmann, 1988)

4.2 Durchführung

Die Durchführung findet, wie bereits im Abschnitt zuvor beschrieben auch unter Anwendung des Geoinformationssystems ArcGIS 9.2 statt. Darin wird zunächst der Vektordatensatz der ALK auf die Ausdehnung des Untersuchungsgebiets zugeschnitten und von nicht verwendeten Objektgeometrien bereinigt. Dazu zählen unterirdisch liegende Gebäudeteile, Altbaubestand, vor allem durch die deutlich vom Flachdach abweichende Dachform. Sehr niedrige ein- bis zweigeschossige Gebäude mit meist durch umliegenden Baumbestand beeinträchtiger Sichtbarkeit und Gebäude mit auffällig unregelmäßiger Kontur aus dem Vektorsatz entfernt.

Anschließend findet eine weitere Selektion innerhalb des Neubaubestandes statt, da auch bei flachen Dachformen im Einzelfall ein erheblicher Dachüberstand die tatsächliche Grundfläche des Gebäudes verfälscht. Nach Selektion des verwertbaren Gebäudebestands im Testgebiet fließen zunächst 70 Gebäude in die unterschiedlichen Auswertungen ein. Um anfallende Rechenzeiten zu verkürzen werden die verwendeten Rasterdatensätze auf die Größe des Testgebietes zugeschnitten.

4.2.1 Projektionstransformation

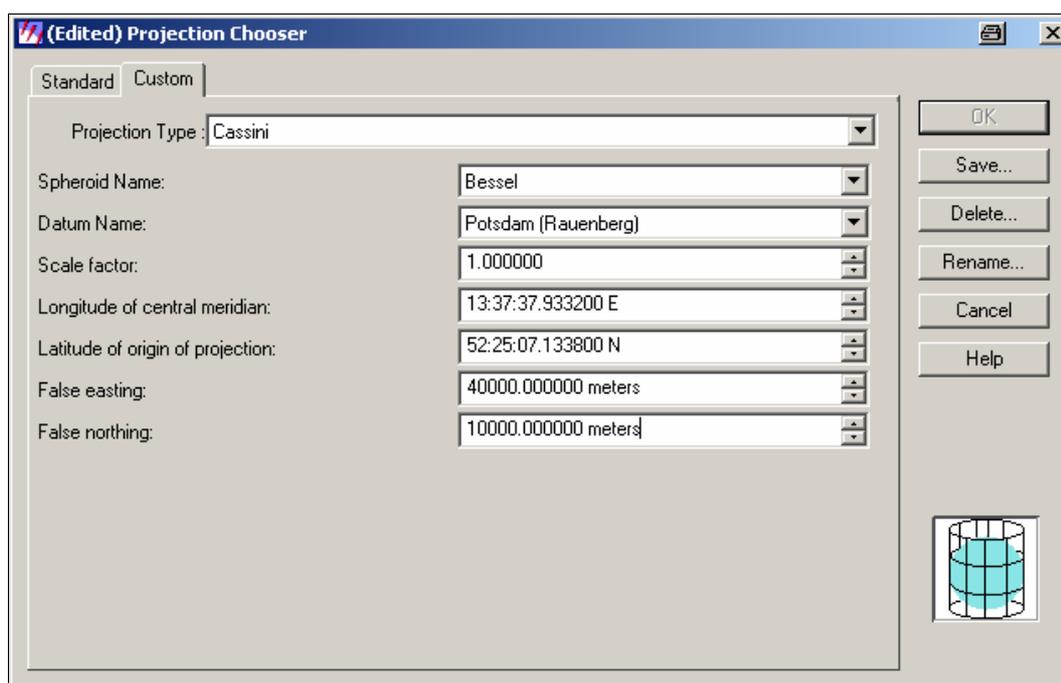


Abbildung 4.1: ERDAS IMAGINE 9.1 - *Reproject Image*.

Die Datensätze liegen standardgemäß nach der photogrammetrischen Verarbeitung in der Projektion UTM über WGS84 in der Zone 33 Nord bezogen auf den Referenzmeridian 15 vor. In ERDAS IMAGINE 9.1 erfolgt das Umprojizieren über den Menüpunkt *Data Preparation* und dem Tool *Reproject Image*. Dort ist es möglich die spezifischen Parameter der gewünschten Projektion, hier das Landeskoordinatensystem Soldner Berlin anzuführen.

4.2.2 Visuelle Analyse der Sensordaten

Ungenauigkeiten in den Bilddaten sind meist auf das Oberflächenmodell und damit auf die photogrammetrische Verarbeitung, auf ungenügende Orientierungsdaten im Zuge der Befliegung oder durch mechanische Unregelmäßigkeiten bei der Bedienung des Kameragesamtsystems, etwa das Anschlagen der Kamera während der Bildaufnahme, zurückzuführen. Zusätzlich spielen die Vorraussetzungen zum Zeitpunkt des Bildfluges eine wesentliche Rolle, denn dies entscheidet über mögliche ungünstige Beleuchtungsartefakte und Schattenbereiche.

4.2.2.1 HRSC-AX

Die geometrische Auflösung der HRSC-AX-Bilddaten hebt sich deutlich vom Auflösungsbereich der UltraCam_D-Bilddaten und der MFC 3 ab. Dies hat im Wesentlichen Einfluss auf die *Ground Sampling Distance* (kurz GSD), wirkt sich aber wiederum nicht merklich auf das exakte Erkennen der Gebäudeabgrenzungen aus. Vielmehr entscheiden der Bildkontrast, die Bildschärfe und die Qualität des zugrunde liegenden digitalen Oberflächenmodells über die Erkennbarkeit. Bewegte Objekte zeigen sich durch das Aufnahmeverfahren auffällig in den drei Kanälen Rot, Grün und Blau. Abbildung 4.2 verdeutlicht dies.

HRSC-AX 2003

Die Verformung der Objekte ist sehr stark ausgeprägt, teilweise so stark, dass ein Ableiten der Geometrien nicht mehr realitätsnah möglich ist. Die Beeinträchtigung durch Farbsäume wirkt zusätzlich erschwerend. Betroffen sind besonders die hohen

Objekte. Die Farbsäume an diesen stärker verformten Objekten kommen dabei am auffälligsten zum Tragen.

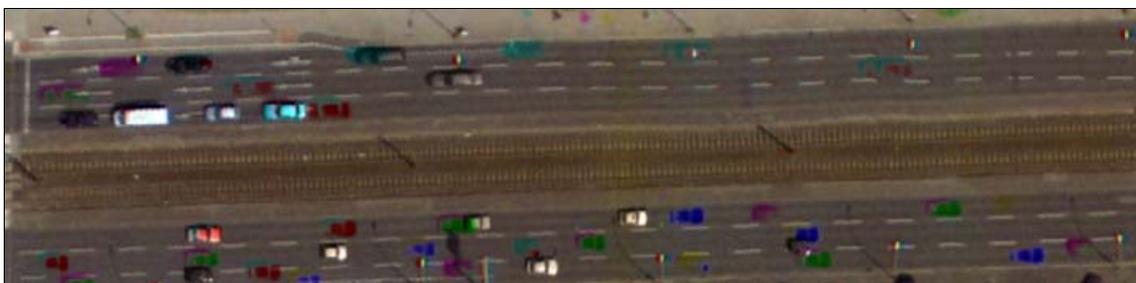


Abbildung 4.2: HRSC-AX-typische Abbildung bewegter Objekte
(Originalpixel 20 cm)

HRSC-AX 2005

Für die Befliegung in 2005 liegt ein besonderer Fehler im Bild vor, der sich unkorrigiert deutlich durch sehr grobe Wackler in Form von Versätzen bemerkbar macht. Diese sind im 8bit-RGB besonders auffällig, im 16bit RGB dagegen durch die Möglichkeiten in der photogrammetrischen Verarbeitung weitgehend eliminiert. Deutliche Schattenbereiche bleiben enthalten. Dem ungeachtet weist dieser Datensatz eine deutlich verbesserte Abbildung der Gebäudekanten auf. Farbsäume sind auch hier vorhanden, ohne aber die Qualität der Kantendarstellung zu beeinträchtigt. Dies könnte durch die Darstellung im Oberflächenmodell zusätzlich bestätigt werden.

Nur vereinzelt treten verformte Gebäude und auch Gebäudekanten auf, ungenaue Konturen und eine diffuse Verwischung aufweisen. In einigen Bildbereichen sind besonders hohe Objekte deutlich überstrahlt dargestellt, dort kommt es zu Sättigungseffekten, deutlich am Hochhaus am *Platz der Vereinten Nationen* im Norden des Testgebietes. Im Histogramm zeigt sich ein Anstieg um den Grauwert 255.

4.2.2.2 MFC 3

Zunächst ist eine deutliche höhere laterale Auflösung von 12,5 cm zu verzeichnen, begründet vor allem durch die geringe Flughöhe unter der kontinuierlich vorhandenen Wolkendecke. Die Bilddaten wirken etwas abgedunkelt, bieten aber ausreichend Kontrast um Objektinformationen abzuleiten. Bei genauerer Untersuchung werden Artefakte besonders in der Kantendarstellung der Gebäude sichtbar. Die Abbildungen

4.3 und 4.4 zeigen den Ausschnitt eines kreisförmigen Gebäudes. Zunächst im Orthobild und vergleichend dazu im DOM.



Abbildung 4.3: MFC 3 2008 - Artefakte bei der Kantendarstellung.
(Originalpixel 12,5 cm)



Abbildung 4.4: MFC 3 2008 Artefakt im DOM.
(Originalpixel 12,5 cm)

4.2.2.3 UltraCam_D 2006

An den Daten der UltraCam_D gilt als Besonderheit, dass das Aufnahmeprinzip keine bewegten Bildinhalte abbildet, unter anderem keine Bilddaten fahrender Fahrzeuge. Vereinzelt lassen sich so genannte Geisterbilder erkennen. Dies ist dann der Fall, wenn sich ein Objekt am Boden nur sehr langsam bewegt, z. B. dann, wenn ein Fahrzeug an einer Ampel langsam zum Stillstand kommt. Die Darstellung bleibt schemenhaft. Auch windbewegte Bäume zeigen eine leicht transparente Textur. Die Auflösung von 7 cm ist bei der Befliegung mit der UltraCam_D den höchsten Detailgrad erwarten. Bei Betrachtung der Daten werden Ungenauigkeiten sichtbar, deutliche Versatze im RGB,

besonders an bodennahen und linearen Objekten. In Abbildung 4.5 ist dies am Beispiel einer Markierung auf einem Sportplatz verdeutlicht.

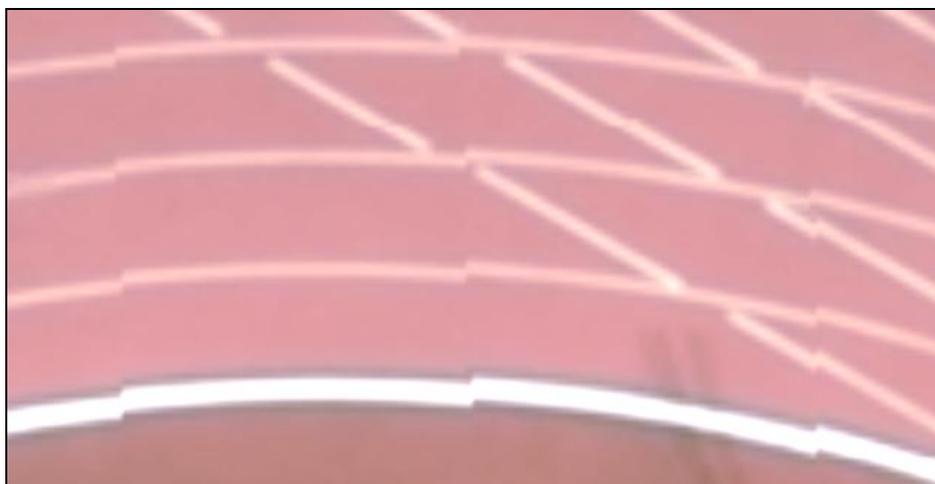


Abbildung 4.5: UltraCam_D Berlin 2006 - Versatze im RGB.

4.2.3 Lagegenauigkeiten

In die Untersuchung fließen vorrangig Gebäude mit 5 bis 11 Geschossen und vereinzelt Gebäude mit einem oder zwei Geschossen ein, um auch hier mögliche Höhenabhängigkeiten festzustellen. Die Geometrien der Gebäude werden nicht automatisiert generiert, sondern manuell erfasst. Dies gewährleistet eine genauere Feststellung der Flächen. Hauseingänge und kleine Anbauten, die in der ALK erfasst sind, finden bei der Digitalisierung keine Berücksichtigung. Zur Beurteilung der Lageabweichung sind die vier äußeren Ecken ausreichend. Wird die Lage ermittelt, dann nur für Gebäude, bei denen die Kanten eindeutig lokalisiert und abgeleitet werden konnten. Um Kanten und Linien im RGB besser erkennen und optimal digitalisieren zu können werden die Bilddaten in ArcGIS 9.2 einem temporären Stretchverfahren unterzogen, damit auch in dunkleren Bildbereichen exakte Geometrien erkennbar sind. Um die Kanten deutlich lokalisieren zu können, wird eine geeignete Resampling-Methode (*Bilineare Interpolation* oder *Kubische Konvolution*) temporär eingesetzt. Objekte die bei starkem Zoom durch die Pixeldarstellung schwer identifizierbar sind, heben sich so deutlicher ab. Bei beiden Verfahren ändern sich die Bilddaten nur temporär in der Datenansicht. Die Originaldatensätze bleiben unverändert bestehen.

HRSC-AX 2003 RGB in 8bit

Blickwinkelunterschiede in den Farbkanälen Rot, Grün und Blau begründen starke Farbsäumen, die sich in Abhängigkeit vom Oberflächenmodell mehr oder weniger stark auswirken können. Neben der besonders starken Beeinträchtigung durch Farbsäume zeigen sich auch eine deutliche Verformung der Gebäudegeometrie und damit eine starke Verminderung der präzisen Abbildung der Gebäudekanten. Auffällig ist, die Verformung tritt vermehrt bei hohen Gebäuden auf. Es darf vermutet werden, dass die Stärke der Verformung und das Vorhandensein von deutlichen Farbsäumen von der Gebäudehöhe abhängig sind und eine Regelmäßigkeit vorhanden ist. Je höher ein Gebäude, desto stärker wirkt sich dieser Effekt vermutlich aus. Dieser Umstand erschwert das Erfassen der tatsächlichen Gebäudegeometrien.

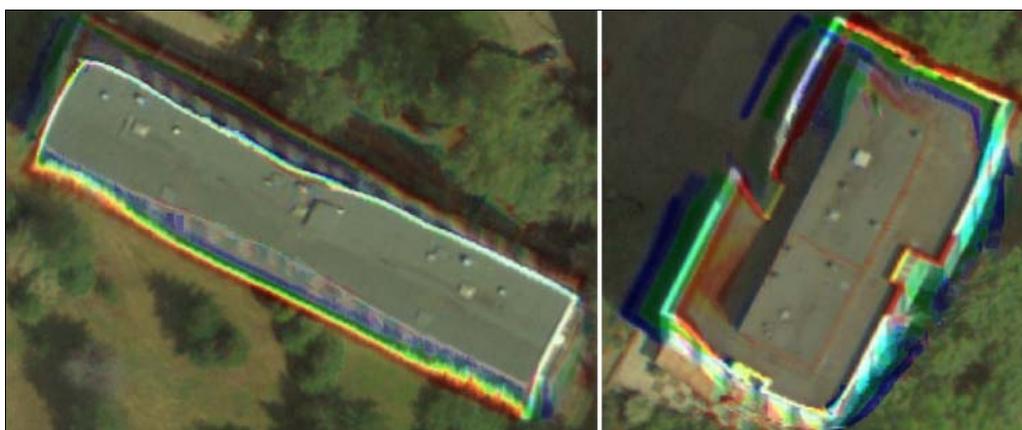


Abbildung 4.6: HRSC-AX 2003, Darstellung der Gebäudekanten.
(Originalpixel 20 cm)

Die Stichprobe dezimiert sich dadurch deutlich. Vereinzelt beinhaltet der Datensatz Gebäude, bei denen die tatsächlichen Kanten des Gebäudes durch die Verformung kaum noch nachvollziehbar sind. Dennoch werden auch diese zunächst zur Vollständigkeit digitalisiert, aber in der Attributtabelle markiert und später aus der Stichprobe entfernt. In einigen Bildbereichen mit eher flacher Bebauung ist das Erkennen der Gebäudekanten durch deutliche Schlagschatten besonders problematisch. Diese Bereiche bieten zu wenig Kontrast und weisen einen hohen Anteil an dunklen Pixeln auf. Im Histogramm auffällig durch eine Häufung im Bereich der niedrigen Grauwerte.

HRSC-AX 2005 RGB in 16bit

Die Ableitung der Geometrie im Orthobild der HRSC-AX-Befliegung aus 2005 mit einem Dynamikumumfang von 16bit ist weniger problematisch. Dennoch gibt es Bildbereiche die trotz der verbesserten radiometrischen Auflösung aufgrund von Schlagschatten nur wenig Kontrast bieten.

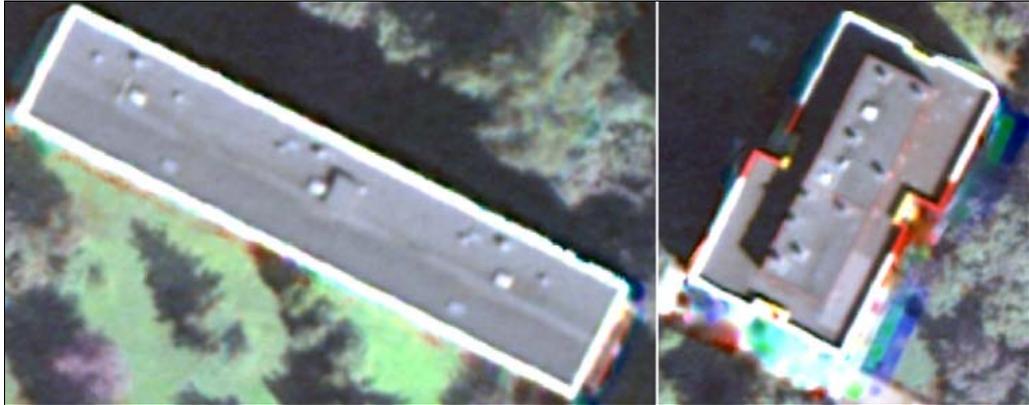


Abbildung 4.7: HRSC-AX 2005, Darstellung der Gebäudekanten.
(Originalpixel 20 cm)

Gebäude von bis zu II Geschossen sind so stark von Schatten hoher Nachbargebäude beeinträchtigt, so dass deren Kanten als solche nicht lokalisierbar sind. Sie werden der Analyse entnommen. Auch dieser Datensatz ist vereinzelt durch Farbsäume betroffen, durch die verbesserte Darstellung der Kanten, kommen diese aber nicht so deutlich zum Tragen. Auffällig dagegen werden die Farbsäume bei höheren Gebäuden, verdeutlicht in Abbildung 4.7.



Abbildung 4.8: UltraCam_D 2006, Darstellung der Gebäudekanten.
(Originalpixel 7 cm)

UltraCam_D 2006 RGB in 12bit

Die Ableitung der Geometrie in den Bilddaten der UltraCam_D ist problemlos ausführbar. Der hohe Auflösungsbereich gewährleistet ein besonders gutes Erkennen der Gebäudeumrisse (siehe Abbildung 4.8). Die zusätzlich klare Darstellung der Gebäudekanten vereinfacht das präzise Erstellen der Polygone in ArcGIS 9.2.

MFC3 in RGB 8bit

Zur Bestimmung der Lagegenauigkeit wird gleichfalls ein Ausschnitt der Folie 11 der ALK hinzugezogen. Der Ausschnitt umfasst Gebäudegeometrien aus dem Stadtbezirk Treptow-Köpenick.

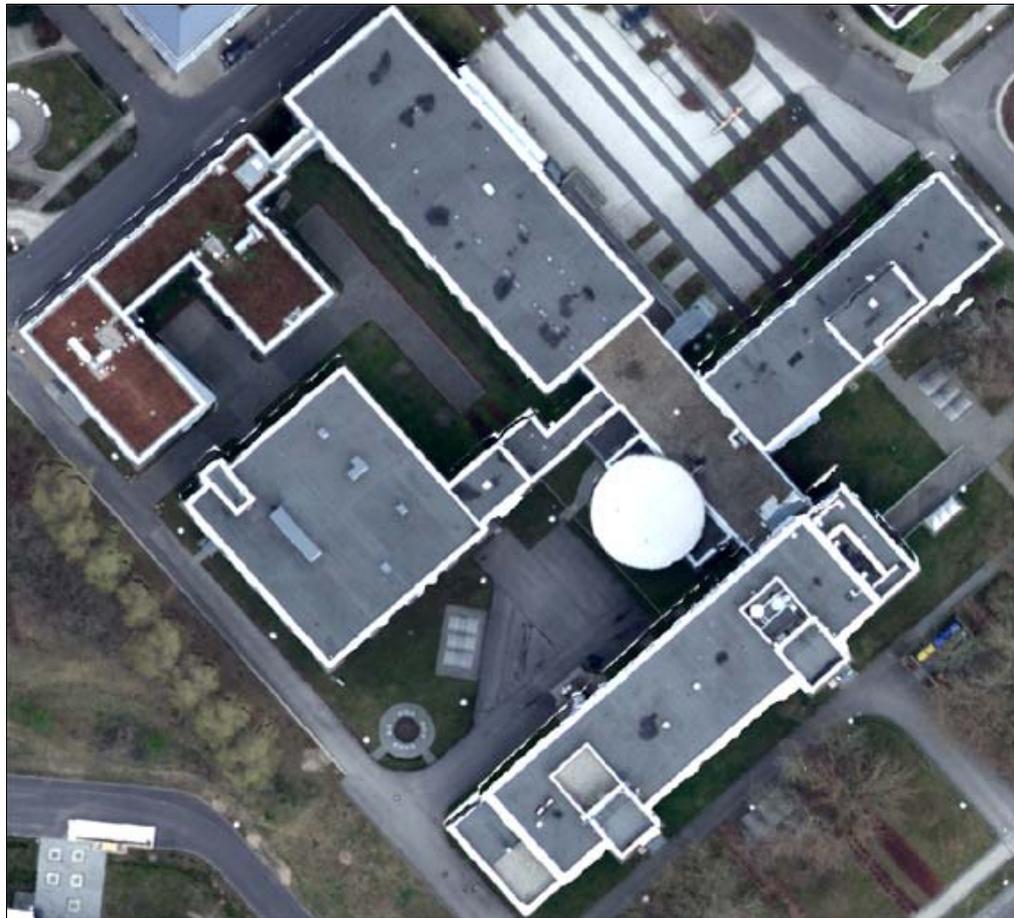


Abbildung 4.9: MFC 3, DLR-Standort Berlin-Adlershof.
(Originalpixel 12,5 cm)

Um die Ergebnisse der Lageabweichung der MFC 3 als vergleichende Größe hinzuziehen zu können, wird die Anzahl der Strichproben in diesem Bereich einen ähnlichen Umfang aufweisen. Erschwerend wirkt die abweichende Gebäudestruktur mit vielen Sondergebäuden, die die Stichprobe deutlich verringern.

Bei Betrachtung der Orthobilder der MFC 3 ist zunächst eine adäquate Abbildung der Gebäudekanten sichtbar. Bei genauer Untersuchung fällt jedoch auf, dass die Gebäudeecken abgerundet erscheinen und die Kanten, verursacht durch das Oberflächenmodell, scheinbar unterbrochen versetzt bzw. sehr zerklüftet abgebildet werden. Abbildung 4.10 verdeutlicht das. Dieser Umstand erschwert das Abgreifen der Gebäudekanten erheblich. Auffällig ist außerdem ein ähnlicher Versatz in Ost-West-Ausdehnung, wie er in den Daten der UltraCam_D zu finden ist.



Abbildung 4.10: MFC 3 Artefakt in der Kantendarstellung.

(Originalpixel 12,5 cm)

Bei der Überlagerung der Rasterdaten mit den Vektoren der ALK und bloßer Betrachtung ist bereits auffällig, dass eine scheinbare Translation in Form der Verschiebung der Gebäudedarstellung nach außen vorliegt. Auch Gebäude mit geringer Höhe vermitteln diesen Eindruck. Begründen könnte sich dies durch den deutlich höheren Öffnungswinkel der Optik, der normal die Möglichkeit der Abbildung von Fassaden beabsichtigt.

4.2.3.1 Bestimmung der Gebäudeeckpunkte

Zunächst wird ein neues Punkt-Shapes im ArcCatalog erstellt. Die Eckpunkte der Gebäude werden im Editor im Uhrzeigersinn und mit Hilfe der Funktion *Snapping* auf Basis der Gebäudepolygone erfasst. (Abbildung 4.11) Zum eindeutigen Identifizieren der Eckpunkte werden diese anschließend in der Attributtabelle systematisch nummeriert, so dass jedes Gebäude vier spezifisch eindeutig benannte Eckpunkte aufweist. Dies ist hilfreich um bei der späteren Lageabweichung zwischen den Punkt-Shapes der ALK und den Punkt-Shapes des jeweiligen Sensors immer von identischem Punkt ausgehen zu können.



Abbildung 4.11: UltraCam_D, digitalisierte Kanten und Eckpunkte.
(Originalpixel 7 cm)

4.2.3.2 Berechnung der Punktkoordinaten in ArcGIS 9.2

Zunächst werden die Gebäudeeckpunkte auf Basis der bereits vorhandenen Gebäudepolygone erstellt. Die Abbildung 4.12 dokumentiert exemplarisch auf Basis des Orthobildes der UltraCam_D die unterschiedlichen Positionen der digitalisierten

Gebäudeeckpunkte in den jeweiligen Sensordaten. Die Geometrien der UltraCam_D mit ihren Polygonen und Eckpunkten sind in rot, die der HRSC-AX aus 2005 in blau und die Vektoren der HRSC-AX aus 2003 in orange dargestellt. In Grün sind die Geometrien der ALK, als amtliche Referenz visualisiert.

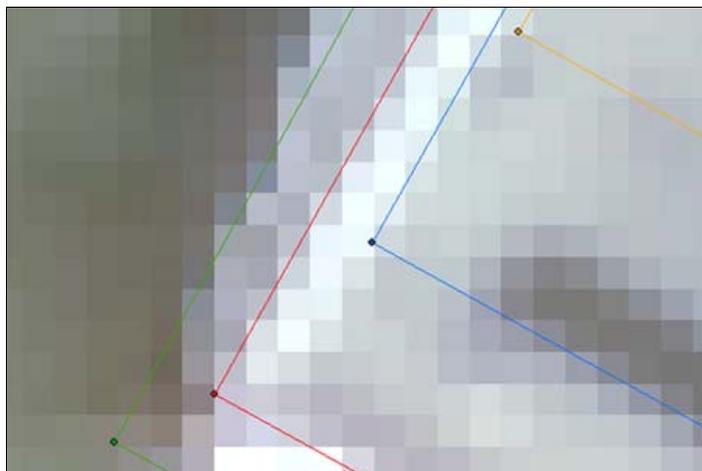


Abbildung 4.12: Lageverschiebung der Datensätze zueinander.
(Originalpixel 7 cm)

Zur Ermittlung der Lageverschiebung der Vektoren und Punkte gegeneinander, werden die x, y-Koordinaten der Gebäudeeckpunkte berechnet. Dieses wird im Editiermodus des jeweiligen Punkt-Shapes durchgeführt. Zuvor werden in der Attributtabelle des ausgewählten Punkt-Shapes zwei neue Spalten angelegt, in die später die Koordinaten während der Berechnung automatisiert eingetragen werden. Diese Spalten werden mit *x_position* und *y_position* benannt und als Gleitkommazahl, für die doppelte Genauigkeit *Double* und für Koordinaten geeignet, angelegt. Um die Koordinaten errechnen zu können wird nach Generieren der beiden neuen Attributspalten im Editiermodus direkt in der Attributtabelle mit Hilfe des *Field Calculators* zuerst die x-Koordinate und anschließend die y-Koordinate der Eckpunkte mit dem VBA Statements wie folgt berechnet:

x-coordinate of a point:	y-coordinate of a point:
<code>Dim dblX As Double</code>	<code>Dim dblY As Double</code>
<code>Dim pPoint As IPoint</code>	<code>Dim pPoint As IPoint</code>
<code>Set pPoint = [Shape]</code>	<code>Set pPoint = [Shape]</code>
<code>dblX = pPoint.X</code>	<code>dblY = pPoint.Y</code>

Tabelle 4.1: VBA-Statements zur Berechnung der x, y-Koordinaten

Unter Anwendung dieser Verfahrensweise zur Berechnung der Punkt-Koordinaten ergibt sich das folgende, wie in Abbildung 4.13 exemplarische aufgezeigte Ergebnis. Auf Basis dieser Koordinaten, nach Durchführung der vollständigen Berechnungen und korrekten Bezeichnung aller vorhandenen Punkte, kann nun jede Attributtabelle als dbf-Datei exportiert und in MS Excel 2003 für die Berechnung der genauen Lageabweichung, zwischen den Datensätzen und besonders die Abweichung zur ALK, eingesetzt werden. Die Genauigkeit wird hier auf sechs Dezimalstellen berechnet, ist für die Auswertung ist wegen teilweise geringer Auflösung in diesem Detailgrad nicht zwingend notwendig. In der weiteren Untersuchung wird sich daher auf nur drei Dezimalstellen bezogen.

FID	Shape *	ID Punkt	x position	y position
0	Point	0-1	26073,402851	21434,710897
1	Point	0-2	26067,742447	21423,747051
2	Point	0-3	26013,943111	21449,958291
3	Point	0-4	26019,603515	21461,534073
4	Point	1-1	25839,599398	21472,087347
5	Point	1-2	25891,89563	21445,486272
6	Point	1-3	25886,418938	21434,574066
7	Point	1-4	25834,163885	21461,216319
8	Point	2-1	25872,207488	21407,79135
9	Point	2-2	25924,467579	21381,494416
10	Point	2-3	25919,118358	21370,714306

Abbildung 4.13: ArcGIS 9.2, Attributtabelle der Gebäudeeckpunkte.

4.2.3.3 Berechnung der Lageabweichung mit MS Excel

Sensor	Standardabweichung s_x scheinbarer Verbesserungen	Standardabweichung s_y scheinbarer Verbesserungen
HRSC-AX 2003	0,405	0,926
HRSC-AX 2005	0,361	0,437
UltraCam_D	0,318	0,330
MFC 3	0,394	0,065

Tabelle 4.2: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen in m.

Das Gebäude mit der ID 47 wird aus der Berechnung entnommen, da es einen deutlichen Ausreißer darstellt. Begründet ist dies durch die drastische Abweichung der ALK-Vektoren von den sichtbaren Geometrien im Luftbild. Das lässt Rückschlüsse darauf zu, dass das Gebäude einen aus der Draufsicht nicht sichtbaren Überstand aufweist, Dach- und Grundfläche nicht identisch sind. In Tabelle 4.3 und 4.4 werden die maximalen und minimalen Abweichungen, sowie die mittleren Abweichungen in x und y differenziert nach Kamerasystem und dem Jahr der Bildaufnahme dokumentiert.

Sensor	Abweichung _{min}		Abweichung _{max}	
	x	y	x	y
HRSC-AX 2003	±0,001	0,000	-1,550	-2,439
HRSC-AX 2005	0,002	0,001	+0,988	1,298
UltraCam_D	0,001	0,003	0,945	-0,998
MFC 3	0,012	-0,002	1,610	-1,115

Tabelle 4.3: Abweichung_{min/max} zur ALK in m.

Sensor	Mittlere Abweichung in x	Mittlere Abweichung in y
HRSC-AX 2003	-0,098	-0,178
HRSC-AX 2005	0,051	-0,054
UltraCam_D	0,053	0,028
MFC 3	0,590	0,006

Tabelle 4.4: Mittlere Abweichung zur ALK in m.

4.2.3.4 Lageverschiebung in Abhängigkeit der Gebäudehöhe

In diesem Abschnitt wird die Abhängigkeit der Lageverschiebung zur Gebäudehöhe hergeleitet und dokumentiert. Dazu werden die *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen* für die Gebäudegruppierungen, gebildet aus den integrierten Geschosszahlen, ermittelt.

Sensor	Geschoss	$s_x = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$ in m	$s_y = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}$ in m
HRSC-AX 2003	I	0,101	0,212
	II	0,209	0,202
	V	0,312	0,255
	VIII	0,312	0,751
	X	0,445	0,909
	XI	0,331	1,123
	XII	0,452	0,967
	XVIII	0,633	2,431
HRSC-AX 2005	I	0,178	0,180
	II	0,139	0,371
	V	0,500	0,287
	VIII	0,382	0,443
	X	0,369	0,449
	XI	0,214	0,597
	XII	0,145	0,364
	XVIII	0,520	0,611
UltraCam_D 2006	I	0,211	0,157
	II	0,247	0,154
	V	0,140	0,173
	VIII	0,294	0,306
	X	0,349	0,348
	XI	0,296	0,670
	XII	0,192	0,227
	XVIII	0,462	0,496
MFC 3 2008	I	0,592	0,224
	II	0,665	0,243
	IV	0,667	0,337
	V	0,643	0,132
	VIII	0,574	0,154
	IX	0,717	0,187

Tabelle 4.5: Standardabweichung scheinbarer Verbesserungen abhängig der Höhe.

4.2.4 Höhengenaugigkeiten

Die absoluten Höhen werden aus dem digitalen Oberflächenmodell abgeleitet. Für den direkten Vergleich mit real gemessenen Höhen existieren sechs amtlich vermessene Höhenfestpunkt für den Bereich des Testgebiets im Bezirk Berlin-Mitte, die sich in den Kartenblättern 41918 und 41818 der K10 im Maßstab 1:10.000 befinden. Fünf weitere Höhenfestpunkte befinden sich im Testgebiet auf Seite des Bezirkes Friedrichshain-Kreuzberg, gelegen in den Kartenblättern 41717, 41817, 41917 und 42017 der K10. Bei Punkten, die mit einer 8 beginnen handelt es sich um übergeordnete Höhenfestpunkte, alle anderen tragen nur die Bezeichnung Festpunkt. In Tabelle 4.6 und Abbildung 4.15 werden die Lage und die Höhe über NHN und über Grund der Höhenfestpunkte mit zugehöriger Festpunktnummer dokumentiert.

4.2.4.1 Parameter der Höhenfestpunkte

Punkt	Blatt	Lage	ü. NHN in m	H.G. in m
Bezirk (01) Berlin-Mitte				
61822	41918	25983 E/ 21693 N	36,732	0,25
61019	41818	26283 E/ 21073 N	35,896	0,30
60884	41818	26284 E/ 20960 N	35,327	0,20
61009	41818	26118 E/ 20823 N	35,127	0,19
80003	41918	26167 E/ 21463 N	36,737	0,33
80002	41918	25791 E/ 21580 N	36,908	0,33
Bezirk (02) Friedrichshain-Kreuzberg				
60954	41917	26993 E/ 21745 N	37,550	0,30
61472	41717	26560 E/ 20648 N	35,238	0,40
60956	42017	26669 E/ 22083 N	40,787	0,25
81012	41817	26715 E/ 21218 N	36,731	0,35
81008	41917	26851 E/ 21572 N	36,042	0,31

Tabelle 4.6: Höhenfestpunkte im Testgebiet.



Abbildung 4.14: Höhenfestpunkte im Testgebiet Innenstadt (DOM).

4.2.4.2 Höhen im DOM

Die Geoidundulation, sie entspricht dem Abstand oder auch der Höhenunterschied in einem gedachten orthogonalen Lot vom Quasigeoid auf den Erdellipsoiden, beträgt in Berlin zwischen 38,8 m im Nordosten der Stadt und 40,0 m im Südwesten. Im Bereich um den Strausberger Platz sind dies 39,2 m. (Quelle: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2005). Diese Geoidundulation ist signifikant, da die Höhen im Oberflächenmodell aller Sensoren zunächst auf WGS84 gerechnet und damit eine Angabe von ellipsoidischen Höhen aufweisen. Dieser Wert wird somit theoretisch einbezogen. Dies ist jeweils davon abhängig, von welchem Höhensystem allgemein

ausgegangen wird. Da die in den Oberflächenmodellen gemessenen Höhen mit den amtlichen vermessenen Festpunkten gegenüber gestellt werden und diese Werte Höhen über NHN repräsentieren, muss diese Geoidundulation in jedem Fall berücksichtigt werden. Das ergibt, dass die vorgenannten 39,2 m im DOM vom gemessenen Höhenwert subtrahiert werden müssen, wenn die Angabe der Höhe über dem Quasigeoiden gewünscht ist.

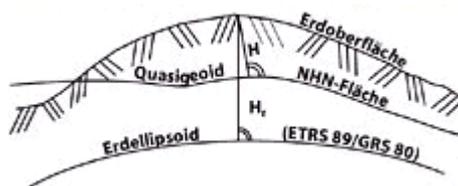


Abbildung 4.15: Geoidundulation
(Quelle: SenStadt Berlin)

Oberflächenmodell Innenstadt Berlin

Bei der Messung der Höhe am Boden ist darauf zu achten, dass keine Objekte etwa parkende Fahrzeuge, Straßeninventar oder niedrige Vegetation, wie Büsche oder Sträucher erfasst werden. Dies lässt sich in der Regel am Grauwert, dem Flächenausmaß und von der Form des Objektes ableiten.

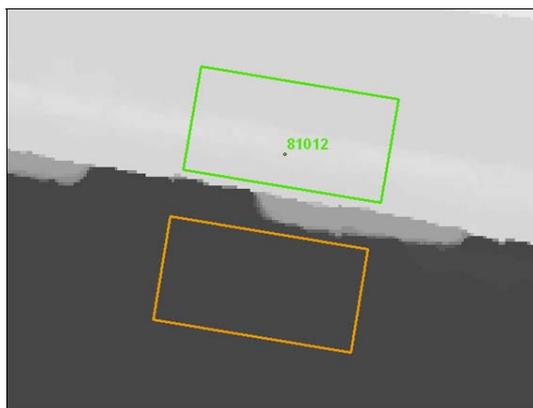


Abbildung 4.16: Höhenableitung im DOM der UltraCam_D.

Sie Schwierigkeit während der Verifizierung der gegebenen Festpunkte ergibt sich aus der Tatsache, dass diese in Form der bereits beschriebenen Mauerbolzen vermarktet werden. Sie befinden sich unmittelbar über dem Boden, im Sockelbereich der jeweiligen Gebäudeaußenwand verankert. Dabei ist durchaus üblich, dass dieser

Messpunkt von einem Dachüberstand verdeckt ist und im DOM nur die Höhe des Gebäudes abgegriffen werden kann. Da so kein korrektes Ergebnis darstellbar ist, wird parallel zur Dachkante der Grauwert am Boden gemessen. Da dieser variiert und der genaue Punkt nicht feststellbar ist, wird der Mittelwert aus mehreren am Boden gemessene Höhen gebildet. Dieser Mittelwert wird dann als die tatsächliche Höhe im DOM angenommen.

Im Datensatz der UltraCam_D ist das Ableiten der Höhen gut durchführbar. Schwierigkeiten ergeben sich dagegen besonders bei der Ableitung der Höhen in den Daten der HRSC-AX von 2005. Unerwartet erschwert lassen sich die Gebäudeumrisse und damit auch das genaue Lokalisieren der Bodenpunkte um den gesuchten Festpunkt realisieren. Die Angaben in den Daten der HRSC-AX sind ebenso wie die Höhen im DOM der UltraCam_D auf Höhen über WGS84 bezogen. Die Geoidundulation von 39,2 m ist damit zu berücksichtigen. Die Höhen im DOM der UltraCam_D müssen aufgrund der veränderten Skalierung der Höhe mit einem Faktor von 3,5 multipliziert werden. 10 DN sind danach 35 dm oder auch 3,5 m. In den digitalen Oberflächenmodellen der HRSC-AX entspricht 10 DN genau 100 dm d. h. 10 m.

Punkt	Referenzhöhe	HRSC 2003	HRSC 2005	UCD 2006
Bezirk (01) Berlin-Mitte				
61822	36,482	36,4	38,1	36,40
61019	35,595	34,8	38,3	36,47
60884	35,127	35,3	37,8	35,42
61009	34,937	35,4	39,3	35,11
80003	36,407	35,3	39,0	36,40
80002	36,578	37,1	38,5	36,82
Bezirk (02) Friedrichshain-Kreuzberg				
60954	37,250	35,8	38,0	37,38
61472	34,838	35,0	38,0	35,00
60956	40,537	39,8	42,0	40,85
81012	36,381	36,0	38,0	36,40
81008	35,732	36,1	38,0	35,91

Tabelle 4.7: Abgeleitete Höhen aus dem Oberflächenmodell.

Die Referenzhöhe ergibt sich aus der Höhe des Festpunktes d. h. des Mauerbolzen an der Fassade. abzüglich dessen Höhe über Grund. Details zu den Höhen der Festpunkte über NHN und der Höhe des Mauerbolzens über Grund sind im Abschnitt 4.2.4.1 aufgeführt. Die Punkte P0070721 und P0070722 sind amtlich vermessene Referenzpunkte.

Oberflächenmodell Adlershof aus der MFC 3-Befliegung 2008

Referenzpunkt	Referenzhöhe	Höhe im DOM	Abweichung in z
P0070721	74,660	73,9	0,76
P0070722	74,584	74,1	0,48
P230	74,699	74,1	0,60
P233	74,642	73,8	0,84
P241	74,548	72,9	1,65
P243	74,503	72,9	1,60
P244	74,467	72,9	1,57
P245	74,507	73,9	0,61
P258	74,326	73,9	0,43
P262	74,442	74,0	0,44
P266	74,401	72,6	1,80
P272	74,327	73,5	0,83
P273	74,319	73,6	0,72
P274	74,332	73,7	0,63
P275	74,319	73,7	0,62
P276	74,375	73,8	0,58
P277	74,376	73,7	0,68
P278	74,369	73,9	0,47
P279	74,556	73,6	0,96
P280	74,585	73,6	0,98
P282	74,548	73,7	0,85
P283	74,602	73,8	0,80
P290	73,773	72,9	0,87

Tabelle 4.8: Höhen in Adlershof vs. Höhen im DOM der MFC3 in m.

Höhenfestpunkte werden an dieser Stelle nicht verwendet. Auch im DOM der MFC 3 liegen ellipsoidische Höhen vor, wobei auch hier die Geoidundulation berücksichtigt werden könnte. Da die manuellen mit GPS eingemessenen Passpunkte auch ellipsoidische Höhenwerte implizieren, ist es an dieser Stelle der Untersuchung nicht notwendig. 23 Passpunkte werden in diesem Gebiet herangezogen. Alle diese Punkte befinden sich am Boden. Die Ableitung der Genauigkeiten und der *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen* unterliegt damit keiner Beeinträchtigung durch die Höhe.

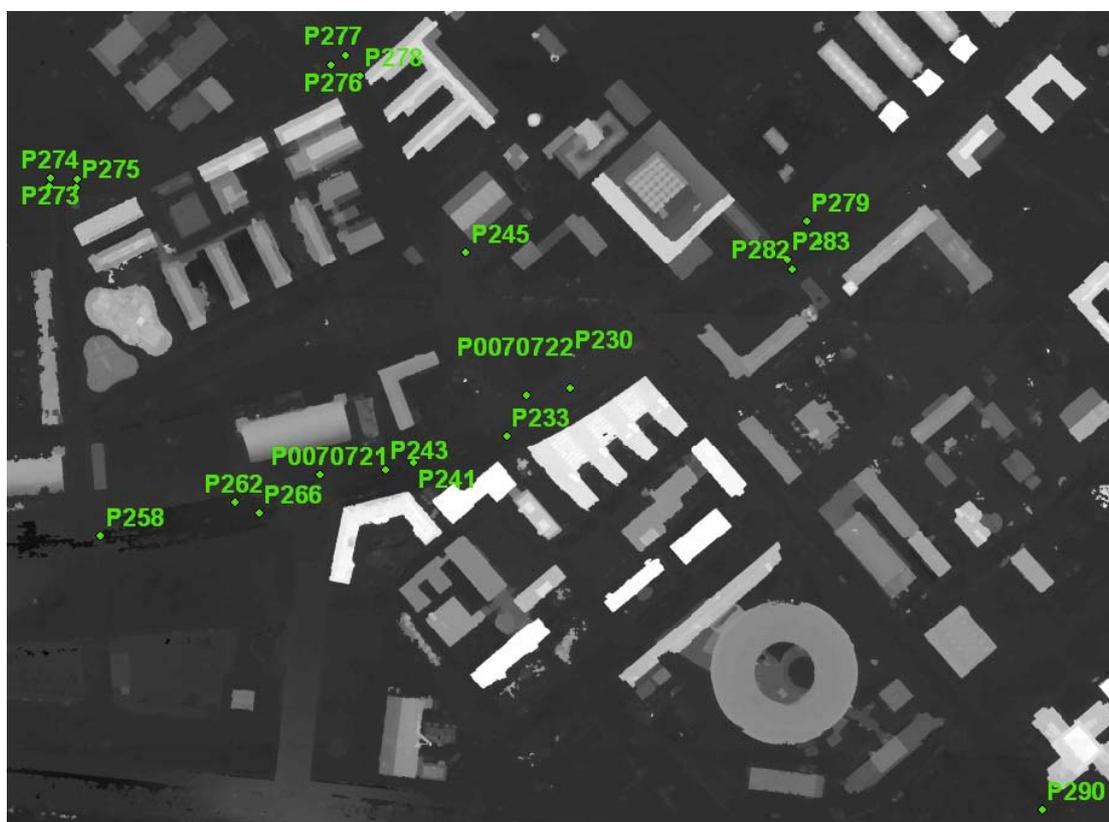


Abbildung 4.17: Verteilung der Passpunkte in Adlershof (DOM).

Sensor	Standardabweichung s_z scheinbarer Verbesserungen in m	Mittlere Abweichung in z in m
HRSC-AX 2003	0,73	0,26
HRSC-AX 2005	2,95	-2,29
UltraCam _D 2006	0,33	-0,21
MFC 3 2008	0,97	0,9

Tabelle 4.9: Standardabweichung scheinbarer Verbesserungen, mittlere Abweichung.

Vertikaler und Horizontaler Profilschnitt

Die Darstellung nahe beieinander stehender Objekte und Innenhöfe sind für einige Sensoren schwierig. Sichtstrahlen, die nicht bis zum Gebäudefußpunkt durchdringen, können solche Artefakte verursachen. Um diese Unterschiede aufzuzeigen werden in RSI ENVI 3.6 horizontale und vertikale Profilschnitte, im DOM der Matrix- und einer Zeilenkamera generiert. Beispiel ist ein Gebäude mit einem sehr markanten Innenhof.

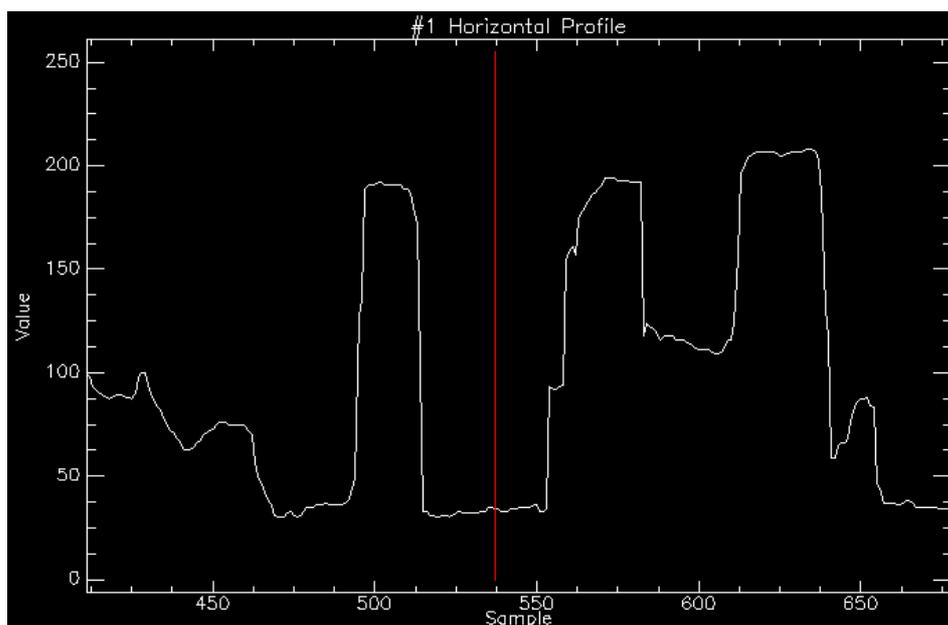


Abbildung 4.18: Horizontales Profil (in x) des HRSC-AX-DOMs 2003.

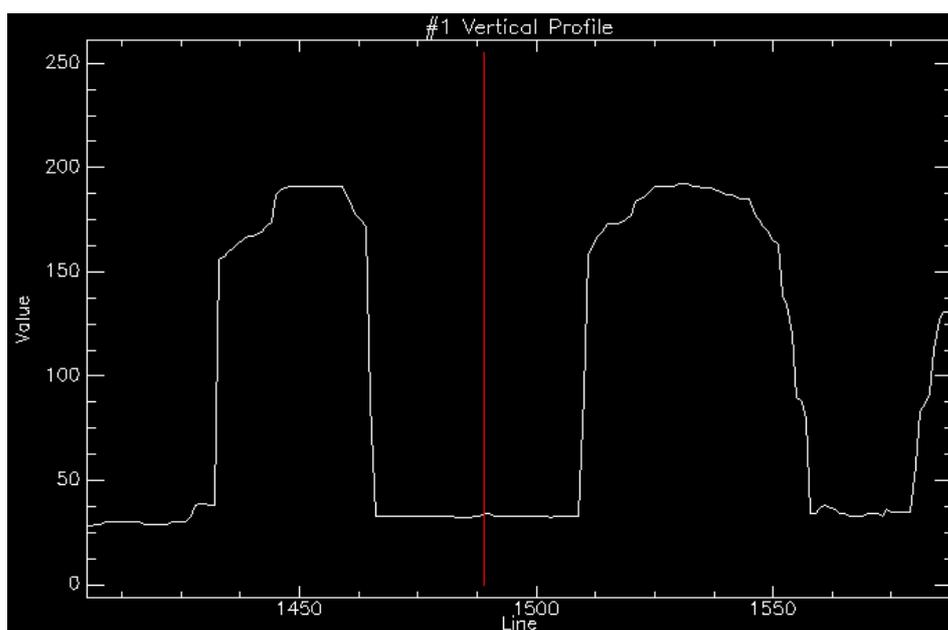


Abbildung 4.19: Vertikales Profil (in y) des HRSC-AX-DOMs 2003.

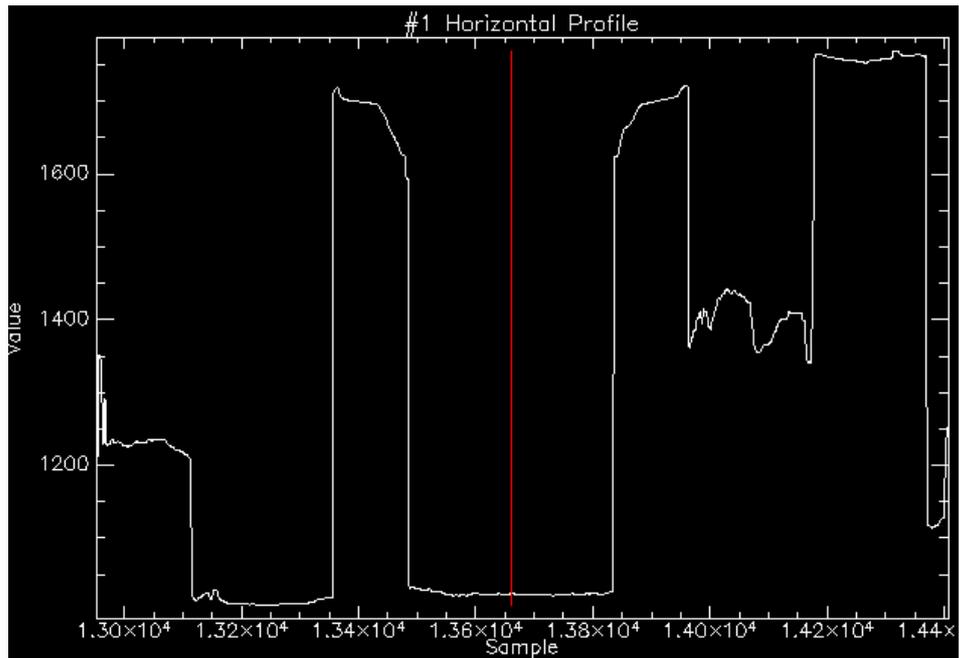


Abbildung 4.20: Horizontales Profil (in x) des UltraCamD-DOMs 2006

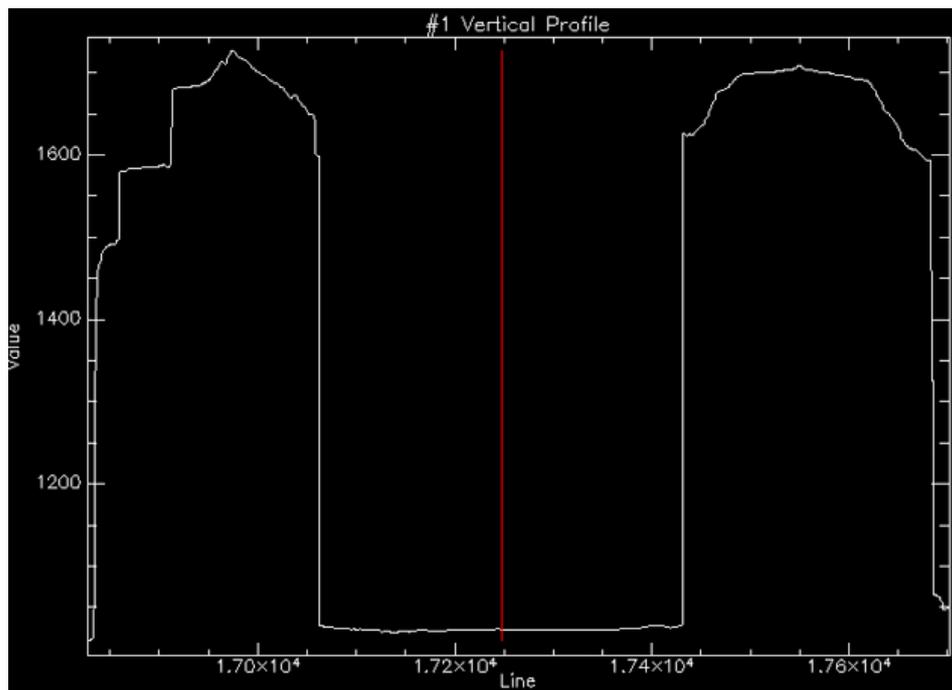


Abbildung 4.21: Vertikales Profil (in y) des UltraCamD-DOMs 2006

Erkennbar ist die exakte Darstellung der Kanten im DOM der UltraCam_D. Die Häuserkanten sind als optimale Senkrechte dargestellt. Anders ist dies im DOM der HRSC-AX. Die Gebäudekanten bilden keinen rechten Winkel zur Oberfläche im Innenhof und erscheinen deutlich unregelmäßiger gegenüber des UltraCam_D-DOMs.

4.2.5 Flächengenauigkeiten

Sinnvoll ist es noch einmal die Gebäudepolygone der ALK abzugreifen und jegliche Vorsprünge, die zur Gebäudeausgestaltung eines Gebäudes zählen, auszulassen. Dazu gehören etwa Hauseingänge und Balkone, sofern diese in der ALK vorhanden sind. Dies ist besonders wichtig, da auch bei der manuellen Digitalisierung im Rahmen der Lageuntersuchung auf solche Gebäudedetails verzichtet wird. Werden anschließend die Flächeninhalte verglichen wird nun von einer gleichen Fläche der Gebäude ausgegangen.

4.2.5.1 Flächenberechnung in ArcGIS Desktop 9.2

Zur Berechnung der Flächen in ArcGIS wird analog zur Berechnung der Punktkoordinaten vorgegangen. Zunächst wird in der Attributtabelle eine neue Spalte *Area* angelegt. Mit Hilfe des *Field Calculator* der innerhalb der Attributtabelle aufgerufen wird, werden nach Starten des Editiermodus die Quadratmeter der digitalisierten Flächen mit folgendem VBA-Statement automatisiert berechnet:

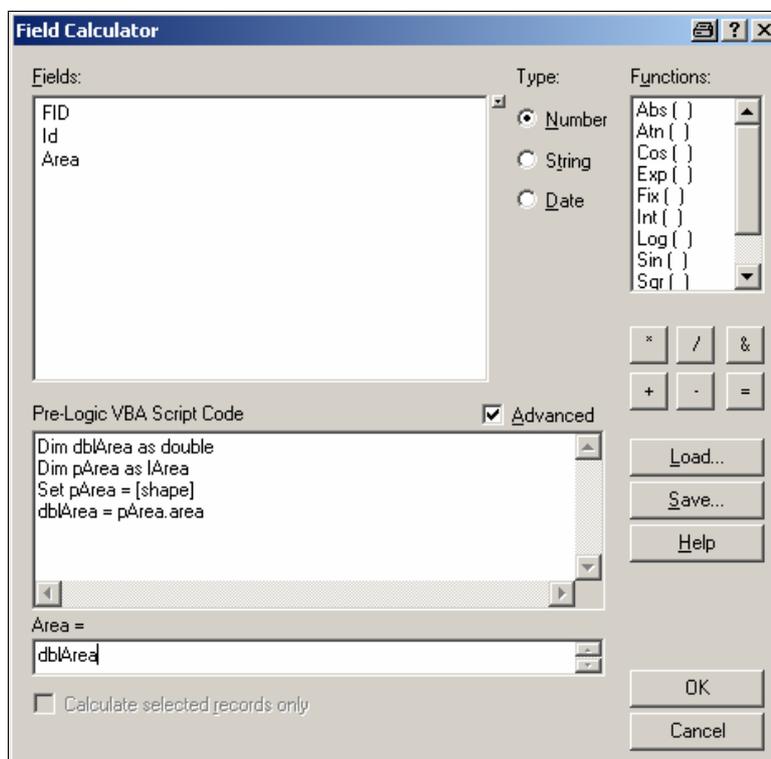


Abbildung 4.22: Field Calculator in ArcGIS 9.2, VBA Statement für *Area*.

Area:

```
Dim dblArea as double
Dim pArea as IArea
Set pArea = [shape]
dblArea = pArea.area
```

Tabelle 4.10: VBA-Statement für die Berechnung der Fläche.

4.2.5.2 Berechnung der Flächenabweichung mit MS Excel

Rasterdaten Innenstadt Berlin

Die Genauigkeiten der Flächen können theoretisch nicht größer sein, als die Genauigkeiten und der Auflösungsbereich der zugrunde liegenden Rasterdaten. Daher sind die hier ermittelten Ergebnisse auf 2 Dezimalstellen reduziert angegeben. Bei der abschließenden Selektierung werden zunächst 39 Gebäude auf Grund der eindeutigen Kantendarstellung ausgewählt. Die Berechnung der Flächeninhalte, der verbliebenen Gebäude im Schritt zuvor ergibt folgende Ergebnisse:

Fläche	ALK	HRSC-AX 2003	HRSC-AX 2005	UltraCam _D 2006
Σ	35.553,99	36.117,97	35.365,55	36.400,45

Tabelle 4.11: Flächen der Gebäude im Rasterbild und der ALK in qm.

	HRSC-AX 2003 in %	HRSC-AX 2005 in %	UltraCam _D 2006 in %
Abweichung min	0,05	-0,05	-0,27
Abweichung max	13,00	9,99	11,13
Mittlere Abweichung	1,42	-0,32	2,55
Median	0,76	-1,02	2,34
Standardabweichung	3,89	3,11	2,66

Tabelle 4.12: relative Flächenabweichungen der ALK.

Das Gebäude mit der ID 47 weist trotz geringer Gebäudehöhe eine generell deutliche Flächendifferenz auf. Dies lässt vermuten, dass der Grundriss der ALK nicht mit der

sichtbaren Dachfläche des Gebäudes korreliert. Es existiert ein so nicht feststellbarer Dachüberstand. Folglich wird dieses Gebäude ebenfalls aus der Bewertung entnommen. In die Angabe der Flächen der Gebäude mit 18 Geschossen, dies entspricht etwa einer Höhe von 60 m, sind die Abweichungen der gemessenen Flächen im Verhältnis zur ALK am stärksten. Dies ist nach visueller Sichtung der Rasterdaten zu bestätigen, jedoch fließt hier nur ein einziges Gebäude mit dieser Geschosshöhe ein und ist damit als Stichprobe nicht ausreichend. Dennoch ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Höhe die Differenzen der Flächen zur ALK ansteigen.

Geschosshöhe	ALK	HRSC03	HRSC05	UCD06
1	229,206	233,60	226,66	228,05
(2)	1.897,728	1.896,25	1.892,97	1.892,56
5	1.366,610	1.379,78	1.340,04	1.383,84
8	7.196,253	7.350,91	7.215,16	7.371,48
10	22.842,236	23.123,14	22.637,00	23.446,59
11	781,593	815,44	756,41	750,45
12	674,141	679,04	674,52	698,24
18	566,224	639,82	622,79	629,24

Tabelle 4.13: Absolute Flächendifferenz zur ALK in Abhängigkeit der Geschosse (in qm).

HRSC-AX 2003 in %	HRSC-AX 2005 in %	UltraCamD 2005 in %	MFC 3 2008 in %
+1,59	-0,53	+2,38	+0,28

Tabelle 4.14: Relative Abweichung zur ALK gesamt.

Rasterdaten Berlin Adlershof

Hier wird eine Stichprobe von 39 Gebäuden aus einer Grundgesamtheit von 56 Gebäuden entnommen. Daraus ergeben sich für die Messung der Flächen in den MFC 3-Daten und der ALK:

	ALK	MFC 3 2008	Differenz absolut	Differenz relativ
Σ	53.826,64	53.977,88	151,24	+0,28

Tabelle 4.15: Flächen der Gebäude im Rasterbild (MFC 3) und der ALK in qm.

Allgemein ist anzumerken, dass die Werte sowohl im positiven, als auch im negativen Wertebereich liegen. Die aus den Rasterdaten der MFC 3 abgeleiteten Flächen sind demnach in Abhängigkeit der ALK größer oder kleiner. Die Angabe von relativen Werten ist an dieser Stelle der Untersuchung besonders sinnvoll, da die Flächengrößen der Gebäude in diesem Gebiet deutlich schwanken und eine Angabe in absoluten Werten einen falschen Eindruck des Ergebnisses bewirken könnten. Bei der Berechnung der Flächeninhalte wird analog zu den der Innenstadtdaten vorgegangen.

Abweichung _{min}	0,01 %
Abweichung _{max}	4,60 %
Mittlere Abweichung	0,32 %
Median	0,27 %
Standardabweichung	1,59 %

Tabelle 4.16: relative Flächenabweichungen der ALK zur MFC 3.

In Tabelle 4.17 ist abschließend die Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen für die Flächenberechnung aller hier vorliegenden Sensoren aufgeführt.

HRSC-AX 2003 in qm	HRSC-AX 2005 in qm	UltraCamD 2005 in qm	MFC 3 2008 in qm
44,45	26,24	30,69	15,73

Tabelle 4.17: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen der Flächen.

5 Ergebnisse

Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Interpretation der Messwerte als Ergebnis der Untersuchung und der errechneten Resultate der statistischen Auswertung. Grundlage ist die Abweichung der Geometrien in Lage, Höhe und Fläche, abgeleitet aus den zugrunde liegenden Sensordaten in direkter Betrachtung zu den Referenzgeometrien der Automatisierten Liegenschaftskarte von Berlin und punktuell vermarkter amtlicher Höheninformationen im Testgebiet.

5.1 Auswertung der visuellen Betrachtung

Die visuelle Betrachtung der Daten belegt, dass die Bilddaten der Matrixkamera UltraCam_D mit 7 cm die höchste Auflösung und damit auch den größten informativen Detailgrad der hier untersuchten Rasterdaten bietet. Auffällig ist dies besonders bei Details am Boden und der klaren Abbildung der Gebäudekanten. Auflösungsbereiche, wie sie bei der UltraCam_D erreicht werden können, sind bei der HRSC-AX nicht ohne weiteres möglich, begründet vor allem durch die Georeferenzierung, die in einem Auflösungsbereich unter 15 cm nicht gewährleistet werden könnte. Artefakte im Orthobild der UltraCam_D, die auf Unstimmigkeiten im Oberflächenmodell zurückzuführen sind treten dennoch auf, besonders an „Verwischungen“ um die Gebäudekanten zu erkennen. Nachteilig bei Betrachtung des Orthobildes der UltraCam_D sind die Schattenbereiche, die auf einen ungünstigen Befliegungszeitpunkt hinweisen, sich aber nicht wesentlich auf das Ableiten der Geometrien auswirken. Auch die Versatze, die besonders an linearen Bodenstrukturen zu erkennen sind, wirken sich nicht negativ aus. Schlagschatten sind ebenso deutlich in den Daten der HRSC-AX aus

dem Befliegungsjahr 2005 zu erkennen. Dennoch zeichnet sich dieser Datensatz durch eine adäquate Darstellung der Gebäudekanten aus. Durch die Steigerung des Dynamikumfangs von 8bit auf 16bit lässt sich das Erkennen der Geometrien vor allem bodennaher Elemente verbessern. Auffällig bei diesem Datensatz sind lediglich die Sättigungseffekte an besonders hohen Gebäuden.

In den HRSC-AX aus 2003 leidet die Qualität der Bilddaten durch die auffällig verformte Darstellung der Gebäudekanten und die daraus resultierenden starken Farbsäume. Aus dem Aufnahmeprinzip hervorgehend werden bewegte Objekte, wie fahrende Autos, regenbogenartig dargestellt. Dies ergibt sich aus den Spektralkanälen Rot, Grün und Blau, aus den unterschiedlichen Blickwinkeln dieser Kanäle und der Fortbewegung des Flugzeuges während des Aufnahmevorgangs. Durch das Aufnahmesystem der UltraCam_D werden dort keine bewegten Objekte abgebildet.

Das Orthobild der MFC 3 weist zunächst auf eine niedrigere natürliche Beleuchtung hin, als Ergebnis der dichten Bewölkung während der Befliegung, zeigt aber im Zuge der Betrachtung der Zeilensysteme mit 12,5 cm Auflösung in x und y die höchste Auflösung. Der Detailgrad der Bildinformationen erhöht sich. Als nachteilig erweisen sich die sehr auffälligen Artefakte bei der Kantendarstellung, die das Abgreifen der Vektoren erschwert und aus ästhetischen Gesichtspunkten kein akzeptables Bild ergeben.

5.2 Auswertung der Lagegenauigkeit

Die Abweichung der Lage in Anlehnung an die ALK kann sich als positiver oder als negativer Wert darstellen. Dies bewirkt, dass Gebäude insgesamt um einen bestimmten Betrag positiv oder negativ in x oder y verschoben sind oder insgesamt größer oder kleiner als die Referenzgeometrie aus der ALK abgebildet werden. Berechnet wird dies anhand der Lage der vier äußeren Eckpunkte eines Gebäudes, die in Form der bereits beschriebenen Punkt-Shapes erfasst und als Koordinate in einer Datenbankdatei gespeichert sind.

Bei Auswertung der Messwerte und der Berechnung der maximalen Abweichung wird deutlich, dass die größte Abweichung in der y-Koordinate im Verhältnis zur ALK aus den Bilddaten der HRSC-AX 2003 mit der Differenz von -2,439 m resultiert. Die maximale Abweichung in x beträgt dem gegenüber -1,550 m. Erklären kann dies die ungenaue Darstellung der Gebäudekanten in den Bilddaten und die starke

Beeinträchtigung durch Farbsäume. Solche Artefakte entstehen aufgrund der ungenügenden Generierung des DOM. Die mittlere Abweichung der x,y-Koordinaten liegt hier in x bei -0,098 m und in y bei -0,178 m. Dies repräsentiert in der Gesamtbetrachtung aller Sensoren die höchste mittlere Abweichung.

Die genaueste Abbildung der Lage ist zunächst durch die UltraCam_D mit der maximalen Abweichung in x mit 0,945 m und in y mit -0,998 m gegeben. Die mittlere Abweichung in x ergibt 0,053 m und in y 0,028 m. Aber auch der Zeilenscanner MFC 3 mit der geringsten mittleren Abweichung in y mit nur 0,006 m ist auffällig.

Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen

Ein aufschlussreicheres Ergebnis und eine solide Größe bietet hier die *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen*, aufgeschlüsselt in x und y. Ausgeprägt ist die hohe Standardabweichung der Lage in den Daten der HRSC-AX aus 2003 mit einer Abweichung in x von 0,405 m und in y von 0,936 m. Auch hier erzielt die Matrixkamera UltraCam_D in der Gesamtbetrachtung der Lagegenauigkeit das genaueste Ergebnis. In x-Richtung betragen die *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen* 0,318 m, in y-Richtung mit 0,330 m. Zum besseren Verständnis sind die errechneten Standardabweichungen je Sensor in Abbildung 5.1 visualisiert.

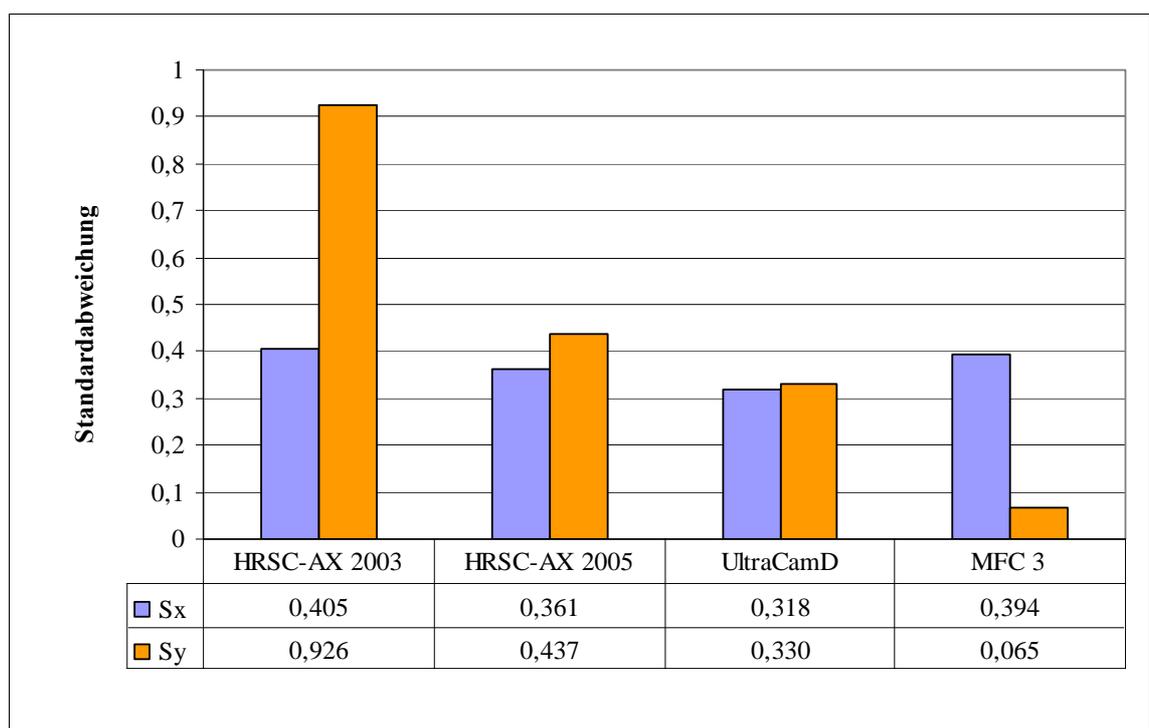


Abbildung 5.1: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen in m

Lagegenauigkeit in Abhängigkeit der Höhe

Bei Betrachtung der Lagegenauigkeit, dargestellt mit der *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen*, ist in x- und y-Richtung ein Trend zu erkennen. Er zeigt die Verringerung der Lagegenauigkeit mit Zunahme der Höhe.

Am stärksten ist dieser Trend bei den Geometrien der HRSC-AX aus dem Jahr 2003 zu verzeichnen und in Abbildung 5.2 als Zusammenhang graphisch verdeutlicht. Gebäude mit nur einem Geschoss bewirken in x-Richtung eine Abweichung von nur 0,1 m und in y-Richtung von 0,2 m. Bei einem Gebäude mit 5 Geschossen beträgt die Aberration in x bereits 0,45 m und in y 0,99 m. Ein 18-geschossiges Gebäude hat eine Standardabweichung zu der x-Koordinate der ALK von 0,63 m und zu der y-Koordinate bereits 2,43 m. Eine vergleichbare Tendenz ergibt sich aus dem Befliegungsjahr 2005 der HRSC-AX und auch aus den Daten der UltraCam_D aus 2006. Auffällig ist ferner, dass die Abweichungen in y-Richtung deutlicher höher ausfallen als in x-Richtung.

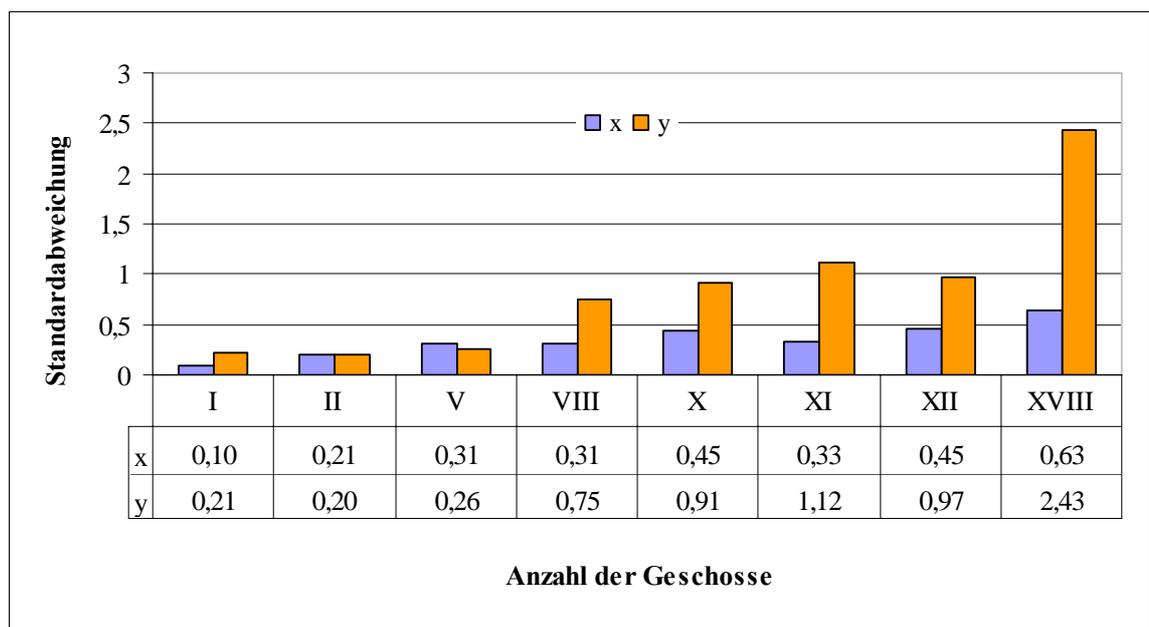


Abbildung 5.2: HRSC-AX 2003, Standardabweichung abhängig der Höhe in m.

Bei den Geometrien der MFC 3 ist diese Tendenz nicht so eindeutig vorhanden, siehe Abbildung 5.3. Dies kann aus der weniger starken Höhendifferenz, der zu untersuchenden Gebäude resultieren, aber auch aus der tatsächlich besseren Umsetzung der Objekte und deren Höhen im DOM. So ergibt sich bei einem Gebäude von nur einem Geschoss eine *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen* in x von

0,6 m und in y von nur 0,22 m. Bei Betrachtung der Gebäude mit 4 Geschossen sind dies in x-Richtung 0,7 m und in y-Richtung nur 0,19 m. Auffällig ist die besonders konstant hohe Abweichung in der x-Koordinate.

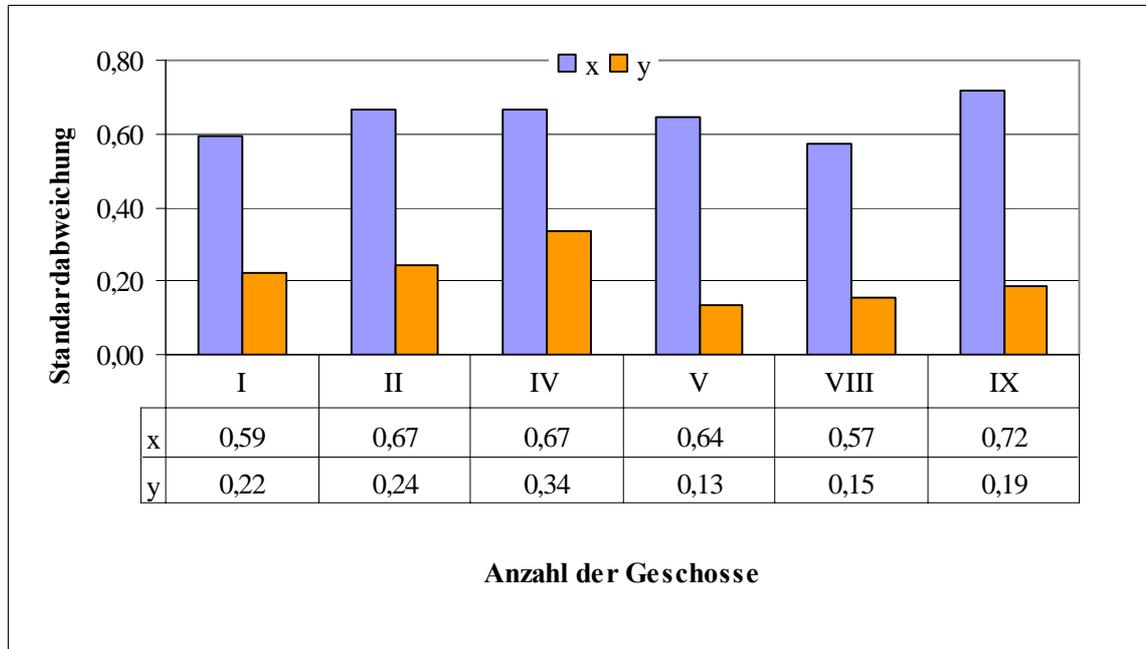


Abbildung 5.3: MFC 3 2008, Standardabweichung abhängig der Höhe in m.

5.3 Auswertung der Höhengenaugigkeit

Die Höhen, abgeleitet aus dem grauwertkodierte DOM der HRSC-AX aus 2005 weisen die stärksten Abweichungen gegenüber den amtlich gemessenen Höhen auf. Die größte Abweichung besteht bei dem Höhenfestpunkt 61009, der die Höhe von 34,94 m über NHN hat, im DOM der HRSC-AX 2005 aber eine Höhe von 39,3 m ü. NHN aufzeigt. Das ergibt einen absoluten Höhenunterschied von 4,4 m. Wenn an dieser Stelle davon ausgegangen wird, dass kein eindeutiger Bodenpunkt ermittelt wurde, so wäre ein Objekt von rund 4 m Höhe dennoch bei der Messung im Oberflächenmodell identifizierbar und im Orthobild nachvollziehbar. Auch der Festpunkt 61472 weist im Verhältnis zum DOM der HRSC-AX (2005) einen ähnlichen hohen Unterschied auf.

Die geringste Abweichung der Höhen, repräsentiert durch die *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen*, das DOM der Matrixkamera UltraCam_D. Die Standardabweichung beträgt an dieser Stelle nur 0,33 m, hingegen die Standardabweichung im DOM der HRSC-AX aus 2005 auffällige 2,95 m beträgt.

Es kann sich nur um einen sehr groben Fehler im gesamten Oberflächenmodell handeln, der im Zuge der Prozessierung entstanden ist. Der gleiche Sensor aus 2003 erzielt eine Standardabweichung von 0,73 m. In Abbildung 5.4 sind die absoluten Werte der Höhenmessung in Betrachtung zur Referenzhöhe veranschaulicht.

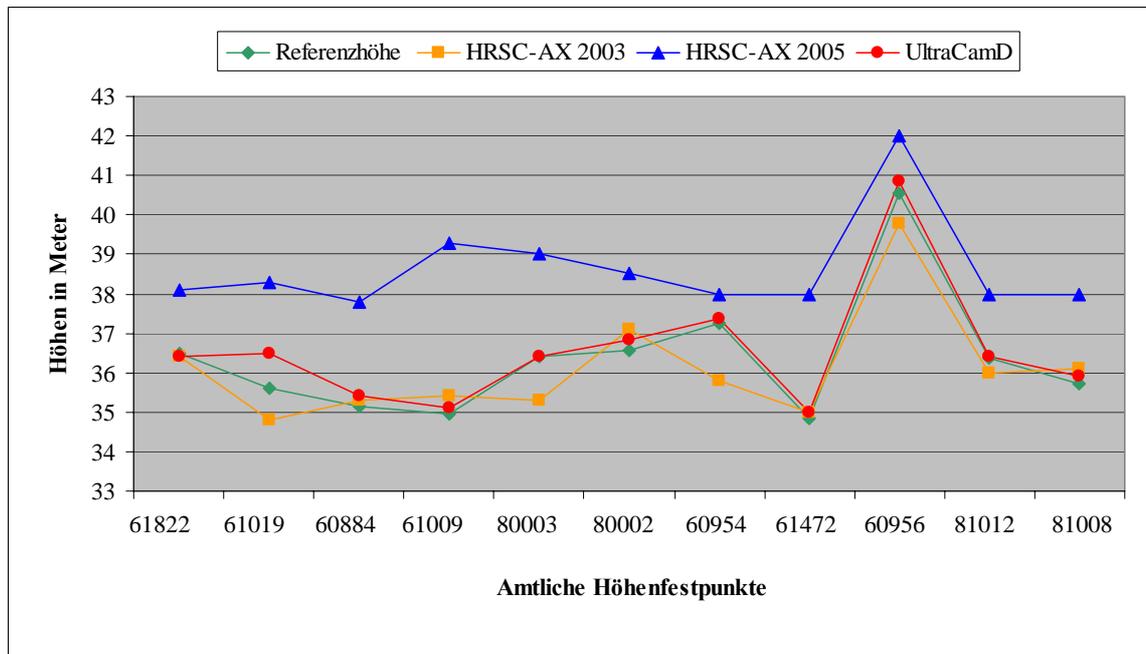


Abbildung 5.4: Graphische Darstellung der Höhen im DOM

Die MFC 3 erzielt mit Passpunkten, ausschließlich am Boden gemessen, einen Wert von 0,97 m. Ein Einfluss der Höhe ist hier nicht gegeben. Bei Betrachtung der Einzelmessungen muss ebenfalls ein nicht bekannter Fehler im gesamten DOM vorliegen, der die Höhe des Oberflächenmodells um einen konstanten Betrag anhebt. Unregelmäßigkeiten im Oberflächenmodell entstehen i. d. R. in Innenhöfen, dies ist vorrangig bei Altbaubestand zu erkennen und generell bei dicht beieinander stehenden Objekten. Diese Unregelmäßigkeiten sind überwiegend verursacht durch Schatten und Sichtschatten (Vgl. Mayer, 2004)

5.4 Auswertung der Flächen

Die Flächen, ermittelt in den Bilddaten der UltraCamD, ergeben die größte Differenz in Gegenüberstellung der ALK. Es besteht eine relative Flächendiskrepanz von +2,38 Prozent. Daraus folgt die um diesen Prozentsatz vergrößerte Darstellung der Flächen in den Bilddaten. Die geringste relative Differenz im Testgebiet mit -0,53 Prozent erzielt der Bilddatensatz der HRSC-AX aus 2005. Die MFC 3 erreicht +0,28 Prozent für das Untersuchungsgebiet Berlin-Adlershof und erzielt in der Gesamtbetrachtung das genaueste Resultat.

Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen

Aufgrund der ungenügenden Darstellung der Gebäudekanten ergibt sich für die Flächen in den Bilddaten der HRSC-AX- aus 2003 die höchste Standardabweichung von 44,45 qm. Am genauesten ist auch hier das Flächenergebnis der MFC 3 mit einer Abweichung im Verhältnis zu den Flächen der Automatisierten Liegenschaftskarte mit 15,73 qm. Die folgende Abbildung 5.5 veranschaulicht dieses Ergebnis graphisch.

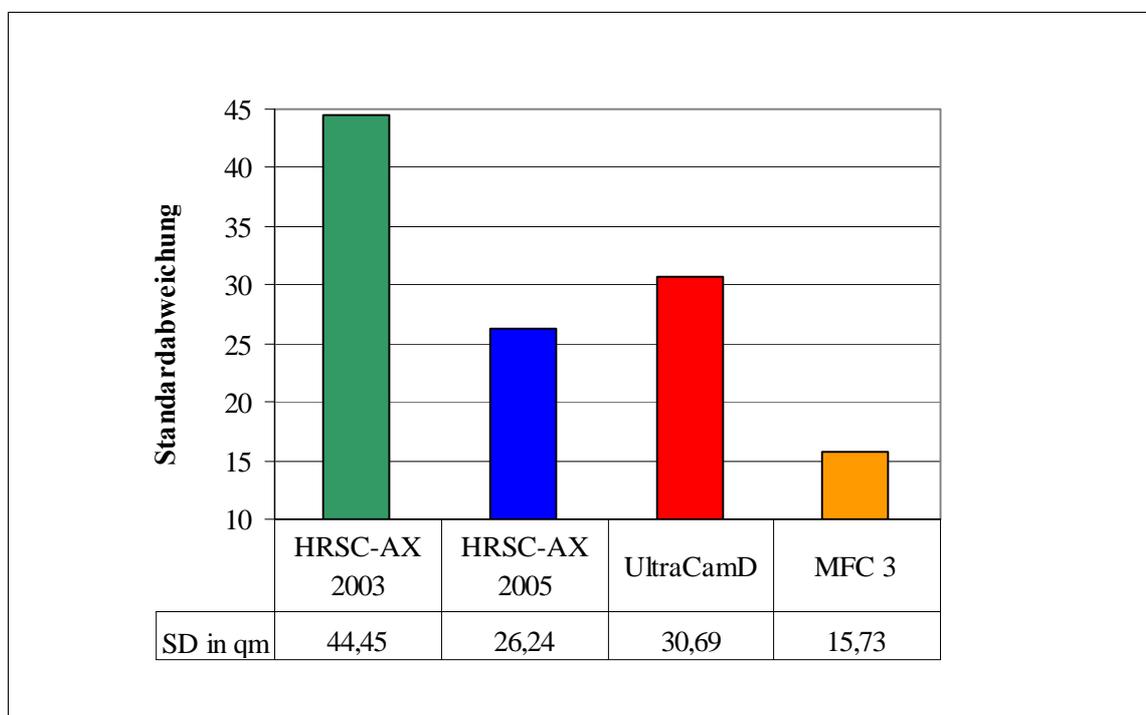


Abbildung 5.5: Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen der Flächen

5.5 Fazit

Die Genauigkeit der Bilddaten hängt weniger von dem verwendeten Aufnahmesystem, als vielmehr von der Genauigkeit des zugrunde liegenden digitalen Oberflächenmodells ab. Je genauer dieses generiert ist, umso präziser stellen sich die Objekte und damit die Kanten der Gebäude im Orthobild dar. Dennoch lassen sich anhand der Ergebnisse Vor- und Nachteile, der zu Beginn ausführlich aufgezeigten Systeme herausstellen. Diese präsentieren sich vor allem über die Ergebnisse der Auswertungen. Besonders durch die Ergebnisse der HRSC-AX kann ein Zusammenhang zwischen Abbildungsqualität und Lagegenauigkeit in Abhängigkeit der Höhe festgestellt werden. Die Abweichung nimmt mit zunehmender Höhe stetig zu.

Für visuelle Verwertbarkeit eignet sich die UltraCam_D besonders. Die Darstellung der Gebäudekanten weist die geringsten Artefakte auf. Die Abbildung bewegter Objekte ist durch die Optik und das Aufnahmeverfahren nicht gegeben. Als nachteilig zeigt sich die transparente Abbildung von Bäumen, die dadurch zum Teil künstlich wirken. Der hohe Öffnungswinkel des Zeilensensors MFC 3 ermöglicht besonders die Ableitung von Fassadeninformation als Textur für Gebäude. Ergänzend werden die Flächen in ihren Ausmaßen in den Orthobildern am getreuesten wiedergegeben. Für die Gewinnung von Höheninformationen, etwa für das digitale 3D-Innenstadtmodell von Berlin, ist gleichermaßen die größte Genauigkeit durch das Oberflächenmodell der UltraCam_D gewährleistet. Ergänzend dazu ist erkennbar, dass die Daten der HRSC-AX des Jahres 2005 deutlich stabiler sind, als die des Jahres 2003. Erwähnt wurde die Modifizierung des Verarbeitungsalgorithmus, der sich positiv auf die Qualität der Darstellung der Gebäudekanten auswirkte. In dieser Untersuchung konnte insgesamt die UltraCam_D durch die höchste Genauigkeit überzeugen. Dennoch müssen die unterschiedlichen Auflösungsbereiche berücksichtigt werden, die hier zwischen 7 cm im RGB der UltraCam_D und 20 cm in den Orthobildern der HRSC-AX liegen. Der Detailgrad der Bildinformation ist aufgrund dessen unterschiedlich, auf die Untersuchung der Lage-, Höhen-, und Flächengenauigkeit hat dieser Umstand jedoch keine direkte Auswirkung.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den geometrischen Genauigkeiten zugrunde liegender Bilddatensätze mit der Untersuchung und Auswertung von Lage-, Höhen- und Flächengenauigkeiten am Beispiel geeigneter Gebäude in einem urbanen Gebiet.

Datengrundlage für die Untersuchung sind die digitalen grauwertkodierte Oberflächenmodelle (DOM) und die daraus abgeleiteten radiometrisch korrigierten und kartenprojizierten Orthobilder in Echtfarbe. Aufgenommen wurden diese Bilddaten durch die optoelektronischen Aufnahmesysteme - der Zeilenkamera HRSC-AX, der modularen Zeilenkamera MFC 3 und der Matrixkamera Vexcel UltraCam_D.

Die HRSC-AX und die MFC 3 sind Entwicklungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Berlin-Adlershof. Die Vexcel UltraCam_D gehört seit 2006 zur Microsoft Corporation. Zeilenkameras realisieren ihre Bildinformation über die zeilenweise Abtastung der Erdoberfläche und erzeugen so eine Parallelprojektion. Matrixkameras erlangen die Aufnahme eines Bildes mittels digitaler matrixförmiger Flächensensoren und der Zentralprojektion. Dabei beschränkt sich die Abbildung der Erdoberfläche auf einen rechteckigen, meist quadratischen Bildausschnitt.

Das Untersuchungsgebiet im Innenstadtbereich von Berlin qualifiziert sich durch eine geometrisch gut erfassbare Gebäudestruktur und die Garantie des Vorhandenseins von flächendeckenden und präzisen Referenzdatensätzen. Die wesentlichen Informationen der Analyse werden aus den dargestellten Gebäuden abgeleitet. Diese Gebäude zeichnen sich vor allem durch eine sehr klar strukturierte, leicht erfassbare Geometrie aus. Die Dächer verfügen über wenig oder gar keinen Dachüberstand. Das geplante Testgebiet befindet sich mit einer Ausdehnung von etwa 1,4 x 1,4 Kilometer im Stadtbezirk Berlin Friedrichshain und dem angrenzenden Bezirk Mitte.

Analysiert wird der Gebietsausschnitt, aufgenommen mit der HRSC-AX 2003 und 2005 aus einer Höhe von ca. 4500 m über Grund in 20 cm Auflösung und einem DOM in x, y-Richtung mit einer Auflösung von 50 cm, in der Höhe z von 10 cm.

Ergänzend zu diesen Daten besteht ein Datensatz der Matrixkamera Vexcel UltraCam_D des gleichen Ausschnitts in 7 cm Auflösung aus dem Jahr 2006. Für die Untersuchung der Abbildungsgenauigkeit der modularen Zeilenkamera MFC 3 besteht ersatzweise ein Bildausschnitt als RGB und DOM in 12,5 cm Auflösung von Berlin-Adlershof, aufgenommen aus 727 m über Grund im März 2008.

Für das Orthobild der HRSC-AX 2005 wurde die radiometrische Auflösung aufgrund der störenden Schlagschatten auf 16bit erhöht. Im Zuge der Prozessierung wurden die Bilddaten ursprünglich auf einen Dynamikumfang von 8bit reduziert. Der Bildflug der UltraCam_D fand im Spätsommer 2006 aus einer Flughöhe von 835 m über Grund statt. Auch in diesem Datensatz sind deutliche Schattenbereiche zu verzeichnen.

Zur Verifizierung der abgeleiteten Messwerte dienen amtliche Lage- und Höheninformationen. Zu diesen zählt die Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) von Berlin aus dem Jahr 2004, die amtlich eingemessenen Höhenfestpunkte der Berliner Bezirksverwaltungen und ein Ausschnitt aus dem digitalen 3D-Innenstadtmodell des Berliner Senats von 2008. Für das Gebiet in Berlin-Adlershof stehen manuell eingemessene Bodenpasspunkte zur Verfügung. Für diese Untersuchung ist die Begrenzungsgeometrie der Gebäude von übergeordneter Bedeutung. Verwendet wird die Folie 11 der ALK, die u. a. die Umrisse der Gebäude beinhaltet.

Für den Bereich um den Strausberger Platz sind 11 Höhenfestpunkte in Form von Mauerbolzen vorhanden. Angegeben ist die Höhe eines Festpunktes über NHN (*für* NormalHöheNull). NHN stellt die Dimension des Höhen Bezugssystems DHHN92 dar. Die Passpunkte in Berlin-Adlershof wurden individuell an markanten Bodenpunkten festgelegt und die zugehörigen Höhen mit Hilfe des Global Positioning Systems (*kurz* GPS) ermittelt.

Zu Beginn der Untersuchung zeigt sich, dass ein Ermitteln der Gebäudegeometrien und damit der Lage der Gebäudeeckpunkte zunächst nicht ohne weiteres möglich ist. Der Einfluss der Vegetation, die massiven Schattenbereiche und die Ungenauigkeiten in der Abbildung der Gebäudekanten, verursacht durch das DOM setzen zunächst eine detaillierte Bildanalyse voraus. Vorhandene Artefakte geben dabei unter Umständen bereits Rückschlüsse auf Schwächen in der Verarbeitungskette. In die Untersuchung

werden demnach nur solche Objekte integriert, die in allen Datensätzen eindeutig und vollständig abgebildet werden.

Die technische Realisierung der Untersuchung zur Verarbeitung der Geometrie- und Sachdaten findet mit dem Geoinformationssystem ESRI ArcGIS 9.2 statt. ERDAS IMAGINE 9.1 und RSI ENVI 3.6 werden für die Aufbereitung der Rasterdaten verwendet. Zur Auswertung der Messwerte kommt die Software Excel 2003 von Microsoft zum Einsatz.

Das Prüfen und die Ableitungen der Lage erfolgt über die Bildung der Differenzen in x, y-Richtung digitalisierter Gebäudeeckpunkte. Verifiziert wird die Lage der Bildinformation mit Gebäudegeometrien und -eckpunkten der ALK. Beschränkt wird sich bei der Wahl der Objekte auf eine rechteckige Grundform, um für jedes untersuchte Gebäude maximal 4 Eckkoordinaten zu erhalten. Zur Ableitung der Höhengenaugkeit werden die im DOM gemessenen Höhen mit denen der amtlich vermarkten Höhenfestpunkte verifiziert. Für die Ableitung der Flächen wird in einer kleineren Stichprobe für jedes involvierte Gebäude der Flächeninhalt bestimmt. Gebäudevorsprünge werden in den Bilddaten und der ALK vernachlässigt. Die Generierung der Flächeninhalte wird in ArcGIS 9.2 realisiert, ebenso die Berechnung der Koordinaten der Gebäudeeckpunkte.

Bei Betrachtung der Höhen im DOM ist die zum Teil unterschiedliche Darstellung der Höhen zu beachten. Die Höhen der amtlichen vermessenen Festpunkte repräsentieren Höhen über NHN, die Höhen im DOM sind u. a. Höhen über WGS84. Daher muss die Geoidundulation unter Umständen berücksichtigt werden. Sie entspricht dem Abstand in einem gedachten orthogonalen Lot vom Quasigeoid auf den Erdellipsoiden und beträgt im Testgebiet 39,2 m. (Quelle: BKG)

Neben der Angabe der maximalen, minimalen und mittleren Abweichungen bedient sich die abschließende statistische Auswertung der Anwendung von Streuungsmaßen. Dazu gehört primär die Berechnung der *Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen*. Betrachtet wird zudem der Zusammenhang zwischen Abbildungsgenauigkeit und der Höhe der Gebäude.

Eine besondere Auffälligkeit, als Ergebnis der visuellen Analyse vorliegender Bilddaten ist die ungenügende Darstellung der Gebäudekanten in dem Orthobild der HRSC-AX 2003, die das Auftreten der Farbsäume massiv verstärkt. Bewegte Objekte zeigen sich durch das Aufnahmeverfahren auffällig in den drei Kanälen Rot, Grün und Blau. Dieser Effekt resultiert aus den Blickwinkelunterschieden der Farbkanäle und der

Fortbewegung des Flugzeuges und liegt auch in den Daten aus 2005 vor. Die Darstellung der Gebäudekanten ist dort zunächst unproblematisch, diffuse Verwischungen treten vereinzelt dennoch auf. Bedingt ist dieser Unterschied in der Kantendarstellung aus der differenzierten Verfahrensweise zur Generierung des digitalen Oberflächenmodells. So kommt für die Prozessierung der Daten aus 2003 der Algorithmus nach Franz Wewel (vgl. Wewel, 1998) zum Einsatz, für die Prozessierung in 2005 ein pixelbasiertes Verfahren von H. Hirschmüller. (vgl. Hirschmüller, 2005 und 2006) Die Generierung der Rasterdaten der MFC 3 verläuft ebenfalls unter Anwendung des Hirschmüller-Algorithmus. Beeinträchtigt sind beide Datensätze durch massive Schlagschatten. Bei Betrachtung der Bilddaten werden Artefakte in der Kantendarstellung der Gebäude sichtbar, die das Ableiten der Gebäudegeometrien erschwert. Für die Daten der UltraCam_D gilt als Besonderheit, dass das Aufnahmeprinzip keine bewegten Bildinhalte, wie Fahrzeuge abbildet. Auch windbewegte Bäume zeigen eine leicht transparente Textur. Regenbogeneffekte, wie sie bei der HRSC-AX auftreten sind hier nicht gegeben. Für die Erzeugung des Oberflächenmodells und des daraus abgeleiteten Orthobildes aus den Rohdaten der Ultracam_D wird eine Aerotriangulation durchgeführt.

Fazit dieser Untersuchung ist, dass die Genauigkeit der Bilddaten weniger von dem verwendeten Aufnahmesystem abhängt ist, als vielmehr von der Genauigkeit des zugrunde liegenden digitalen Oberflächenmodells. So ergibt sich aus den Rasterdaten insbesondere des Oberflächenmodells der Ultracam_D die größte Höhengenaugkeit mit einer Standardabweichung aus scheinbaren Verbesserungen von 0,33 m. Ungenügend zeigt sich daneben das Ergebnis der HRSC-AX 2005 mit 2,95 m. Die genaueste Darstellung der Flächeninhalte wird in den Bilddaten der MFC 3 erzielt. Die Standardabweichung beträgt hier 15,73 qm. Für die Flächen der Gebäude in den Bilddaten der HRSC-AX 2003 sind dies 44,45 qm. Eine geringe Abweichung der Lage erweist sich ebenso bei der UltraCam_D, die in x und y-Richtung eine konstante Verschiebung erhält. Die Standardabweichung beträgt in der x-Koordinate 0,318 m und in der y-Koordinate 0,330 m. Ebenfalls zufrieden stellend sind die Ergebnisse der Betrachtung der Lagegenauigkeit für die MFC 3. In x-Richtung beträgt die Standardabweichung 0,394 und in y-Richtung nur 0,065 und ist damit das genaueste Ergebnis. Besonders durch die Ergebnisse der HRSC-AX kann ein Zusammenhang zwischen Abbildungsqualität und Lagegenauigkeit in Abhängigkeit der Höhe festgestellt werden. Die Abweichung nimmt mit zunehmender Höhe stetig zu.

Für visuelle Vorhaben eignet sich die UltraCam_D besonders. Die Darstellung der Gebäudekanten weist die geringsten Artefakte auf. Die Abbildung bewegter Objekte ist durch die Optik und das Aufnahmeverfahren nicht gegeben. Als nachteilig zeigt sich die transparente Abbildung von Bäumen, die dadurch zum Teil künstlich wirken. Durch den hohen Öffnungswinkel des Zeilensensors MFC 3 eignet sich dieser besonders zur Ableitung von Fassadeninformation als Textur für Gebäude. Ergänzend werden die Flächen in ihren Ausmaßen in den Orthobildern am getreusten wiedergegeben. Für die Gewinnung von Höheninformationen, etwa für das digitale 3D-Innenstadtmodell von Berlin ist gleichermaßen die größte Genauigkeit durch das Oberflächenmodell der UltraCam_D gewährleistet. Ersichtlich ist, dass die Daten der HRSC-AX des Jahres 2005 deutlich stabiler sind, als die des Jahres 2003. Erwähnt wurde die Modifizierung des Verarbeitungsalgorithmus, der sich positiv auf die Qualität der Darstellung der Gebäudekanten auswirkte. In dieser Untersuchung konnte insgesamt die UltraCam_D durch die höchste Genauigkeit überzeugen. Dennoch müssen die unterschiedlichen Auflösungsbereiche berücksichtigt werden, die hier zwischen 7 cm im RGB der UltraCam_D und 20 cm in den Orthobildern der HRSC-AX liegen. Der Detailgrad der Bildinformation ist aufgrund dessen unterschiedlich, auf die Untersuchung der Lage-, Höhen-, und Flächengenauigkeit hat dieser Umstand jedoch keine direkte Auswirkung.

7 Ausblick

Die Entwicklung im Bereich digitaler Erdfernerkundungssensoren schreitet stetig voran. Durch fortwährende Verbesserungen in den Verarbeitungsroutinen zur Generierung digitaler Oberflächenmodelle und daraus abgeleiteter hochauflösender Orthobilder kann mit einer Steigerung der Genauigkeiten gerechnet werden. Nicht zuletzt aufgrund der Nachfrage von Verbrauchern aus Wirtschaft, Wissenschaft oder öffentlicher Verwaltung, die diese Genauigkeiten und damit die Verbesserungen fordern. Am DLR e.V. in Berlin-Adlershof wird kontinuierlich an der Optimierung der digitalen Sensoren gearbeitet. Die technischen Bedingungen für die Bildaufnahme werden täglich verbessert und die Systeme an die Anforderungen angepasst.

Die Auflösungsbereiche, vor allem der zeilenbasierten Systeme werden sich zukünftig soweit angleichen, dass die Genauigkeit des hier untersuchten matrixbasierten Aufnahmesystems erreicht werden kann. Für die Zukunft ist zu erwarten, dass sich die Aktivitäten auf der Grundlage solcher digitalen Bilddaten stark ausweiten. Neben Aufgaben im Umwelt- und Katastrophenschutz oder der Ableitung digitaler 3D-Stadtmodelle für große Metropolen können diese Daten mit ihren hohen Genauigkeiten auch interessant sein für das Immobilienwesen, für den Bereich der Logistik, für die Landwirtschaft oder den Tourismus. Die Anwendungsbereiche sind vermutlich unerschöpflich.

Literaturverzeichnis

- Albertz, Jörg, (2001): Einführung in die Fernerkundung; Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern., 2. Aufl., Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. S. 37-42.
- Albertz, Jörg, (2007): Einführung in die Fernerkundung; Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern., 3. Aufl., Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt., S. 37-52 u. S. 97ff.
- Bähr, Hans-Peter & Thomas Vögtle (Hrsg.), Digitale Bildverarbeitung – Anwendung in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS, 4. Aufl. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005, S. 20.
- Bartelme, Norbert, (1989): GIS-Technologie. Geoinformationssysteme, Landesinformationssysteme und ihre Grundlagen, Springer Verlag Berlin.
- Bartelme, Norbert, (2005): Geoinformatik. Modelle – Strukturen – Funktionen, 4. Aufl., Springer Verlag Berlin-Heidelberg.
- Bill, Ralf, (1999): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1, Hardware, Software und Daten, 4. Aufl. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

- Börner, A., Suppa, M., Abmayr, T., Bodenmüller, T., Eckardt, A., Hirschmüller, H., Scheibe, K. und Strackenbrock, B., (2006): Ein modulares Sensorsystem zur multiskalaren Erfassung von dreidimensionalen Objekten, Tagung der DGPF 2006, S. 322-325.
- Eckardt, A., Börner, A., Jahn, H., Hilbert, S., Walter, I., (2006): Neue optische Systeme für die Erdbeobachtung, Tagung der DGPF 2006, S.332f.
- Gruber, Franz Josef (1998): Formelsammlung für das Vermessungswesen, 9.Aufl., Ferd. Dümmler Verlag, Bonn.
- Hirschmüller, Heiko, (2005): Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. In Pro. of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005), San Diego, CA, USA, pp. 807-814, 20-25.
- Hirschmüller, Heiko, (2006): Stereo Vision in Structured Environment by Consistent Semi-Global Matching. In Pro. of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2006), New York, NY, USA.
- Hoffmann, Andrea & Frank Lehmann, (2000): Vom Mars zur Erde: Die erste digitale Orthobildkarte Berlin mit Daten der Kamera HRSC-A. Kartographische Nachrichten, (2).
- Hofmann, Otto; P. Navé & H. Ebner, (1982): DPS – A Digital Photogrammic System for Producing Digital Elevation Models and Orthophotos by Means of Linear Array Scanner Imagery. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 24, Part 3, S. 216-227.
- Kraus, Karl (2004): Photogrammetrie Band 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laseraufnahmen. 7. Aufl. de Gruyter Lehrbuch, Walter de Gruyter Berlin, New York.

- Krueger, Tobias, (2003): Einsatz von HRSC-Daten zur GIS-basierten Kartierung für Hochwasserschutz. Demonstrationsbeispiel Bitterfeld, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Kartographie.
- Mayer, Stephan, (2004): Automatisierte Objekterkennung zur Interpretation hochauflösender Bilddaten in der Erdfernerkundung, Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Neukum, Gerhard & HRSC-Team, (2000): Vom Mars zur Erde. DLR Nachrichten – Mitteilung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, (99).
- Saiger, Peter (2007): Entwicklung, Implementierung und Erprobung eines planetaren Informationssystems auf Basis von ArcGIS, Dissertation, Universität Potsdam, S.41-46.
- Sandau, Rainer (Hrsg.), (2005): Digitale Luftbildkamera – Einführung und Grundlagen. 1. Aufl. Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg, S. 5.
- Scheibe, Karsten, (2006): Design and Test of Algorithms for the Evaluation of modern Sensors in close-range Photogrammetry, Dissertation, Universität Göttingen.
- Scholten, F., S. Sujew, & F. Wewel, (2001): Einsatz digitaler Kameras im Auflösungsbereich von 5cm bis 1m – Die neue HRSC-AX Kamerageneration in der geometrischen Analyse. Jahresversammlung der DGPF.
- Scholten, F., K. Gwinner, & F. Wewel (2002): Angewandte digitale Photogrammetrie mit der HRSC. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, 5/2002.
- Schrerr, Oliver, (2005): Stereoanalyse und Bildanalyse, Springer Verlag Berlin Heidelberg, S. 65-78.
- Schuster, R. & Braunecker, B., (2000): Design and Calibration of ADS40 Airborne Camera; Proceeding of XIX ISPRS Congress, Amsterdam, The Netherlands, S.228.

Pflug, M., P. Rindle, & R. Katzenbeisser. True-Ortho-Bilder mit Laser-Scanning und multispektralen Zeilenscanner. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 3/2004.

Plessmann, Jochen, (1988): Bohrlochorientierungssysteme, Kalibrierung und Fehlerbetrachtung, Diplomarbeit, Universität Münster, Institut für Geophysik.

Wewel, F., F. Scholten, G. Neukum & J. Albertz, (1998): Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, (6), S.337-348.

Internetquellen

www1	http://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadtmodelle/index.shtml	abgerufen am 03/2008
www2	http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/liegenschaftskataster/	abgerufen am 03/2008
www3	http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/bezugssysteme/	abgerufen am 05/2008
www4	http://www.berlin.de/ba-mitte/org/vermessung/index.html	abgerufen am 05/2008
www5	http://www.berlin.de/ba-friedrichshainkreuzberg/verwaltung/org/vermessung/	abgerufen am 05/2008
www6	http://www.igisystems.com/products/ccns.htm	abgerufen am 04/2008
www7	http://www.swissphoto.ch	abgerufen am 04/2008
www8	http://www.esrgermany.de/products/arcgis/index.html	abgerufen am 05/2008
www9	http://rsinc.com/envi/	abgerufen am 06/2008
www10	http://www.creaso.com	abgerufen am 06/2008
www11	http://www.geosystems.de/produkte/author/erdas-imagine.html	abgerufen am 05/2008
www12	http://office.microsoft.com/dede/excel/FX100487621031.aspx	abgerufen am 06/2008