Ortung von Altschächten mittels IR Drohnen

PREUß, J.

G.U.B. Ingenieur AG, Büro Freiberg

ZUSAMMENFASSUNG :

Noch immer sind die Lagebestimmung und das Auffinden von Altschächten in der Örtlichkeit mit teilweise erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Dies resultiert einerseits aus den bei der Georeferenzierung historischer Risse entstehenden Lageungenauigkeiten von bis zu 20 m. Zum anderen sind durch Bodenumlagerung, Baumaßnahmen oder teilweisem Rückbau der Altschächte im Zuge der Einstellung des Bergbaus heute keine visuell erkennbaren Hinweise mehr im Gelände vorhanden.
In den vergangenen Jahren hat sich zur Ortung der Schächte eine Kombination aus flächenhafter geotomographischer Vorerkundung und nachfolgenden gezielten Aufschlüssen durchgesetzt. Ausgewählte Ergebnisse einer derartigen Erkundungsstrategie wurden in den vergangenen Jahren im Rahmen des Altbergbaukolloquiums vorgestellt.
Gerade auf Flächen mit intensiven altbergbaulichen Einwirkungen und einer Vielzahl von Altschächten wäre jedoch eine noch effizientere Möglichkeit der Schachtortung von Vorteil. Auf Grundlage dieser Überlegungen wurde durch die G.U.B. Ingenieur AG ein Förderprojekt initiiert, das die Möglichkeit der Ortung von Altschächten mittels spektralempfindlicher ferngesteuerter Drohnen abklären soll.
Grundlage dafür bilden erste Voruntersuchungen auf landwirtschaftlich genutzten Freiflächen mit Infrarot - Spektrometern, welche die Ortung unverwahrter Altschächte ermöglichten, deren Lockermassenfüllsäule bzw. lufterfüllte Schachtröhre einen meßtechnisch erfaßbaren Temperaturunterschied gegenüber dem umgebenden unverritzten Gebirge aufwies und die so eindeutig im Gelände lokalisiert werden konnten. Diese Messungen fanden jedoch noch unmittelbar am Boden auf ausgewählten Messprofilen statt.
Im Rahmen des Forschungsprojektes werden flächenhafte Befliegungen von Altbergbauverdachtsflächen mittels IR - Drohne durchgeführt, die mit einem hochsensitiven IR Spektrometer in Leichtbauweise bestückt sind. Im Rahmen des Vortrags werden sowohl die Mess- und Drohnentechnik als auch erste konkrete Ergebnisse von Befliegungen im südlichen Ruhrgebiet sowie im Freiberger Revier vorgestellt.

ABSTRACT:

In former mining areas it is critical to locate unknown, abandoned mineshafts prior to the development of a site. Abandoned mineshafts are ground disturbances that have very localised effects on the morphology, physical, chemical, drainage and moisture properties

of the surface geological materials and thus thermophysical properties. Remotely sensed thermal infrared surveys provide the potential for a rapid, inexpensive and non-intrusive technique for mineshaft detection.

The benefits of detecting mineshafts before they are disturbed by construction or during site development are twofold: safety is increased and costs are reduced. No definitive technique exists that can reliably detect all such mineshafts. Geophysical techniques can be employed with success, but they are not always effective on large areas. Drilling and trenching can also be used but, as well as time and expense, this approach involves disruption to the ground under study and safety issues. Therefor there is a need for rapid, cost effective and non-intrusive techniques especially in areas with intensive effects from mining and a variety of abandoned shafts. Based on these considerations the G.U.B. Ingenieur AG at present accelerates the development of an Infrared based remote - controlled drone. In the presentation both the measurement- and drone technology as well as the first concrete results of aerial surveys in the southern Ruhrgebiet and in the Freiberg mining area are presented.

Zur Ortung verdeckter Schachtöffnungen wurde in den vergangenen Jahren, speziell seit Vorlage hochauflösender Luftbilder aus Satellitenbefliegungen und historischen Aufnahmen, der Versuch unternommen, aus vorliegendem Luftbildmaterial auf die Existenz altbergbaulicher Objekte zu schließen.

Standardmäßig wird zur Ortung speziell von Schächten und tagesnahen Strecken eine Kombination aus geophysikalischer Flächenerkundung und direkten bohrtechnischen Aufschlüssen durchgeführt. Dabei kommen in einem ersten Bearbeitungsschritt vor allem Messungen mittels 2D/3D geoelektrischer Tomographie, Gravimetrie, Georadar oder, im Falle stahlbewehrt verschlossener Schachtöffnungen, elektromagnetische Messungen zum Einsatz. Diese erlauben die Herausstellung signifikanter Anomalien, die auf nichtnatürliche Untergrundstrukturen und damit altbergbauliche Einwirkungen hinweisen. Im Bereich dieser Anomalien werden dann gezielt Bohrungen zum stofflichen Nachweis der Schächte/Strecken durchgeführt.

Der Erfolg einer derartigen Erkundungsstrategie konnte in einer Langzeitauswertung derart quantifiziert werden, daß bei insgesamt 43 untersuchten Altbergbauobjekten ca. 70% der Altbergbauobjekte nachgewiesen werden konnten. Zu berücksichtigen ist dabei, daß es sich bei den erfolgreich nachgewiesenen altbergbaulichen Gefährdungsbereichen um Objekte handelte, die auf Grund ihrer Größe, Ausbildung und Verfüllungsgrad einen hinreichenden Kontrast zum geologischen Untergrund darstellten und damit mit hoher Wahrscheinlichkeit geortet werden konnten.

Bei insgesamt 8 dieser untersuchten Altbergbauobjekte im Zeitraum 2003 – 2014 wurden zusätzlich Luftbildaufnahmen aus Satellitenbildern (Google Earth) sowie spezielle Luftbilder aus Befliegungen, vor allem aus dem Fundus der Luftbildaufklärung zum Erfolgsnachweis von Flächenbombardements während des 2. Weltkrieges, herangezogen. Es zeigte sich, daß nur in einem Fall zusätzliche altbergbaurelevante Informationen herausgefiltert werden konnten. Diese betrafen zudem auch nur großflächige Gelände - Senkungsbereiche im Bereich flächenhafter unterirdischer Abbaue.

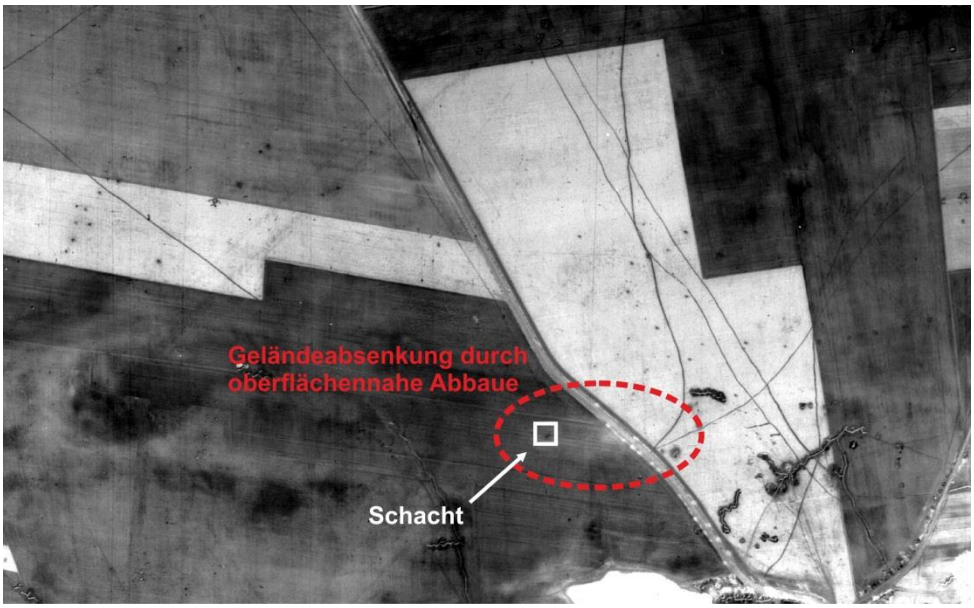

Abb.1 : Falschfarbendarstellung einer Altbergbauverdachtsfläche bei Frankfurt/Oder aus Luftbildaufnahmen zur Erfolgskontrolle von Flächenbombardements (Aufnahme April 1945)

Die Schwierigkeit der Erkennung altbergbaulicher Gefährdungsbereiche mittels Luftbildern, speziell die Ortung verdeckter Schachtöffnungen, ist auf 3 entscheidende Faktoren zurückzuführen:

1) Die Aufnahmen erfolgten meist zu nicht definierbaren, willkürlichen Zeitpunkten und aus so großer Höhe, daß eine Ortung altbergbaulicher Strukturen nur erschwert oder unmöglich war.

2) Selbst im günstigsten Fall (Aufnahmen während der Wachstumsperiode auf landwirtschaftlichen Nutzflächen) konnten durch die visuelle Begutachtung der Aufnahmen lediglich lokale Wachstumsunterschiede herausgestellt werden, die jedoch erfahrungsbedingt nur in ca. 5 – 10 % aller Fälle als Indikation von Schachtöffnungen gewertet werden können. 90% der Wachstumsunterschiede entstehen durch natürliche Schwankungen der Bodengüte sowie Inhomogenitäten in der Aussaht.

3) Eine rein visuelle Beurteilung des Luftbildmaterials, selbst mit softwareseitiger Bearbeitung des Bildmaterials durch Kontrastschärfung und Falschfarbendarstellung, führt zu keiner eindeutigen Klassifizierung des Untergrundes in anthropogene/geologische Strukturen.

Im Ergebnis der Recherchen im Vorfeld der Entwicklung eines drohnenbasierten Ortungssystems zur Detektion altbergbaulicher Hohlräume stand die Erkenntnis, daß nur die zusätzliche Messung weiterer physikalischer Parameter zu einem signifikanten Informationsgewinn führt. Da bei verfüllten, aber unversiegelten Schachtsäulen der entscheidende Ortungs- bzw. Klassifizierungsparameter in der veränderten Bodenfeuchte/Temperatur liegt, wurde der Einsatz von NIR / IR Technik als methodische Grundlage der Entwicklung eines drohnengestützten Ortungsverfahrens gewählt.

Aktuelle Hyperspektralsensorik unterteilt das Aufnahme - Spektrum in mehrere hundert schmalbandige Kanäle, die zusammen einen hyperspektralen Datenkubus erzeugen. Diese Informationsvielfalt ermöglicht eine wesentlich feinere Unterscheidung von Materialien und physikalischen Einflüssen.

Im Hinblick auf die geringe Dimension der altbergbaulichen Schachtöffnungen (teilweise maximaler Querschnitt 1.5 x 1 m) kann eine derartige Messung auch nicht durch Flugzeuge erfolgen, da die Flug – Geschwindigkeit und rechtlich vorgeschriebene Flughöhe keine Ortung derart kleinräumiger Objekte mittels NIR/IR Messungen zuläßt.

Anderseits verhindern beim derzeitigen Entwicklungsstand der NIR/IR Technik Größe und vor allem Gewicht der Apparaturen den Einsatz von Drohnen. Erst mit der Entwicklung eines spektralempfindlichen Videospektrometers mit einem Gesamtgewicht deutlich < 2 kg und einer Auflösung von 0,5 nm, der entsprechenden Gimbal - gesteuerten Aufhängevorrichtung und einer Drohne mit Lightbridge Steuerung zur Beherrschung der Video - Datenströme bei gleichzeitigem vollautonomen Flug ist die erfolgreiche Erkundung großflächiger altbergbaulicher Gefährdungsbereiche möglich.

Als flugtechnische Basis für die IR – Messungen wurde ein Quadrocoptersystem der Firma Blacksheep, die TBS Discovery Pro herangezogen. Die TBS Discovery Pro stellt den derzeitigen flug- und steuerungstechnischen Entwicklungsstand im Bereich der Mittelklasse – Drohnen dar.

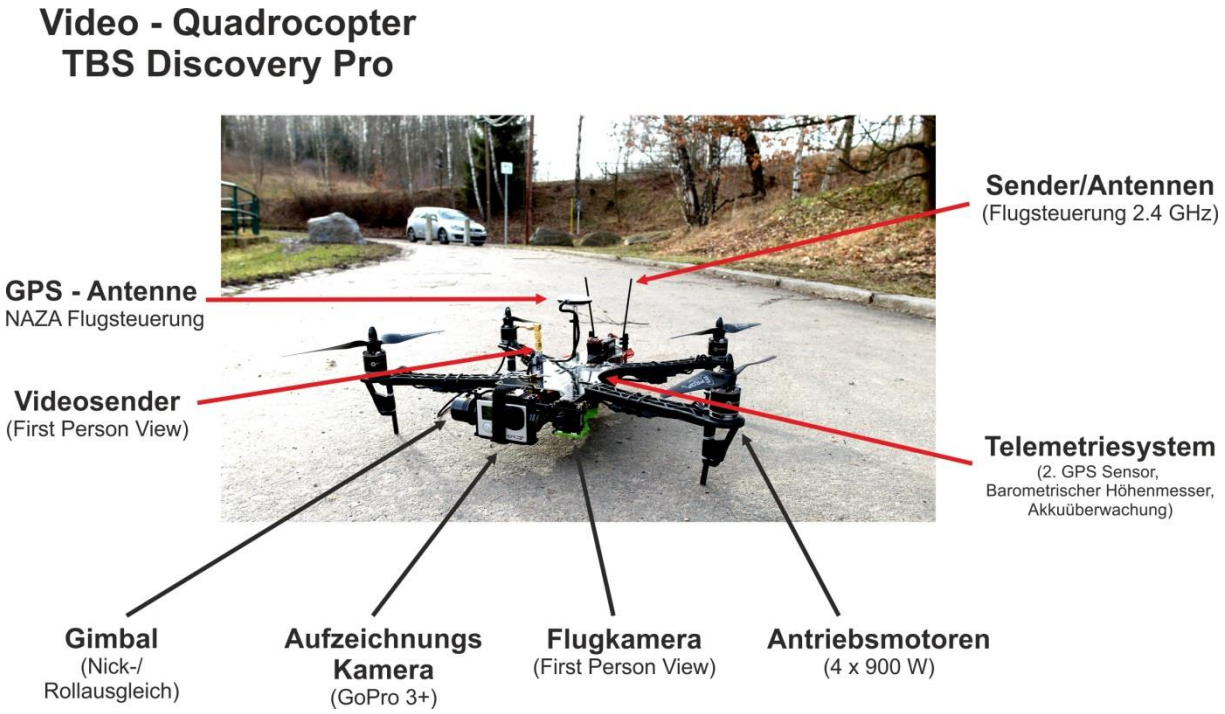

Abb.2 : Aufbau eines Mittelklasse - Quadrocopters (hier TBS Discovery Pro)

Folgende technische Spezifikationen sind stellvertretend für derartige Drohnen mit halbautonomer Steuerung und voller Telemetrie zu nennen:

Bauart:	Asymmetrischer Quadrocopter
Gewicht (flugfertig):	1.580 g
Flugzeit:	max. 25 min
Geschwindigkeit:	65 km/h max.
Flugsteuerung:	DJI Naza V2 GPS
Flugmodi:	Manuell / Höhenkalibriert / vollständig GPS gesteuert / Vollständig autonomer Flug mit Vorprogrammierung
Sender/Empfänger:	Taranis X9D 20 Kanal
Features:	Barometrischer Höhenmesser, Genauigkeit +- 10 cm GPS-Flugdatenübertragung mit Live – View in Google Earth 2. GPS Empfänger für Telemetrie Flugrouten- und volle **Telemetrieaufzeichnung** (Höhe absolut, Höhe relativ, Geschwindigkeit, Luftdruck, Position, Steig-/Sinkgeschwindigkeit, Motor/Akku - Regeldaten) Automatische Befliegung vordefinierter Flugrouten
Reichweite Drohne:	2 km
Reichweite FPV:	1.5 km

Für den Einsatz der Drohne zur Ortung von Altschächten erfolgte ein Umbau bzw. ein Austausch der Videosektion/Aufnahmeeinheit. Die standardmäßig verbaute Videokamera (GoPro3+) wurde durch eine geeignete IR – Einheit ersetzt.

Die bis vor Kurzem erhältlichen IR – Kamera – Systeme wären für eine Verwendung mit Mittelklasse – Drohnen auf Grund von Größe und Gewicht nicht einsetzbar gewesen.

Seit ca. 2 Jahren sind jedoch auch kompakte IR – Kameras erhältlich, die speziell für die Montage an Drohnen optimiert wurden und gleichzeitig Leistungsdaten aufweisen, die denen größerer und vor allem teurerer IR Systeme nur wenig nachstehen, für die drohnenbasierte Flächenerkundung von Einzelobjekten der gesuchten Größe jedoch vollkommend ausreichend sind.

Im konkreten Fall wurde die Drohne mit einer IR Kamera FLIR TAU 2 bestückt. Diese Kamera liefert eine maximale Auflösung von 640 x 480 Bildpunkten bei 9 bzw. 25 Hz. Entscheidend ist jedoch die hohe Auflösung im Temperaturbereich von 50 mK. Damit sind auch geringste Temperaturdifferenzen sicher detektierbar, was gerade bei verfüllten Schachtsäulen bzw. Schächten mit einer Schachtkopfverwahrung zu einer signifikanten Erhöhung der Ortungswahrscheinlichkeit führt.

Abb.3 : Einbauzustand der IR – Kameraeinheit an der Ortungsdrohne

Die Bilddaten der Kamera werden derzeit noch per Videodatenübertragung auf eine mobile Empfangsstation übertragen. Dabei wird das Frequenzband 5 MHz genutzt. Der analoge Empfänger wandelt das Funksignal zurück in ein Videosignal, das über eine Videodecoder Einheit eingelesen und als Video – Datei abgespeichert wird. Aus dieser Videodatei können dann einzelne Bilder extrahiert und weiterbearbeitet werden.

Schwerpunkt der derzeitigen Entwicklung ist die direkte Speicherung der Videodaten auf einem mobilen PVR – Recorder, der an der Drohne mitgeführt wird und den Datenverlust durch die Funkdatenübertragung zwischen Drohne und Bodenstation minimiert bzw. ausschaltet. Zweiter Entwicklungsschritt ist die unmittelbare, verlustfreie Speicherung der Rohdaten der IR – Kameraeinheit.

Erst die Rohdatenspeicherung ermöglicht fortgeschrittene Bearbeitungsroutinen, in denen die Rohdaten mit einem definierten Farbspektrum skaliert und für jede Temperatur ein definiertes RBG bzw. CMYK Farbpixel festgelegt wird.

Die folgenden Abbildungen zeigen Beispiele einer derartigen Farbspektrum – Skalierung auf Basis realer Befliegungen eines Altbergbaustandortes in Sachsen/Anhalt.

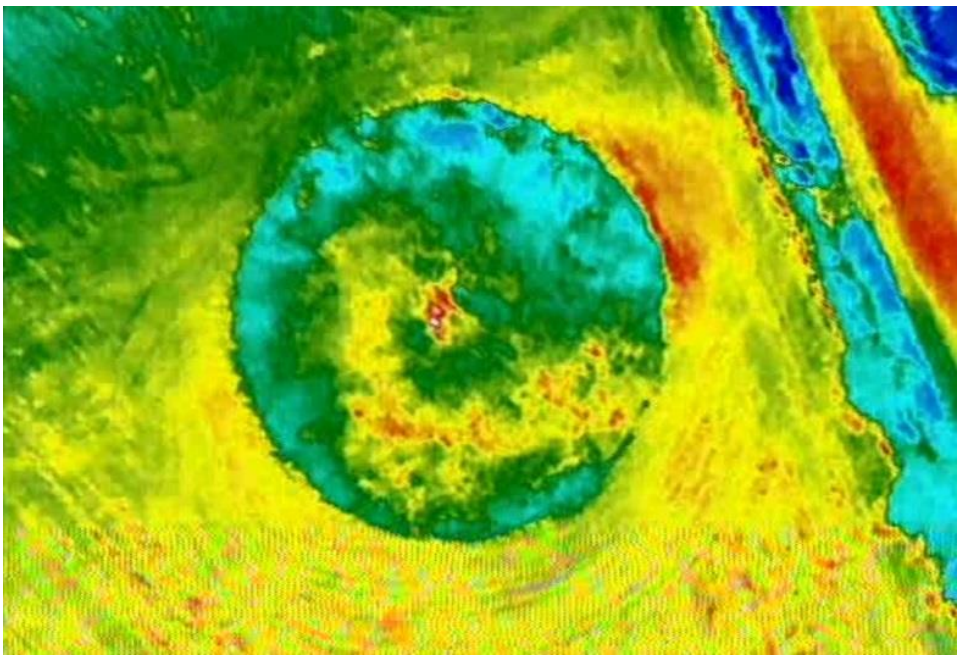

Abb.4 : Farbskalierte IR – Aufnahme eines Tagesbruches über einem Kupferschieferschacht bei Strenznaundorf (Sachsen/Anhalt)

In Abbildung 4 ist der Bereich eines Tagesbruches dargestellt, der durch Abgehen einer teilverfüllten Schachtsäule eines ehemaligen Erzschachtes verursacht wurde. Die kreisförmige Struktur wird durch Bewuchsunterschiede im Tagesbruchbereich erzeugt, im Inneren der Struktur erkennt man jedoch einen Spot signifikant erhöhter Temperatur mit einem Absolutwert von +0.7 K gegenüber dem gewachsenen, nicht durch den Tagesbruch beeinflußten geologischen Formationen. Der Schacht selbst bzw. die Schachtkontur ist nicht definiert zu erkennen, da der Verbruch bis in eine Teufe von ca. 18 m zu einer großräumigen Auflockerung der oberflächennahen Schichten geführt hat.

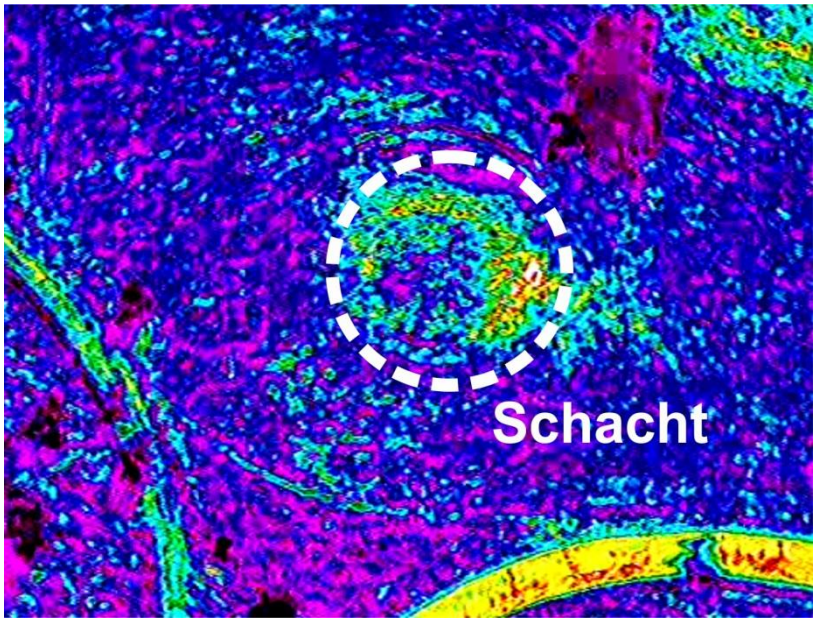

Abb.5 : Farbskalierte IR – Aufnahme eines Erzschachtes bei Freiberg

Ein weiteres Beispiel ist die in Abb. 5 dargestellte Kontur eines ehemaligen Erzschachtes im Freiberger Revier bei Tuttendorf. Das ehemalige Lichtloch liegt hier unverbrochen vor. Die Schachtsäule ist mit Bergemassen weitgehend hohlraumfrei verfüllt. Man erkennt jedoch deutlich eine ringförmige Struktur um den eigentlichen Schachtansatzpunkt. Hier führten Setzungserscheinungen zu einer Auflockerung der Kontaktzone zwischen Schachtsäule und umgebenden Gebirge. Die in dieser Kontaktzone aufsteigenden Wetter mit einer Temperatur von ca. 11 Grad sind aufgrund des Temperaturunterschiedes zu den umgebenden Erdschichten (ca. 4 Grad Bodentemperatur) gut erkennbar.

In vielen Fällen reicht jedoch die rein optische Auswertung der Bilddaten zum Detektieren der Schächte noch nicht aus, selbst wenn eine Farbspektrums – Klassifizierung vorgenommen wurde. In diesem Fall müssen die Kamera – Rohdaten herangezogen werden und Multispektral – Bilder mit bis zu 4 Einzelkanälen herangezogen werden.

Derartige mehrkanalige Bilder lassen sich mit der überwachten Bildklassifizierung einer geeigneten Software, z.B. ArcGIS - Spatial Analyst, detailliert bearbeiten und auswerten. Dabei werden s.g. Trainingsgebiete definiert. Diese werden auf ihre statistische Einzigartigkeit überprüft, die Trainingsgebiete anschließend angepaßt und eine Signaturendatei für jede Klasse erstellt. Anschließend erfolgt eine multivariante Maximum – Likelihood – Klassifizierung über den gesamten Bildverband.

Eine weitere Möglichkeit der Bilddatenverarbeitung und –darstellung befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase, läßt jedoch vielversprechende Ansätze für die Detektion altbergbaulicher Gefährdungsbereiche erkennen, bei denen keine optisch erkennbaren Temperaturdifferenzen zur Klassifizierung herangezogen werden.

Dabei werden die Bilddaten aus einer „herkömmlichen“ Videobefliegung und die Spektraldaten der IR – Kamera mittels einer speziellen Software kombiniert, die auf Basis einer photogrammetrischen Auswertung von Befliegungsdaten ein 3D – Modell der überflogenen Fläche berechnet. Entscheidend ist dabei der gedankliche Ansatz, daß die temperaturbasierten Farbdaten der IR Kamera durch die Software ein Art „Tiefeninformation“ zugeordnet werden, die in der Realität nicht existent ist.

Im Folgenden sind die Schritte der Datenbearbeitung kurz dargestellt:

Im ersten Schritt werden aus den Videodaten (Kamera + IR) zu definierten Zeitpunkten Bilder herausgeschnitten. Diese Bilder müssen synchron aufgenommen worden sein und exakt denselben Blickwinkel auf die zu untersuchende/befliegenden Fläche aufweisen.

Diese Bilder werden in der Software anschließend einer ersten Allocation – Phase unterzogen. Dabei berechnet das Programm für jedes Bild die exakte räumliche Position der Aufnahme und die durch das zugehörige Bild dargestellten Teilfläche. Daraus kann über systemischen Abgleich der Bilder untereinander eine erste Punktwolke erstellt werden (Abb. 6).

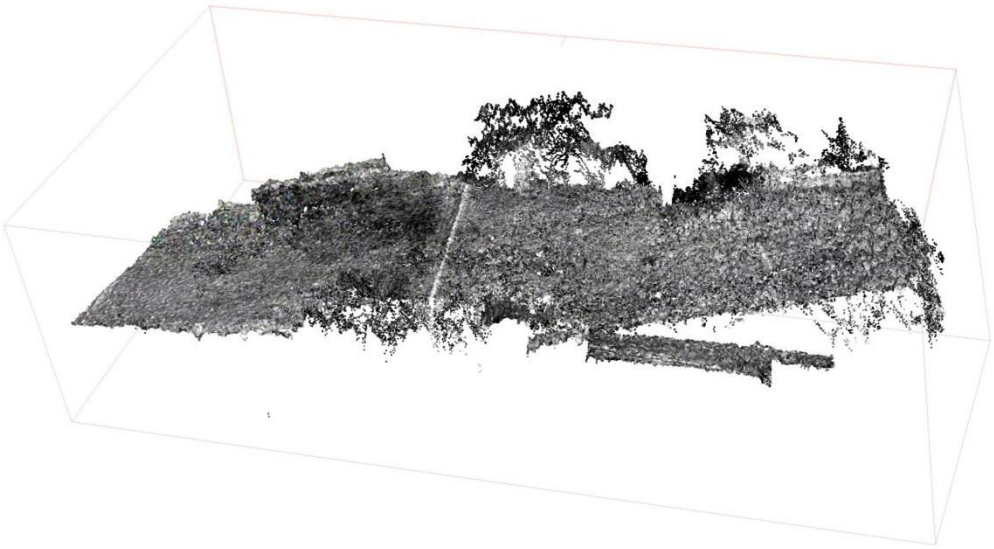

Abb.6 : Punktwolke aus IR – und Video – Rohdaten nach erster Allocation

Im nächsten Schritt wird die Tiefeninformation berechnet und hinzugefügt. Im Prinzip erfolgt hier die räumliche Skalierung, im Ergebnis erhält man ein 3D – Mesh der Geländeoberfläche, jeweils auf Basis der tatsächlichen Bilddaten sowie der IR – Daten.

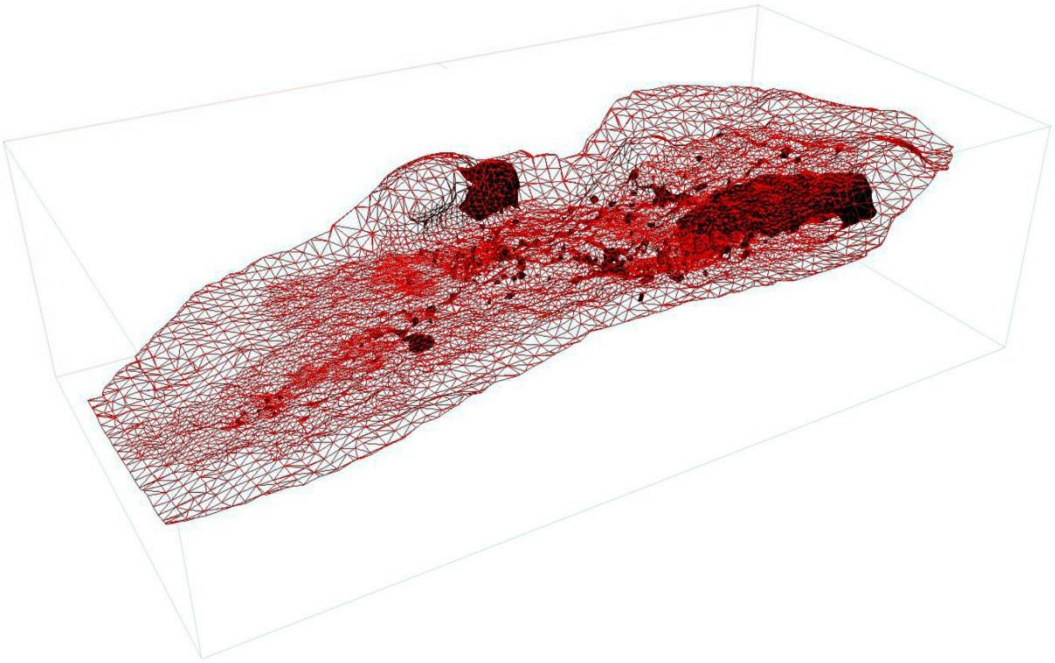

Abb.7 : Dreidimensionale Geländeoberfläche aus skalierten IR - Aufnahmen

Nachfolgend werden beide Datensätze mittels eines aufwendigen Differenzierungsverfahrens miteinander abgeglichen und ein neuer räumlicher Datensatz erstellt, der die Tiefeninformationen aus Bild- und IR Daten skaliert und statistische Abweichungen bereinigt beinhaltet. Diesem

Datensatz wird abschließend eine Textur aufgeprägt. Diese Textur kann IR – oder luftbildbasiert sein, jedoch sind auch kombinierte Darstellungen möglich.

Im Ergebnis entsteht eine Abbildung vergleichbar der Darstellung in Abb.8.

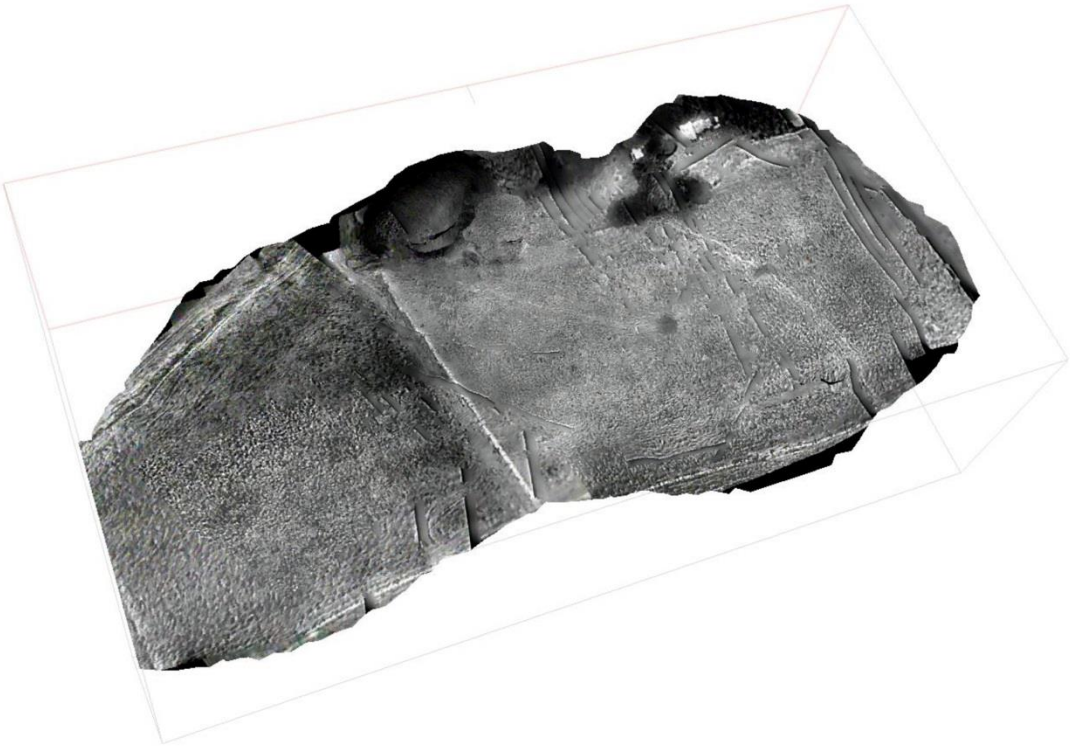

Abb.8 : 3D – Modell der Befliegungsfläche mit Falschfarben - Textur

Dabei handelt es sich um das Ergebnis einer derartigen Bilddatenbearbeitung auf Basis der Befliegungsdaten einer Altbergbaufläche im südlichen Ruhrgebiet bei Hattingen. Die von der Bezirksregierung Arnsberg sowie der Stadt Hattingen bereitgestellten Unterlagen weisen auf der beflogenen Fläche insgesamt 11 klassifizierte Altschächte aus.

Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt konnte die Fläche 2 Mal beflogen werden, allerdings unter ungünstigen Witterungsbedingen mit unzureichendem Temperaturkontrast zwischen Umgebungsluft und Boden bzw. zu detektierendem altbergbaulichen Objekt. Im Winterhalbjahr sind auf dieser Fläche weitere Befliegungen geplant.

Mit dem derzeitig vorliegenden Datenbestand können erste Kalibrierungen als Basis nachfolgender Datenbearbeitungsroutinen vorgenommen werden. So erfolgt eine Tiefenanalyse des Datenmaterials aus dem Bereich eines der Schächte, auf dem bereits ein Tagesbruch gefallen ist, bei dem eine oberflächennahe Sicherung durch Auffüllung des Bruchtrichters vorgenommen wurde.

Auf insgesamt 3 weiteren Altbergbauverdachtsflächen im Freiberger Revier, in Brandenburg sowie im Ruhrgebiet sind zudem Befliegungen ausgewählter Referenzobjekte geplant, bei denen Lage, Dimension und Verfüllzustand der Altschächte bekannt sind. Die Daten dieser Befliegungen werden zur Optimierung der Bearbeitungsroutinen herangezogen und als dienen als Basis weiterer Entwicklungsschritte.