

Veränderungsanalysen von Pioniervegetation in einer Bergbaufolgelandschaft in Mitteldeutschland mittels hyperspektraler HyMap-Flugzeugscannerdaten

HENNING GERSTMANN¹, CORNELIA GLÄBER & CHRISTIAN GÖTZE

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Veränderungsdetektion durch Sukzession von Pioniervegetation in einer Bergbaufolgelandschaft Mitteldeutschlands. Diese Veränderungen werden mithilfe von hochauflösenden, hyperspektral abbildenden Flugzeugscannerdaten des Sensors HyMap für einen Untersuchungszeitraum von elf Jahren ausgewiesen. Hierfür werden vier Verfahren der digitalen Change Detection angewendet, deren Eignung hinsichtlich Genauigkeit, Robustheit sowie der Veränderungsart für das hyperspektrale Monitoring der Veränderungen von Pioniervegetation bewertet werden soll. Dies geschieht vor dem Hintergrund qualitativ unterschiedlicher Eingangsdaten. Diese Unterschiede erschweren die Veränderungsdetektion, sind jedoch bei einem Langzeitmonitoring häufig unvermeidbar. Die detektierten Veränderungen werden mit verschiedenen Sekundärdaten in Beziehung gesetzt, wodurch eine ökologische Analyse der Vegetationsveränderungen durchgeführt werden kann. Es konnte eine Entscheidungskette entwickelt werden, die je nach Veränderungsart und Datenqualität die Auswahl des optimalen Change-Detection-Verfahrens ermöglicht.

1 Einleitung

Große Teile Mitteldeutschlands sind geprägt vom Braunkohlebergbau, der eine vollständige Zerstörung der ursprünglichen Landschaft bewirkt. Nach dem Ende des Bergbaus müssen die entstandenen Flächen rekultiviert werden, um sie einer Folgenutzung zuführen zu können. Der Fortschritt der Rekultivierung muss dabei einem kontinuierlichen Monitoring unterliegen, wofür Methoden der Fernerkundung geeignete Mittel darstellen (u.a. BIRGER (2002), GLÄBER et al. (2004)).

2 Problemstellung und Zielsetzung

Die Verfügbarkeit von hyperspektralen Fernerkundungsdaten hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Dies hat eine schnelle Weiterentwicklung der Auswertungsmethoden beispielsweise zur Veränderungsdetektion zur Folge. Auf lange Zeitreihen konnte dabei bisher kaum zurückgegriffen werden. Für diese Arbeit stand jedoch eine Zeitreihe von gleichartigen Datensätzen des selben Gebietes für fünf Zeitpunkte aus elf Jahren zur Verfügung. Da die Daten im Rahmen von Befliegungskampagnen für verschiedene Forschungsprojekte erhoben wurden, weisen sie qualitative Unterschiede durch die jeweiligen projektspezifischen Anforderungen und unterschiedliche Vorprozessierungen auf. In Praxisanwendungen ist dies häufig der Fall. Da sich das Untersuchungsgebiet durch eine sehr heterogene und ungeplant sprunghaft verändernde Landbedeckung auszeichnet, sind multispektrale Satellitendaten mit Auflösungen von

1) Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Fachgebiet Geofernerkundung und Thematische Kartographie, Von-Seckendorff-Platz 4, 06120 Halle; E-Mail: henning.gerstmann@geo.uni-halle.de

über 10 m für ein detailliertes Monitoring nicht geeignet. Daten mit höherer räumlicher und spektraler Auflösung werden diesem Problem durch höhere geometrische und spektrale Auflösungen eher gerecht. Die meisten existierenden *Change-Detection*-Verfahren wurden allerdings für Multispektraldaten oder zur Detektion von scharf abgegrenzten Veränderungen (bspw. Bebauung, bewegliche Objekte) entwickelt. Die Übergänge zwischen ökologischen Zuständen verlaufen jedoch oftmals fließend. Die verfügbare Zeitreihe bietet somit die Möglichkeit für die Untersuchung des Nutzungspotenzials und der erforderlichen Anpassungen grundlegend verschiedener Methoden der *Change Detection* mit hyperspektralen Fernerkundungsdaten für ökologische Fragestellungen, auch bei qualitativ unterschiedlichen Eingangsdaten.

3 Untersuchungsgebiet

Die Bergbaufolgelandschaft Goitzsche befindet sich ca. 30 km nordöstlich von Halle (Saale) bei Bitterfeld in Sachsen-Anhalt. Die Region weist ein trockenes, gemäßigttes Übergangsklima auf. Für die Untersuchungen wurden drei Abraumhalden als Testflächen ausgewählt, auf denen natürliche Sukzession unter unterschiedlichen Bedingungen ablaufen konnte (BIRGER 2002). Die Vegetationsentwicklung umfasst sowohl Verdichtung, Verbuschung und Artenverdrängung als auch Vernässung, Überflutung und Neubewuchs ehemals vegetationsfreier Substrate.

4 Materialien und Methoden

4.1 Datengrundlage

Es standen fünf Datensätze des flugzeuggestützten, abbildenden Spektrometers HyMap (HYVISTA, 2013) zur Verfügung, die in den Jahren 1998, 2000, 2003, 2008 und 2009 aufgenommen wurden. Der Sensor zeichnet die Intensität der reflektierten Strahlung mit einer geometrischen Auflösung zwischen 3 m und 8 m in 125 Spektralkanälen im Wellenlängenbereich zwischen 450 nm und 2500 nm auf. Die Messung erfolgt mit einer Streifenbreite von 512 Pixel in Whiskbroom-Technik.

Für thematische Analysen wurden außerdem Daten des Grundwasserflurabstandes, phänologische Sofortmelderdaten sowie Temperatur- und Niederschlagsdaten herangezogen.

Als Referenzdaten konnte auf Landbedeckungsklassifikationen von BIRGER (2002) und GLÄBER et al. (2004) zurückgegriffen werden.

4.2 Vorprozessierung und Klassifikation

Die Vorprozessierung umfasste die geometrische und radiometrische Vereinheitlichung der Datensätze sowie die Georeferenzierung und Reduktion des sensorbedingten Rauschens. Der älteste Datensatz wurde einer radiometrischen Normalisierung unterzogen (CANTY et al., 2004), die übrigen waren bereits atmosphärisch korrigiert. Anschließend erfolgte eine *Land-Cover*-Klassifikation. Hierbei wurden Wasserflächen, vegetationsfreie Substrate, artenreiche und artenarme Sandtrockenrasen (STR), Nadel- und Laubwald sowie von Vernässung geschädigte Vegetationsflächen unterschieden. Als Klassifikationsalgorithmus wurde der *Support-Vector-Machines*-Ansatz in der Softwareumgebung ENVI 4.7 (EXELIS VIS, 2009) genutzt.

4.3 Methoden der Veränderungsanalyse

Es wurden vier Verfahren der *Change Detection* angewandt. Dabei kamen sowohl muster- als auch pixelbasierte Verfahren zum Einsatz. Die Umsetzung erfolgte in ENVI 4.7+IDL.

4.3.1 Feature Space Analysis

Die *Feature Space Analysis* (FESPA) wurde von BIRGER (2002) entwickelt. Sie verschneidet die ausgewiesenen Landbedeckungstypen aus den Klassifikationen der unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte miteinander und stellt die Veränderungsrichtung im Merkmalsraum dar. Das Verfahren ermöglicht somit die quantitative und qualitative Detektion von Veränderungen.

4.3.2 Iteratively Reweighted Multivariate Alteration Detection (IR-MAD) und Maximum Autocorrelation Factor (MAF)

Das von NIELSEN & CONRADSEN (1997) vorgestellte MAD-Verfahren berechnet über Linearkombinationen der Eingangsdatensätze so genannte kanonische Variablen, welche die maximal mögliche Korrelation zwischen den betrachteten Datensätzen aufweisen. Nach Subtraktion der kanonischen Variablen voneinander werden Bereiche mit hohen Differenzen als Veränderungen der Landbedeckung aufgefasst. Eine Verbesserung der Ergebnisse wird durch eine iterative Anpassung der Linearfaktoren (*Iteratively Reweighted MAD / IR-MAD*) erzielt (NIELSEN, 2005). Um das Rauschen im Veränderungsbild zu verringern, wird anschließend eine weitere Transformation (*Maximum Autocorrelation Factor / MAF*) durchgeführt, die die Autokorrelation zwischen benachbarten Pixeln maximiert (NIELSEN et al., 1998).

4.3.3 Chronochrome (CC) und Covariance Equalization (CE)

Die beiden pixelbasierten Verfahren CC und CE wurden von SCHAUM & STOCKER (1998, 2003) zur Detektion von Subpixel-Veränderungen entwickelt. Durch die Bestimmung von Kovarianz (für CE und CC) und Kreuzkovarianz (für CC) der als Vektoren aufgefassten Pixelspektren eines Datensatzes wird der Datensatz eines anderen Zeitpunktes simuliert. Unterschiede zum tatsächlich aufgenommenen Datensatz des zweiten Zeitpunktes, die einen Schwellenwert überschreiten, werden als Veränderungen aufgefasst.

4.4 Analyse der Umweltfaktoren

Phänologische und klimatische Unterschiede sowie saisonal verschiedene Aufnahmezeitpunkte der HyMap-Daten erschweren die Trennung speziell der sehr ähnlichen spektralen Signaturen der Rasenflächen. Dies hat besonders bei den nur Pixelspektren betrachtenden Methoden eine erhöhte Fehleranfälligkeit zur Folge. Die Ähnlichkeiten der Mittelwerte der Klassenspektren wurden unter Zuhilfenahme von *Spectral Angle Mapper* (KRUSE, 1993) und *Tetracorder*-Verfahren (CLARK et al., 2003) abgeschätzt und mithilfe des Eintrittsdatums spezieller phänologischer Phasen sowie des Vorwetters interpretiert.

Der Wiederanstieg des Grundwassers wurde mit den Intensitäten der detektierten spektralen Veränderungen korreliert um eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen.

5 Ergebnisse und Interpretation

5.1 Ergebnisse der Veränderungsdetektion

Es konnte gezeigt werden, dass keines der untersuchten Verfahren für die Ausweisung aller Veränderungstypen optimal geeignet ist. Für die Detektion von Neubewuchs offener Substrate erzielte der IR-MAD/MAF-Ansatz die besten Ergebnisse. Bei der frühzeitigen Detektion vernässungsbedingter Veränderung erwies sich die CE als leistungsfähig. FESPA hat durch die Verschneidung mehrerer Ergebnisse separat durchgeführter Prozessierungen eine höhere Fehleranfälligkeit als die unüberwachten Methoden. Abbildung 1 stellt eine gegenüber Datenheterogenitäten robuste Prozesskette dar, die die genutzten Verfahren mit der besten Eignung für bestimmte Veränderungstypen zusammenführt, um einen wissensbasierten Rahmen als Grundlage für ein möglichst effektives Monitoring zu schaffen.

Die Ergebnisqualität hängt stark von der Qualität der Eingangsdaten ab. Bereits geringe geometrische Ungenauigkeiten, unterschiedliche Pixelgrößen, Datenlücken und unterschiedliche atmosphärische Korrekturen vermindern die Ergebnisgüte beträchtlich. Als besonders anfällig hierfür stellte sich die CC-Methode heraus, da zwei komplexe statistische Berechnungen (Kovarianz, Kreuzkovarianz) in die Simulation des zweiten Datensatzes eingehen. Bei der methodisch ähnlichen CE-Methode hingegen wird nur die Kovarianz des Vektors mit einbezogen. Sie ist dadurch robuster.

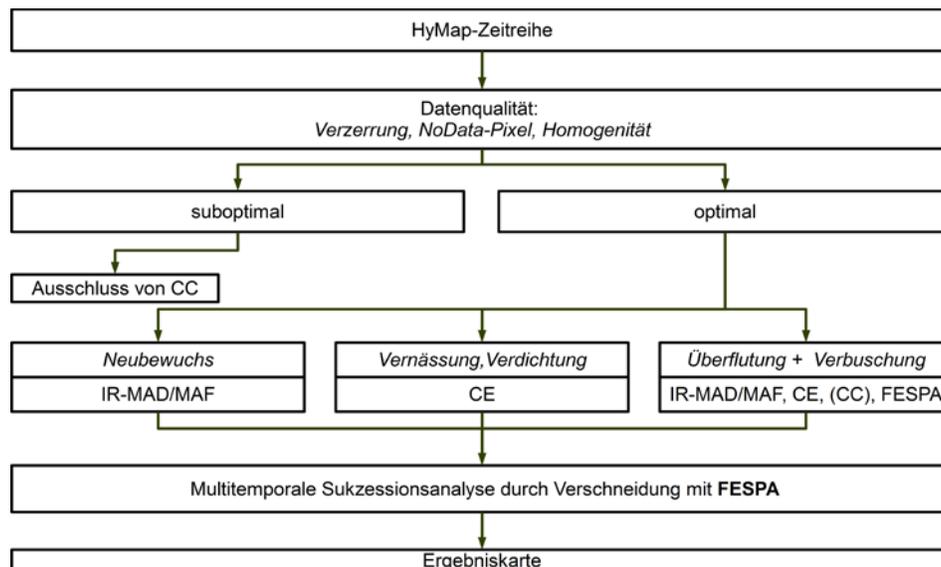


Abbildung 1: Vorgehensweise zur Sukzessionsanalyse und optimale Methoden für die Ausweisung verschiedener Veränderungstypen

Durch Verschneidung der Ergebnisse der unüberwachten Verfahren (CE, CC, IR-MAD/MAF) mit denen der FESPA wurde eine thematische Analyse der detektierten Veränderungen durchgeführt (Abb. 2). Dadurch konnten die Sukzessionsprozesse in Bezug auf veränderte Standortbedingungen analysiert und abgebildet werden. Ansteigendes Grundwasser stellt hierfür den wirksamsten Einfluss dar.

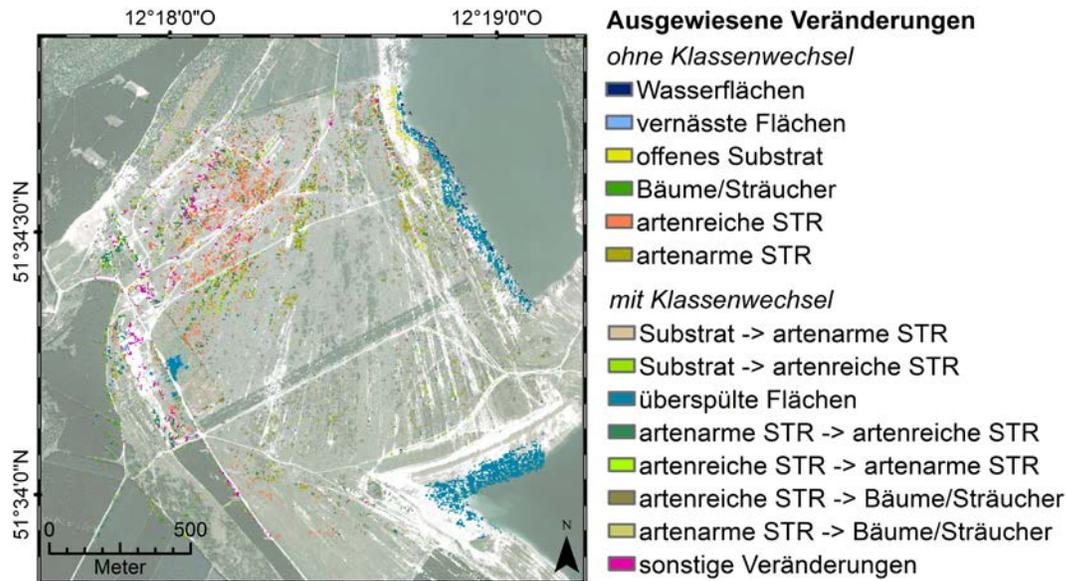


Abbildung 2: Veränderungen auf der Halde Petersroda zwischen 2000 und 2003. Die Ausweisung der Veränderungen erfolgte durch Covariance Equalization, die Klassifikation mit den Ergebnissen der FESPA. (STR=Sandtrockenrasen. Projektion: UTM Zone 33 N, WGS 84)

5.2 Validierung der Ergebnisse

Die Übereinstimmung zwischen Flächen bekannter Landbedeckung aus den Referenzdaten und den SVM-Klassifikationen liegt zwischen 87 % und 99 %. Die Veränderungsanalysen erzielten Genauigkeiten zwischen 72 % und 97 % bei der Ausweisung bekannter Veränderungen. Dabei wies die CE-Methode die höchsten, die FESPA die niedrigsten Genauigkeiten auf.

6 Fazit und Ausblick

Rechenintensive, komplexe Algorithmen zur Veränderungsdetektion, die meist für die Detektion scharf abgegrenzter Veränderungen entwickelt wurden, lassen sich auch für ein ökologisches Langzeitmonitoring mit heterogener Datenbasis anpassen und anwenden.

Mit einer Kombination verschiedener Ansätze je nach Landbedeckung der veränderten Flächen lassen sich Veränderungen mit hohen Genauigkeiten ausweisen. Eine Verschneidung mit Geländeinformationen und Ergebnissen der FESPA-Methode ermöglicht die Analyse von Sukzession von Pionierarten mit hoher Detailliertheit hinsichtlich der Standortbedingungen.

Die Güte der Ergebnisse von hyperspektralen *Change-Detection*-Verfahren in heterogenen, sich dynamisch verändernden Landschaften hängt stark von der Qualität der Eingangsdaten ab. Diese variiert nicht nur durch sensorbedingte Unterschiede, sondern auch durch unterschiedliche Methoden der geometrischen und atmosphärischen Korrektur. Eine Standardisierung der Vorverarbeitungsmethoden würde bei der zu erwartenden Weiterentwicklung der hyperspektralen Fernerkundung, speziell durch den geplanten satellitengestützten Sensor EnMap, die Ergebnisse eines Langzeitmonitorings deutlich verbessern. Dies würde außerdem die Nutzbarkeit für Anwender mit geringerer technischer und finanzieller Ausstattung erhöhen, da diese zurzeit oftmals nicht über vergleichbare Ressourcen verfügen wie Großforschungseinrichtungen.

7 Literaturverzeichnis

- BIRGER, J., 2002: Multisensorale und multitemporale Fernerkundungsdaten zur Erfassung, Differenzierung und Veränderungsanalyse ausgewählter Vegetationsstrukturen der Bergbaufolgelandschaft Mitteldeutschlands. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- CANTY, M. J., NIELSEN, A. A. & SCHMIDT, M., 2003: Automatic Radiometric Normalization of Multitemporal Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 91 (34), S. 441-451.
- CLARK, R. N., SWAYZE, G. A., LIVO, K. E., KOKALY, R. F., SUTLEY, S. J., DALTON, J. B., MCDUGAL, R. R. & GENT, C. A., 2003: Imaging Spectroscopy: Earth and Planetary Remote Sensing with the USGS Tetracorder and Expert Systems. *Journal of Geophysical Research*, 108 (E12), S. 1-44.
- EXELIS VISUAL INFORMATION SOLUTIONS, 2009: Environment for Visualizing Images. URL: <http://www.exelisvis.com/ProductsServices/ENVIPProducts.aspx>
- GLÄBER, C.; BIRGER, J. & ETZRODT, N., 2004: Begutachtung der Vernässungen und Vegetationsänderungen im Bereich Petersroda: Projekt-Endbericht. Projektauftraggeber: Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH. Halle.
- HYVISTA CORPORATION, 2013: Sensors: HyMap Hyperspectral Scanner. URL: http://www.hyvista.com/?page_id=275. Letzter Zugriff: 13.11.2013
- KRUSE, F. A., 2003: The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, 44 (2-3), S. 145-163.
- NIELSEN, A. A. & CONRADSEN, K., 1997: Multivariate Alteration Detection (MAD) in Multispectral, Bitemporal Image Data: New Approaches in Change Detection Studies. Technical Report, Department for Informatics and Mathematic Modeling, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, IMM-REP-1997-11. Online verfügbar unter: <http://www2.imm.dtu.dk/pubdb/p.php?3092>
- NIELSEN, A. A., CONRADSEN, K. & SIMPSON, J. J., 1998: Multivariate Alteration Detection (MAD) and MAF Postprocessing in Multispectral, Bitemporal Image Data: New Approaches in Change Detection Studies. *Remote Sensing of Environment*, 64, S. 1-19.
- NIELSEN, A. A., 2005: An iterative extension to the MAD transformation for change detection in multi- and hyperspectral remote sensing data. In: *Proceedings of the 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*. Hrsg.: Zagajewski, B.; Sobczak, M. & Wrzesień, M.
- SCHAUM, A. & STOCKER, A., 1998: Long-interval Chronochrome Target Detection. In: *Proceedings of the International Symposium on Spectral Sensing Research*.
- SCHAUM, A. & STOCKER, A., 2003: Linear Chromodynamics Models for Hyperspectral Target Detection. In: *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, 4, S. 1897-1885.