

Publikationen der Deutschen
Gesellschaft für Photogrammetrie,
Fernerkundung und Geoinformation e.V.



Band 19

2010



**Vorträge
Dreiländertagung
30. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF**

1. – 3. Juli 2010
Wien

100 Jahre ISPRS – 100 Jahre internationale Zusammenarbeit

Automatische Detektion von Bombentrichtern in digitalisierten Luftbildern des 2. Weltkriegs

Laura Jensen¹, Martin Drauschke² & Wolfgang Förstner¹

Zusammenfassung: Bei der Suche nach Blindgängern aus dem 2. Weltkrieg in Deutschland werden vom Kampfmittelbeseitigungsdienst seit den 90er Jahren auch Luftbilder der Alliierten Streitkräfte verwendet (CARLS & MÜLLER, 2007). Da eine automatische Detektion von Blindgängerverdachtspunkten ohne Kenntnis der Orientierung der Bilder und einer Georeferenzierung unmöglich ist, haben wir ein automatisches Verfahren zur Detektion von Bombentrichtern entwickelt. Mit Hilfe dieses Verfahrens können Bombentrichterdeckkarten erstellt werden, so dass die digitalisierten Bilder oder Bildausschnitte maschinell vorsortiert werden können. Unser Ansatz berücksichtigt die vielen Erscheinungsformen und Größen von Bombentrichtern, indem wir einerseits mehrere Trichterklassen lernen und andererseits die Repräsentanten dieser Klassen skalieren. Durch Korrelation werden die Kandidaten für Bombentrichter gefunden, die dann mittels der linearen Diskriminanzanalyse (LDA) als solche klassifiziert werden.

1 Einleitung

Im 2. Weltkrieg wurden durch die Luftstreitkräfte der Alliierten schätzungsweise bis zu 2 Millionen Tonnen Munition über deutschen Städten, Industriestandorten und Verkehrswegen abgeworfen, wovon ebenfalls Schätzungen zufolge 10 Prozent nicht detonierten (AH KMR, 2007). Allein in Nordrhein-Westfalen werden noch über 60 Jahre nach Ende des Kriegs jährlich mehr als 1000 Blindgänger mit einer Explosivstoff-Nettomasse von ca. 26 Tonnen entschärft³. Vor und nach den Bombardierungen wurden die Zielgebiete zu deren Erkundung bzw. zur Ergebnisüberprüfung der militärischen Operation überflogen, wobei mehr als eine Million Senkrechtluftbilder entstanden. Diese Luftbilder werden vom Kampfmittelbeseitigungsdienst seit den 90er Jahren zusammen mit weiteren Dokumenten und historischen Unterlagen sowie Geo- und Infrastrukturdaten genutzt, um die nicht detonierten Bomben aufzuspüren (AH KMR, 2007; CARLS & MÜLLER, 2007).

Aufgrund der großen Menge von Luftbildern und deren zeitaufwendiger Interpretation ist es wünschenswert, die Suche nach Blindgängern in den Luftbildern zu automatisieren. Dabei ist es schon bei manueller Inspektion sehr schwierig, die Blindgänger zu erkennen, da sie meist sehr klein und unauffällig sind. Zudem haben andere kriegsbedingte Strukturen wie Einmannlöcher eine ähnliche Erscheinungsform in den Luftbildern. LÜCKE ET AL. (2007) haben ein Verfahren entwickelt, das Blindgänger halbautomatisch unter Verwendung eines neuronalen Netzes

¹ Laura Jensen, Wolfgang Förstner, Professur für Photogrammetrie, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nußallee 15, 53 115 Bonn, Email: ljensen@uni-bonn.de, wf@ipb.uni-bonn.de

² Martin Drauschke (Korrespondierender Autor), Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Institut für Angewandte Informatik, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85 577 Neubiberg, Email: Martin.Drauschke@unibw.de

³ siehe <http://www.im.nrw.de/sch/725.htm>, zuletzt aufgerufen am 02. Juni 2010

detektiert. Es findet allerdings keine Verwendung in der Praxis, da dieser Ansatz eine zu hohe Fehlklassifikationsrate aufweist.

Da Blindgänger nur in Gebieten zu finden sind, die auch bombardiert wurden, wollen wir zunächst die Trichter der detonierten Bomben in den Luftbildern detektieren. Dies kann bereits auf einem einzelnen Bild realisiert werden. Das Verfahren kann später noch dahingehend erweitert werden, dass nach einer Georeferenzierung der Luftbilder eine Bombentrichterdichtekarte analog zu MERLER ET AL. (2005) erstellt wird, oder es wird eine Zeitreihenanalyse mit einem Szenenvergleich vor und nach der Bombardierung durchgeführt.

2 Konzept für die automatische Detektion von Bombentrichtern

Wir haben ein Verfahren zur Detektion von Bombentrichtern in einzelnen Luftbildern realisiert. Daher wählten wir einen erscheinungsbasierten Ansatz, in dem wir lediglich die Bildintensitäten auswerten. Um möglichst viele Variationen von Bombentrichtern erkennen zu können, berücksichtigen wir mehrere Luftbilder beim Lernen eines Modells für diese Objektklasse. Die Bombentrichter unterscheiden sich erstens in ihrer Größe, zweitens in der Struktur des Auswurfs und drittens in der Helligkeit bzw. der räumlichen Verteilung der Helligkeiten. Die Größenunterschiede sind auf verschiedenen Bombenkonstruktionen sowie auf die unterschiedlichen Bildauflösungen zurückzuführen. Im 2. Weltkrieg wurden Bomben mit einem Explosivgewicht zwischen 2 kg bei einer Stabbrandbombe und 6 t bei einer britischen Luftmine verwendet (AH KMR, 2007). Folglich entstehen auch unterschiedlich große Trichter. Der Auswurf variiert durch die unterschiedliche Stärke der Detonation, aber auch durch die verschiedene Beschaffenheit der Böden. Die Helligkeitsunterschiede kommen am häufigsten durch Wechsel des Sonnenstands (Schattenwurf) oder durch Wasser im Trichter vor. Abbildung 1 zeigt die Variationsbreite der Bombentrichter, die verschieden großen Trichter stammen alle aus demselben Luftbild.

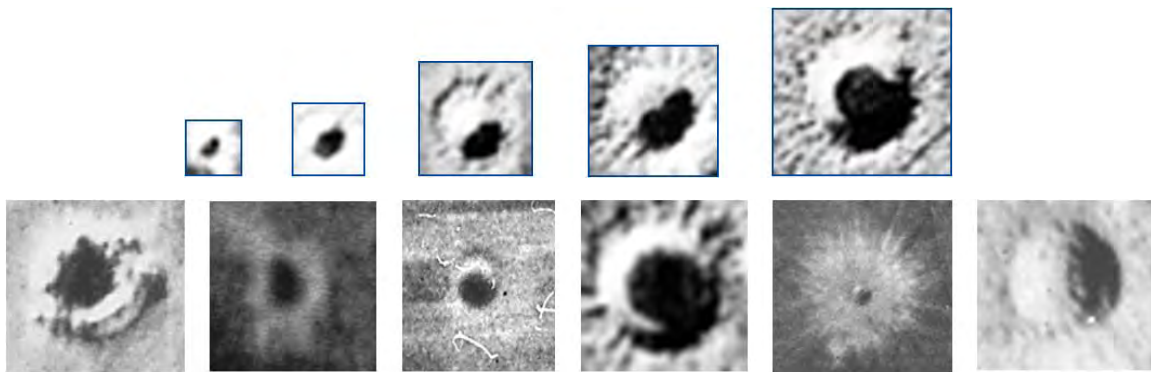


Abb. 1: Größen- und Formvariationen der Bombentrichter.

Unser Ansatz besteht aus drei Arbeitsschritten. Zuerst werden die Bilder optisch verbessert, d.h. wir führen eine Kontrastverbesserung mit Multidodging-Ansatz von DRAUSCHKE ET AL. (2009) durch und richten die Bilder so aus, dass der Sonnenstand auf allen einheitlich ist. Dann suchen wir geeignete Kandidaten im Bild und anschließend klassifizieren wir diese unter Berücksichtigung ihrer Umgebung.

Für die Auswahl der Kandidaten haben wir drei Detektionsverfahren verglichen. Durch die häufig kreisförmige Form des Bombentrichters im Bild eignet sich der Punktoperator von

FÖRSTNER & GÜLCH (1987) für die Kandidatenauswahl. Alternativ dazu haben wir auch den SIFT-Operator von LOWE (2004) ausprobiert, der insbesondere im Computer Vision eingesetzt wird. Als dritte Möglichkeit haben wir die Kreuzkorrelation mit verschiedenartigen und unterschiedlich großen Trichter-Templates in Betracht gezogen.

Ein gefundener Kandidat wird durch die Position im Bild, d.h. der x- und y-Koordinate des (Sub)-Pixel, und die Größe seiner Umgebung charakterisiert. Beim Punktoperator kann die Größe der Umgebung vom Suchfenster abgeleitet werden, beim SIFT-Operator definiert der dazugehörige Maßstab die Größe der Umgebung und bei der Korrelation die Größe des Templates.

Nach Skalierung der Umgebung aller gefundenen Kandidaten auf eine einheitliche Größe, wird aus den Bildintensitäten ein Merkmalsvektor erstellt. Diese werden dann klassifiziert, wobei die entsprechenden Klassenzugehörigkeiten (Trichter oder kein Trichter) durch Abgleich mit manuell annotierten Bombentrichtern erfolgt. MERLER ET AL. (2005) haben für ihre Klassifikation von Bildausschnitten verschiedene Boosting-Ansätze verwendet, die aber eine sehr hohe Komplexität haben (350 Stunden auf einem Pentium IV Prozessor mit 3 GHz fürs Lernen!). Daher haben wir uns für eine deutlich einfache Methode, die Klassifikation mit linearer Diskriminanzanalyse (LDA), entschieden.

3 Durchführung

3.1 Vorbereitung der Bilder

Bei der Digitalisierung der Aufnahmen aus dem 2. Weltkrieg kann wegen der großen Anzahl von Luftbildern keine ständige Anpassung der Beleuchtungsparameter erfolgen, siehe dazu die Ausführungen von DRAUSCHKE ET AL. (2007). Aus diesem Grund wurde in den vergangenen Jahren ein Algorithmus zur Kontrastverbesserung in den digitalisierten Bildern von DRAUSCHKE ET AL. (2009) entwickelt. Vor der Trichterdetektion erreichen wir so eine Anpassung aller Luftbilder in Bezug auf die Verteilung der Grauwerte, die Bilder weisen ähnliche Histogramme auf.

Da die Aufnahmezeit der Luftbilder bekannt ist, könnte man bei georeferenzierten Bildern den Sonnenstand modellieren und eine weitere Angleichung der Bilder bewirken. Durch das Fehlen der präzisen Orientierung der Bilder haben wir die Luftbilder manuell gedreht und derart ausgerichtet, dass die Sonne immer von unten strahlt und daher die Schatten immer noch oben fallen.

Vom Kampfmittelbeseitigungsdienst der Bezirksregierung Arnsberg haben wir 18 verschiedene Luftbilder zur Verfügung bestellt bekommen, die ein eher ländlich geprägtes Gebiet zeigen. Nach der Drehung der Bilder haben wir 34 vollständige Ausschnitte für die Trichterdetektion herausgesucht, die jeweils eine Größe von 2.400×2.000 Pixel haben. Alle Bildausschnitte liegen in der Originalauflösung vor, die Bombentrichterdichte variiert stark zwischen diesen Bildern.

Für die Klassifikation der Trichterkandidaten haben wir uns für ein überwacht Verfahren entschieden und deshalb alle 1.099 Bombentrichter in den 34 Bildausschnitten manuell annotiert. Dabei wurden sowohl die Position als auch der Radien des Trichters und des Auswurfkreises abgespeichert. So können die Trichter auch als gefunden markiert werden, in deren unmittelbarer Nähe wir Kandidaten gefunden haben.

3.2 Experimente zur Kandidatensuche

Wie im Abschnitt 2 bereits erwähnt, haben sowohl die Bombentrichter als auch der Auswurf verschiedene Größen und Formen, aber häufig eine kreisförmige Struktur. Aus diesem Grund haben wir für die automatische Detektion von Trichterkandidaten drei Verfahren vergleichend untersucht: der Punkt- bzw. Kreismittelpunktdetektor von FÖRSTNER & GÜLCH (1987), den im Computer Vision beliebten SIFT-Operator von LOWE (2004) als auch die Detektion mittels Kreuzkorrelation mit einem Trichter-Template.

Der Punktoperator von FÖRSTNER & GÜLCH (1987) kann die kleinen Bombentrichter als Punkte erkennen, und die größeren als Kreise, deren Mittelpunkt er dann ausgibt. Wir haben das Suchfenster so angepasst, dass es die meisten Bombentrichter umrandet. Die Abbildung 2 zeigt links die vom Punktoperator gefundenen Trichterkandidaten. Der SIFT-Operator von LOWE (2004) arbeitet ohne weitere Angabe von Parametern und liefert markante Bildstrukturen in verschiedenen Maßstäben. In der Abbildung 2 zeigen wir rechts die Ausgabe des SIFT, die Größe der Kreise wird durch den Maßstab der detektierten Strukturen festgelegt.

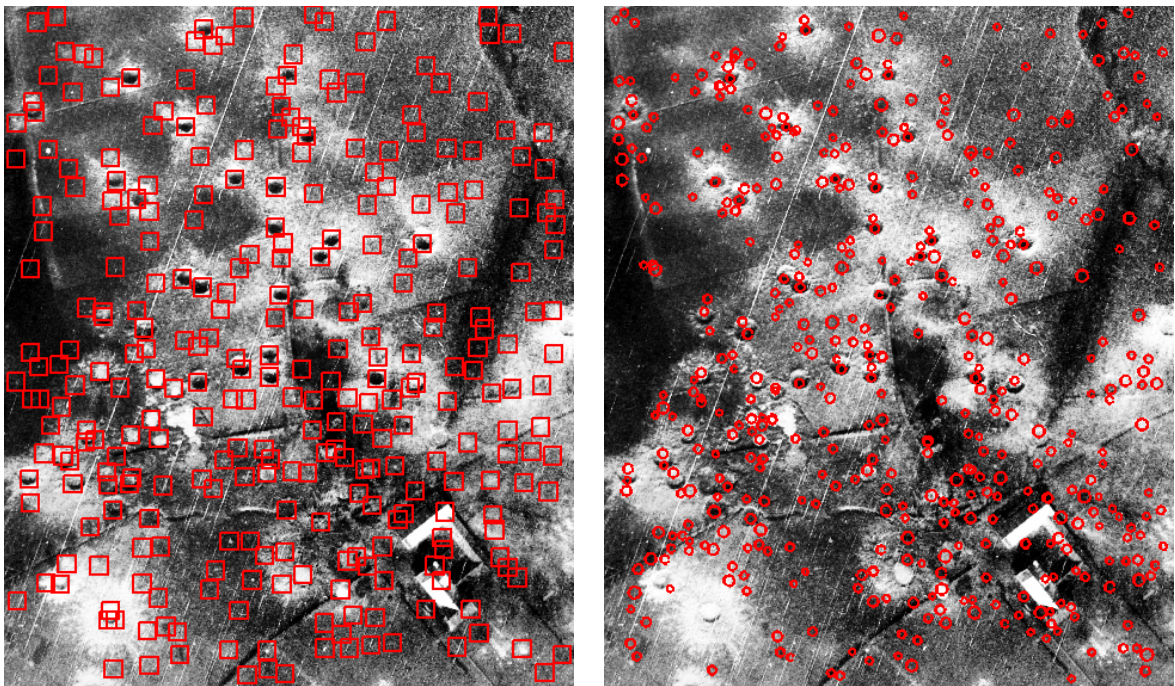


Abb. 2: Ausgabe der Kandidatensuche. Links: Punktoperator von FÖRSTNER & GÜLCH (1987). Rechts: SIFT-Operator von LOWE (2004).

In den 34 Bildausschnitten wurden 8.193 Kandidaten durch den Punktoperator und 107.497 Kandidaten durch den SIFT-Operator gefunden. Dem stehen aber nur 1.099 annotierte Bombentrichter gegenüber. Ein annotierter Bombentrichter gilt als gefunden, wenn in seinem Trichterkreis mindestens ein Kandidat gefunden wurde. Bei beiden Ansätzen werden ca. 80 Prozent der annotierten Trichter als Kandidaten gefunden.

Als Alternative zu den beiden Struktur-Detektoren bietet sich die Kreuzkorrelation mit einem oder mehreren Templates an. Die Kreuzkorrelation des Bildes mit einem Template liefert eine

Korrelationsmatrix, die die Ähnlichkeit des Templates mit dem entsprechenden Bildbereich repräsentiert. Wir haben als Template ein Bild verwendet, das einen möglichst allgemeinen und repräsentativen Trichter zeigt. Die Positionen der lokalen Maxima dieser Korrelationsmatrix werden als mögliche Trichterpositionen im Bild akzeptiert, wenn sie einen größeren Korrelationswert als 0,7 haben. Die Größenvariationen der Trichter können durch Verwendung des Templates in verschiedenen Größen berücksichtigt werden.

JENSEN (2008) hat ein für alle Trichter geltendes Trichter-Template als Durchschnitt aller annotierten und auf eine einheitliche Größe skalierten Bombentrichter berechnet und dieses in fünf verschiedenen Größen verwendet. Dieses Trichter-Template zeigt eine dunkle, kreisförmige Struktur vor hellem Hintergrund, d. h. die verschiedenen Erscheinungsformen der Bombentrichter bleiben unberücksichtigt. Mit diesem Template wurden 70 Prozent der annotierten Trichter gefunden, zeitgleich aber auch mehrere tausend Bildausschnitte, die keine Trichter zeigen. Eine - im Folgenden dargestellte - Spezialisierung der Templates bringt demgegenüber zwei Verbesserungen mit sich: wir können die Anzahl der gefundenen Bombentrichter erhöhen und gleichzeitig die Anzahl der falschen Kandidaten verringern.

3.3 Kandidatensuche mit mehreren Templates

WENZEL & FÖRSTNER (2008) haben ein interaktives Verfahren zur Erstellung von Templates vorgestellt. Zuerst wird ein charakteristischer Bildausschnitt als erstes Template definiert. Durch Kreuzkorrelation werden dann diesem Template ähnliche Bild gefunden. Falsche Korrespondenzen werden interaktiv gelöscht, dann wird das Template als Mittelung aller gefundenen Bildausschnitte aktualisiert. Nach mehreren Iterationen ist das erste Template ziemlich stabil, so dass nun weitere Templates definiert werden können.

Wir haben diese Vorgehensweise für die Bombentrichter angewandt und auf diese Weise acht Klassen von Bombentrichtern definiert. Die acht Templates dieser Trichterklassen werden in Abbildung 3 gezeigt.

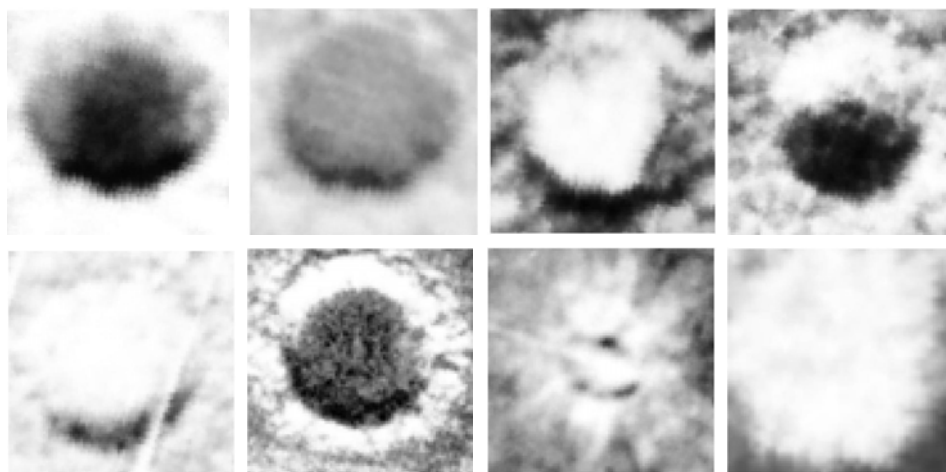


Abb. 3: Templates der acht Trichterklassen.

In unseren Experimenten haben wir mit diesen acht Templates 815 der 1099 annotierten Bombentrichter gefunden, was einer Detektionsrate von 74 Prozent entspricht. Der Anteil der falschen Kandidaten liegt bei nur 16 Prozent. Selbst ohne weitere Klassifikation dieser Kandidaten ist damit die Suche nach Bombentrichtern erfolgreich und deutlich besser als die anderen untersuchten Verfahren.

Analog zu Abbildung 2 zeigen wir in Abbildung 4 die Ergebnisse der Kreuzkorrelation sowie das Originalbild als Vergleich. Die verschiedenen Templategrößen werden durch verschieden große Boxen gekennzeichnet. In unseren Versuchen haben wir vier verschiedenen Seitenlängen für unsere Templates verwendet: 55, 85, 115 und 165 Pixel. Die meisten annotierten Bombentrichter haben einen Durchmesser von 85 Pixel. Da die Kreuzkorrelation noch gut mit Maßstabsdifferenzen von 20 Prozent umgehen kann, haben wir die anderen Templategrößen mit Abweichungen um 40 Prozent ausgesucht.

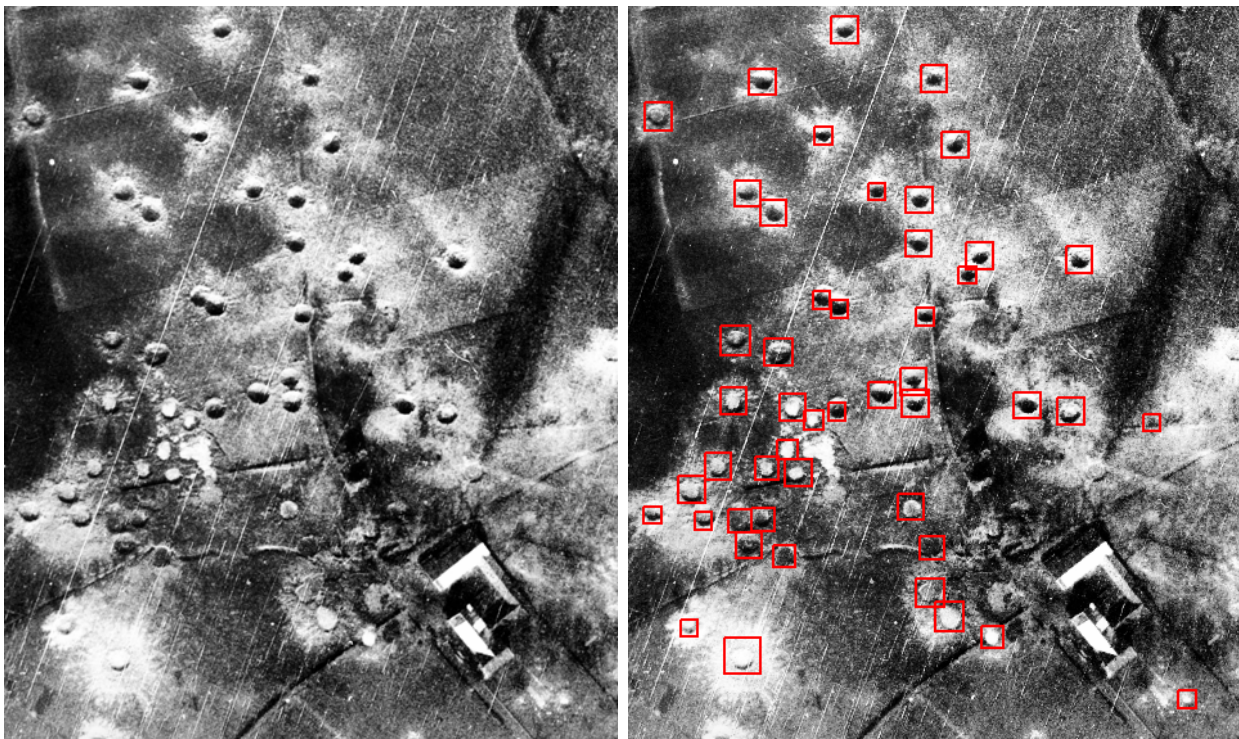


Abb. 4: Luftbildausschnitt (links) und Ergebnis der Kandidatensuche mittels Kreuzkorrelation und acht Trichter-Templates in vier verschiedenen Fenstergrößen (rechts).

3.4 Merkmalsvektor der Trichterkandidaten

Jeder gefundene Trichterkandidat besteht aus einer Position und der Fenstergröße des Templates, mit dem der Kandidat gefunden wurde. Nun muss für jeden Kandidaten ein Merkmalsvektor erstellt werden, der dann bei der Klassifikation verwendet wird. Die korrekten und falschen Kandidaten haben alle eine sehr ähnliche, kreisförmige Struktur, unterscheiden sich aber stark in der Umgebung. Daher vergrößern wir die Fenstergröße eines Kandidaten um das 1,5-fache.

Die verschiedenen großen Fenster der Kandidaten könnten je nach Größe unterschiedlich klassifiziert werden, d. h. wir klassifizieren alle Kandidaten, die durch Kreuzkorrelation mit dem 55×55 großen Template gefunden wurden, und für die anderen Kandidaten könnten wir eigene Klassifikatoren trainieren. JENSEN (2008) hat aber schon gute Klassifikationsergebnisse erzielt, obwohl sie alle Kandidaten auf eine einheitliche Fenstergröße skaliert hat, so dass wir diese Vorgehensweise beibehalten haben.

Wir haben die Fenster aller Kandidaten auf eine einheitliche Größe von 85×85 Pixel skaliert. Da wir die Fenstergrößen der Templates auf 1,5-fache vergrößert haben, werden die Fenster der kleinsten Kandidaten nochmals leicht vergrößert, die der anderen aber stark verkleinert. Anschließend wird die Matrix der interpolierten Bildintensitäten in einen Vektor überführt, der 7.225 Merkmale vereint.

3.5 Klassifikation der Trichterkandidaten

Für die Klassifikation der Trichterkandidaten mit der linearen Diskriminanzanalyse (LDA) hat JENSEN (2008) bereits gute Ergebnisse erzielt. Wir haben zusätzlich die Verwendung von Support Vektor-Maschinen (SVM) überprüft, aber von ihrer Verwendung wieder abgesehen, da sie sich zu sehr an die Trainingsdaten anpassen und daher zum Overfitting des Klassifikators führen. Aus Platzgründen können die hier verwendeten Techniken nicht weiter erklärt werden, wir verweisen dazu auf einführende Literatur, z. B. das Lehrbuch von DUDA ET AL. (2001).

Da unser Merkmalsraum eine Dimension von 7.225 aufweist, ist die LDA bei der Berechnung der Eigenwerte sehr instabil. Deshalb haben wir der Projektion in den LDA-Unterraum eine Hauptachsentransformation (PCA) vorgeschaltet. Die PCA projiziert jeden Merkmalsvektor in einen Unterraum, der 95 Prozent der Varianz der Merkmale darstellt. Er hat die Dimension 66.

Mit der LDA erfolgt dann eine weitere Projektion in einen anderen Unterraum, der bei unserem 2-Klassen-Fall die Dimension 1 hat. Im LDA-Unterraum entscheidet der Abstand zum nächsten Klassenmittelpunkt über die Ausgabe des Klassifikators.

Unsere Klassifikation haben wir mit einem Leave-One-Out-Test durchgeführt, d. h. wir haben 34 Versuche durchgeführt, in jedem Versuch mit allen Kandidaten aus 33 Bildausschnitten gelernt, und dann mit den Kandidaten des fehlenden Bildes getestet. In unseren Tests erreichen wir eine Fehlerrate von ungefähr 10 Prozent. Das Klassifikationsergebnis ist ausreichend für die Einschätzung, ob der Bildausschnitt viele Bombentrichter zeigt oder wenige.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben ein Verfahren entwickelt, um in digitalisierten Luftbildern des 2. Weltkriegs Bombentrichter zu finden. Mittels Kreuzkorrelation lassen sich die meisten Bombentrichter finden, wenn man mit verschiedenen Trichter-Templates in mehreren Größen arbeitet. Diese Vorauswahl ist schon sehr zuverlässig in Bezug auf die Detektionsrate, zudem werden nur wenige Nicht-Trichter als Kandidaten gefunden. Mit der linearen Diskriminanzanalyse konnten die meisten der Kandidaten richtig klassifiziert werden, d. h. die Trennung in Trichter und Hintergrund ist wirksam.

Eine Bombentrichterdeckkarte kann leider erst bei georeferenzierten Luftbildern erstellt werden, aber unser Verfahren ist in der Lage einzuschätzen, ob ein Bildausschnitt viele oder

wenige Bombentrichter aufweist. Eine Georeferenzierung der Bilder ermöglicht auch eine Zeitreihenanalyse, mit der noch wirksamer Bombentrichter detektiert werden könnten. Dann könnte man die automatische Erkennung von Blindgängern untersuchen.

5 Literaturverzeichnis

- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG & BUNDESMINISTERIUM DER VERTEIDIGUNG (HRSG.), 2007: Arbeitshilfen zur wirtschaftlichen Erkundung, Planung und Räumung von Kampfmitteln auf Liegenschaften des Bundes (AH KMR). 678 S., erhältlich unter http://www.ofd-hannover.de/KMR/KMRDocs/Downloads/Arbeitshilfen_KMR/, zuletzt aufgerufen am 02. Juni 2010.
- CARLS, H.-G. & MÜLLER, W., 2007: Die Aktualität der Vergangenheit – der Krieglufbildbestand “JARIC” in der modernen Kampfmittelbeseitigung. PFG, **2007** (2), S. 121-129.
- DRAUSCHKE, M., BRUNN, A., KULSCHEWSKI, K. & FÖRSTNER, W., 2007: Automatic Dodging of Aerial Images. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): Publikationen der DGPF, Band 16: Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert. Muttentz 2007, S. 173-180.
- DRAUSCHKE, M., FÖRSTNER, W. & BRUNN, A., 2009: Multidodging: Ein effizienter Algorithmus zur automatisierten Verbesserung von digitalisierten Luftbildern. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): Publikationen der DGPF, Band 18: Zukunft mit Tradition. Jena, 2009, S. 61-68.
- DUDA, R. O., HART, P. E. & STORK, D. G., 2001: Pattern Classification. John Wiley & Sons.
- FÖRSTNER, W. & GÜLCH, E., 1987: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers of Circular Features. In: Proceedings Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data. Interlaken, Schweiz, 1987, S. 281-305.
- JENSEN, L., 2008: Automatische Detektion von Bombentrichtern. Bachelorarbeit, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn.
- LOWE, D. G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. IJCV, **60** (2), S. 91-110.
- LÜCKE, C., CRUSE, C. & MÜTERTHIES, A., 2007: Entwicklung und operationelle Anwendung der halbautomatisierten Krieglufbildanalyse zur Detektion von Blindgängern. PFG, **2007** (7), S. 495-502.
- MERLER, S., FURLANELLO, C. & JURMAN, G., 2005: Machine Learning on Historic Air Photographs for Mapping Risk of Unexploded Bombs. In: Image Analysis and Processing - ICIAP 2005. LNCS 3617. Cagliari, Italien, 2005, S. 735-742.
- WENZEL, S. & FÖRSTNER, W.: Semi-supervised incremental learning of hierarchical appearance models. In: Proceedings of the 21st Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXVII, Part B3b-2. Peking, China, 2008, S. 399-404.