Prospektion unterirdischer archäologischer Fundstätten mittels Fernerkundung

Achim DOMBERT[1] und Martin SCHAICH[2]

[1]Hochschule Anhalt, Dessau
[2]ArcTron3D, Altenthann

Kurzfassung

Das Erkennen unterirdischer Strukturen ist keine klassische Aufgabe der hyperspektralen Fernerkundung. Als Referenzmessung liegt eine (archäologische) geomagnetische Prospektion der näheren Umgebung des Klosters Corvey in Höxter, Nordrhein-Westfalen und deren Auswertung vor. Die Untersuchung soll zeigen, ob visuell nicht wahrnehmbare Effekte von unterirdischen Objekten an der Oberfläche mit bestimmten Auswertemethoden aus den Multisensordaten (hyperspektral, thermal, Laserscanning) detektiert werden können.

1 Einleitung

Der vorliegende Beitrag ist eine Zusammenfassung der Masterarbeit des Verfassers zum Abschluss des berufsbegleitenden Online-Masterstudiengang „Geoinformationssysteme“ an der Hochschule Anhalt in Dessau. Das gesamte Datenmaterial wurde von der Firma ArcTron^{3D} aus Altenthann bei Regensburg zur Verfügung gestellt. Die fachliche Betreuung lag beim Erstprüfer Prof. Dr. rer. nat. Lutz Bannehr. Zweitprüfer war Prof. Dr. Holger Baumann. Eine Kurzfassung dieser Masterarbeit ist im VDVmagazin 3/2015 (Juni 2015) erschienen.

Das Auffinden, Ausstellen und Geld verdienen mit spektakulären Funden ist heute nicht mehr das Hauptmotiv der Archäologie. Vielmehr geht es darum, auch das Leben vergangener Generationen abseits der großen Persönlichkeiten der Geschichte zu rekonstruieren. In einen dicht besiedelten Kulturraum wie der Bundesrepublik ist es schwierig, Spuren von historischen Infrastrukturen zu entdecken. Natürlich gibt es Bauwerke, welche die Jahrhunderte überdauern (z. B. den Magdeburger Dom) und hin und wieder überraschen Zufallsfunde von historischen Grundmauern bei Erdarbeiten in Stadtgebieten. Hauptsächlich sind die Stadtgebiete jedoch nicht die Fundstellen für historische Infrastruktur, da diese durch jahrhundertelange Nutzung als Siedlungsplatz zerstört ist. Vielmehr sind es außerhalb der heutigen Siedlungen liegende Flächen, welche vielleicht eine archäologische Sensation verbergen. Eine Siedlung, welche vor vielen Jahrhunderten aufgegeben wurde, ist in der Regel nach Quellenlage örtlich nicht mehr zu identifizieren.

Buhmann, E., Ervin, S. M. & Pietsch, M. (Eds.) (2015): Peer Reviewed Proceedings of Digital Landscape Architecture 2015 at Anhalt University of Applied Sciences. © Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH, Berlin/Offenbach. ISBN 978-3-87907-555-3.
This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/).

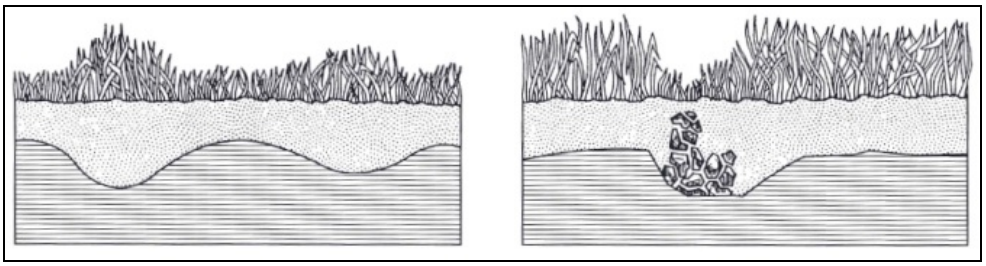

Abb. 1: Beeinflussung der Vegetation durch den Untergrund. Das bessere Wachstum der Vegetation durch alte verfüllte Gräben (links). Das schlechtere Wachstum der Vegetation durch unterirdische Strukturen (ALBERTZ 2009, 210).

Langwierige Suchgrabungen sind nicht mehr zu finanzieren. Moderne zerstörungsfreie Verfahren helfen längst vergangene Siedlungsstrukturen zu entdecken und ohne kostspielige Grabungen zu dokumentieren. Im Boden verborgene Objekte können visuell wahrnehmbare Effekte an der Erdoberfläche erzeugen (Abb. 1). Ein bekanntes Beispiel zur Erfassung dieser visuell erkennbaren Effekte ist die Luftbildarchäologie (siehe 4.1.1). Bei der Fernerkundung müssen Bodenmerkmale bzw. Bodenbewuchs die nicht in den Boden reichende Sensorik ergänzen. Kann aus dem wesentlich größeren elektromagnetischen Spektrum, welches bei der hyperspektralen Fernerkundung beobachtet wird und den größeren Auswertemöglichkeiten ein Detektionsverfahren entwickelt werden? Dieser Frage soll hier in einigen Ansätzen nachgegangen werden. Dieses Verfahren kann bestenfalls Änderungen der − nicht visuell wahrnehmbar sind. Eine solche Detektionsmöglichkeit wird die Suche nach archäologischen Fundstellen sicherlich revolutionieren und den Bedarf an zerstörungsfreien Verfahren wertvoll ergänzen.

2 Multisensoransätze in der archäologischen Fernerkundung

Verfasser: M. Schaich M. A., CEO ArcTron^{3D}

Während sich zusammen mit der seit den 1970er-Jahren systematisch eingesetzten Luftbildarchäologie das Airborne Laserscanning (ALS) im letzten Jahrzehnt zu einer neuen Schlüsseltechnologie für die Erkennung und 3D-Modellierung archäologischer Geländedenkmäler vor allem in Waldgebieten entwickelt hat, ist die luftgestützte Fernerkundung mit Thermal- und Hyperspektralsensoren in den letzten Jahren zumeist nicht sehr erfolgreich in archäologischen Fragestellungen getestet worden. Limitierende Faktoren für die Airbone Imaging Spectroscopy (AIS) sind die zu geringe Auflösung am Boden (ca. 1-4m) und die aus Kostengründen synchron zum ALS nicht einfach zu realisierenden geeigneten Aufnahmebedingungen für die abbildende Spektroskopie, deren Erfolg wesentlich von allgemeinen Flugparametern (Geschwindigkeit, Höhe), der Jahres- und Tageszeit, der Witterung, der Bewölkung, diversen Vegetationsparametern etc. abhängt.

Weltweit gelang es deshalb nur in wenigen aktuellen Forschungsprojekten, in denen mit mehreren Befliegungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten und einer höheren GSD (Ground Sampling Distance) gearbeitet werden konnte, die großen Potentiale der abbildenden Spektroskopie für die Archäologie konkret deutlich zu machen. Zu analysieren sind aufgrund der

großen Bandbreite sehr umfangreiche und komplex zu filternde spektrale Datenpakete mit einem teils erheblichen Grundrauschen. Direkt unter der Bodenoberfläche befindliche archäologische Strukturen (insbesondere Gräben, Gruben, Mauern etc.) lassen sich durch sehr subtil erfassbare Wachstumsparameter, durch Temperatur-, Feuchtigkeitsunterschiede und diverse andere Parameter detektieren. Sehr interessante und mit großem Forschungsaufwand realisierte archäologische Feldstudien u. a. in den südöstlich von Wien gelegenen Carnuntum (Österreich) machen dies deutlich (DONEUS u. a. 2014). Dank neuer Sensortechnik mit einer GSD von 40 cm und dank der Auswertung mittels einer dort entwickelten MATLAB Toolbox ARTCIS werden spannende konkrete archäologische Forschungsergebnisse sichtbar.

Gerade für archäologische Projekte bedarf es spezieller Fluggeräte- und Sensorkombinationen. Interessante Perspektiven versprechen entsprechende Entwicklungen in Ultraleichtfluggeräten und UAVs. Die für eine Beurteilung notwendige Grundlagenforschung und Parameteranalyse wird unter anderem auch in der hier vorliegenden, von ArcTron^{3D} initiierten Masterarbeit geleistet.

3 Methodik

Das Ziel ist es, aus den vorhandenen Fernerkundungsdaten durch die Anwendung verschiedener Methoden unterirdische Strukturen zu erkennen.

Zunächst werden die verschiedenen Aufnahmemethoden erläutert. Es folgen die eigentlichen Untersuchungen (hier nur in Auszügen dargestellt). Der allgemeinen Methodik bei der Bearbeitung von Fernerkundungsergebnissen folgend, wird hierbei versucht, Oberflächenmerkmale auszumachen, welche für eine Klassifizierung der Hyperspektralaufnahmen genutzt werden können.

Nach einem Klassifikationsversuch (ISODATA-Methode und Maximum-Likelihood-Methode) zur Ableitung der prinzipiellen Erkennbarkeit der gesuchten Objekte wird der Schwerpunkt der Untersuchung auf die vielfältigen Möglichkeiten gelenkt, welche die hyperspektrale Fernerkundung bietet. Hierbei kommen einige klassische Vegetationsindices Ratio Vegetation Index (RVI) und Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) zum Einsatz (hier nicht dargestellt). Anschließend wird der spezielle Derivative Greenes Vegetation Index (DGVI) eingesetzt, welcher ursprünglich zur Änderungsdetektion der Vegetation entwickelt wurde. In der abschließenden Bewertung werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Möglichkeiten gegeben.

4 Projektbeschreibung

Die Klosteranlage Corvey − heute eher Schloss Corvey − war viele Jahrhunderte lang ein bedeutender Siedlungsplatz, von dem der heutige Zustand der Umgebung etwas außerhalb von Höxter kaum noch etwas erahnen lässt (Abb. 2). Corvey ist am 21. Juni 2014 von der UNESCO als Weltkulturerbe ausgezeichnet worden. Als Welterbestätte trägt Corvey den offiziellen Titel „Das Karolingische Westwerk und die Civitas Corvey“. Im Juli 2012 wur-

de die Umgebung von Corvey ausführlich begangen. Rein visuell waren keine Oberflächenmerkmale erkennbar. Der Bewuchs zeigte ein homogenes Bild. Aufgrund der zeitlichen Differenz (die Befliegung erfolgte 9/2011) würden jetzt (die Begehung erfolgte 7/2012) wahrnehmbare Merkmale ohnehin nicht in die Untersuchung einfließen können. Es ist zu vermuten, dass auch zum Aufnahmezeitpunkt keine oberflächigen Veränderungen existierten. Eine Begehung vor Ort sollte zeitnah zur Aufnahme erfolgen. In diesem speziellen Fall am besten vor der Befliegung so könnte mit relativ wenig Aufwand die kostenintensive Befliegung – je nach Ergebnis der Begehung vor Ort – auf einen günstigen Zeitpunkt gesetzt werden. Die Mittel der modernen Landwirtschaft sorgen für einen nahezu homogenen Wuchs der Nutzpflanzen. So lässt sich hier auch nicht die Detektion bestimmter Pflanzenarten einsetzen. Prof. Dr. LAMBERS konnte in seiner Untersuchung mit hochauflösenden Satellitenbildern (LAMBERS 2010) alte Tierpferche nachweisen, durch jahrelange natürliche Düngung tritt eine ganz bestimmte Pflanze auf. In einer eben nicht landwirtschaftlich intensiv genutzten Umgebung lassen sich diese Pflanzenfelder detektieren. Mit Ausnahme der Anlage Corvey selbst und einer etwas weiter nördlich liegenden Anlage („tom Roden"; Abb. 2) sind heute für den archäologischen Laien keine oberirdischen historischen Anlagen vorhanden. „Der für ein Kloster ungewöhnliche Name tom Roden (zur Rodung) verweist auf hochmittelalterliche Landgewinnung…" (www.hoexter.de). Im historischen Kontext lag eine Siedlung („Wüstung Corvey"; Abb. 2) direkt außerhalb der heutigen Anlage.

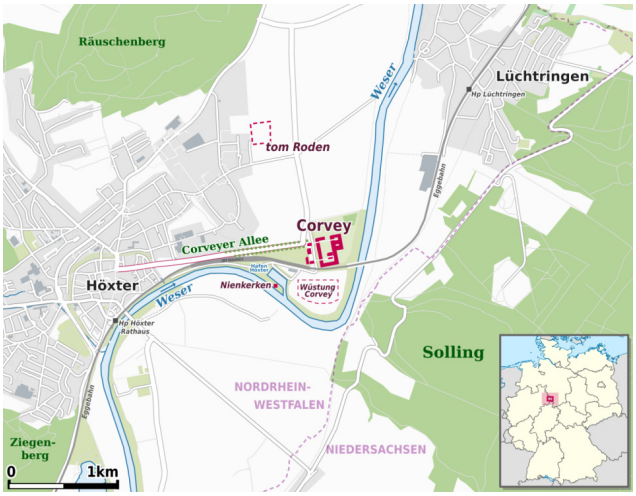

Abb. 2: Übersichtskarte Corvey. Die heute außerhalb von Höxter gelegene Anlage Corvey ist ein Glücksfall für die Suche nach historischer Infrastruktur (TUBS 2013).

4.1 Methoden zur Aufnahme

4.1.1 Luftbildarchäologie

Die Luftbildarchäologie ist ein seit Langem bekanntes Verfahren und hat beträchtliche Erfolge zu verzeichnen. So wurde die Kreisgrabenanlage bei Goseck in Sachsen-Anhalt von dem Luftbildarchäologen Otto Braasch entdeckt. Der Eingriff des Menschen in die Natur hinterlässt Spuren. Der vor 6000 Jahren (!) ausgehobene Graben der Anlage ist im Gelände durch jahrhundertelange Erosion und Bewirtschaftung nicht mehr zu erkennen. Es sammeln sich im unterirdischen Grabenprofil Wasser und Nährstoffe, welche die Pflanzen in diesem Bereich besser gedeihen lassen. Dieses unterschiedliche Wachstum lässt ideal in der Color-Infrarot-Aufnahme (CIR) nachweisen. Der höhere Wassergehalt der Pflanzen sorgt für eine deutliche höhere Reflektion des infraroten Lichtanteils als bei Pflanzen der Umgebung. Auch feste unterirdische Strukturen − z. B. gepflasterte Straßen, Grundmauern aber auch der festgestampfte Lehmfußboden − können ähnliche Effekte erzielen. Vegetationsfreie Flächen können durch unterschiedliche Bodenfeuchte fotografisch erfassbare Unterschiede von Flugzeug aus zeigen.

Das Fotografieren mit einer handelsüblichen Kamera von Kleinflugzeug aus hat auf den ersten Blick nur wenig mit der komplexen Technik der Aufnahme eines hyperspektralen abbildenden Spektrometers gemeinsam. Im Kontext dieser Untersuchung sind beide Verfahren jedoch passive Fernerkundungssensoren und erfassen das hier aufzuspürende Objekt − im weitesten Sinne: unterirdische Strukturen – nur indirekt.

Natürlich wird Luftbildarchäologie auch mit vorhandenen (georeferenzierten) Luftbildern betrieben (HELLER 2012). Die oft genutzten Schrägluftbildaufnahmen lassen sich kaum in die Örtlichkeit übertragen. Da in der Regel keine (geodätischen) Passpunkte signalisiert sind. Anders als bei der Aufnahme mit dem Spektrometer steht auch kein GPS zur Bestimmung des Projektionszentrums der Kamera zur Verfügung. Die Kosten für das Flugzeug sind gleich – die Komplexität der Aufnahmetechnik und die damit verbundenen Kosten sind jedoch bei der Hyperspektralaufnahme ungleich höher.

4.1.2 Geomagnetik

Ein weiteres zerstörungsfreies Verfahren zum Aufspüren unterirdischer Strukturen ist die elektromagnetische Prospektion kurz Geomagnetik genannt. Während die Luftbildarchäologie das eigentliche Objekt eigentlich nur indirekt misst – eben durch Veränderungen an der Oberfläche - kann die Geomagnetik die Objekte direkter erfassen. Das Verfahren nutzt das elektromagnetische Feld der Erde. Jedes Objekt auf und unter der Erde wird durch das Erdmagnetfeld magnetisch aufgeladen. Jedes Material weist eine unterschiedliche Magnetisierbarkeit (magnetische Suszeptibilität) auf. Im Boden verborgene Objekte (z. B. Mauerreste) aber auch verfüllte Gräben haben eine andere magnetische Suszeptibilität als das umgebende Erdreich. Diese Ladungsunterschiede können sehr genau erfasst werden. Die Maßeinheit ist Tesla. Die von den Sensoren registrierten Ladungsunterschiede werden als Graustufenbilder dargestellt. Im Allgemeinen wird bei der Interpretation dieser Graustufenbilder von Störungen (Anomalien) gesprochen. Mehrere Sensoren werden in einem festen Abstand zueinander angebracht. Der Abstand der Sensoren gibt einen Anhaltspunkt für die Genauigkeit der Aufnahme. Da die Feldarbeit durch gleichmäßiges Überschreiten der Messfläche erfolgt, ist die Frequenz der Messimpulse und die Laufgeschwindigkeit des Bedieners ebenfalls ein Faktor für die Genauigkeit der Aufnahme. Aufgrund dieser Kon-

stellation kann es zu einer unterschiedlichen Auflösung quer und in Messrichtung (Laufrichtung) kommen. Sowohl die geomagnetische Messung als auch die Interpretation der Aufnahmen ist keine triviale Aufgabe. Dieses Verfahren funktioniert bis zu einer Tiefe von ca. 3 m. Aufgrund des Messverfahrens kann bei den hier verwendeten Daten mit einer Auflösung von ca. 0,2 m gerechnet werden. Ein Problem sind bei diesem Verfahren im Boden vorhandene Metallteile. Schon kleinste Metallteile wie z. B. Schrauben überstrahlen durch ihre magnetischen Eigenschaften bereits über einen Quadratmeter und machen die Messwerte in diesem Bereich unbrauchbar. So sind die auf den ersten Blick auffallenden weiß umrandeten Objekte (Abb. 3) nicht etwa archäologische Funde, sondern vielmehr Störungen des Magnetfeldes durch Metall im Boden. Die geomagnetische Prospektion bildet die Referenzmessung für diese Arbeit. Da für Fachfremde die Interpretation der originären Geomagnetikaufnahmen schwierig ist, wurde eine vorhandene Digitalisierung des archäologischen Instituts Bochum sinnvollerweise weiterverwendet. Ebenso wurden Thermal- und Höhendaten erfasst. Auf eine ausführliche Darstellung wird hier verzichtet.

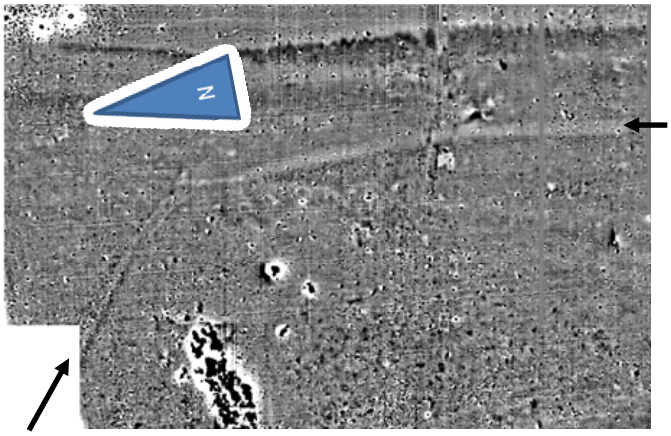

Abb. 3: Graustufenbild einer geomagnetischen Aufnahme. Die deutlich wahrnehmbaren Anomalien (tiefschwarz mit weißer Umrandung) sind Metalle im Boden, welche die Aufnahme stören. Die gesuchte Anomalie läuft quer durchs Bild und ist nur schwach zu erkennen (Pfeile).

4.1.3 Hyperspektralaufnahmen

Das im Projekt verwendete AISA-Dual-System wird wegen der Vielzahl der möglichen aufzunehmenden Kanäle als hyperspektrales abbildendes Spektrometer bezeichnet. Es ist möglich mit dem System ein nahezu vollständiges Spektrum abzubilden, während mehrkanalige (auch multispektrale) Systeme nur einige Stützpunkte des Spektrums abbilden können. Das verwendete System AISA-Dual ist eine Kombination aus den Systemen AISA-Eagle und Hawk. Der Sensor wird so konfiguriert, dass beide Teilgeräte zur selben Zeit alle 320 Pixel einer Aufnahmezeile beobachten. Beide Datensätze werden in einem Bild kombiniert. Somit wird trotz unterschiedlicher Sensoren das komplette Spektrum von 400-2.500 nm (Nanometer) erzeugt. Beide Systeme arbeiten nach dem Prinzip des Push-broom-(Zeilen-)Scanners. Es wird jeweils ein kompletter Geländestreifen quer zur Flugrichtung mit den CCD-Sensoren (Charge Coupled Devices =ladungsgekoppeltes Bauteil) erfasst. Durch die Bewegung des Sensors wird das Gelände in Flugrichtung registriert. Das Prinzip der Datenerfassung lässt sich anschaulich mit dem Datenwürfel beschreiben. Für jedes Bildelement (Pixel) wird ein komplettes Spektrum erfasst. In diesem Projekt wurden 367 Kanäle mit einer Bodenauflösung (auch als GSD = Ground Sampling Distance) von 0,5 m erfasst. Aus 367 Reflektionswerten für unterschiedliche Wellenlängen entsteht ein zusam-

menhängendes Spektrum (Abb. 4). Das Gelände wurde am September 2011 mit einem AISA-Dual System beflogen. Die Flughöhe betrug laut Flugprotokoll 500 m bzw. 380 m. Es liegen insgesamt ca. 50 Gigabyte an komprimierten Daten vor. Es sind sowohl die Flugrohdaten (hier nicht näher betrachtet) als auch die vorprozessierten und georeferenzierten Daten vorhanden. Die einzelnen Aufnahmen sind zwischen 3 und 5 GB groß und decken einen Streifen von ca. 3.500 m mal 200 m ab.

4.2 Methoden zur Auswertung

4.2.1 Allgemeine Betrachtungen

Für die Analyse stehen die Hyperspektralaufnahmen, das Digital-Terrain-Model (DTM), das Digital-Situation-Model (DSM) und die Thermalaufnahmen zur Verfügung. Zur exemplarischen Bearbeitung wurden drei Testbereiche festgelegt. Die Thermalaufnahmen sind laut Flugprotokoll im Oktober 2011 in den Nachmittagsstunden entstanden. Es ist durchaus vorstellbar, dass unterirdische Strukturen auch messbare Temperaturdifferenzen auf der Erdoberfläche erzeugen. Jedoch überdeckt die Wärmestrahlung der Sonne aufgrund des Aufnahmezeitpunktes thermale Differenzen des Bodens komplett. Anders als bei den Hyperspektralaufnahmen ist die Bedeckung des Bodens mit Vegetation eher hinderlich. Auftretende Differenzen sind eher dem Unterschied Erdoberfläche und Pflanze zuzuordnen, als dem Untersuchungszweck. Die Thermalaufnahmen bleiben aufgrund dieser Tatsachen im Weiteren unberücksichtigt. Es ist unwahrscheinlich, hieraus Ergebnisse abzuleiten, welche der Untersuchung dienlich sind. Die Hyperspektralaufnahmen sind durchweg große Datenpakete. Um diese Datenmengen effizient verarbeiten zu können, werden die Daten einmal räumlich und zum Zweiten spektral reduziert. Aus den entsprechenden Aufnahmen werden die drei Testgebiete (räumliche Reduzierung) ausgeschnitten. Das Löschen einiger nicht benötigter Kanäle (spektrale Reduzierung) aus den Aufnahmen birgt die Gefahr Kanäle zu löschen, welche relevante Information enthalten könnten. Um dem Verlust relevanter Informationen vorzubeugen, folgen einige weitere Überlegungen.

Die Sonnenstrahlung welche auf die Vegetation trifft wird absorbiert, transmittiert und reflektiert. Über die Intensität und Art entscheiden verschiedene Faktoren, wie die Wellenlänge, der Einstrahlungswinkel, die Oberfläche der Vegetation und die optischen Eigenschaften der Vegetation welche auch die Form der Vegetationsspektren bestimmen. Anders als bei festen Materialen welche durch die chemischen Eigenschaften auch unterschiedliche Absorptionsbanden haben und somit auch unterschiedliche Spektren, sind die sich Spektren der fotosynthetisch aktiven grünen Vegetation sehr ähnlich. Die Ähnlichkeit resultiert aus der sehr ähnlichen biochemischen Zusammensetzung. Zusammengefasst beeinflussen folgende Faktoren der Vegetation die optischen Eigenschaften bzw. die spektrale Variabilität:

- Pflanzenarchitektur,
- Oberflächenrauhigkeit,
- Brechungsindex der Oberfläche,
- Zusammensetzung, Menge und Verteilung von Pigmenten,
- interne Struktur,
- Wassergehalt.

Bei dem betrachteten Vegetationsspektrum (Abb. 4, oberer Graph) im Testgebiet handelt es sich um fotosynthetisch aktive grüne Vegetation. Der deutliche Anstieg bei ca. 700 nm, das

sogenannte Red-edge, ist ein deutliches Charakteristikum, welches bei den sogenannten Vegetationsindices genutzt wird. Das Red-edge ist wohl das am meisten analysierte Feature des Vegetationsspektrums. Abbildung 5 fasst noch einmal die Ausführungen als Grafik zusammen. Obwohl das aus dieser Untersuchung erhaltene Spektrum einer Nutzpflanze im Detail anders ausgeprägt ist, sind grundsätzliche Merkmale identisch. So könnten sich hieraus auch ohne visuelle Überprüfung bereits die Kanäle herausfiltern lassen, welche für die Untersuchung nicht relevant sind. So zum Beispiel die Absorptionsbänder vom Wasser. Das für die Bearbeitung der Hyperspektralaufnahmen benutzte Programm ENVI hat eine visuelle Möglichkeit, diese überflüssigen Kanäle zu finden. Über das gesamte Spektrum kann ein Film erstellt werden. Jeder der 367 Kanäle wird zu einem Bild in diesem Film und es lassen sich deutlich Sequenzen erkennen, in denen das von Erdboden reflektierte Signal so gering ist, dass sich im Bild nichts mehr erkennen lässt. So konnten drei Bereiche identifiziert werden. Es ist unwahrscheinlich in diesen Spektralbereichen (Wasserabsorptionsbanden) Erkenntnisse für die Untersuchung zu erwarten. Eine wichtige Erkenntnis für zukünftige Untersuchungen ist es, diese Kanäle a priori nicht aufzunehmen. Hier dürfen nun keine Zweifel an der Qualität der Aufnahmen aufkommen. Als ein Maß für Detektion kleiner spektraler Unterschiede wird der SNR-Wert (Signal-to-Noise Ratio) genannt. Dieser soll „einige(n) Hundert“ (FRANK 2008, 13) betragen. Der SNR beträgt für die verwendeten Sensoren den AISA-Hawk 800:1 und für den AISA-Eagle 1250:1. Die Qualität der Aufnahmen ist also für die hier zu bearbeitende Aufgabe völlig ausreichend. Zur Kontrolle wurde im Testgebiet jeder der 367 Kanäle als Graustufenbild betrachtet. So konnten noch weitere Bereiche festgestellt werden. Auch diese Kanäle könnten in der Aufnahmeplannung ausgeschlossen werden. Es bestätigen sich auch die zuvor festgestellten Wasserabsorptionsbanden. Zusätzlich lässt sich feststellen, dass im Bereich bis ca. 620 nm nur kleinere Bereiche nutzbarer Daten enthalten. Der Red-edge-Bereich ab ca. 700 nm ist etwa 30 nm breit und könnte auch mit multispektralen Sensoren erfasst werden. Die vorhandenen Aufnahmen wurden mit hyperspektralen Sensoren erfasst. Das Spektrum ist also durch mehrere Stützpunkte wesentlich detaillierter. Obwohl mehrere Aufnahmekanäle aus den Daten entfernt wurden, erfüllen die spektral reduzierten Daten nach wie vor die Voraussetzungen zur Analyse der Vegetation.

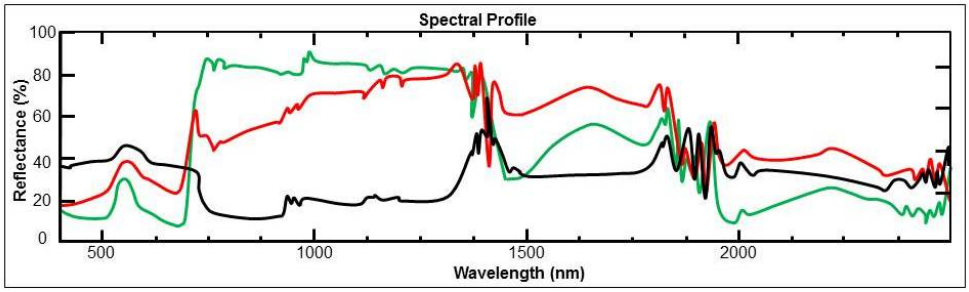

Abb. 4: Eindeutige Vegetationsmerkmale. Der obere Graph entspricht dichter Vegetation, der mittlere Graph entspricht schwacher Vegetation, der untere Graph entspricht einer Straße (keine Vegetation).

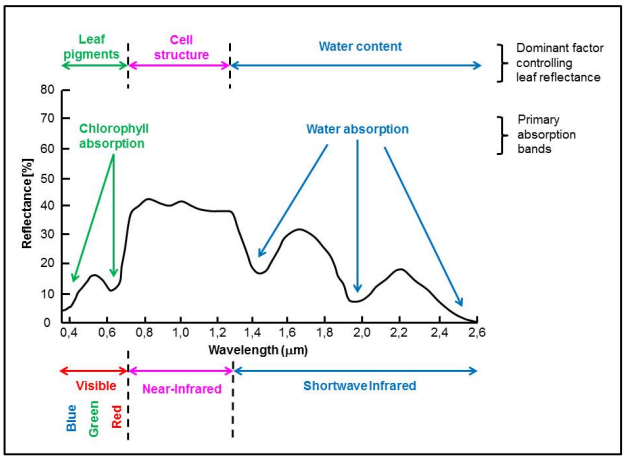

Abb. 5: Ursachen der unterschiedlichen Absorption und Reflexion in grünen Blättern. Die Spektren fotosynthetisch aktiver (grüner) Vegetation zeigen ähnliche Charakteristika. Die Ausprägungen sind von spezifischen Eigenschaften abhängig (eigene Bearbeitung nach CREWELL 2004).

Abb. 6: Oberflächenmerkmale Anlage ‚tom Roden'. Die ehemalige Klosteranlage ist touristisch aufbereitet. Der Grundriss der Anlage ist deutlich zu erkennen.

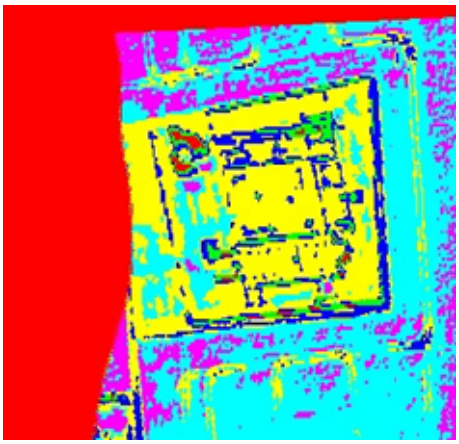

Abb. 7: Anlage ‚tom Roden' (unüberwachte Klassifikation – ISODATA). Ein erster Versuch zur Wahrnehmung einer archäologischen Fundstelle in den Daten der hyperspektralen Fernerkundung.

4.2.2 tom Roden: unüberwachte Klassifikation

Im Untersuchungsgebiet „tom Roden" tritt der Grundriss der historischen Klosteranlage zu Tage. In diesem Gebiet liegt eine Geomagnetikaufnahme vor, welche aber im Ergebnis nur geringe unterirdische Strukturen (Hausgrundrisse) zeigt. Die Höhenmodelle liegen für dieses Gebiet nicht vor. Es soll hier um die prinzipielle Erkennbarkeit einer archäologischen Fundstelle mit den Mitteln der Fernerkundung gehen. Nach der Erkundung vor Ort konnten mit Ausnahme der Mauerreste im Testgebiet „tom Roden" (Abb. 6) keine visuell wahrnehmbaren Oberflächenmerkmale erfasst werden. In der Fachliteratur (z. B. THIELEN-WILLIGE 1993) wird zur ersten Orientierung oft eine unüberwachte Klassifizierung zur Identifizierung der Klassen empfohlen. Dieser erste Ansatz soll auch die maximal zu erwartende

Auflösung eines möglichen Ergebnisses (Abb. 7) zeigen. Es kommt hierbei die ISODATA-Methode (ISODATA = Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) zum Einsatz. Es handelt sich um ein rein mathematisches Verfahren (Cluster-Analyse), welches auf dem Minimal-Distance-Verfahren basiert, jedoch keine Testflächen in den Aufnahmen erfordert. Es soll gezeigt werden, dass eine oberirdische archäologische Fundstelle mit einem einfachen automatischen Klassifizierungsverfahren erkennbar ist, bevor mit weiteren Analysen versucht wird, die unterirdischen Strukturen zu detektieren.

Es sind Strukturen erkennbar, jedoch sind diese nicht mit den visuell wahrnehmbaren Strukturen gleichzusetzen. Es fällt auf, dass keine klaren Linien entstehen, obwohl diese Mauerfragmente oberirdisch sind. Aufgrund der Auflösung der Hyperspektralaufnahmen (0,5 m) ist also bestenfalls mit einer Art Erwartungsraum für unterirdische Strukturen zu rechnen.

Wird nun weiterhin einem Standardverfahren gefolgt, können die aus der unüberwachten Klassifikation erhaltenden Erkenntnisse als Klassen für eine überwachte Klassifikation eingesetzt werden. Ein oft genutztes Verfahren ist die Maximum-Likelihood-Methode (MLH = Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit). Hierbei müssen Testflächen in den Aufnahmen definiert werden. Aus diesen Testflächen werden Wahrscheinlichkeitsfunktionen abgeleitet. Sollte das MLH-Verfahren funktionieren, könnte es auf die unterirdischen Strukturen übertragen werden. Die Idee dahinter ist, dass nur eine Teilfläche geomagnetisch untersucht werden könnte. Hier würden dann Testflächen in den hyperspektralen Aufnahmen gekennzeichnet und dann das MLH-Verfahren auf weitere – geomagnetisch nicht untersuchte – Flächen übertragen werden. Natürlich ist die Testfläche (Mauern) sehr klein und kaum ausreichend repräsentativ (Abb. 8).

Das Ergebnis (Abb. 9) der Maximum-Likelihood-Methode ist nicht aussagekräftig.

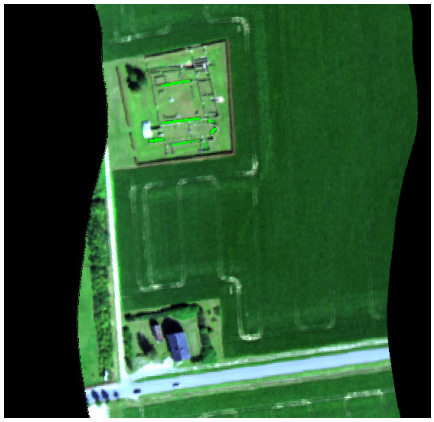

Abb. 8: Anlage ‚tom Roden' (ROI). Die Markierung der ROI (Region of Intrest) als Klassifikationsvorlage.

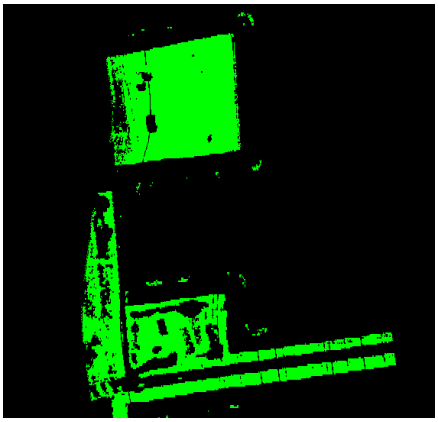

Abb. 9: Anlage ‚tom Roden' (MLH) und das Ergebnis der MLH-Methode.

Obwohl die Mauerreste von einer etwa 10 bis 20 cm hohen Erdschicht bedeckt sind (Abb. 6), lassen sie sich auf der Fernerkundungsaufnahme visuell und auch bei unüberwachter Klassifizierung (Abb. 7) erkennen.

Die etwa 1,2 m breite Mauer der Apsis zeigt sich in der Hyperspektralaufnahme deutlich. Die ca. 0,8 m breiten Innenmauern sind schon weniger gut wahrnehmbar. Die quadratischen Mauerreste (vielleicht Säulenfundamente?) (ca. 0,6m × 0,6m) sind nur noch visuell zu erahnen, in der Darstellung aus Google Earth (hier nicht abgebildet) sind diese deutlich erkennbar. Als Struktur lassen sich die quadratischen Mauerreste in der unüberwachten Klassifizierung (Abb. 7) nicht erkennen. Es lässt sich festhalten, dass die gesuchten Strukturen mindestens die doppelte Ausdehnung (also mindestens 1 m) der Bodenauflösung der Fernerkundungsaufnahmen (in diesem Fall 0,5 m) betragen sollte. Für das Aufspüren kleiner unterirdischen Strukturen (z. B. Pfostenlöcher) ist die hyperspektrale Fernerkundung von Flugzeug aus nicht geeignet. Die zeitlich sehr aufwendige Berechnung der Maximum-Likelihood-Methode (Abb. 9) zeigt im Ergebnis eine homogene Fläche in der Nähe der Mauerreste. Obwohl optisch erkennbar weist das Berechnungsergebnis (MLH) keine Unterschiede aus. Die Standardmethode, also zunächst eine unüberwachte Klassifikation zur Ermittlung möglicher Klassengebiete und dann eine Klassifizierung, funktioniert nicht. Mauerreste und Umgebung lassen sich mit dieser Methode nicht unterscheiden. Der relativ dünne Bewuchs auf der Mauer und im umgebenden Gelände lässt sich aber deutlich von Bewuchs des Ackers unterscheiden. Die Traktorenspuren im Feld (mit geringen Bewuchs) lassen sich teilweise erkennen. Diese beiden Indizien zum einen die Vegetationsdichte zum anderen unterschiedliche Arten von Vegetation sind aber im weiteren Verlauf der Untersuchung nicht zu erwarten. Im Ergebnis lässt sich sagen, dass diese Untersuchung zu keinem erkennbaren Nachweis führt. Es lassen sich jedoch einige Erkenntnisse ableiten. Die sonst so bewährte MLH-Methode versagt hier, da aus der oberirdischen Struktur keine eindeutigen spektralen Merkmale erkannt werden können. Ebenso ist die Menge der Pixel zu klein, die Referenzflächen sind also nicht geeignet. Da die spektralen Merkmale der Vegetation über einer unterirdischen Struktur mit Sicherheit schwächer sind, als die der oberirdischen Mauer direkt, kann auch die MLH-Methode für den Untersuchungszweck nicht funktionieren.

4.2.3 Blackman Window Filter und DGVI

Alle bisherigen (hier nicht dargestellten) Untersuchungen führten zu keinen signifikanten Ergebnissen. Auch die zur Vegetationsanalyse häufig bewährten Vegetationsindices führten zu keinem brauchbaren Ergebnis. Michael FRANK hat in seiner Publikation „Hyperspektrale Fernerkundung Methoden zur Aenderungsdetektion von multitemporalen Hyperspektralbildern“ (FRANK 2008) eine entsprechende Untersuchung dokumentiert. In seinen Ausführungen beschreibt er ausführlich Detektionsmöglichkeiten auch geringer spektraler Unterschiede aus zeitlich getrennten hyperspektralen Aufnahmen. Es wird u. a. der Derivative Greenes Vegetation Index (DGVI) genutzt.

Der DGVI wird in trockenen Gebieten zur Detektion sehr geringer Anteile photosynthetisch aktiver (grüner) Vegetation genutzt. Der Vorteil dieses Index ist die Nutzung des gesamten engbandigen Spektrums, während z. B. der Vegetationsindex NDVI nur zwei getrennte Kanäle (Rot und nahes Infrarot) nutzt. Die hier verwendete Ableitungsanalyse hebt auch schwache Vegetationsmerkmale hervor.

FRANK benutzt zusätzlich einen Filter-Algorithmus zur Glättung des Spektrums. Der Blackman-Window-Filter ist ein Tiefpassfilter. Beide Formeln wurden von FRANK in IDL (Interactiv Data Language) programmiert und publiziert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde diese Quelle genutzt, um eine weitere Möglichkeit zur Suche nach unterirdischen Strukturen durch Vegetationsanalyse zu etablieren.

Die festgestellte detailliertere Analysemöglichkeit der Vegetationsbedeckung wird nun auf das Untersuchungsgebiet Stadtgraben übertragen.

Das Ergebnis (Abb. 10) zeigt eine mögliche Struktur des Stadtgrabens (Pfeile). Auch die gemeinsame Projektion mit den Daten der geomagnetischen Auswertung lässt den Eindruck zu, dass sich die Struktur (Abb. 11) des Grabens und die Torsituation in der Auswertung widerspiegeln!

Der Unterschied des DGVI zu den anderen Vegetationsindices ist besonders deutlich. So sind dort (einfache Vegetationsindices) zwar auch links und rechts der Torsituation Änderungen zu erkennen. Der Verlauf des Stadtgrabens ist jedoch nur beim DGVI zu erahnen.

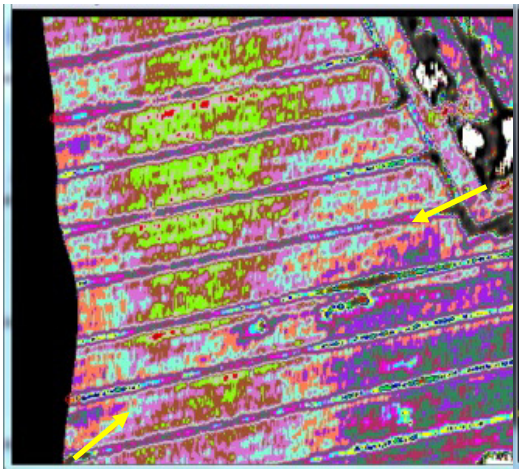

Abb. 10: Stadtgraben DGVI. Der mögliche Verlauf des Stadtgrabens (Pfeile).

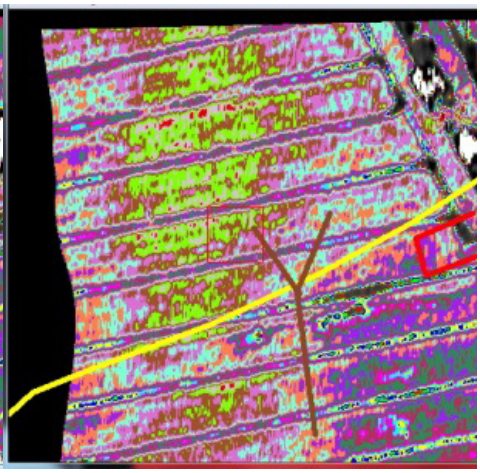

Abb. 11: Stadtgraben DGVI Geomagnetik. Die archäologische Auswertung: Stadtgraben, mögliche Torsituation (Y-förmig), Hausgrundriss (rechteckig).

5 Fazit der Untersuchungen

Hier soll die zentrale Frage beantwortet werden:

Können unterirdische Strukturen durch die hier verwendeten Untersuchungsmethoden und das hier verwendete Datenmaterial erkannt werden?

Antwort: Nein.

Selbstkritisch muss erkannt werden, dass ohne die archäologischen Auswertungen die Indizien in den Untersuchungsergebnissen viel zu schwach waren, um für sich allein für die Identifizierung der unterirdischen Strukturen auszureichen.

Die Menge der Variablen dieser Untersuchung ist derartig groß, dass selbst durch die Anwendung komplexer Algorithmen (Filter und DVGI) keine eindeutigen Ergebnisse erzeugt werden konnten.

Die biochemischen Einflussfaktoren auf die spektrale Signatur der Vegetation ist ein Fakt, der sich nicht beeinflussen lässt. Anders lassen sich sehr wohl einige äußere Bedingungen beeinflussen. Hier soll nun eine Aufzählung erfolgen, um die äußeren Bedingungen zu benennen und für zukünftige Untersuchungen die Menge der Variablen zu verringern.

Die Kenntnis der Art der Vegetation wäre von Vorteil. Entsprechende Fachexperten könnten so Angaben über die Sensibilität der Vegetation auf bestimmte Bedingungen machen. Die Art der Vegetation ist in dieser Untersuchung nicht bekannt.

Es liegt auf der Hand, dass nicht nur der Einfluss der Menschen Auswirkungen auf die Vegetation hat, sondern auch die Umwelt. Eine längere Trockenperiode unterstützt Mangelerscheinungen bei Pflanzen, längere Regenfälle kompensieren Mangelerscheinungen. Auch die Nähe eines Testgebietes zur Weser beeinflusst durch einen hohen Grundwasserspiegel die Vegetation. In dieser Untersuchung wurden keine Umweltbedingungen dieser Art berücksichtigt.

Eine Erkundung vor Ort vor der Erfassung der Daten fand nicht statt. So hätte vielleicht ein günstiger Zeitpunkt für die Aufnahmen gewählt werden können. Dies gilt besonders für die Thermalaufnahmen. Auch die hyperspektralen Aufnahmen sollten im Frühjahr erfolgen in der Wachstumsphase der Vegetation lassen sich Unterschiede am besten erkennen.

In dieser Untersuchung war die Lage der unterirdischen Strukturen bekannt, jedoch lagen diese wahrscheinlich zu tief. Es ist wichtig festzuhalten, dass bei der hyperspektralen Fernerkundung keine kleinstrukturierten Ergebnisse zu erwarten sind.

Idealbedingungen könnten sein:

- besonders große unterirdische Strukturen,
- nicht sehr tief im Boden gelegene Strukturen,
- tiefgreifende Wurzeln möglichst unbeeinflusster Vegetation,
- trockene Großwetterlage,
- Geländebegehung vor der Messung wenn möglich,

Die Kombination verschiedener Aufnahmearten (hyperspektral, thermal, Höhenmodell) mit der Einhaltung einiger Vorbedingungen könnte die Lösung zur Detektion unterirdischer Strukturen sein. Es ist natürlich, auch die Wirtschaftlichkeit einer solchen möglichen Untersuchung zu beachten. Es ist wahrscheinlich, dass die Geomagnetik trotz des hohen Aufwandes vor Ort die wirtschaftlichere Alternative darstellt. Aber auch die Einhaltung aller äußeren und inneren Idealbedingungen wäre kein Garant für ein schlüssiges Ergebnis. Es käme auf einen weiteren: „Versuch der Prospektion unterirdischer Strukturen mit passiven Fernerkundungssensoren“ (so der Titel im Original) unter anderen Bedingungen an.

„Die Grenzen des Möglichen lassen sich nur dadurch bestimmen, dass man sich ein wenig über sie hinaus ins Unmögliche wagt.“ (Arthur C. Clarke)

Literatur (Auszug)

ALBERTZ, J. (2009), Einführung in die Fernerkundung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

CREWELL, S. (05.11.2004): Vorlesung: Fernerkundung der festen Erde – solar. http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/lehre/crewell/vorles/FE_vorles/FE_5nov04.pdf (27.01.2014).

DONEUS M., VERHOEVEN G., ATZBERGER C., WESS M. & RUS M. (2014), New ways to extract archaeological information from hyperspectral Pixels. Journal of Archaeological Science, 52, 84-96 (mit umfangreicher weiterer Literatur ebd. 94-96 und Weblinks zur Toolbox).

FRANK, M. (2008), Hyperspektrale Fernerkundung Methoden zur Aenderungsdetektion von multitemporalen Hyperspektralbildern. VDM-Verlag Dr. Müller, Saarbrücken.

HELLER, E. (2012), Archäologische Waldinspektion durch den Blick von oben. VDVmagazin, 2/2012, 116-122.

LAMBERS, K. (2010), Am Boden, aus der Luft, aus dem All: Prospektion archäologischer Fundstellen in der Silvretta. In: REITMAIER, T. (Hrsg.), Letzte Jäger, erste Hirten: hochalpine Archäologie in der Silvretta. Zürich, 55-66. http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:352-198039 .

THIELEN-WILLIGE, B. (1993), Umweltbeobachtung durch Fernerkundung. Ferdinand Enke, Stuttgart.

TUBS (2013), http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ALocator_map_Corvey.svg. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/Locator_map_Corvey.svg (10.02.2013).