

Zeitreihenanalyse historischer und aktueller Luftbilder

Irene WALDE

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

1 Zusammenfassung

Historische Luftbilder sind Zeitzeugen aus der Vogelperspektive. Diese Daten lagern oftmals ungenutzt in den Luftbildarchiven. Aktuelle Geodaten werden in sehr großen Mengen erhoben, genutzt und archiviert. Der Zeitaspekt als 4te Dimension wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen und Analysen jeglicher Art werden die raum-zeitlichen Veränderung zum Inhalt haben. Diese Arbeit soll einen Beitrag leisten, die Nutzbarmachung historischer Bilddaten voranzutreiben sowie mögliche Schwierigkeiten und Lösungsansätze bei der Kombination von historischen und aktuellen Daten aufzeigen. Dabei werden historische und aktuelle Luftbilddatensätze der Stadt Potsdam aufbereitet, entzerrt, analysiert und in die Historie des Aufnahmezeitpunktes eingeordnet. Hauptschwerpunkt ist die Analyse von weitgehend automatisierten Methoden, die Luftbilder verschiedener Jahrgänge aufeinander abzugleichen (zu entzerren), um sie für Visualisierungen, Analysen oder Animationen nutzen zu können. Dabei werden parametrische und nicht-parametrische Verarbeitungsmethoden angewandt, wobei die nicht-parametrischen Ansätze im Mittelpunkt der Verarbeitung historischen Bildmaterials stehen. Die parametrischen Ansätze, bei denen innere und äußere Orientierung der Daten bekannt sein müssen, eignen sich gut für das aktuellere Material, da bei diesen Daten Kamerakalibrierprotokolle, Bildmitten etc. zur Verfügung stehen. Nach Auswahl optimaler Methoden wird das Ergebnis in Form einer Animation, mit Adaption von allgemeinen Morphingalgorithmen, präsentiert.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Die vierte Dimension

Jedes Objekt hat nicht nur eine räumliche sondern auch eine zeitliche Ausdehnung. Dabei kann die Zeit als absolute oder relative Angabe benutzt werden. Anhand eines Gebäudes lassen sich die Zusammenhänge gut erläutern. Ein Gebäude an einem bestimmten Ort wurde zu einem bestimmten absoluten Zeitpunkt errichtet. Die Zeitspanne bis zum Abriss des Gebäudes ist eine relative Zeitangabe, der Abriss wiederum eine absolute. Die Fragen „Was?“ „Wo?“ und „Wann?“ korrelieren also miteinander. (vgl. OTT, SWIACZNY 2001, S. 1 ff.) Das Hauptziel eines Zeit-integrierenden GIS ist es, zeitliche Prozesse und Sequenzen von Ereignissen der realen Welt in ein Modell zu übertragen, um sie für räumlich-zeitliche Abfragen, Analysen und Visualisierung verfügbar zu machen. (vgl. OTT, SWIACZNY 2001, S. 6) Luftbilder sind Momentaufnahmen und stellen rasterbasierte Zeitschnitte dar. Mit Hilfe von Visualisierungsalgorithmen können zeitliche Veränderungen anschaulich dargestellt werden. Außerdem können georeferenzierte Luftbilder verschiedener Jahrgänge als Layer in einem GIS visualisiert und für Veränderungsanalysen aufbereitet werden.

2.2 Photogrammetrische Grundlagen

Die Aerophotogrammetrie (Luftbildmessung) gehört zu den indirekten Beobachtungsverfahren und dient als geodätisches Messmittel. „Ein mit annähernd lotrechter Aufnahmerichtung aufgenommenes Luftbild hat einen nahezu einheitlichen Maßstab und vermittelt einen kartenähnlichen Eindruck des betreffenden Geländeausschnitts. Es ist sehr viel inhaltsreicher als eine Karte und gibt das Aufnahmegebiet für den Zeitpunkt der Befliegung mit absoluter Beweiskraft wieder.“ (LEHMANN 1969, S. 79) Um in Luftbildern messen zu können, müssen die projektiven und perspektiven Verzerrungen beseitigt werden. Wenn Bild- und Objektebene nicht parallel zueinander liegen, spricht man von einer projektiven Verzerrung. Durch die Umkehrung des Aufnahmevorgangs kann sie behoben werden. Die zentralperspektive Abbildung ist der Grund für die perspektive Verzerrung. Höhenunterschiede an Objekten der aufgenommenen Geländeoberfläche werden radial versetzt.

2.3 Parametrische Entzerrung der Luftbilder

Die parametrische Entzerrung der Luftbilder ist nur möglich, wenn die Elemente zur inneren Orientierung bekannt und die äußeren Orientierungselemente bestimmbar sind. Bei einem Bildverband mehrerer Luftbilder und Bildstreifen wird eine Aerotriangulation (AT) durchgeführt, damit die Anzahl der Passpunkte reduziert werden kann und größere Gebiete ohne Passpunkte überbrückt werden. (vgl. KRAUS 2004) Es werden die äußeren Orientierungselemente aller Messbilder bestimmt. Die Verknüpfungspunktsuche ist als automatischer Prozess in aktueller photogrammetrischer Software integriert. Eine Methode für die Berechnung der äußeren Orientierungsparameter, gleichzeitig für alle Messbilder, ist die Bündelblockausgleichung. Anschließend können Stereoauswertungen oder eine Höhenmodellberechnung durchgeführt werden und die Entzerrung auf ein Geländemodell erfolgen. Dabei werden Bildversetzungen beseitigt und Objekte, die im Geländemodell abgebildet sind, lagerichtig dargestellt. Um ein Orthophoto zu errechnen, müssen die Grauwerte neu zugewiesen werden. Diese Methode nennt man Resampling. (vgl. KRAUS 2004⁷ und ALBERTZ 2001) Aus den Orthophotos wird ein Orthophotomosaik erzeugt. Dazu werden Schnittkanten im Überlappungsbereich der Bilder berechnet. Orthophotos können in GIS Systeme eingebunden, für verschiedene Analysen genutzt werden, als Digitalisierungsgrundlage dienen oder mit Vektordaten überlagert einem breiten Publikum als kartenähnliche Grundlage zur Verfügung gestellt werden.

2.4 Nicht-parametrische Georeferenzierung der Aufnahmen

Ein weiterer Ansatz einer Georeferenzierung sind nicht-parametrische Verfahren. Dafür sind innere und äußere Orientierungselemente nicht notwendig. Anhand von Pass- und Verknüpfungspunkten wird eine Entzerrung mit Hilfe mathematischer Funktionen herbeigeführt. Für das Datenmaterial von 1944 bis 1998 sind keine Aufnahmeangaben bekannt, sodass ein nicht-parametrisches Verfahren geeignet ist. Erdas Imagine AutoSync™ 9.1 ist ein Werkzeug um Luft- oder Satellitenbilder zu entzerren. Dabei stehen geometrische Modelle zur Entzerrung zur Verfügung: affine und polynomiale Transformation, Rubber Sheeting, direkt lineare und projektive Transformation. Beim Automatic Point Measurement (APM), ein wichtiger Bestandteil der Software, werden Verknüpfungspunkte automatisch gefunden, die die Entzerrung verbessern sollen. Für den Ähnlichkeitsalgorithmus werden ein Referenz- und ein Suchbild benötigt. Im Referenzbild wird die Referenzmatrix gewählt,

die im Suchbild die entsprechende Stelle findet. Mit Hilfe von Korrelationsberechnungen, dem Korrelationskoeffizient, wird das Maß der Ähnlichkeit bestimmt. Das IMAGINE AUTOSYNC™ WHITE PAPER gibt an, welche Bildcharakteristiken zu einem guten APM-Ergebnis führen. Diese Merkmale werden in der Tabelle mit dem Datenmaterial verglichen, damit Schwierigkeiten im Vorfeld der Untersuchungen erkennbar sind.

Tabelle 1: Optimale und vorliegende Merkmale für das APM

Optimale Merkmale für den APM-Algorithmus	Merkmale des vorliegenden Datenmaterials	Kompensationsmöglichkeiten
Überlappungsbereich der Bilder mindestens 40%	Bilder überlappen sich unterschiedlich stark	Begrenzung auf gemeinsamen Ausschnitt -> Überlappung 100%
Gleiche oder ähnliche Bodenpixelauflösung (sollte die 6fache Differenz nicht überschreiten)	Unterschiedliche Bodenpixelaufösungen zwischen 10 cm und 2 m	Resampling der Daten (Downsampling)
Bilder, die zur gleichen Jahreszeit, Tageszeit aufgenommen wurden (gleiche Licht- und Wetterverhältnisse)	Bilder sind von verschiedenen Jahreszeiten, Tageszeiten, große Jahresabstände (inhaltliche Veränderungen)	Vorgänger- Nachfolger Prinzip anwenden, damit inhaltliche Veränderungen nicht zu extrem ins Gewicht fallen
Bilder, die von ein und demselben Sensor stammen	Verschiedene Kameratypen, aber alles Flächensensoren aus Luftfahrzeugen (analog u. digital)	–
Auswahl von Bändern gleicher spektraler Eigenschaften	farbige und schwarz-weiß Aufnahmen	Basis 2000 liegt als farbiges und als schwarz-weiß Bild vor
Gute Startgenauigkeit bei bereits projizierten Bildern, andernfalls genaues Messen von 3-4 Punkten in den Bildecken	Passpunkte manuell wählen, schwierig bei extremer inhaltlicher Veränderung	Vorgänger-Nachfolger-Prinzip

3 Untersuchungsgebiet und Datenherkunft

Auf der Suche nach einem geeigneten Untersuchungsgebiet gibt es einige Kriterien, die im Hinblick auf die Arbeit von Bedeutung sind. Zum einen sollte das Gebiet in der Historie möglichst oft durch Luftbildbefliegungen abgedeckt sein. Zum anderen sollten bauliche Veränderungen eine Rolle spielen, damit eine möglichst reelle Situation für die Passpunkt-suche und die Automatische Punktmessung geschaffen wird. Potsdam, als Hauptstadt des Landes Brandenburg, erfüllt diese Kriterien. Historische Bauten aus der friderizianischen Zeit ziehen Touristen aus allen Teilen der Welt an und bestimmten früher das Stadtgebiet massiver als heute. Im Zweiten Weltkrieg wurde die Innenstadt im April 1945 durch die Royal Air Force bombardiert. Viele historisch bedeutsame Gebäude wurden dabei zerstört. Potsdam fiel zur russischen Besatzungszone und während des Wiederaufbaus der Stadt wurden nur wenige Gebäude aus der Zeit Preußens erhalten. Das Luftbildmaterial Potsdams ist deshalb inhaltlich sehr vielfältig (vgl. HAHN 2003).

Der Zeitstrahl in Abbildung 1 gibt einen groben Überblick über das vielfältige Datenmaterial.

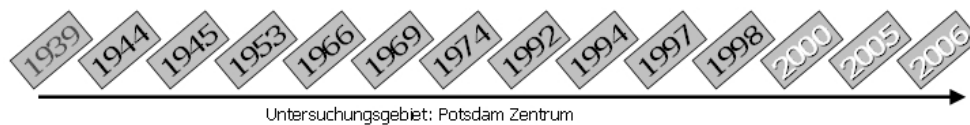


Abb. 1: Zeitstrahl des Datenmaterials

Bei dem Jahrgang 1939 handelt es sich um zwei orthorektifizierte Luftbildkarten mit Beschriftungen im Maßstab 1:25.000. Die Luftbilder von 1944 bis 1998 stammen aus schwarz-weiß Bfliegungen mit analogen Luftbildkameras. Die analoge Luftbildkarte von 1939 sowie die Luftbilder der Jahre 1944 bis 1953 und 1992 bis 1998 wurden in der Landesluftbildsammelstelle des Amtes für Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg erworben. Die Luftbilder der Jahrgänge 1966 bis 1974 konnten beim Bundesarchiv in Berlin bezogen werden. Zu Zeiten der ehemaligen DDR wurden militärische Gebiete, Polizei- und Staatsicherheitsbehörden aus den Luftbildern entfernt und diese Stellen ge-weißt. So auch in den Aufnahmen 1966, 1969 und 1974. Leider sind diese Lücken in den Luftbildern unwiederbringlich und müssen als Teil der Geschichte der ehemaligen DDR akzeptiert und interpretiert werden. Die Daten aus dem Jahr 2000, 2005 und 2006 sind Luftbilder aus dem Bestand der Firma GeoContent GmbH und stehen als farbiges Bildmaterial zur Verfügung.

4 Vorbereitung des Datenmaterials

Das vorhandene Bildmaterial ist in der räumlichen Ausdehnung sehr unterschiedlich. Für die Auswertung des Bildmaterials und für die Animation der Zeitreihe ist der Bereich von Bedeutung, der allen Bildern zugrunde liegt. Um das Bildmaterial auf den gemeinsamen Ausschnitt zu beschränken ist eine grobe Entzerrung nötig. Mit Global Mapper V10.00 konnte eine schnelle und unkomplizierte Georeferenzierung des Materials von 1944-1998 auf das Orthophotomosaik von 2000 durchgeführt werden.

Die Luftbilder von 2000 liegen bereits georeferenziert und mosaikiert vor, während das Material von 2005 und 2006 im unbearbeiteten Rohzustand bereitgestellt wurde. Da für diese Daten die Bildmitten und Drehwinkel (ω , φ , κ) aus GPS/IMU während des Bildfluges aufgezeichnet wurden und das Kalibrierungszertifikat der Kamera zur Verfügung steht, wurde der parametrische Ansatz verfolgt. Dazu diente das Softwarepaket der Firma inpho GmbH. Die innere und äußere Orientierung sind über die Kameraeinstellungen und die Bildmitten und Winkel aus GPS/IMU näherungsweise hergestellt. Anschließend wurden Verknüpfungspunkte automatisch korreliert und mit Hilfe von Passpunkten im übergeordneten System eine Bündelblockausgleichung durchgeführt. Danach wurden die Luftbilder mit Hilfe eines Digitalen Geländemodells von der Zentralperspektive in eine Parallelperspektive überführt. Es entstanden dabei sog. Orthophotos, die abschließend entlang von Schnittlinien im Überlappungsbereich mosaikiert wurden. Außerdem konnten farbliche Anpassungen vor dem Export des Orthophotomosaiks zur Steigerung der Bildqualität beitragen.

Das Geländemodell wurde aus dem Luftbildmaterial von 2006 aus Stereomodellen berechnet. Das automatisiert erstellte Modell entspricht vorerst einem Oberflächenmodell. Gebäude, Brücken und ähnliche Bauwerke sind im Modell abgebildet und mussten in manueller Nacharbeit auf das natürliche Gelände reduziert werden.

Für 1974 und vom 16. April 1945 liegen jeweils 2 Aufnahmen vor. Sie wurden grob georeferenziert. Für ein Mosaik der Daten ist ein nicht-parametrischer Ansatz empfehlenswert. Mit Erdas Imagine AutoSync™ 9.1 war es möglich beide Bilder durch *Edge Matching* zu verknüpfen. Die Methode korrigiert beide Bilder im Überlappungsbereich auf der Grundlage der gefundenen Verknüpfungspunkte. Der entstehende Fehler wird auf beide Bilder gleichmäßig verteilt. Durch die grobe Georeferenzierung ist es nicht notwendig Passpunkte zu bestimmen. Da die Bilder aus ein und demselben Bildflug stammen gibt es keine inhaltlichen und jahreszeitlichen Veränderungen. Die durch das APM lokalisierten Verknüpfungspunkte wurden visuell kontrolliert und fehlerhafte Punkte verworfen. Als geometrisches Modell wurde das *Lineare Rubber Sheeting* verwendet, eine 2-dimensionale Bildtransformation, bei der Dreiecke aus den Verknüpfungspunkten gebildet werden. Die Transformation ist an den Verknüpfungspunkten exakt und der RMSE-Wert Null. Umso wichtiger sind visuelle Kontrollen und gleichmäßige Punktverteilung. Laut IMAGINE AutoSync™ White Paper sind mindestens 50 Verknüpfungspunkte notwendig. Um das jeweilige Bildpaar zu mosaikieren, mussten Schnittkanten berechnet bzw. verlegt werden. Dieser Schritt wurde mit dem Seam Editor Version 4.3.2 von der inpho GmbH durchgeführt. Für die 1974er Daten war es wichtig, das geweißte Gebiet im Zentrum mit Bildinformation zu füllen. In Ortho Vista wurden abschließend Helligkeit und Kontrast aneinander angeglichen.

Die Luftbildkarten (1939) haben den Vorteil, dass die aufgeprägten Gitterkreuze in der angegebenen Projektion zur Georeferenzierung genutzt werden kann und damit die Suche nach Passpunkten entfällt. Beide Karten wurden mit Adobe Photoshop Version 8.0.1 zusammengeführt. Um die Bilder an den Gitterkreuzen aneinander zu passen, musste der Kartenrand eines Bildes entfernt werden. Anschließend wurde die Karte mit Global Mapper Version 10.00 anhand des Referenzgitters in der Projektion Gauß Krüger 4. Streifen entzerrt.

Es wurde versucht, Staub und Kratzer aus historischen Luftbildern zu beseitigen. Dabei kamen die Softwareprodukte Polaroid Dust and Scratch Removal Version 1.0.0.15, Adobe Photoshop 8.0.1 und das Softwaretool *Noise Reduction* von Erdas Imagine Version 9.1 zum Einsatz. Nach verschiedenen Einstellungstests der Polaroid Dust and Scratch Removal Software gab es folgende Schlussfolgerungen: Wählt man die Einstellungen zu gering, werden Kratzer und Staubteilchen nur zum Teil bzw. nicht erkannt. Wählt man die Einstellungen zu grob, wird auch „echte“ Bildinformation als Kratzer identifiziert. Das Ergebnis von Erdas Imagine ähnelt dem von Photoshop: Kratzer bleiben erhalten und Unschärfe in Folge von Weichzeichnung verschlechtern die Bildqualität. Nach diesen Untersuchungen wurde eine Entfernung von Staub oder Kratzern am vorliegenden Datenmaterial nicht angewandt. Bildunschärfe und zurückbleibende Kratzer bei automatischen Prozessen können für geometrische hochauflösende Bilddaten nicht in Kauf genommen werden. Eine manuelle Bearbeitung ist aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes nicht wirtschaftlich.

Um die Visualisierung/Animation gleichmäßiger und ansprechender zu gestalten, sollten die Bilder möglichst ähnlich in Helligkeit, Kontrast und Farbe sein. Das Werkzeug *Histogram Matching* von Erdas Imagine 9.1 bietet die Möglichkeit, das Histogramm des Ein-

gangsbildes dem des Referenzbildes anzugleichen. Die Histogrammangleichung wurde auf alle schwarz-weiß Aufnahmen angewandt. Durch den Einsatz des Batch-Prozesses lässt sich dieser Schritt weiter automatisieren. Das Ergebnis war bei allen Bildern zufrieden stellend, bis auf das Luftbild vom 14.4.1945. Beim Hineinzoomen wurde ein körniger Effekt festgestellt, der Kratzer und Staubteilchen betonter darstellt. Das Bild wurde zum Vergleich mit Adobe Photoshop 8.0.1 bearbeitet. Dabei nutze man die Funktion *Auto Kontrast* und die manuelle Korrektur von Helligkeit und Kontrast. Das *Histogram Matching* mit farbigen Bildern lieferte keine zufrieden stellenden Ergebnisse. Die Kontraste der Aufnahmen von 2000 und 2005 wurden abgeschwächt, die Farben wirkten blasser. Deshalb bevorzugte man auch hier die radiometrische Bildbearbeitung mit Adobe Photoshop 8.0.1.

5 Geodatenverarbeitung

Die folgenden Untersuchungen wurden mit Erdas Imagine AutoSync™ 9.1 durchgeführt:

- Gegenüberstellung der Layerwahl bei Farbbildern
- Vergleich unterschiedlicher Auflösung bei aktuellem Bildmaterial
- Vergleich verschiedener Korrelationsvarianten
- Vergleich verschiedener geometrischer Modelle
- Vergleich von Basis 2000- und Vorgänger-Nachfolger Projekten
- Rubber Sheeting Verfahren mit und ohne Passpunkte

Anhand der Farbbilder von 2000, 2005 und 2006 wurde die Auswirkung der Layerwahl des APM untersucht. Es wurden pro Layer die Anzahl der gefundenen Verknüpfungspunkte, RMSE-Werte und Standard Deviation Error verglichen. Dabei blieben die APM-Einstellungen gleich. Es wurden pro Projekt 9 bodennahe Passpunkte gewählt. Ein DHM wurde zur Berechnung der direkt linearen Transformation angegeben. Die Option Schattenpunkte vermeiden wurde gewählt und die Feature Point Density auf 200% gesetzt. 3 Punkte pro Pattern wurden voreingestellt. Im Ergebnis findet das APM die meisten Verknüpfungspunkt im Layer 1 (Roter Bildkanal). Die Anzahl der Verknüpfungspunkte der beiden anderen Layer ist gleich.

Für den Auflösungstest wurden die gleichen Einstellungen wie beim Layertest verwendet. Die Wahl des Layers fiel auf den roten Kanal. Die meisten Verknüpfungspunkte werden mit der Originalauflösung gefunden. Ein Downsampling hat weniger Verknüpfungspunkte zur Folge, trägt aber bis zu einem gewissen Grad zur Genauigkeitssteigerung bei.

Tabelle 2: Vergleich unterschiedlicher Korrelation

Test 1	2000_2005	2000_2006	2005_2006
RMSE [m]	10,452834	75,434020	18,057735
Error Std. Dev. [m]	6,175213	32,852672	10,889985
Tie Points	116	420	503
Test 2	2000_2005	2000_2006	2005_2006
RMSE [m]	7,343168	25,623673	12,234903
Error Std. Dev. [m]	4,693646	13,546985	7,992028
Tie Points	46	121	183

Anschließend wurden Korrelationstests durchgeführt. Beim Test 1 (siehe Tabelle 2) nutzte man die Voreinstellungen (Korrelationsgröße 11 Pixel, Schwellwert d. Korrelationskoeffizienten 0,8). Für den Test 2 wurden die Werte erhöht (Korrelationsgröße 15 Pixel, Schwellwert d. Korrelationskoeffizienten 0,9). Für alle 3 Projekte wirkt sich die verbesserte Korrelation direkt auf die Genauigkeit aus. Wie erwartet ist dabei die Anzahl der Verknüpfungspunkte gesunken. Ein Kompromiss könnte erzielt werden, wenn die Voreinstellungen beibehalten werden und die manuelle Kontrolle der Verknüpfungspunkte und das Entfernen grob fehlerhafter Punkte zur Genauigkeitssteigerung beitragen.

Der Vergleich verschiedener geometrischer Modelle anhand eines Projektes soll beispielhaft sein. Anzumerken ist, dass aus erwähnten Gründen beim Rubber Sheeting keine Standardabweichungen ausgegeben werden. Die Modellauswahl hat keinerlei Auswirkungen auf die Anzahl der Verknüpfungspunkte.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener geometrischer Modelle

Projekt		Affin	Polynomial (Order 3)	Linear/Nonlinear-Rubber Sheeting	DLT (mit DGM)	Projective Transform (Order 2), DGM
1998_1997	Total RMSE [m]	5,075592	5,231726	–	3,983424	3,592475
	Error Std. Dev. [m]	2,916928	3,129166	–	2,36535	2,468492
	Tie Points	19	19	19	19	19

Der Vergleich geometrischer Modelle zeigt, dass mit jedem Modell ähnliche Genauigkeiten erreicht werden. Nur geringfügig sind die Modelle besser, die ein Geländemodell zur Berechnung verwenden. Da die Projektive Transformation in fast allen Projekten geringfügig bessere Ergebnisse erzielt hat, wird das Modell für alle weiteren Projekte angewandt.

Die Projekteinstellungen für die Basis-2000-Projekte wurden auf Grundlage vorangegangener Untersuchungen gewählt. Die Standard *Correlation size* (11) und *Minimum Point Match Quality* (0,80) wurden übernommen, damit möglichst viele Verknüpfungspunkte gefunden werden, die in einem zweiten Schritt gefiltert und visuell kontrolliert werden. Nach der Wahl der geeigneten Voreinstellungen wurden Passpunkte gemessen. Je nach inhaltlicher Veränderung zur Basis 2000 wurden bodennahe Punkte und niedrige Gebäude als Passpunkte definiert. Je älter das Datenmaterial umso ungenauer werden die Passpunkte, da tlw. nur noch große markante Gebäudeecken als Dach erkannt werden konnten. Nach der Passpunktwahl startete man das APM. Die identifizierten Verknüpfungspunkte wurden zuerst anhand ihres RMS- Fehlers gefiltert und in einem iterativen Prozess gelöscht. Nach jedem Schritt wurde das Modell neu berechnet um die Verbesserung aufgrund der Punktlösung festzustellen und die RMS-Werte aller Punkte neu zu berechnen. Die übrigen Punkte wurden einer visuellen Kontrolle unterzogen. Dabei wurden weitere Schatten- oder Dachpunkte und auch Punkte, die als falsch gematcht erkannt wurden, entfernt oder manuell versetzt. Das APM präsentiert bei sehr unterschiedlichem Bildinhalt keine sinnvollen Ergebnisse. Ähnliche Grauwerte werden gefunden, jedoch stimmen diese nach visueller Kontrolle nicht mit dem Referenzbild überein. Die Verknüpfungspunkte der Jahrgänge 1939 bis 1953 konnten nicht verwendet werden. Das APM auf eine Basis ist nur dann zu empfehlen, wenn in allen Bildbereichen noch annähernd gleicher Bildinhalt zu erkennen ist.

Das APM der Jahrgänge 1992 bis 1998 konnte zur Genauigkeitssteigerung der Bildentzerrung beitragen. Die Vorgänger-Nachfolger-Projekte wurden mit den gleichen Einstellungen durchgeführt, damit ein Vergleich der Ergebnisse in Bezug auf die Methode gewährleistet ist. Der Matching-Algorithmus des APM identifiziert mehr Punkte je zeitlich näher sich die Aufnahmen sind. Zeitlich unmittelbar angrenzende Jahrgänge zeigen, dass nach der Punktfilterung und der visuellen Kontrolle noch zahlreiche Verknüpfungspunkte für den Entzerrungsprozess zur Verfügung stehen. Faktoren wie verschiedene Gebäudekippung oder stark abweichende Tageszeiten führen zu einem schlechten APM Ergebnis.

Die Aufnahmen von 2005 und 2006 wurden mit dem parametrischen Ansatz als Orthophotomosaik auf ein Geländemodell entzerrt. Deshalb ist es nicht notwendig sie erneut auf ein DGM zu entzerren. Für diese Daten sollte das Rubber Sheeting mit und ohne Passpunkte getestet werden. Da dieses geometrische Modell nur innerhalb der konvexen Hülle der Verknüpfungspunkte angewendet wird, ist es notwendig, dass die Randbereiche mit Verknüpfungspunkten abgedeckt sind, deshalb wurde ein größerer Bildausschnitt gewählt. Den Aufnahmen ist bereits eine Projektion zugewiesen, daher kann das APM ohne Passpunkte durchgeführt werden. Es werden viele Verknüpfungspunkte durch das APM gefunden, da die Bilder inhaltlich homogen sind. Deshalb ist ein Rubber Sheeting Verfahren möglich. Das Rubber Sheeting mit Passpunkten zeigte eine geringe Verbesserung gegenüber den Projekten ohne Passpunkte. Es kann mit Hilfe von Passpunkten im Randbereich eine stabilere Entzerrung mit dem Rubber Sheeting Verfahren gewährleistet werden.

6 Auswertung und Auswahl der Methoden

Da beim Vorgänger-Nachfolger-Prinzip der Fehler aus der Ausgleichung von einem Projekt zum nächsten übernommen wird, soll versucht werden möglichst viele Aufnahmen auf die Basis 2000 zu entzerren. Erst ab einem hohen inhaltlichen Veränderungsgrad soll das Vorgänger-Nachfolger Prinzip angewandt werden. Für die farbigen Daten, speziell für die Aufnahme von 2006, entschied man sich für das Vorgänger-Nachfolger Prinzip, da die Auflösung der Datensätze zwischen 50cm (Basis 2000) und 10cm (2006) stark voneinander abweicht. Die Aufnahme von 2005 ist mit einer Auflösung von 25cm besser für die Entzerrung der Aufnahme von 2006 geeignet. Als geometrisches Modell wurde Rubber Sheeting bevorzugt. Die Aufnahmen 1992 bis 1998 wurden auf die Basis 2000 entzerrt. Die inhaltlichen Veränderungen tragen bei diesen Aufnahmen nicht zu einem schlechten APM Ergebnis bei. Die Projektive Transformation unter Hinzunahme eines DGM lieferte dabei die besten Ergebnisse. Die Daten von 1939 bis 1974 sind mit der Vorgänger-Nachfolger-Methode entzerrt wurden. Die inhaltliche Heterogenität im Vergleich zur Basis 2000 hatte nur unzureichende APM-Ergebnisse zur Folge. Die Projektive Transformation konnte auch für diese Projekte als geometrisches Modell mit guten Ergebnissen angewandt werden.

Erdas Imagine AutoSync™ 9.1 ist ein Werkzeug mit dem man ohne Kamera- oder Bildflugangaben Luftbilder aufeinander entzerren kann. Im Vorfeld ist es wichtig, das vorliegende Bildmaterial zu analysieren, um inhaltliche Veränderungen zu lokalisieren und geometrische und radiometrische Merkmale zu erkennen. Inhaltliche Homogenität führt meist zu guten Ergebnissen des APM. Jedoch sind unterschiedliche Tageszeiten bei der Befliegung (unterschiedliche Schatten) oder unterschiedliche Gebäudekippungen hinderlich. Es ist von Vorteil, wenn alle Bilddaten in annähernd gleicher Auflösung vorliegen. Das Entzerren mehrerer Bildjahrgänge auf eine Referenz ist bei geringen inhaltlichen Veränderun-

gen empfehlenswert. Das Vorgänger-Nachfolger-Prinzip kann auf die Bilddaten angewandt werden, wenn starke inhaltliche Veränderungen im Bildmaterial auftreten. Es ist von Vorteil, dass die Zeitabstände zwischen den Aufnahmen so gering wie möglich sind. Ein vollständiger Automatisierungsprozess konnte nicht angewandt werden. Ein semiautomatisches Verfahren, in dem die Auswahl der Passpunkte und das Filtern bzw. die visuelle Kontrolle der Verknüpfungspunkte manuell erfolgen, die Verknüpfungspunktsuche automatisch abläuft, ist ein guter Kompromiss für die Entzerrung. Die Wahl geeigneter Passpunkte für das APM ist ein zeitaufwändiger Prozess, da nicht für jede Aufnahme die Passpunkte wieder verwendet werden können. Für die Entscheidungsfindung welche Methode zum vorliegenden Datensatz passt sind interaktive Schritte, Überlegungen und eine vorangehende Datenanalyse notwendig und erfordert Erfahrung im Umgang mit Imagine Auto-Sync™.

7 Ergebnispräsentation in Form einer Morphinganimation

Warping und Morphing sind zwei Techniken bekannt aus Film und Fernsehen. Warping wird benutzt, wenn ein Ausgangsbild deformiert werden soll. Morphing, entstanden aus dem Begriff Metamorphose, kommt bei zwei Bildern zum Einsatz, wobei eine Transformation aus einem Bild in das zweite Bild stattfindet. Morphing ist eine Kombination aus zwei Warping-Prozessen. Das Ausgangsbild wird zum Endbild verformt und das Endbild zum Ausgangsbild. Für die Animation wurde die Freeware WinMorph 3.01 genutzt. Nach dem Einladen der Bilder werden Vektoren auf dem Ausgangsbild erstellt. Die Software überträgt diese in das Endbild und dort müssen sie an die gewünschte Stelle übertragen werden. (vgl. KUMAR S. 2002, S. 8ff, MARENKA S., SADUN A., WATKINS C. 1993, S. 97ff) Die Dauer des Renderns eines Morphingvideos ist von der Bildgröße, der Vektorenanzahl, der Anzahl der Frames, der Bildkompression und der Framerate abhängig. Dafür ist es von Vorteil, bereits im Vorfeld genaue Vorstellungen über das Endvideo zu haben. Die Animation wurde nach dem Export der Morphingvideos mit Windows® Movie Maker zusammengeschnitten und verfeinert. Um das Video ansprechender zu gestalten und das Thema der Zeitreihe einleitend etwas näher zu bringen, wurde eine weitere Videosequenz importiert. Mit ESRI®ArcGlobe™, einem GIS-Werkzeug, wurden alle Bilder als Zeitstapel visualisiert und eine Animation mit Hilfe von Keyframes erzeugt. Um das Ende des Videos abzurunden wurde ein Ausblick in die Zukunft gewagt. Zum einen entstand eine Überlagerung des Luftbildes von 2006 mit Stadtschloß, Garnisonkirche und Plantage aus 1944. Danach wird dieses Bild dann mit dem Bauplan der Umbaumaßnahmen für Potsdam Mitte überblendet, dass zu diesem Zweck grob georeferenziert wurde.

8 Fazit und Ausblick

Das Datenmaterial wurde bezüglich geometrischer und radiometrischer Eigenschaften analysiert. Dabei konnten erhebliche inhaltliche Unterschiede aufgrund der baulichen Entwicklung im Untersuchungsgebiet festgestellt werden. Um das Untersuchungsgebiet vollständig abzubilden, wurden Luftbildmosaiken aus Bildern eines Jahrganges erstellt. Durch die Geheimhaltung in der ehemaligen DDR sind im Untersuchungsgebiet eines Jahrganges geweißte Gebiete entstanden. Diese konnten fast vollständig mit dem Nachbarbild des Bildfluges abgedeckt werden. Durch die unterschiedlichen räumlichen Ausdehnungen der Luftbilder wurde das Untersuchungsgebiet beschränkt. Eine radiometrische Angleichung der Bilder

wurde durchgeführt. Es ist nicht gelungen, Staubteilchen und Kratzer automatisch aus den Aufnahmen zu entfernen. Aufgrund erheblicher Bildveränderungen und Unschärfe bei automatischer Staub- und Kratzerdetektion wurde auf die Bildrestaurierung verzichtet. Anschließend wurden Untersuchungen zur automatischen Verknüpfungspunktsuche und verschiedenen geometrischen Entzerrungsmodellen durchgeführt. Es zeigte sich, dass inhaltliche Bildveränderungen, unterschiedliche Gebäudekippungen und Belaubungszustände zu großen Schwierigkeiten bei der Verknüpfungspunktsuche führen. Bis zu einem gewissen Grad der Bildveränderung ist es empfehlenswert auf ein Basisbild zu entzerren, um die Lagefehler nicht von Projekt zu Projekt weiterzuführen. Sind die Bildveränderungen zu groß, werden fehlerhafte oder keine Verknüpfungspunkte automatisch lokalisiert. Dann sollte das Bildmaterial auf die zeitlich am nächsten liegende Aufnahme entzerrt werden. Bei Zeitreihen wie bei dem vorliegenden Datenmaterial ist eine Kombination aus beiden Methoden empfehlenswert. In jedem Fall sollten die automatisch gefunden Verknüpfungspunkte gefiltert und anschließend manuell kontrolliert werden, um das Ergebnis zu verbessern. Ein semiautomatisches Verfahren, verbindet automatische Verknüpfungspunktsuche mit Filterung und visueller Kontrolle und liefert zufrieden stellende Ergebnisse. Erfahrungen und Tests bei der Wahl der Parameter für die automatische Punktsuche sind nötig, um gute Ergebnisse mit dem Werkzeug Erdas Imagine AutoSync™ 9.1 von Leica Geosystems zu erhalten. Zur Visualisierung der Zeitreihe wurde unter Verwendung von Morphingalgorithmen ein Video erstellt. Als Ausblick sind weitere wissenschaftliche Untersuchungen von Zeitreihen denkbar. Zum Beispiel können zeitlich große Lücken im Datenmaterial mit Satellitenbildern aufgefüllt werden. Mit Hilfe von geschätzten oder angegebenen Kameraparametern könnten parametrische Ansätze mit automatischer Verknüpfungspunktsuche untersucht werden. Das Untersuchungsgebiet der Potsdamer Mitte wird sich in den kommenden Jahren noch weiter verändern, eine Aktualisierung des Datensatzes mit weiterem Luftbildmaterial, um die weitere Stadtentwicklung zu visualisieren, wäre vorstellbar. Außerdem kann das Untersuchungsgebiet vergrößert werden, um die Verarbeitung mit speicherintensivem Datenmaterial zu testen. Da das Bildmaterial entzerrt vorliegt, kann es in ein GIS, bestehend aus zeitlichen Layern, eingebunden werden. Analysen, Monitoring oder Planungen können auf dieser Basis schnell und unkompliziert durchgeführt werden.

Literatur

- ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 2. Aufl. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- HAHN, P.-M. (2003): Geschichte Potsdams. Von den Anfängen bis zur Gegenwart. München, Beck.
- Imagine AutoSync™ White Paper (2006): Softwarebeschreibung.
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie. Band 1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscannaufnahmen. 7. Aufl. Berlin, de Gruyter.
- KUMAR, S. (2002): WinMorph^{3.01} User Guide.
- LEHMANN, G. (1969): Photogrammetrie. 3. Aufl. Sammlung Göschen, Band 1188/1188a. Berlin, de Gruyter.
- MARENKA, S., SADUN, A. & WATKINS, C. (1993): Modern Image Processing: Warping, Morphing, And Classical Techniques. Cambridge, Academic Press Professional.
- OTT T. & SWIACZNY F. (2001): Time-Integrative Geographic Information Systems. Management and Analysis of Spatio-Temporal Data. Heidelberg, Springer.