

## Thermalaufnahmen zur Erkundung ehemaliger Truppenübungsplätze

KAY WINKELMANN & WOLFGANG SPYRA, Cottbus

**Zusammenfassung:** Die Konversion von ehemals militärisch genutzten Flächen – allein im Land Brandenburg über 1 300 km<sup>2</sup> – stellt ein erhebliches ökologisches Problem dar. Ehemalige Truppenübungsplätze sind in Gänze als altlastenverdächtig einzustufen, wobei neben „normalen“ Kontaminationen (z. B. Kraftstoffe) insbesondere militärspezifische Kontaminationen (von Munition bis zu chemischen Kampfmitteln) ein erhebliches Gefährdungspotenzial darstellen. Eine terrestrische Erkundung dieser Flächen ist aus Kostengründen und Gründen der Arbeitssicherheit oft nicht vertretbar. Die Fernerkundung bietet hier Alternativen. In der vorliegenden Arbeit wurde die Anwendbarkeit der Thermalfernerkundung für die Lokalisierung von Vergrabungsarealen und unterirdischen Objekten untersucht. Obwohl die Thermalbefliegung des ehemaligen Truppenübungsplatzes „Döberitzer Heide“, die mit Hilfe eines militärischen Aufklärungssystems durchgeführt wurde, für diesen Zweck unter den gewählten Gegebenheiten nicht geeignet waren, sind Thermalaufnahmen prinzipiell ein geeignetes Werkzeug für die Erkundung von Altlastenverdachtsflächen. Geeignete Systeme und Parameter für die Erkundung von Altlastenverdachtsflächen mittels Thermalfernerkundung werden vorgeschlagen.

**Summary:** *Thermal Imaging for the Investigation of Former Military Training Areas.* The conversion of former military sites – more than 1 300 km<sup>2</sup> in the federal state of Brandenburg alone – is a considerable problem. The sites that have to be dealt with principally have to be considered to be contaminated. Apart from „normal“ contaminations (e.g. with fuel hydrocarbons), contaminations and hazards that are specific for former military uses (in particular ammunition and warfare agents) pose the biggest problems. The terrestrial investigation of these sites can not be realised due to high costs and occupational safety reasons. Remote sensing is a possible alternative to terrestrial site investigation. In this study, the applicability of thermal imagery for the localisation of buried wastes and objects in the subsurface has been investigated. Even though the imagery acquired of the former military training area „Döberitzer Heide“ west of Berlin using a military reconnaissance system was not suitable to obtain these objectives, thermal imagery is in principle a useful tool for contaminated site investigation. Appropriate systems and parameters for contaminated site investigation using thermal imagery are proposed.

---

### Problematik der Konversion

Das Ende des Kalten Krieges Anfang der 90er Jahre führte zu einer erheblichen Abrüstung in Europa. Europaweit wurden ehemals militärische Liegenschaften im Umfang von ca. 20 000 Quadratkilometer geräumt und zivilen Institutionen übergeben. Zu den geräumten Liegenschaften gehören Kasernengelände, Flugplätze, De-

pots, Hospitäler und die Truppenübungsplätze, die den flächenmäßig größten Anteil der zurückgegebenen Flächen ausmachen.

Stark betroffen von diesem Prozess ist Deutschland. Die hier stationierten Truppen aus acht Nationen wurden von 1,4 Millionen auf heute etwa 480 Tausend Soldaten reduziert. Mehr als 4 000 Standorte mit einer Fläche von 3 280 km<sup>2</sup> (0,9 % des deutschen Territoriums) wurden freigezogen und sind

seitdem Gegenstand der Konversion von der militärischen zu einer zivilen Nutzung (BICC 1996).

Auf Grund seiner strategisch-geographischen Lage zu Berlin hat das Land Brandenburg aus der Historie heraus die umfangreichsten Aufgaben in der Konversion in Deutschland zu lösen. Bis 1989 wurden etwa 2300 km<sup>2</sup> (etwa acht Prozent der Landesfläche) militärisch genutzt (BICC 1998). Heute befinden sich in Brandenburg über 700 ehemals militärisch genutzte Liegenschaften mit einer Fläche von circa 1500 Quadratkilometer in der Konversion. Darunter befinden sich 16 Truppenübungsplätze von jeweils über 30 km<sup>2</sup>, sowie 22 Militärflugplätze (GROTH & WEGENER 1998). Seit 1992 wurden in die Konversion in Brandenburg etwa 1,5 Mrd. DM an öffentlichen Mitteln investiert (BICC 1998).

### Ehemalige Truppenübungsplätze

Truppenübungsplätze in Deutschland zeichnen sich in der Regel durch eine lange militärische Nutzung für Übungs- und Erprobungszwecke aus, die teilweise 100 Jahre und länger zurückreicht. Durch diese Nutzung kam es zu militärspezifischen wie militärunspezifischen Kontaminationen, die über Jahrzehnte weitestgehend unerkannt blieben. Die militärunspezifischen Kontaminationen (z.B. Mineralölkohlenwasserstoffe, chlorierte Kohlenwasserstoffe, Schwermetalle) sind wie die aus ziviler Nutzung von Bedeutung, weil sie die biotischen und abiotischen Schutzgüter gefährden. Die größte Bedeutung für die Konversion haben die militärspezifischen Kontaminationen, zu denen insbesondere flächenhafte Belastungen mit scharfer Munition und Kampfstoffen, die nutzungsspezifisch große Flächen auf Truppenübungsplätzen betreffen können, zählen. Die Lokalisierung der spezifischen Kontaminationen stellt in der Erkundung und Sanierung (Beräumung) eine wichtige Aufgabe zur Herstellung der Verkehrssicherheit dar. Die Realisierung der Verkehrssicherheit ist die wesentliche Voraussetzung für die Nutzung der Liegenschaften.

Ein besonderes Problem stellen Vergrabungen, Überschiebungen und unterirdische Objekte dar, die zu atypischen Ablagerungsformen führen und somit eine erhöhte Gefahrenlage implizieren. Wilde Deponien finden sich auf einer Vielzahl von militärischen Liegenschaften. Sie sind mit der kontinuierlichen Nutzung dieser Standorte verbunden, liegen i.d.R. in der Nähe von Wohn- und Technikbereichen (Kasernen) und enthalten zumeist unspezifische Abfälle. Problematischer sind Vergrabungen und Überschiebungen von spezifisch militärischen Abfällen, die meist mit historischen Einschnitten oder besonderen Ereignissen wie der Einführung neuer Führungs- und Einsatzmittel einhergehen. Beispiele, die in der Literatur belegt sind:

- Vergrabungen von chemischen Kampfstoffen nach Ende des Ersten Weltkriegs.
- Sprengung und Vergrabung großer Mengen konventioneller Munition nach Ende des Zweiten Weltkriegs.
- Vergrabungen und Überschiebungen von Chemikalien und Kampfmitteln vor Abzug der Westgruppe der Truppen (WGT) der Roten Armee aus Deutschland 1992 – 1994.

Ebenfalls von Interesse sind im Rahmen der Konversion unterirdische Anlagen (Bunker, Leitungssysteme), die überschohen wurden und an der Oberfläche nicht mehr auszumachen sind.

Erschwert wird der Konversionsprozess bei Truppenübungsplätzen durch zwei weitere Faktoren, die Größe dieser Liegenschaften und die abgeschiedene Lage. Diese beiden Faktoren machen die Konversion dieser Flächen in der Regel finanziell aufwändig und wirtschaftlich unattraktiv.

### Döberitzer Heide

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung war der fünf Kilometer westlich von Berlin-Spandau gelegene, ehemalige Truppenübungsplatz Döberitzer Heide. Die Liegenschaft hat eine Größe von etwa 50 km<sup>2</sup>, wovon inzwischen ca. 34 km<sup>2</sup> als Naturschutzgebiet ausgewiesen sind und 8,5 km<sup>2</sup> weiter-

hin als Standortübungsgelände von der Bundeswehr genutzt werden. Die Liegenschaft hat eine lange Geschichte in der militärischen Nutzung. Erstmals für militärische Zwecke genutzt wurde das Gebiet im Jahre 1753 durch Friedrich II., der hier ein Großmanöver mit 44000 Soldaten abhielt. Als dauerhafter Truppenübungsplatz wurde das Gelände ab 1892 eingerichtet. Vor dem und während des Ersten Weltkriegs wurde der Truppenübungsplatz intensiv für militärische Übungen und Erprobungen genutzt. Nach Ende des ersten Weltkrieges wurde hier Munition durch Vergraben entsorgt. Im Rahmen der Olympischen Spiele 1936 in Berlin befand sich das Olympische Dorf im Nordwestteil der heutigen Liegenschaft. In der Zeit des Zweiten Weltkriegs wurde das Übungsgelände für Zielübungen mit scharfer Munition genutzt. Direkt nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs übernahm die Rote Armee den Truppenübungsplatz. Bis 1950 erfolgte auf der Liegenschaft die Vernichtung großer Mengen an Munition durch Sprengung. Sprengtrichter mit Munitionsresten wurden mit Erdmaterialien verfüllt.

Die WGT nutzte die Liegenschaft bis 1991 zu militärischen Übungen, vor allem als Panzerschieß- und -ausbildungsplatz. Vor der Räumung durch die sowjetischen Truppen wurden auf Grund einer Vereinbarung zwischen der deutschen und sowjetischen Regierung, dass die freiwerdenden Liegenschaften „besenrein“ zu übergeben seien, zahlreiche Abfälle, darunter auch Chemikalien, durch Vergrabung „entsorgt“. Weiterhin ist für das gesamte Gelände von einer Reihe unterirdischer Bauobjekte auszugehen, die über die gesamte Nutzungszeit entstanden, heute aber oberflächlich nicht mehr erkennbar sind.

### **Fernerkundung als Methode zur Erkundung großflächiger Liegenschaften**

Methoden der Fernerkundung sind aus vier Gründen für die Erkundung von großflächigen Liegenschaften besser geeignet als terrestrische Erkundungsmethoden:

- Kosteneffizienz – große Flächen können im Vergleich zur terrestrischen Erkundung kostengünstig untersucht werden, wodurch die Untersuchung der Gesamtfläche überhaupt erst finanzierbar wird.
- Schnelle Verfügbarkeit der Ergebnisse für die Gesamtfläche nach Durchführung einer Befliegung.
- Homogenität und Vergleichbarkeit der Ergebnisse, da Daten für die Gesamtfläche quasisimultan innerhalb kurzer Zeit aufgenommen werden.
- Erhöhte Arbeitssicherheit, da Arbeitskräfte nur in sehr geringem Umfang Gefahren durch Munition und Kontaminanten ausgesetzt werden.

Prinzipiell kommen mehrere Verfahren für die Fernerkundung von Truppenübungsplätzen in Frage, die jeweils unterschiedliche Informationen liefern können. Dazu gehören

- die visuelle oder digitale Auswertung von historischen Luftbildern (multitemporale Luftbilddauswertung/ Change Detection),
- Colorinfrarotaufnahmen für Vegetationsstresskartierungen,
- Thermalaufnahmen für die Detektion von Vergrabungen und unterirdischen Objekten und
- abbildende Spektrometrie (Hyperspektroskopie, Imaging Spectrometry) für die qualitative und quantitative Analyse von Kontaminationen und oberflächlichen Ablagerungen oder Objekten

Thermales Infrarot oder Thermalstrahlung (TIR) unterscheidet sich von sichtbarem Licht (VIS), nahem und mittleren Infrarot (NIR, MIR) dadurch, dass es sich nicht um reflektierte Strahlung solaren Ursprungs handelt, sondern um emittierte terrestrische Strahlung. Für die Fernerkundung sind auf Grund atmosphärischer Absorption nur die Bereiche von 3 bis 5 und 8 bis 14  $\mu\text{m}$  Wellenlänge nutzbar. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz und dem Wien'schen Verschiebungsgesetz korrespondiert die Strahlung dieser Bereiche mit (Schwarz-)Körpern, deren Emissionsmaximum im Bereich der kinetischen Temperaturen um 692 bis

306 °C (3 µm bis 5 µm) bzw. 89 bis – 66 °C (8 µm bis 14 µm) liegt. Der Bereich von 3 bis 5 µm Wellenlänge ist damit für die Fernerkundung von Erscheinungen und Objekten hoher Temperatur an der Erdoberfläche wie z.B. Waldbrände geeignet. Die thermalinfrarote Strahlung im Bereich von 8 bis 14 µm korrespondiert mit den normalen Umgebungstemperaturen der Erde. Daher ist dieser Bereich besonders für die Thermalfernerkundung der Erdoberfläche geeignet und wird auch als terrestrische Strahlung bezeichnet.

Die Eignung der Thermalfernerkundung für die Detektion von unterirdischen Objekten wie Vergrabungen, Überschiebungen und Bauteilen beruht auf Unterschieden in der Bodenfeuchte zwischen dem gestörten Boden im Bereich der Objekte und dem ungestörten Boden in deren Umgebung. Gestörter Boden verfügt im Vergleich zum ungestörten Boden über eine höhere Bodenfeuchte. Dies resultiert in niedrigeren Temperaturen des gestörten Erdreichs und damit entsprechend geringerer Emission von Thermalstrahlung. In einer Studie wurde festgestellt, dass die Temperaturunterschiede zwischen gestörtem und ungestörtem Erdreich 0,4 bis 1,0 °C betragen (IRVINE et al. 1997). Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss von Niederschlagsereignissen auf die Bodenfeuchte- und Temperaturunterschiede zwischen gestörtem und ungestörtem Erdreich. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Unterschiede in Bodenfeuchte und Temperatur direkt nach einem Niederschlagsereignis am geringsten sind und dann mit der Zeit zunehmen (IRVINE et al. 1997). Weitere Einflussfaktoren neben Niederschlagsereignissen, die die Emission von Thermalstrahlung beeinflussen, sind Topographie, Tageszeit, Klima, atmosphärische Absorption und thermodynamische Eigenschaften der Objekte an der Erdoberfläche.

Im deutschsprachigen Raum wurden Untersuchungen zur Anwendung der Thermalfernerkundung zur Erkundung von Altlasten Mitte der 90er Jahre publiziert. (KÜHN & HÖRIG 1995; Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 1995). Bei diesen Untersuchungen lag der Schwerpunkt aber auf

der Erkundung von Deponien, insbesondere thermischen Prozessen im Deponiekörper.

### **Zielstellung der Thermalfernerkundung der Döberitzer Heide**

Im Rahmen des Konversionsprojektes „Döberitzer Heide und Kasernenumfeld“ wurde 1997 der Schwerpunkt der Arbeiten auf die Erkundung von Munitionsbelastung und Altlasten gelegt, um den Nordteil der Liegenschaft über Wanderwege touristisch erschließen zu können. Die teilweise Erschließung für die Naherholung wurde angestrebt, weil der diesbezügliche Nutzungsdruck durch die Lage zu Berlin sehr hoch ist. Um die Kosten für die Erschließung möglichst niedrig zu halten, sollen Trassen für die Wanderwege so gewählt werden, dass die Aufwendungen für die Munitionsräumung und Sanierung möglichst gering sind. Die Beräumung ist dabei so zu realisieren, dass von den verbleibenden Gefahren auf der Liegenschaft keine Wirkung auf den öffentlich zugänglichen Raum entfaltet werden kann.

Auf Grund der Tatsache, dass die Hauptprobleme dabei neben der flächigen Munitionsbelastung von unterirdischen Bauobjekten, Vergrabungen und Überschiebungen ausgehen, sollte für die Erkundung dieser Objekte für die gesamte Döberitzer Heide eine Thermalbefliegung durchgeführt werden.

Im Vorfeld wurde antizipiert, dass folgende, für die Altlastenerfassung relevante Objekte identifiziert werden könnten:

- oberflächennahe Ablagerungen
- anthropogene Veränderungen in Gebieten mit dichter Vegetation
- anthropogene Veränderungen in Feuchtgebieten
- visuell nicht erkennbare bauliche Altanlagen
- Vergrabungsareale

Darüber hinaus erwartete man, dass Thermalaufnahmen für eine Reihe weiterer Anwendungen im Bereichen Naturschutz, Landnutzung, Gewässerschutz u.a. wertvolle Informationen liefern könnten.

Die Befliegung mit einem Thermalsensor erfolgte in Amtshilfe durch die Bundesluftwaffe. Vorgaben bezüglich der für die Zielstellung erforderlichen Parameter wie Bodenauflösung, radiometrische Auflösung u. a. wurden im Vorfeld der Befliegung im April 1998 nicht gemacht.

### Befliegung

Die Planung der Mission und Befliegung der Liegenschaft erfolgte am 15. April 1998 zwischen 10 und 12 Uhr vormittags durch ein TORNADO-Aufklärungsflugzeug des Aufklärungsgeschwaders 51 „Immelmann“ aus Jagel (Schleswig-Holstein).

Bei dem eingesetzten Sensorsystem handelte es sich um einen optomechanischen Thermalscanner, der die Oberfläche unter dem Trägersystem zeilenweise abtastet. Das System ist im Bereich des thermalen Infra-

rots von 8 bis 14  $\mu\text{m}$  Wellenlänge empfindlich. Die radiometrische Auflösung des Systems wurde mit  $0,2^\circ\text{C}$  angegeben. Aus der Flughöhe und dem Schwenkwinkel des Systems ergab sich die Schwachbreite zu 470 m. Die Bodenauflösung lag auf Grund der systematischen Panoramaverzerrung von Scanneraufnahmen zwischen  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  und  $28\text{ cm} \times 51\text{ cm}$ . Die Befliegung erfolgte an einem klaren, sonnigen Tag mit ca. 8,5 Stunden Sonnenscheindauer. Der summierte Niederschlag der beiden vorhergehenden Wochen betrug etwa 30 mm.

Als Ergebnis der Befliegung wurden dem Landkreis Havelland als Auftraggeber der Befliegung durch die Bundesluftwaffe 14 Negativstreifen mit geometrisch nicht korrigierten Thermalaufnahmen zur Verfügung gestellt. Die Auswertung übernahm der Lehrstuhl Altlasten der BTU Cottbus.



**Abb. 1:** Schwarzweiß-Luftbild eines Bereiches südöstlich der Löwen-Adler-Kaserne im nordwestlichen Teil der Döberitzer Heide. Luftbild © Landesvermessungsamt Brandenburg 1996

## Auswertung

Für die Auswertung wurden die Filmstreifen digitalisiert, mathematisch entzerrt und georeferenziert. Die mathematische Entzerrung der systematischen Panoramaverzerrung wurde mit Hilfe eines in MATLAB entwickelten Programms vorgenommen. Die Korrektur von unsystematischen Fehlern und die Georeferenzierung erfolgte mit dem Bildverarbeitungssystem ENVI 3.2.

Anhand von ausgewählten Testflächen im Nordwesten der Liegenschaft, die bekannte Zielobjekte wie sandbedeckte Bunker, offene Altablagerungen, verfüllte Sprengtrichter, Vergrabungen u. a. umfassten, wurden die aufbereiteten Thermalaufnahmen beispielhaft visuell ausgewertet. Eine digitale Auswertung war auf Grund von systematischen Streifen in den analogen Aufnahmen und der nicht durchgeführten radiometrischen Kalibrierung während der Aufnahme im April 1998 nicht möglich.

## Ergebnisse

Die Auswertung zeigt, dass die angefertigten Aufnahmen für den eigentlichen Zweck, die Suche nach Vergrabungen und unterirdischen Objekten auf dem ehemaligen Truppenübungsplatz Döberitzer Heide nicht geeignet sind. Dies kann auf mehrere Ursachen zurückgeführt werden, die insbesondere auf Unterschieden zwischen den Zielen der militärischen Fernerkundung mittels Thermalinfrarot und Anwendungen von Thermalaufnahmen im Umweltbereich beruhen. Während es bei militärischen Anwendungen darum geht, relativ große Objekte zu detektieren, die sich thermal deutlich von der Umgebung absetzen – Fahrzeuge, militärische Ausrüstung und Menschen mit Temperaturdifferenzen von bis zu 30 °C und mehr im Vergleich zum umgebenden Gelände – geht es in der Umweltfernerkundung darum, geringe Temperaturdifferenzen im Bereich von 0,5 bis 1,0 °C zu detektieren,

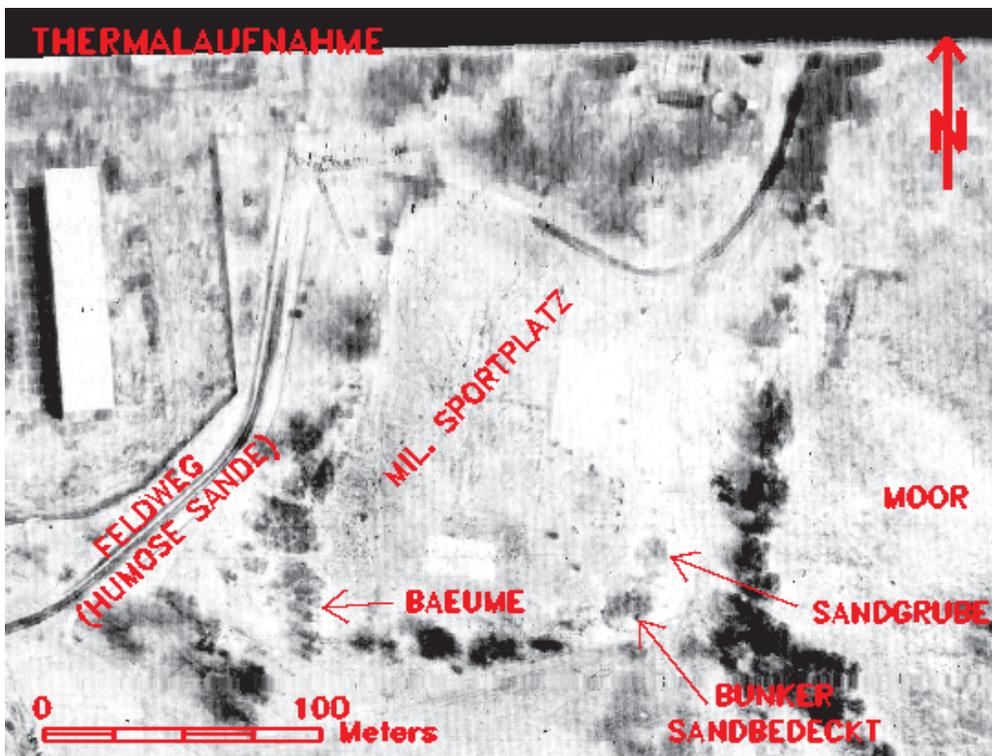


Abb. 2: Der gleiche Bereich wie in Abb. 1 als Thermalaufnahme.

die aus Veränderungen in der Bodenstruktur, exothermen Prozessen im Untergrund (mikrobiologische und chemische Umsetzungen) etc. herrühren.

Die Anforderungen an ein System zur Erkundung der o.g. Objekte können wie folgt definiert werden:

#### 1. Radiometrische Auflösung

Die Bodenfeuchteunterschiede, die die Detektion von unterirdischen Objekten ermöglichen, betragen unter optimalen Bedingungen um  $1^{\circ}\text{C}$ . Um diese in analogen Grauwertaufnahmen aufzufinden, ist eine höhere radiometrische Auflösung als die des verwendeten Systems von  $0,2^{\circ}\text{C}$  erforderlich.

#### 2. Tagbefliegung

Die Befliegung der Döberitzer Heide wurde unter anderem aus Rücksicht auf die Bevölkerung tagsüber durchgeführt. Das relativ undifferenzierte Strahlungsverhalten großer Flächen in den Thermalaufnahmen resultierte aus der Aufheizung der Oberfläche, die am Befliegungstag durch eine lange Sonnenscheindauer begünstigt wurde. Deutlich traten dagegen störende Schatten in den Aufnahmen auf.

#### 3. Klima

Einen negativen Einfluss auf die Qualität der Daten hatte neben der Tagbefliegung offensichtlich auch das Wetter in den Tagen vor der Befliegung. Durch Niederschläge von bis zu 30 mm in den vorangegangenen Tagen kann von einer weitgehend homogenen Wassersättigung gestörter und ungestörter Bodenbereiche ausgegangen werden, so dass Temperaturunterschiede zwischen Vergrabungen und umliegendem Gelände stark nivelliert wurden und damit nicht detektierbar waren.

#### 4. Räumliche Auflösung

Die gewählte räumliche Auflösung von bis zu  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ , die sich aus der Flughöhe und den Systemparametern ergab, ist für eine Auswertung in Bezug auf Altlastenverdachtsflächen auf einer derartigen großen Liegenschaft zu hoch. Bei einer Gesamtgröße der Fläche von 5000 Hektar kann davon ausgegangen werden, dass Altlastenverdachtsflächen mit Größen unter vier Quad-

ratmetern nicht erfassbar sind. Eine niedrigere Auflösung von  $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$  wäre ausreichend, um Altlastenverdachtsflächen von vier Quadratmetern zu detektieren, da diese dann durch jeweils 16 Pixel repräsentiert würden.

Ursache für die hohe Auflösung war die militärische Befliegung, bei der auch bei Übungen möglichst tief geflogen wird, um angenommenem feindlichem Radar und Flugabwehrfeuer zu entgehen.

#### 5. Kalibrierung, Verifizierung der Daten und Referenzdaten

Im Rahmen der Befliegung wurden keine bodengestützten Messungen der Strahlungstemperatur oder zumindest der kinetischen Temperatur an Objekten bekannter Emissivität vorgenommen. Ebenso wurden simultane panchromatische Luftbildaufnahmen – wie ursprünglich geplant – bei der Befliegung nicht mit aufgenommen. Zur Auswertung im Jahr 2000 standen so keine Referenzdaten aus dem gleichen Zeitraum zur Verfügung.

#### 6. Verzerrungen, Streifen in den Aufnahmen

Die unter Verwendung eines analog aufzeichnenden Thermalscanners entstandenen Aufnahmen weisen eine Reihe von Nachteilen auf, zu denen die systematischen Panoramaverzerrungen sowie systematische diagonale und horizontale Streifen gehören, die offensichtlich durch den Filmtransport entstanden sind. Diese Fehler der analogen Aufnahmen schränken deren Auswertbarkeit ein.

Nutzbar waren die Aufnahmen für Auswertungen bezüglich der Wasserführung von trockenfallenden Mooren im Bereich der Döberitzer Heide sowie für die Feststellung deutlicher Unterschiede in der Bodenfeuchte auf unbewachsenen Böden. Zwei Beispiele zeigen die Abb. 3 und 4. Abb. 3 zeigt ein Feld am Westrand der Döberitzer Heide. Der westliche Teil des Feldes erscheint in dieser Aufnahme deutlich dunkler als der östliche Teil. Dies kann auf Unterschiede in der Bodenfeuchte auf Grund der Topographie des Geländes zurückgeführt werden. Der westliche Teil des Feldes liegt

etwa fünf Meter höher als der östliche, wodurch es nach den starken Niederschlägen in den Tagen vor der Thermalbefliegung zu einem hypodermalen Abfluss in den tiefergelegenen Teil des Feldes kam. Die geringere Temperatur in der südöstlichen Ecke des Feldes korreliert ebenfalls mit der Topographie.

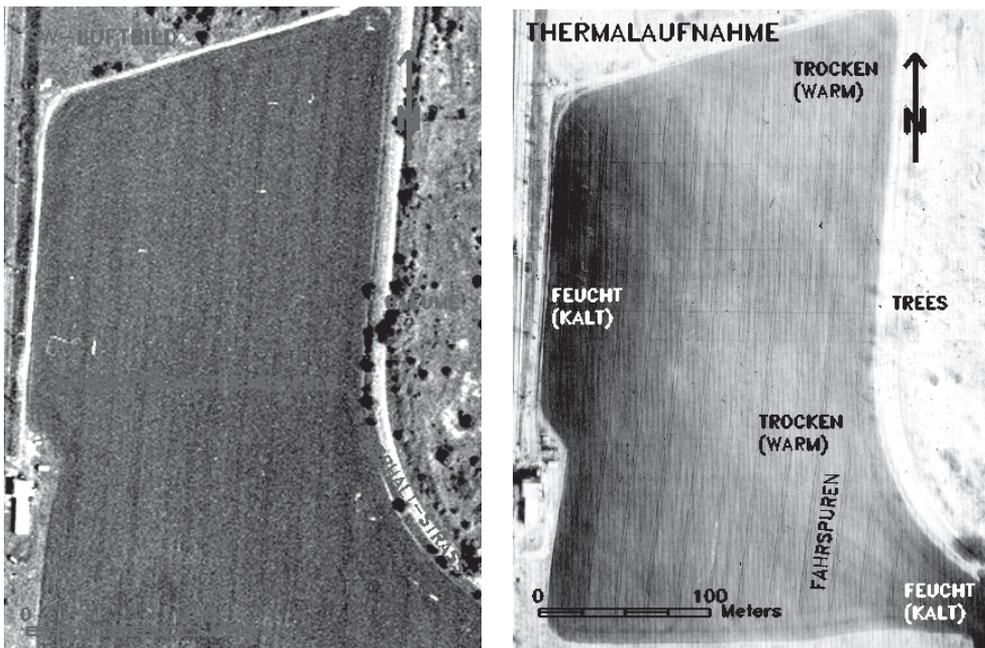
Abb. 4 zeigt den südlichen Teil des Rührbruch-Moors in der Döberitzer Heide. In der Luftbildaufnahme können die wasserführenden Bereiche nur anhand der Vegetation erahnt werden. In der Thermalaufnahme können diese anhand der geringeren Temperaturen (dunkle Bereiche) deutlich ausgemacht werden.

Diese beiden Aufnahmen bestätigen im Vergleich zu der Aufnahme, die u.a. den sandbedeckten Bunker und die Altablagerungen zeigt die These, dass die radiometrische Auflösung für die Detektion von Vergrabungen und unterirdischen Objekten nicht ausreichend ist, wohl aber für die Unterscheidung von höheren Temperaturkontrasten von z. B. Wasser zu Vegetation oder Boden.

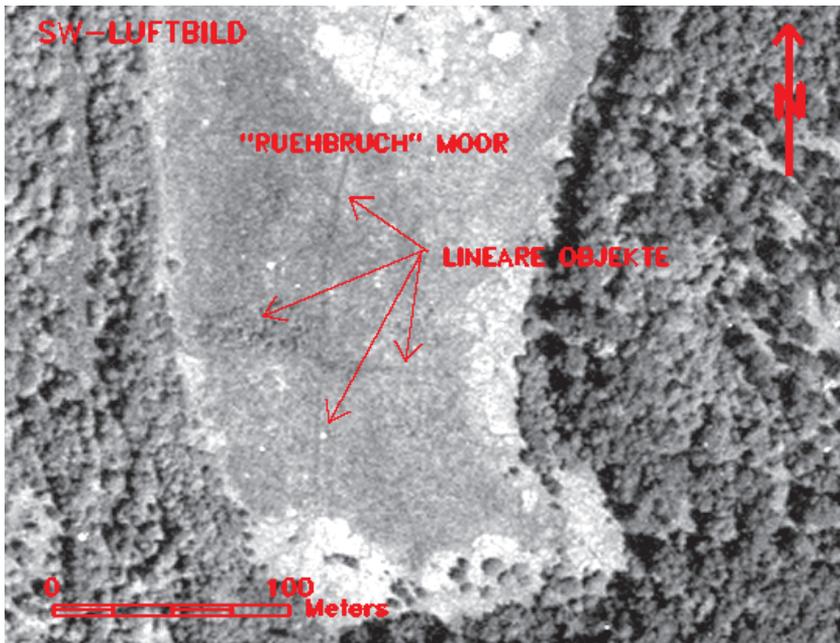
### Parameter für eine Neubefliegung

Obwohl die Aufnahmen im vorliegenden Fall nicht für die Erfassung von Altlastenverdachtsflächen wie Vergrabungen und unterirdischen Bauobjekten geeignet waren, ergibt sich aus den Untersuchungen doch, dass die gesetzten Ziele mit Hilfe von Thermalaufnahmen erreicht werden können. Da die Untersuchung der großflächigen Truppenübungsplätze auf Altlastenverdachtsflächen und unterirdische Bauobjekte für die Konversion der Flächen eine große Bedeutung hat, für den Fall von terrestrischen Untersuchungen aber nicht finanzierbar ist, wurde angeregt, eine erneute Thermalbefliegung der Döberitzer Heide durchzuführen. Dazu wurden aus den Ergebnissen der vorliegenden Befliegung Parameter abgeleitet, die bei der geplanten Befliegung Anwendung finden sollen.

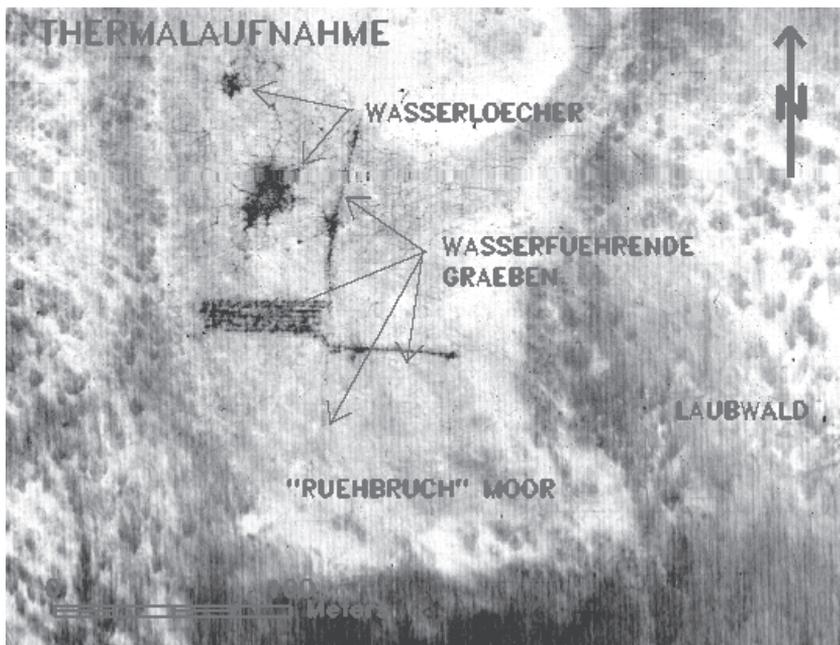
Die radiometrische Auflösung sollte mindestens  $0,1^\circ\text{C}$  betragen, um die Temperaturunterschiede zwischen gestörtem und ungestörtem Boden von  $0,5$  bis  $1,0^\circ\text{C}$  detektieren



**Abb. 3:** Feld westlich des ehemaligen Truppenübungsplatzes im Schwarzweiß-Luftbild und in der Thermalaufnahme. Deutlich können in der Thermalaufnahme Bereiche trockenen und feuchten Bodens unterschieden werden. Luftbild © Landesvermessungsamt Brandenburg 1996.



**Abb. 4:** Schwarzweiß-Luftbildaufnahme des Rühbruch-Moors in der Döberitzer Heide. Wassergräben und Wasserlöcher können auf dem Luftbild kaum ausgemacht werden. Luftbild © Landesvermessungsamt Brandenburg 1996.



**Abb. 5:** Rühbruch-Moor in der Döberitzer Heide in einer Thermalaufnahme. Wassergräben und Wasserlöcher, die auf dem Luftbild kaum auszumachen sind, können auf der Thermalaufnahme eindeutig identifiziert werden.

zu können. Für die Altlastenerkundung wäre eine räumliche Auflösung um 0,5 m ausreichend.

Wie zuvor abgeleitet, wird als Befliegungszeitraum das Frühjahr vor Einsetzen der Vegetationsperiode angestrebt. Die Befliegung sollte als Nachtbefliegung zwischen Mitternacht und Sonnenaufgang erfolgen, um die Aufheizung der Flächen durch Sonnenstrahlung und damit die Überlagerung von thermalen Unterschieden, die aus unterschiedlicher Bodenfeuchte herrühren, zu vermeiden. In der Befliegungsplanung sollte zudem die Witterung vor der Befliegung berücksichtigt werden, wobei die Befliegung nach mindestens einer niederschlagsfreien Woche empfohlen ist.

Um eine bessere Auswertbarkeit der Daten zu gewährleisten, soll eine digitale Thermalkamera anstelle eines analog aufzeichnenden Thermalscanners verwendet werden. Dadurch sind geringere geometrische Verzerrungen und Bildfehler zu erwarten. Für die Kalibrierung und Referenzierung der Thermaldaten sind zeitnahe panchromatische Luftbildaufnahmen und simultane Strahlungstemperaturmessungen am Boden geplant.

### Danksagung

Unser Dank gilt dem Aufklärungsgeschwader 51 „Immelmann“ der Bundesluftwaffe, das die Befliegung der Döberitzer Heide im April 1998 in Amtshilfe für den Landkreis Havelland durchführte, sowie dem Umweltamt des Landkreises Havelland und dem Naturschutzförderverein für die Unterstützung und gute Zusammenarbeit im Rahmen der Auswertung der Daten.

### Literatur

- Bonn International Center for Conversion (BICC), 1996: Conversion Survey 1996. Global Disarmament, Demilitarization and Demobilization. – Oxford: Oxford University Press.
- Konversionsbericht Brandenburg, 1998: Wirtschaftsministerium Brandenburg. – Potsdam
- GROTH, K. & WEGENER, L., 1998: Konversion in Brandenburg. – Planerin 1/1998. <http://www.srl.de/publikationen/planerin/plan981/inhalt.html#beitraege>
- IRVINE, J. M. et al., 1997: The detection and mapping of buried waste. – International Journal of Remote Sensing. **18** (7): 1583–1595.
- KÜHN, F. & HÖRIG, B., 1995: Geofernerkundung. Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. – Berlin: Springer
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 1995: Einsatz ausgewählter Fernerkundungsmethoden bei der Altlastenbehandlung am Beispiel von Untersuchungen im Raum Leipzig. Materialien zur Altlastenbehandlung. – Radebeul: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. KAY WINKELMANN, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Altlasten, PF 101344, D-03013 Cottbus  
Tel.: 03 55-69 3607, Fax: 03 55-69 31 71  
e-mail: kay.winkelmann@tu-cottbus.de

Prof. Dr.-Ing. WOLFGANG SPYRA,  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Altlasten, PF 101344, D-03013 Cottbus  
Tel.: 03 55-69 31 61, Fax: 03 55-69 31 71  
e-mail: wolfgang.spyra@tu-cottbus.de

Manuskript eingegangen: Juni 2001  
Angenommen: Juni 2001