

Reduktion von Rohstoffimporten durch Wertstoffgewinnung aus Hüttenhalden

– Entwicklung eines multiskalaren Ressourcenkatasters für Hüttenhalden –

Michael Jandewerth, Michael Denk, Cornelia Gläber, Asja Mrotzek und Sebastian Teuwsen

1.	Projektvorstellung	640
2.	Multiskalares Ressourcenkataster	640
2.1.	Übersichtskataster	642
2.2.	Ressourcenkataster der mittleren Maßstabsebene	643
2.3.	Ressourcenkataster für einen Haldenstandort	644
3.	Methoden der Fernerkundung	648
3.1.	Haldendetektion auf Ebene des Übersichtskatasters.....	648
3.2.	Optische Fernerkundungsmethoden zur Haldenanalyse auf regionaler und lokaler Ebene.....	651
3.2.1.	Hintergrund.....	651
3.2.2.	Multispektrale Satellitenfernerkundung zur Haldenanalyse auf mittlerer Maßstabsebene.....	652
3.2.3.	Reflexionsspektrometrie und hyperspektrale Fernerkundung auf Ebene des Haldenstandorts	652
4.	Ausblick.....	654
5.	Quellen	656

Für die Herstellung einer Vielzahl von Hightech-Produkten aber auch für die Entwicklung von Zukunftstechnologien ist Deutschland auf die Versorgung mit unterschiedlichen Rohstoffen durch Importe angewiesen [1]. Zur Minimierung dieser Importrisiken bildet die Exploration nicht genutzter anthropogener Lagerstätten, die signifikante Mengen von teilweise wirtschaftsstrategischen Metallen enthalten, einen wichtigen Baustein. Hierzu gehören auch Hüttenhalden für Reststoffe wie Stäube, Schlämme, nicht verwertete Schlacken und anderen Hüttenschutt aus der Roheisen- und Stahlerzeugung [2].

Die technische Machbarkeit steht prinzipiell nicht in Frage, es fehlt jedoch detailliertes Wissen über die Verteilung, Zusammensetzung und Qualität der deponierten Materialien, so dass als künftiges Forschungs- und Handlungsfeld, die Entwicklung eines Systems zur Erfassung und wirtschaftlichen Charakterisierung von Hinterlassenschaften des Bergbaus und der Hüttenindustrie gefordert wird [2].

1. Projektvorstellung

Zentrales Ziel des Projekts *REStrateGIS*¹ ist die Schließung der Datenlücken über Wertstoffpotenziale in Halden in Form eines Ressourcenkatasters, mit dem sich das Wertstoffvorkommen in Hüttenhalden aufzeigen lässt. Zur Erreichung des Ziels sollen relevante Stoffströme wirtschaftsstrategischer, metallischer Rohstoffe identifiziert werden, die in der Vergangenheit auf Hüttenhalden deponiert wurden. Das Projekt wird gefördert im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme *r³ Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien* und hat eine Laufzeit von August 2012 bis Juli 2015.

Einhergehend mit der Entwicklung der Datenbasis über die Hüttenhalden in Deutschland werden im Projekt wissenschaftlich-technisch innovative Labormethoden und Methoden der Fernerkundung zur Detektion und Klassifikation von Hüttenhalden und ihren Wertstoffen adaptiert und prototypisch angewandt. Diese Methoden werden anhand von Archivdaten und der Detailbetrachtung einer Halde validiert, wobei die Ergebnisse in das Ressourcenkataster einfließen werden. Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Ressourcenkataster werden Konzepte zur Rückgewinnung der Wertstoffe beschrieben, analysiert und bewertet. Gepaart mit einer Hemmnisanalyse sollen anschließend Verwertungsstrategien mit Vertretern aus Industrie und Wissenschaft ermittelt werden. Durch die sich ergänzenden Kompetenzen der beteiligten Partner kann so ein entscheidender Beitrag zur Verbesserung der Rohstoffsituation in Deutschland hinsichtlich wirtschaftsstrategischer Metalle geleistet werden. Das Konsortium wird koordiniert von Fraunhofer UMSICHT und bearbeitet mit den Partnern Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, EFTAS GmbH und FEhS e.V. das Projekt in einem inter- sowie transdisziplinären Ansatz. Um Synergieeffekte zu nutzen, ist *REStrateGIS* zusammen mit den Projekten *ROBEHA* [27] und *SMSB* [28] Teil eines Miniclusters. Das Minicluster zum Thema Halden soll in Zukunft Daten zu Bergbau-, Schlacke- und Hüttenhalden, in einer zunächst deutschlandweiten Datenbank, nach einheitlichen und internationalen Standards exemplarisch zusammentragen. Die Datenbank wird durch ein Methodenhandbuch ergänzt, indem alle Schritte zu einer erfolgreichen Bewertung und ökonomischen sowie ökologischen Aufarbeitung von Haldenmaterial zusammengefasst werden.

2. Multiskalares Ressourcenkataster

Grundsätzlich hat die Fragestellung zur Wiedergewinnung von Wertstoffen aus Halden einen ausgeprägten räumlichen Bezug. Dieser zeigt sich sowohl im kleinmaßstäblichen Bereich, wie etwa der räumlichen Verteilung der Halden über das Bundesgebiet, als auch im großmaßstäblichen Bereich, wie der Verteilung der Wertstoffe innerhalb eines

¹ Langtitel: *Konzeption und Entwicklung eines Ressourcenkatasters für Hüttenhalden durch Einsatz von Geoinformationstechnologien und Strategieentwicklung zur Wiedergewinnung von Wertstoffen* – www.ressourcenkataster.de

Haldenkörpers. Die räumliche Information auf unterschiedlichen Skalenebenen z.B. zur Lage oder Größe der Halde, den Standortgegebenheiten, dem Umfeld sowie der Zusammensetzung des Haldenkörpers sind von essentieller Bedeutung, so dass das Ressourcenkataster eine Komponente zur Verwaltung und Visualisierung der räumlichen Aspekte benötigt. Daher wird ein webbasiertes Geoinformationssystem (GIS) als Basistechnologie für das Ressourcenkataster genutzt. Zur softwaregestützten Verarbeitung raumbezogener Daten (Geodaten) eignen sich Geoinformationssysteme in besonderer Weise. Geoinformationssysteme umfassen dabei diverse Funktionalitäten zur Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation von Geodaten. Ein GIS ist in Abgrenzung zu sonstigen Informationssystemen auf Geodaten² spezialisiert. Sie bieten die Möglichkeit, jeder beliebigen geometrischen Form der Erdoberfläche kontextspezifische Sachinformationen unterschiedlichster Art zuzuordnen. Üblicherweise werden Geodaten in einem GIS als Themen bzw. Layer organisiert. Bei gleichem Raumbezug lassen sich die einzelnen Schichten überlagern und in einem gemeinsamen Kontext analysieren [3]. Durch die Überlagerung bzw. Kombination mehrerer Schichten und die Integration von Sachdaten aus Datenbanken lässt sich somit ein Informationsgewinn ableiten.

Das geplante Ressourcenkataster verfolgt einen multiskalaren Ansatz und setzt sich aus drei Komponenten zusammen, die auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen arbeiten (Bild 1). Dabei wird neben der räumlichen Auflösung auch die inhaltliche Darstellungstiefe von Ebene zu Ebene erhöht. Betrachtet das Übersichtskataster Halden unterschiedlicher Technologiezweige (Bergbau und Hüttenwesen), so werden auf der regionalen und untersten Ebene im Ressourcenkataster schwerpunktmäßig Halden der Eisen- und Stahlindustrie betrachtet.

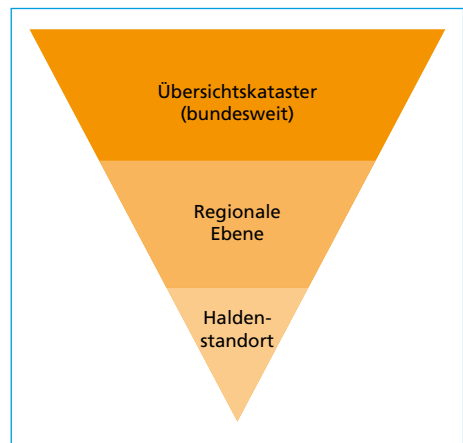


Bild 1: Skalenebenen des Ressourcenkatasters

Zur Erstellung des Ressourcenkatasters werden für die einzelnen Skalenebenen unterschiedliche Methoden und Datengrundlagen herangezogen. Auf jeder Ebene finden fernerkundliche Arbeiten und Rechercharbeiten (Literaturauswertung, Experteninterviews) zur Generierung von Zusatz- bzw. Referenzdaten statt.

² Geodaten sind digitale Informationen, welchen auf der Erdoberfläche eine bestimmte räumliche Lage, etwa über ein Koordinatensystem, zugewiesen werden kann. Sie können unmittelbar gewonnene Primärdaten oder bereits bearbeitete Sekundärdaten sein. Geodaten gliedern sich in die Geobasisdaten, die in der Regel von den Vermessungsverwaltungen der Länder oder der Kommunen bereitgestellt werden und den Geofachdaten, die aus unterschiedlichen raumbezogenen Fachdatenbanken stammen. Sie werden in einem Geoinformationssystem gemeinsam geführt. Eine weitverbreitete Objektmodellierung in Geoinformationssystemen besteht darin, Geodaten einerseits mit ihrer geometrischen Form, andererseits mit der zugehörigen Sachinformation (Attribute) abzulegen. Letztere können sich auch mit einer Referenz auf das geometrische Objekt beziehen.

Für die Nutzung der Fernerkundungsdaten werden skalenspezifische Methoden zur Haldendetektion und -charakterisierung entwickelt und angewendet. Dabei werden Daten unterschiedlicher Sensoren mit verschiedenen geometrischen und spektralen Auflösungen verwendet. Im Rahmen der Ermittlung von weiteren Daten zur Haldenthematik werden vorhandene Archive und (Geo-)Datenbanken bei den mit der Thematik befassten Stellen gesichtet und in Abstimmung mit Datenschutzbestimmungen ausgewertet. Die Auswertung erfolgt dabei mit einem skalenspezifischen Detaillierungsgrad. Abschließend finden auch Ergebnisse aus den Arbeiten der Schwesterprojekte im Minicluster Eingang in das Ressourcenkataster.

Tabelle 1: Übersicht der Skalenniveaus des Ressourcenkatasters

Skalenniveau	Detaillierungsgrad	Fernerkundung	Zusatzdaten	Zielaussage
Übersichtskataster	Deutschlandweit: niedrige räumliche Auflösung und inhaltliche Detailtiefe	Ersterfassung von Halden auf Basis von kostenlosen, weltweit verfügbaren Radar-daten u. dem ASTER GDEM; Methodenentwicklung und -anwendung exemplarisch in Testregion, stellvertretend für Bundesebene	Archivdaten der Landesbehörden, Minicluster	Erstinventarisierung der Halden in Deutschland mit Übersichtsfunktion
Regionale Ebene	Testregionen: mittlere räumliche und inhaltliche Auflösung	Mittelsmaßstäbige Oberflächenanalyse mittels multispektraler Satellitendaten sowie Generierung der Haldengeometrie mittels Airborne Laser-scanner (ALS)-Daten	Raumbezogene Regionalanalyse der Hütten-geschichte	Regionale Aussagen; Mittelsmaßstäbige Charakterisierung der Haldengeometrien, Oberflächen und Zusammensetzung
Haldenstandort	Modellhalde: hohe räumliche Auflösung und Detailbeschreibung	Generierung multitemporaler Geländemodelle zur Genese der Haldenentwicklung mittels Stereoluft-bildern und ALS-Daten Stoffliche Analysen einer Modellhalde mittels Labor- u. Feldspektrometrie sowie abbildender hyperspektraler terrestrischer und Flugzeug-scannerdaten	Historische Verfahrens und Standort-analyse; Feststoff-analytik und Bestimmung der mineralischen Zusammensetzung von Haldenmaterial	Umfassende Beschreibung der Modellhalde als planerische Grundlage für Rückgewinnung; Rekonstruktion der Haldenaufbaus in 3D

2.1. Übersichtskataster

Das Übersichtskataster wird als WebGIS-Applikation realisiert. Das WebGIS ist eine internetbasierte Kartenapplikation und bietet die Möglichkeit räumliche Zusammenhänge klar, einfach sowie optisch ansprechend zu visualisieren. Dabei wird eine überblicks-artige, kartographische Darstellung der Halden unterschiedlicher Technologie-zweige des Bergbaus und Hüttenwesens anvisiert. Es dient letztendlich einer ersten Übersicht, Bestandsaufnahme und Dokumentation der Haldenlandschaft in Deutschland und stellt somit eine erste Wissensbasis für die Potenziale der Wertstoffrückgewinnung dar.

Der Workflow zur Erstellung des Übersichtskataster ist in Bild 2 dargestellt.

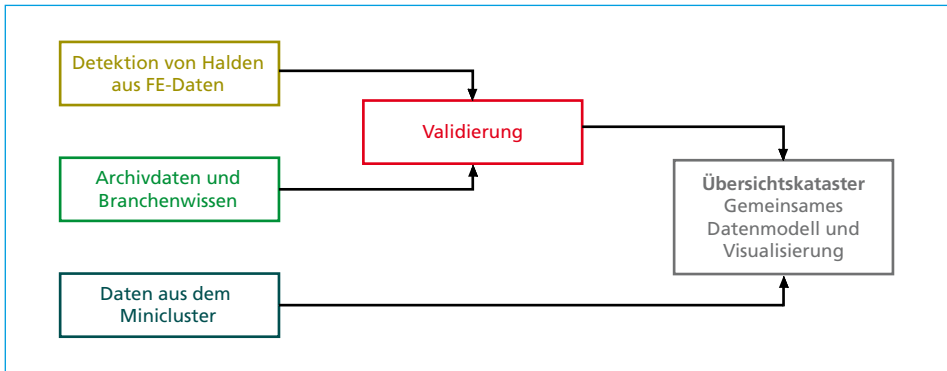


Bild 2: Workflow zur Erstellung des Übersichtskatasters

Im Projekt erfolgt für die Ebene des Übersichtskatasters die parallele Methodenentwicklung zur Datenrecherche und zur Auswertung der Fernerkundungsdaten (siehe Abschnitt 3.1). In Bezug auf die Archivdaten zeigt sich bereits zum jetzigen Zeitpunkt, dass die Datenverfügbarkeit und -qualität zwischen den einzelnen Landesbehörden sehr heterogen ist. Einige Länder (NRW, Saarland) führen bereits digitale Geodatenbestände über Halden, teilweise liegen diese aber nur unvollständig vor. Die Beschreibung der Halden über weitere Sachdaten ist ebenfalls unterschiedlich ausgeprägt.

Die nutzbaren Archivdaten werden zur Validierung der Ergebnisse der fernerkundlichen Arbeiten herangezogen. Dieser Schritt erfolgt durch die Verschneidung (räumliche Überlagerung) der beiden Datensätze, mit dem Ziel validierte Haldengeometrien für das Übersichtskataster zu ermitteln. Komplettiert wird das Übersichtskataster durch Daten aus den Schwesterprojekten des Miniclusters. Die weitere Herausforderung besteht darin, aus den unterschiedlichen Datenbeständen ein gemeinsames Datenmodell für das Übersichtskataster zu erzeugen.

In Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit bzw. Geheimhaltungsvereinbarungen wird eine punktuelle oder flächenhafte Darstellung der Halden auf der Karte angestrebt. Ein WebGIS bietet hierzu verschiedene Möglichkeiten der Visualisierung. Die Halden lassen sich in der Applikation z.B. auf Basis des Technologiezweigs kodieren oder in der Darstellungsgröße nach möglichen Wertstoffgehalten variieren. Als Visualisierungsgrundlage dienen Attribute die in der Mindestanforderung u.a. den Haldentyp, Technologiezweig, Größe sowie Eigentumsverhältnisse umfassen. Implementiert wird das Übersichtskataster auf Basis von OpenSource GIS-Technologien. Die Datenintegration folgt dabei den Standards des Open Geospatial Consortium (OGC).

2.2. Ressourcenkataster der mittleren Maßstabsebene

Für das Ressourcenkataster auf mittlerer Maßstabsebene steht die Region als Betrachtungsebene im Fokus. Für zwei Regionen in Deutschland (westliches Ruhrgebiet und

ein Ausschnitt im Saarland) erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Hüttenhistorie. Im Fokus stehen die Hüttenstandorte und die zeitliche Entwicklung der Verfahren. Durch Experteninterviews und Literaturrecherchen wird die Geschichte raumbezogen aufgearbeitet. Ziel ist die Abbildung der Stoffströme zur Eisen- und Stahlproduktion und soweit möglich, die Abbildung der Halden in einer höheren räumlichen Auflösung. Die geometrische Darstellung erfolgt auf dieser Maßstabsebene als Fläche (Polygon). Auch die attributive Beschreibung der Halden wird im Rahmen einer regionalen Stoffstromanalyse vertieft. Ferner erfolgt auf dieser Ebene die Integration der Auswertung multispektraler Satelliten-Fernerkundungsdaten (siehe Kapitel 3.2).

2.3. Ressourcenkataster für einen Haldenstandort

Die höchste räumliche Auflösung wird auf Ebene eines einzelnen Haldenstandorts erreicht. Als Modellhalde für das Projekt dient die Halde am Standort der Stahlwerk Thüringen GmbH im Industrie- und Gewerbegebiet Maxhütte Unterwellenborn, Landkreis Saalfeld-Rudolstadt, Freistaat Thüringen.

Das Ressourcenkataster wird auf dieser Ebene gemäß dem eingangs genannten Layermodell erstellt (Bild 3). Auf diese Weise ergibt sich die Möglichkeit der Überlagerung und Verschneidung der einzelnen Layer im Ressourcenkataster. Zu den wichtigsten Layern im Kataster gehören:

- das Ergebnis der historischen Verfahrens- und Standortanalyse,
- die Ergebnisse der Beprobungen und geochemischen Analytik,
- die Ergebnisse punktueller Spektralmessungen sowie abbildender terrestrischer und flugzeuggestützter hyperspektraler Aufnahmen, Luftbilder aus unterschiedlichen Zeiträumen,
- sowie digitale Geländemodelle aus Airborne Laserscanner Daten und Stereoluftbildern aus unterschiedlichen Zeiträumen.

Mit den einzelnen Layern werden unterschiedliche Datengrundlagen visualisiert. Ein umfangreiches Methodenset wird für die Datensammlung angewendet. Bild 3 gibt einen Überblick über die Methoden und Layer des Ressourcenkatasters.

Die Orthophotos und Luftbilder werden von externen Quellen bereitgestellt und in das Kataster eingebunden. Für die Verfahrens- und Standortanalyse liegen erste Zwischenergebnisse vor.

Digitales Geländemodell

Eine Halde zeichnet sich als dreidimensionales Objekt im Raum aus. Zur raumbezogenen Abbildung der Halden im GIS wird auf digitale Geländemodelle (DGM) zurückgegriffen. Ein digitales Geländemodell beschreibt die Geländeoberfläche ohne Bewuchs und Gebäude [3]. Mittels Laserscanner-Daten lassen sich hochauflösende Geländemodelle produzieren, wodurch es möglich ist den Haldenkörper räumlich

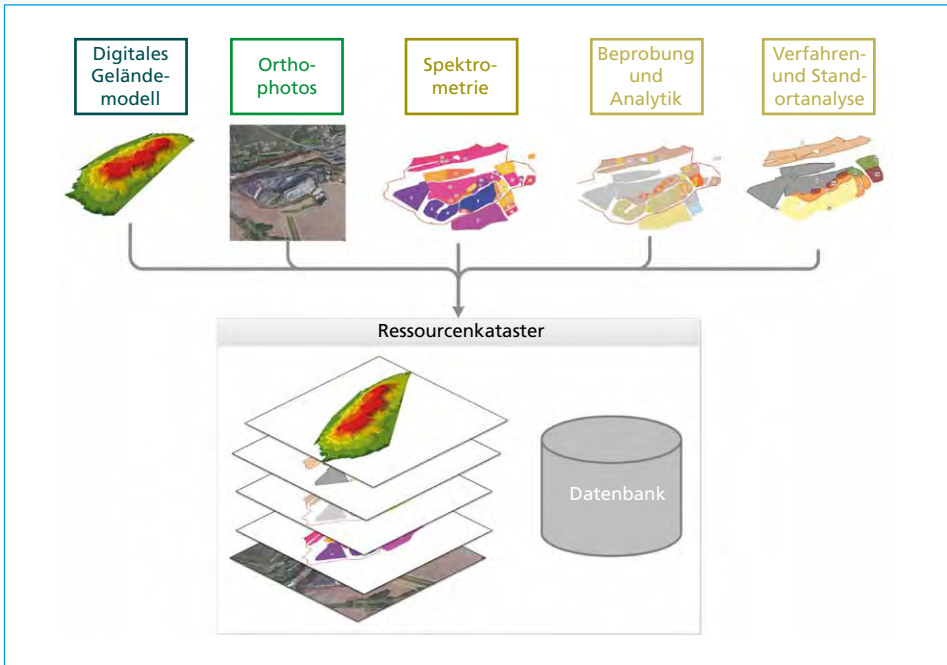


Bild 3: Layermodell des Ressourcenkatasters

als 3-dimensionalen Körper darzustellen, Volumenberechnungen durchzuführen und in Verbindung mit der Standortgeschichte die Internstruktur des Haldenkörpers zu modellieren.

Verfahren und Standortanalyse

Schon seit 1872 ist Unterwellenborn Standort der Eisen- und Stahlproduktion. Die Geschichte beginnt mit der Errichtung des ersten Eisenwerks 1872. Im Jahre 1873 wurde der erste Hochofen erbaut, 1878 folgte der zweite Hochofen. Zeitgleich wurde ein Bessemer-Stahlwerk mit zwei 5 Tonnen Konvertern errichtet. Durch den Bau des Stahlwerkes war der Standort Unterwellenborn der zweite Betrieb, welcher mit der Technologie der direkten Konvertierung arbeitete.

Nachdem 1882 ein dritter Hochofen sowie Cowper-Winderhitzer gebaut wurden, erfolgte in den Jahren 1896 bis 1898 die Modernisierung der Hochöfen. Schon zu Beginn der 1880er Jahre zeichnete sich eine Veränderung der Erzqualitäten mit Folgen für das Werk in Unterwellenborn ab. Am Standort Unterwellenborn wurden bisher phosphorarme Eisenerze aus dem nahegelegenen Kamsdorfer Revier verhüttet. Die Vorräte nahmen ab und zeitgleich wurden neue, jedoch phosphorreiche Erzvorkommen erschlossen. Dem Bessemer-Verfahren (für phosphorarmes Roheisen) wurde somit die Rohstoffbasis entzogen. Mit der Stilllegung des Bessemer-Stahlwerks 1898 begann eine Zeit in dem nur die Hochöfen betrieben wurden. In diesen wurden Thomas-Roheisen aus Schmiedefelder Erzen, versetzt mit Kalkzuschlägen aus dem Kamsdorfer Revier, erzeugt.

Der Bau des Thomas-Stahlwerkes (für phosphorreiches Roheisen) begann 1923. In Produktion konnte der metallurgische Zyklus aus Hochofen, Stahl- und Walzwerk erstmals 1934 gehen. Vier Konverter mit jeweils 14 Tonnen Fassungsvermögen produzierten Thomas-Stahl und Thomas-Schlacke, die in der Mühle zu Düngern gemahlen wurde. Der nächste, wichtige technologische Schritt war die Errichtung eines Elektrostahlwerkes mit zwei Schmelzöfen in den Jahren 1937 und 1938, die insbesondere Qualitätsstähle für die Rüstung produzierten.

Die Nachkriegszeit war vom Wiederaufbau und der Wiederinbetriebnahme der Hochöfen, der Elektroöfen, des Thomas-Stahlwerks und des Walzwerks geprägt. 1951 wurde ein Niederschachtofen in Betrieb genommen, der einheimischen Brennstoff auf Braunkohlebasis und relativ arme Eisenerze nutzte. Er blieb bis 1968 in Betrieb. Für den Betrieb der Hochöfen und die effektive Ausnutzung heimischer Rohstoffe war ferner die 1949 errichtete Erzsinteranlage von hoher Bedeutung. Im Sinterprozess konnten zuvor nicht nutzbare Einsatzstoffe (Feinerze) agglomeriert werden und durch ein Vorreduzieren die physikochemischen Eigenschaften für den Hochofenprozess verbessert werden. Ein weiteres Verfahren zur Erzaufbereitung wurde mit dem Bau einer Rennanlage realisiert. Ziel war es auch hier eisenarme Erze mit weiteren Einsatzstoffen zu Luppen und damit für den Einsatz im Hochofen zu verarbeiten.

Im Thomas-Stahlwerk wurde zur Steigerung der Produktionsmengen und insbesondere zur Verbesserung der Stahlqualitäten Mitte der 1970er Jahre auf das bodenblasende Sauerstoffkonverterverfahren umgestellt. In diesem Zusammenhang wurde auch eine Nassentstaubung für die Konverter installiert. Die Schlämme aus der Entstaubung wurden auf die Deponie gebracht. Die Maxhütte arbeitete anschließend im vollen metallurgischen Zyklus. Drei Hochöfen, die im 2-Ofen-Betrieb betrieben wurden, erzeugten Roheisen, welches im Blasstahlwerk durch vier bodenblasende Konverter zu Stahl umgewandelt wurde. Hinzu kamen zwei Elektroöfen. Zur Erzeugung der Produktlinie wurden die Vorblöcke über die Blockstraße der Duostraße oder der kombinierten Formstahlstraße zugeführt, in der überwiegend Formstahl für den weltweiten Versand hergestellt wurde.

Mit Gründung der Stahlwerk Thüringen GmbH im Jahr 1992 konnte der Stahlstandort Unterwellenborn erhalten bleiben. Ein wesentlicher technologischer Umbruch erfolgte im Jahr 1995, in dem das Elektrostahlwerk fertiggestellt wurde. In Betrieb ist seitdem ein Elektrolichtbogenofen mit Stranggießanlage. Als Haupteinsatzstoff dient Schrott. Im Elektrolichtbogen wird der Schrott geschmolzen, bevor dem Rohstahl im Pfannenofen Legierungselemente für die Zielzusammensetzung des Stahls zugesetzt werden.

Die oben dargestellten Informationen sind [5] entnommen und in Gesprächen mit Vertretern der Stahlwerk Thüringen GmbH aufgearbeitet.

Die zeitliche Abfolge der Verfahren am Standort gekoppelt mit unterschiedlichen Bauaktivitäten gibt Hinweise auf die abgelagerten Materialien wie Schlacken, Stäube, Schlämme oder auch gebrauchte Feuerfestmaterialien. Verfahrensabhängig weisen diese spezifische Wertstoffe auf, die mit damaligen Verfahren nicht oder nur teilweise erschlossen werden konnten und heute ein mögliches anthropogenes Ressourcenlager darstellen. Der vorgestellte Abriss zur Standorthistorie dient in Kombination mit

Auswertungen von Archivdaten der Beschreibung des Haldenkörpers. Erste Zwischenergebnisse zur Differenzierung einzelner Bereiche auf der Halde zeigen, den vielschichtigen wie heterogenen Aufbau der Modellhalde (Bild 4). Von Interesse für die Projektergebnisse sind die unterschiedlichen Bereiche in Hinblick auf die Wertstoffpotenziale. Auch Materialien, die keine umfangreichen Wertstoffpotenziale erwarten lassen, wie z.B. Hüttensande, werden im Projekt zur Methodenentwicklung näher untersucht. Das Projekt erfüllt somit den Anspruch des Erkenntnisgewinns über Wertstoffpotenziale sowie der wissenschaftlichen Methodenentwicklung.

Auf der Halde finden sich spezifische Bereiche, die im Rahmen des Projekts einer Beprobung und entsprechender Analytik (Feststoffanalytik, mineralische Zusammensetzung) unterzogen werden. Das folgende Bild gibt einen ersten groben Überblick der unterschiedlichen (oberflächennahen) Ablagerungsbereiche auf der Halde, dargestellt auf einem aktuellen Orthophoto.

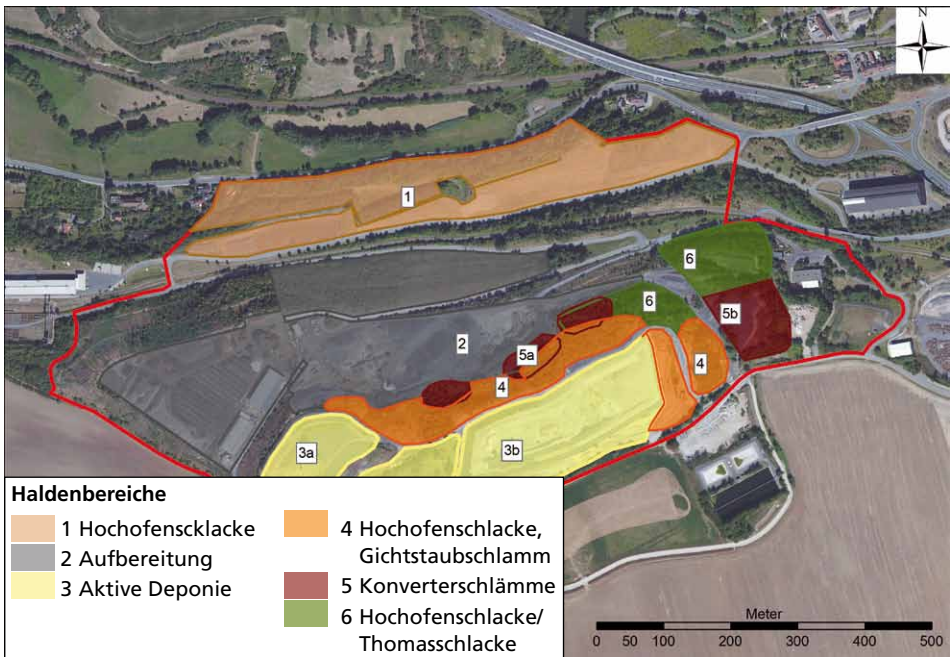


Bild 4: Orthophoto der Modellhalde und Abgrenzung Ablagerungsbereiche

Quelle: Orthophoto Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

Der Gesamtbereich der Halde ist auf der Karte mit einem roten Umring dargestellt. Im nördlichen Bereich finden sich alte Haldenbereiche, wo sich insbesondere Hochofenschlacken wiederfinden (1). Ein großer, zentraler Bereich der Halde befindet sich heute in Betrieb und dient der Aufbereitung der Schlacke aus dem laufenden Betrieb des Stahlwerks (2). Ein Dienstleister der Stahlwerk Thüringen GmbH übernimmt die Aufbereitung der metallurgischen Abprodukte sowie die Vermarktung und den Verkauf von aufbereiteten Materialien (Schlacke z. B. für den Straßenbau, sog. Saueisen für die

Stahlindustrie usw.). Die zurzeit nicht verwertbaren Reststoffe werden auf der Deponie beseitigt. Im zentralen Bereich finden sich Deponien genehmigt nach Deponieverordnung zur Ablagerung von Reststoffen aus der Schrottanlieferung (Monodeponie) (3a) und die aktive Abprodukte-deponie für die Schlacken und andere Reststoffe (z.B. Feuerfestmaterial) aus der laufenden Produktion (3b). In diesem Bereich wird aktiv Deponiebau betrieben. Die Deponie ist gekennzeichnet durch die gemeinsame Einlagerung von z.Z. nicht verwertbarer Elektroofenschlacke, Pflannenofenschlacke sowie Hüttenschutt, Bauschutt und Bodenaushub. An die aktiven Deponiebereiche schließen sich nach Norden und Osten Bereiche an, in denen Gichtstäube bzw. Schlämme und Hochofenschlacke aus unterschiedlichen Zeitabschnitten, Mischablagerungen aus dem Hochofen wie Hüttensande, Hochofenschlacke und Feuerfestmaterialien abgelagert sind (4).

Unterhalb eines Hanges finden sich mehrere Schlammabsetzteiche für Schlämme aus der Nassentstaubung der bodenblasenden Konverter des ehemaligen Thomas-Stahlwerkes (5a und 5b).

Nach Osten schließen sich Bereiche an, in denen sich im Profil der Halde neben Hochofenschlacke und Feuerfestmaterial auch einige Dezimeter starke Bänder Thomas-Schlacke finden lassen (6).

3. Methoden der Fernerkundung

Die Arbeiten zum Thema Fernerkundung haben das Ziel die Datengrundlage für das hierarchisch gegliederte multiskalare Auswertesystem auf der Basis von unterschiedlichen Fernerkundungsdaten zu liefern. Dieses umfasst:

- die Ebene der Übersichtsinformationen zu den Halden für das Übersichtskataster,
- die regionale Ebene der Testregionen für das Ressourcenkataster,
- und die Ebene der detaillierten stofflichen Analysen für die Modellhalde.

3.1. Haldendetektion auf Ebene des Übersichtskatasters

Auf der Skalenebene des Übersichtskatasters ist es das Ziel der fernerkundlichen Arbeiten, Halden über ihre geometrischen Eigenschaften von natürlichen Erhebungen und anderen anthropogenen Vollformen zu differenzieren und auf diese Weise zu detektieren. Die Detektion von Haldenkörpern aus Fernerkundungsdaten wird durch ein automatisches Analyseverfahren vorerst in mehreren morphologisch inhomogenen, sowohl durch möglichst hohe Haldendichten, als auch durch verschiedene Haldentypen charakterisierten Testregionen erfolgen. Die Testregionen dienen der exemplarischen Anwendung der Methoden für die Ebene des Übersichtskatasters. Als eine Testregion wurde ein Ausschnitt des Saarlands festgelegt. Das Saarland ist eine Region, die sowohl durch eine anspruchsvolle und inhomogene Geomorphologie geprägt ist, die sich im Westen vom Saartal bei Ens Dorf (175 m ü NN) bis hin in den Osten in den Saarwald (300 m bis 420 m ü NN) erstreckt. Als weitere Testregionen wurden das westliche Ruhrgebiet mit seiner langjährigen Historie der Montanindustrie und das Mansfelder Land bei Halle/Saale ausgewählt.

Für dieses Ziel erfolgt die Methodenentwicklung und prototypische Anwendung auf Basis von frei verfügbaren Höhendaten unterschiedlicher Satellitensensoren. Auch die Verwendung von Geländemodellen der Landesvermessungsämter ist im Rahmen des Projektes geplant. Diese Daten weisen eine höhere geometrische Auflösung als frei verfügbare Daten auf, sind in der Regel aber nicht kostenfrei. Die erste Analyse möglicher Sensoren innerhalb des Projekts zeigt, dass für das Übersichtskataster die frei verfügbaren Daten des in Japan gebauten ASTER Sensors (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) in Frage kommen, hier handelt es sich um den Datensatz GDEM V2 (Global Digital Elevation Model Version 2). Die Daten sind von einer genügenden räumlichen Auflösung und bieten auch in den ausgewählten Testgebieten in Deutschland eine lückenlose Abdeckung.

Zwischenergebnisse zeigen, dass es kaum möglich ist, lediglich auf Basis morphologischer Haldenparameter verschiedene Haldenkörper oder gar deren -Typ zu charakterisieren, da die Halden in Bezug auf die Oberflächenform (Wechsel von Bermen und Böschungen, Schüttwinkel, Bewuchs) zu unterschiedlich sind. In die Methodik ist folglich die Analyse der Umgebungsvariablen, d.h. die Morphologie des Umlandes einer Halde, zu integrieren. Die besondere Herausforderung ist hierbei die Unterscheidung potentieller Haldenkörper von anderen natürlichen oder anthropogenen Höhenstrukturen wie z.B. Schuttberge oder Deponien.

Ausgangsdatensatz der Methodenentwicklung zur automatisierten Haldendetektion ist der Ausschnitt des westlichen Ruhrgebiets aus einer aktuellen ASTER GDEM V2-Szene (Bild 5).

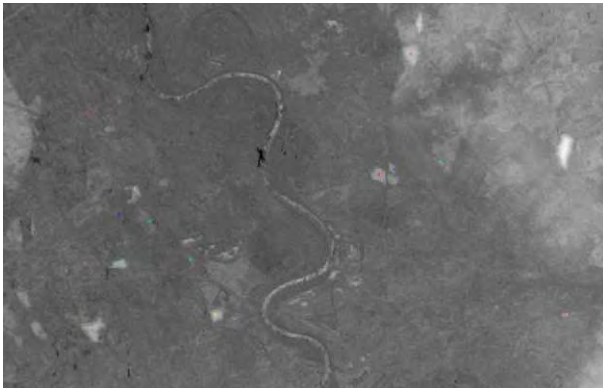


Bild 5:

Ausgangsdatensatz für Haldendetektion westliches Ruhrgebiet (ASTER GDEM ist ein Produkt des METI und der NASA)

Das Gebiet umfasst eine Ausdehnung von etwa 27 km x 18 km und ist somit etwa 500 km² groß. Örtlich wird das Gebiet in West-Ost-Richtung von Kamp-Lintfort und Oberhausen und in Nord-Süd-Richtung von Dinslaken und Duisburg begrenzt. Als zentrale linienhafte Struktur ist der Rhein zu erkennen. Bild 5 stellt den Originaldatensatz dar und dient als Testregion mit einer Vielzahl von bekannten Halden, die als Referenz in die Methodenentwicklung eingehen. Hier sind die größeren Halden in unterschiedlichen Graustufen gut zu erkennen.

Die angewandten Ansätze zur Haldendetektion bestehen aus einem Set von Methoden (Gradientenanalyse, Glättungsverfahren, Wasserscheidensegmentierung, Ableitung von Höhendifferenzen).

Bild 6 stellt ein erstes Ergebnis der Gradientenanalyse dar. Die Gradienten der Höhen-
darstellung verlaufen von dunklen Stufen, die relativ flaches Gelände charakterisieren,
hin zu helleren Objekten, die steilere Bereiche in der Region repräsentieren. In dieser
Darstellung sind dadurch die potentiell zu detektierenden Halden anhand ihrer helleren
Gradienten gut auszumachen.

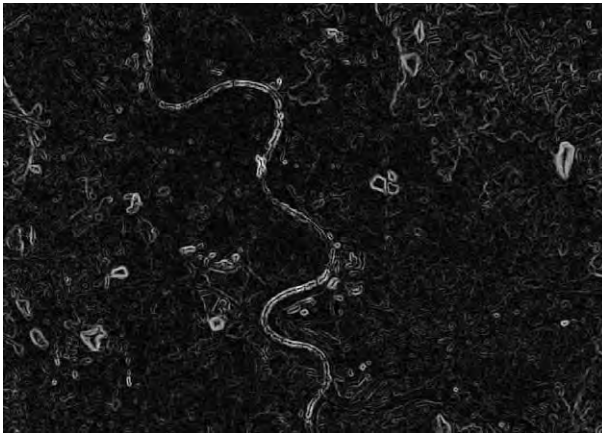


Bild 6:

Westliches Ruhrgebiet Höhen-
daten ASTER DGEM V2 gradi-
entenbasiert

Zu Visualisierungszwecken in 3D wurden die ASTER GDEM V2-Daten mit einer
Bodenauflösung von etwa 25 m (Bild 7) in eine Bodenauflösung von 10 m mit geglä-
teter Höhengauflösung interpoliert (Bild 8). Dabei werden Nachbarpunkte mit einer
Ableitungsfunktion berücksichtigt. Zur besseren Übersicht wurden alle Neigungen
mit Hilfe eines Farbkreises, der die Richtung des Gradienten angibt, eingefärbt. Die
Überhöhung wurde auf den Faktor 10 gesetzt.

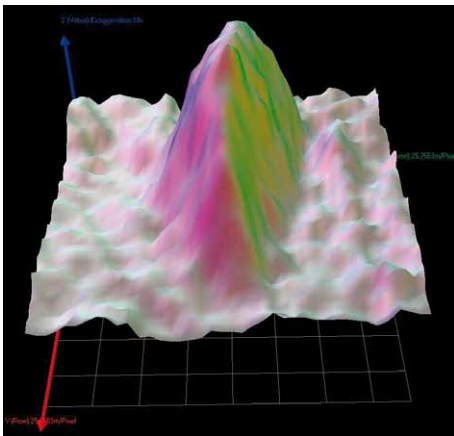


Bild 7: Halde ohne geglättetes Relief
(zehnfach überhöht)

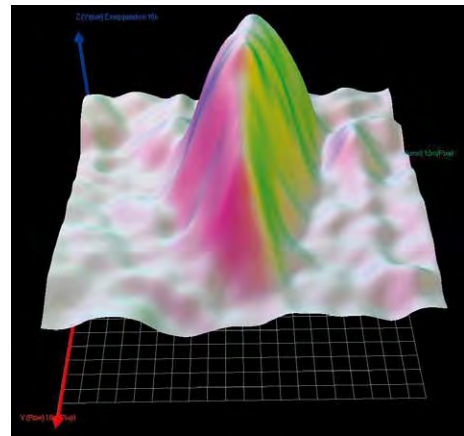


Bild 8: Geglättetes Relief (zehnfach über-
höht)

3.2. Optische Fernerkundungsmethoden zur Haldenanalyse auf regionaler und lokaler Ebene

Im Rahmen des Projektes REStrateGIS erfolgen nicht nur die zuvor aufgeführten Arbeiten mit fernerkundlich gewonnenen Geländemodellen sondern auch vielfältige Messungen mit unterschiedlichen Sensoren, die dem Bereich der optischen Fernerkundung zuzuordnen sind. Nachfolgend ist daher eine Einführung in diese Thematik gegeben. Anschließend erfolgt eine Kurzvorstellung der im Projekt geplanten Messmethoden und Analysetechniken.

3.2.1. Hintergrund

Mit Hilfe optischer Fernerkundungsmethoden (Feld- und Labormessungen, flugzeug- oder satellitengetragene Aufnahmesysteme) können Oberflächen anhand der von Ihnen reflektierten Strahlung differenziert und analysiert werden. Verschiedene Materialien, etwa Vegetation, Böden, Mineralien aber auch anthropogene Stoffe, besitzen in Abhängigkeit von ihrem Aufbau und ihrer Zusammensetzung einen charakteristischen *spektralen Fingerabdruck*. Im Bereich der Geologie, Mineralogie und Geochemie gilt, dass die meisten Minerale spezifische spektrale Signaturen aufweisen. Ursachen hierfür sind durch Elektronenübergangs- und Vibrationsprozesse verursachte Absorptionsbanden. Minerale können anhand solcher spezifischer Signaturen im Spektrum der von ihnen reflektierten Strahlung identifiziert werden [6, 7, 8, 9, 10]. Im Bereich der Wellenlängen des sichtbaren Lichtes und nahen Infrarotes (etwa 350 bis 1.000 nm) werden Absorptionsbanden in Spektren von Mineralien und Gesteinen vordergründig durch elektronische Prozesse von Metall-Ionen hervorgerufen (z.B. Fe, Cr, Co, Ni). Im Bereich des kurzwelligen Infrarot (etwa 1.000 bis 2.500 nm) sind dagegen vor allem Wasser- und Hydroxylgruppen sowie Carbonate und Sulfate aufgrund von Vibrationsprozessen spektral wirksam. Die Stärke von Absorptionsmerkmalen im Spektrum geht dabei grundsätzlich mit der Konzentration des absorbierenden Materials einher. Aus diesem Grund können Spektren neben der reinen Identifikation von Mineralphasen auch zur Ableitung quantitativer Aussagen herangezogen werden [11]. Neuere Forschungsarbeiten zeigen zum Beispiel, dass sich das Vorhandensein von Schwermetallen auf die Reflexionseigenschaften von Böden und Substraten auswirken [12, 13, 14].

Punktuelle reflexionsspektrometrische Messungen und Spektralanalysen von Mineralen und Gesteinen mittels hochauflösender Feld- und Laborspektrometer stellen ein bereits seit über 40 Jahren intensiv untersuchtes Forschungsfeld dar [6, 7, 15]. Umfassende Sammlungen von mineralspezifischen Reflexionsspektren sind zum Beispiel in den Spektralbibliotheken des United States Geological Survey (USGS) und der ASTER spectral library zusammengestellt [16, 17].

Um nicht nur punktuelle Informationen aus Labor- und Feldmessungen, sondern flächendeckende spektrale Informationen über die räumliche Verteilung verschiedener Materialien in größeren Gebieten zu gewinnen, werden seit mehreren Dekaden auch flugzeug- und satellitengetragene optische Sensoren eingesetzt. Je nach der Anzahl an Kanälen, die Licht bestimmter Wellenlängen erfassen können, werden multi- und

hyperspektrale Aufnahmesysteme unterschieden. Multispektrale Satellitensensoren wie ASTER und Landsat fanden und finden zur Beantwortung einer Vielzahl geowissenschaftlicher Fragestellungen Anwendung. Dabei steht nicht nur die Rohstoffexploration bzw. Lagerstättendetektion im Vordergrund [11, 18, 19, 20], sondern auch das Monitoring des Prozessgeschehens in Bergbau- und Bergbaufolgelandschaften [21, 22].

Hyperspektrale Sensoren verfügen im Vergleich zu multispektralen Aufnahmesystemen über eine wesentliche höhere Anzahl spektraler Kanäle. Auf diese Weise sind die Sensoren in der Lage, ein quasi kontinuierliches Reflexionsspektrum von Oberflächen für jedes Bildpixel aufzuzeichnen, wodurch eine wesentlich detailliertere Analyse der Spektren und eine feinere Differenzierung von Objektklassen ermöglicht werden. Hyperspektrale Sensoren übertragen somit das Konzept von Labor- und Feldspektrometern der punktuellen Aufzeichnung eines vollständigen Spektrums auf die Fläche, weshalb man auch von *abbildender Spektrometrie* spricht. Hyperspektrale Mess- und Analyseverfahren werden seit längerer Zeit zur Beantwortung vielfältiger geologisch-mineralogischer sowie hydrochemischer Fragestellungen eingesetzt [11, 23, 24, 25, 26].

Die reflexionsspektrometrische und fernerkundliche Analyse von Produkten aus anthropogenen Prozessen – so auch die im Rahmen des Projektes REStrateGIS untersuchten Materialien aus dem Hüttenwesen – ist bisher jedoch kaum erfolgt. Insbesondere die umfassende Analyse von Schlacken ist als Pilotprojekt zu sehen.

3.2.2. Multispektrale Satellitenfernerkundung zur Haldenanalyse auf mittlerer Maßstabsebene

Auf der Basis der Ergebnisse der Haldengenerierung mittels der genannten Geländemodelle für das Übersichtskataster sollen exemplarisch Gebiete mit einer hohen Haldendichte innerhalb einer Testregion ausgewählt werden. Für diese Gebiete werden mit Hilfe von multispektralen Satellitenbilddaten unterschiedlicher spektraler und geometrischer Auflösungen in der mittleren Maßstabsebene Charakterisierungen der Halden vorgenommen. Ziel der Auswertungen sind Erstinformationen über die Oberflächeneigenschaften der Halden, beispielsweise die Differenzierung in offene und vegetationsbestandene Halden sowie die Klassifizierung in verschiedene Haldentypen (z.B. die Unterscheidung von Kali- und Hüttenhalden).

3.2.3. Reflexionsspektrometrie und hyperspektrale Fernerkundung auf Ebene des Haldenstandorts

Die Anwendung der Reflexionsspektrometrie und abbildender hyperspektraler Fernerkundungsmethoden an der Modellhalde verfolgt folgende Ziele:

- die spektrale Charakterisierung der verschiedenen Haldenmaterialien und die Differenzierung in spektral unterschiedliche Klassen,
- die qualitative spektrale Analyse des Mineral- und Stoffbestandes des Haldenmaterials sowie

- die Analyse auf Zusammenhänge zwischen dem Gehalt an (Schwer-) Metallen und anderen Inhaltsstoffen und den spektralen Eigenschaften des Haldenmaterials.
- Da ein Teil der Halden vegetationsbestanden ist, sollen auch mögliche Zeigerwirkungen der Vegetation untersucht werden.

Dabei muss zwischen punktuellen Messungen und Analysen auf Feld- und Laborebene, abbildenden terrestrischen Messungen an ausgewählten Bereichen der Halde und flächendeckenden Luftaufnahmen unterschieden werden.

Messmethodik

Punktuelle reflexionsspektrometrische Messungen werden mit einem Feld- und Laborspektrometer durchgeführt, das ein quasi kontinuierliches Spektrum im Wellenlängenbereich von 350 bis 2.500 nm aufzeichnet. Die Spektralmessungen erfolgen sowohl unter Feld- als auch unter Laborbedingungen.

Um die kleinräumige Materialverteilung auf der Halde zu erfassen, werden auch Messungen mit abbildenden hyperspektralen Scannern durchgeführt. Die durchgeführten punktuellen und abbildenden Messungen werden herangezogen, um die Ergebnisse reflexionsspektrometrischer Methoden den klassischen geochemischen Analyseverfahren gegenüberzustellen.

Auswertung der Spektraldaten

Die Auswertung aller Spektraldaten erfolgt qualitativ und quantitativ. Über den semi-automatischen Vergleich der aufgezeichneten Feld- und Laborspektren mit Referenzspektren wird die spektrale Identifizierbarkeit von bekannten Mineralen überprüft. Dabei werden das Vorhandensein mineralspezifischer Absorptionsbanden und deren Ausprägung analysiert. Die quantitative Auswertung der Spektren meint die Ermittlung und Parametrisierung spektraler Charakteristika und die Korrelation dieser mit den geochemischen Analysewerten der entsprechenden Proben. Die Art des Zusammenhangs kann direkt (über das Vorhandensein spezifischer Absorptionsbanden) oder indirekt (über Variationen des gesamten Spektrums) erfolgen.

Für die Auswertung der abbildenden Hyperspektral-Daten werden verschiedene Prozessierungs- und Klassifikationsverfahren angewendet. Ziele hierbei sind die Übertragung der auf Basis punktueller Messungen und Analysen erzielten Ergebnisse auf die Fläche und somit die Herausstellung der räumlichen Verteilung unterschiedlicher Materialien und Stoffgehalte.

Im Rahmen von REStrateGIS erfolgten bisher reflexions-spektrometrische Labormessungen an Materialien der Halde bei Unterwellenborn sowie an Proben zweier weiterer Halden. Als Resultat wurde ein Materialkatalog erstellt, der eine erste Einteilung der Haldenmaterialien in unterschiedliche spektrale Klassen erlaubt. Durch dieses Vorgehen wurde auch die spektrale Differenzierbarkeit verschiedener Schlacken und anderer Stoffe aus der Eisen- und Stahlerzeugung aufgezeigt (Bild 9 und Bild 10).

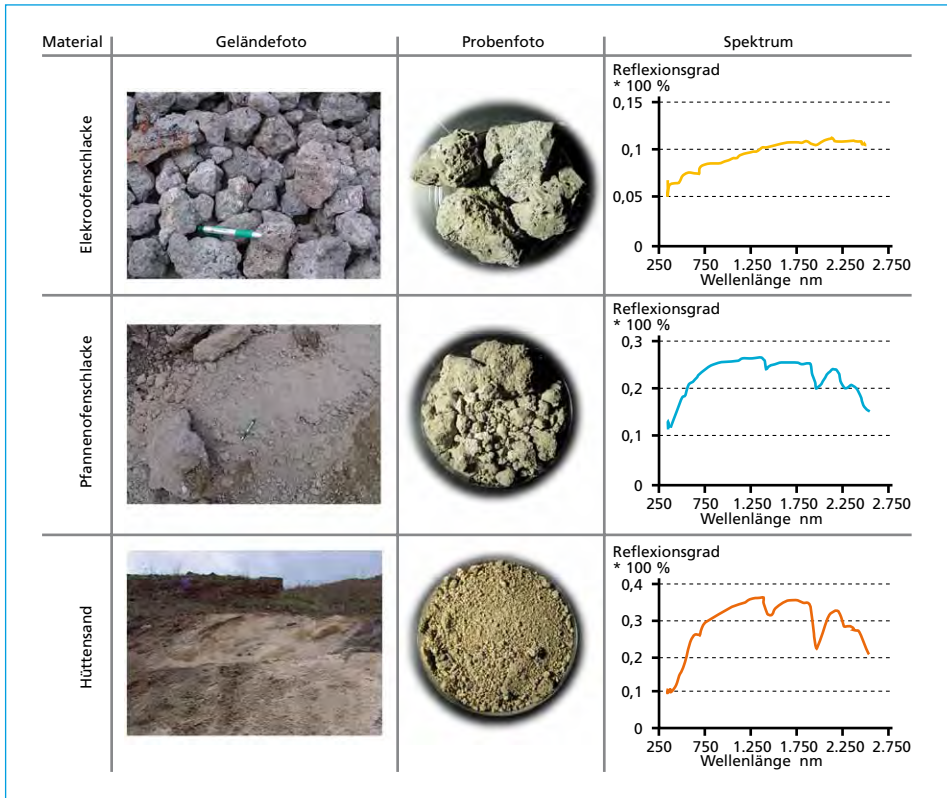


Bild 9: Ausgewählte Haldenmaterialien der Schlackenhalde bei Unterwellenborn und deren Reflexionseigenschaften

Quellen: Spektralanalytik: M. Denk, Institut für Geowissenschaften und Geographie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg;
Fotos: Denk & Jandewerth 2013

Von ausgewählten Proben wurden zudem umfangreiche Messungen an verschiedenen Korngrößenreihen durchgeführt, um die Variabilität der Reflexionsspektren in Abhängigkeit von der Korngröße aufzuzeigen. Erste geochemische Analyseergebnisse vom Projektpartner FEhS e.V. wurden für die Interpretation der Spektralmessungen herangezogen und im Sinne eines Methodenvergleichs betrachtet.

4. Ausblick

Zum jetzigen Stand des Projektes sind noch in allen Arbeitspaketen Entwicklungsarbeiten notwendig bzw. fangen diese erst in der zweiten Projektphase an. So wird z.B. im Rahmen des Übersichtskatasters das Datenmodell weiterentwickelt, in dem die Informationen der unterschiedlichen Datenbestände und Datenquellen eingepflegt werden können. Sowohl auf der mittleren Maßstabebene als auch für den Haldenstandort wird die Verfahrensgeschichte der Region recherchiert und hinsichtlich möglicher

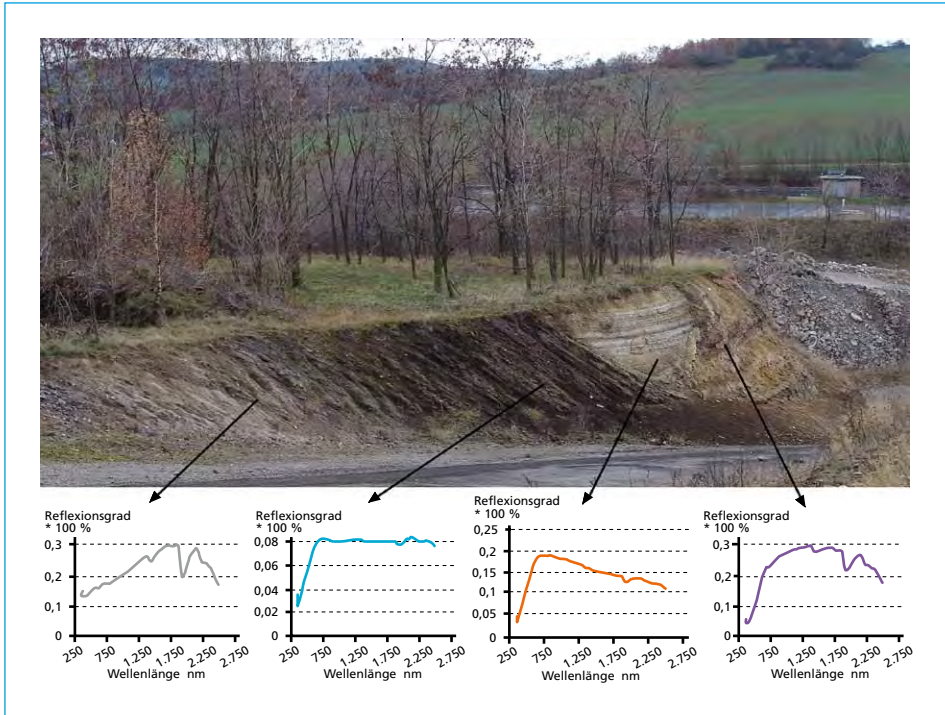


Bild 10: Grundsätzliche Reflexionseigenschaften verschiedener Materialien auf der Halde bei Unterwellenborn

Foto: Denk 2012

abgelagerte Stoffströme detaillierter untersucht. Hierzu gehört grundlegend auch ein Überblick, welche Verfahren mit welchen Einsatzstoffen es im Laufe der Hüttengeschichte gegeben hat und welche Reststoffe mit diesen Verfahren einhergehen.

Neben der weiteren Methodenentwicklung zur Detektion von Halden und Haldentypen mittels Fernerkundung werden auch die Arbeiten zur Erkennung des Haldeninventars über reflexionsspektrometrische Messung weitergeführt und mit den Ergebnisse geochemischer Laboranalysen verglichen. Erste, im Artikel dargestellte Ergebnisse, zeigen, dass mittels der Reflexionseigenschaften zwischen unterschiedlichen abgelagerten Materialien gut unterschieden werden kann.

Wenn diese Arbeiten zur Erkennung der Halden und des Haldeninventars vorangeschritten sind, starten in der zweiten Projekthälfte auch die Arbeiten zu möglichen Wiedergewinnungsverfahren, der in den Halden erkannten Wertstoffe. Neben praktischen Versuchen im Labor werden auch Konzepte entwickelt, die nicht nur die eigentlich Wertstoffwiedergewinnung, sondern auch den (Teil-)Rückbau von Haldenbereichen und die damit einhergehende Aufbereitung betreffen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten fließen in die Konzeption von Verwertungsstrategien ein, die letztendlich auf verschiedene Haldenstandorte übertragbar sein sollen.

Wie in dem Artikel beschrieben, werden in dem Projekt unterschiedliche fachliche Aspekte verfolgt. Daher decken die geplanten Projektergebnisse auch diese Bereiche ab. Zum Projektende werden folgende Zielsetzungen angestrebt:

- Übersichtskataster, in dem Haldenstandorte und standortsspezifische Informationen überblicksartig hinterlegt sind,
- Methoden zum Erkennen von Halden mittels radargestützter Fernerkundung, prototypisch in Testregionen unterschiedlicher Rahmenbedingungen angewendet,
- Reflexionsspektrometrische Methoden zur Untersuchung und Unterscheidung von Haldenmaterialien, prototypisch im Labor und der Modellhalde eingesetzt,
- Konzepte zur Wiedergewinnung von Wertstoffen aus Rückständen der Hüttenindustrie und Gesamtverwertungsstrategien.

Das vorgestellte Forschungsvorhaben wird gefördert durch Bundesministerium für Bildung und Forschung. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei den Autoren. Die Autoren danken dem Fördermittelgeber für die freundliche Unterstützung.

Für die Möglichkeit der Durchführung projektspezifischer Untersuchungen an der Halde in Unterwellenborn dankt das Konsortium ausdrücklich der Stahlwerk Thüringen GmbH.

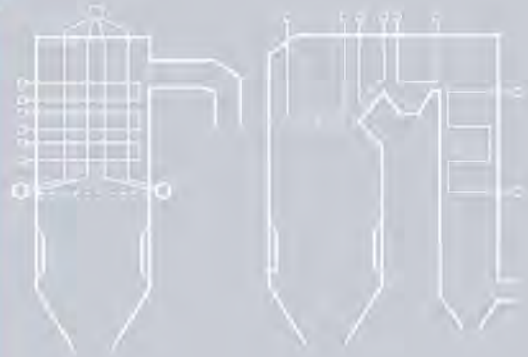
5. Quellen

- [1] BMU (Hrsg.): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (Progress) Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin, 2012
- [2] Faulstich, M.: r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien. Informationspapier zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf der gleichnamigen BMBF-Fördermaßnahme. Straubing. 2010
- [3] Bill, R.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Berlin: Wichmann Verlag, 2010
- [4] Bill, R.; Zehner, M. L.: Lexikon der Geoinformatik. Heidelberg: Wichmann Verlag, 2001
- [5] Geschichtsverein Maximilianshütte/Maxhütte e.V.: Die Maxhütte Unterwellenborn. Band 1-6. 2007
- [6] Farmer, V.C.: The Infra-Red Spectra of Minerals. Mineralogical Society, London, 1974
- [7] Hunt, G. R.: Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near-infrared. In: Geophysics, 42, Nr. 3, 1977, S. 501-513
- [8] BURNS, R. : Mineralogical Applications of Crystal Field Theory, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1993
- [9] BURNS, R. (1993b): Origin of Electronic Spectra of Minerals in the Visible and Near-Infrared Region. IN: Pieters, C.M. und Englert, P.A.J.: Remote Geochemical Analysis. Elemental and Mineralogical Composition. 1993, S. 3-29
- [10] Clark, R. N.: Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. In: Rencz, A. N. (Hrsg.): Manual of Remote Sensing. John Wiley and Sons, New York, Kap. 1, 1999, S.3 -58
- [11] Van der Meer, F.; van der Werff, H.; van Ruitenbeek, F.; Hecker, C. A.; Bakker, W. H.; Noomen, M. F. et al.: Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 14 (1), 2012, S. 112-128

- [12] Kemper, T.; Sommer, S.: Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy. *Environmental Science & Technology* 36, 2742-2747, 2002
- [13] Wu, Y.; Chen, J.; Ji, J.; Gong, P.; Liao, Q.; Tian, Q.; Ma, H.: A Mechanism Study of Reflectance Spectroscopy for Investigating Heavy Metals in Soils. In: *Journal of the Soil Science Society of America*, Vol. 71; Nr. 3, 2007, S. 918-926
- [14] Choe, E.; Van der Meer, F.; Van Ruitenbeek, F.; Van der Werff, H.; De Smeth, B.; Kim K.-W.: Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain. In: *Remote Sensing of Environment*, Nr. 112 (7), 2008, S. 3222-3233.
- [15] Clark, R. N.; King, T. V. V.; Klejwa, M.; Swayze, G.; Vergo, N.: High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. In: *Journal of Geophysical Research*, Nr. 95, 1990, S. 12.653-12.680
- [16] Clark, R.N.; Swayze, G.A.; Wise, R.; Livo, E.; Hoefen, T.; Kokaly und R., Sutley, S.J.: USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, 2007
<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>
- [17] Baldrige, A. M.; Hook, S. J.; Grove, C. I. und G. Rivera: The ASTER Spectral Library Version 2.0. In: *Remote Sensing of Environment*. 2008, <http://speclib.jpl.nasa.gov>
- [18] Goetz, F. H., F. C. Billingsley, A. R. Gillespie, M. J. Abrams, R. L. Squires, E. M. Shoemaker, I. Lucchitta, D. P. Elston: Application of ERTS images and image processing to regional problems and geological mapping in northern Arizona, JPL Technical Report 32-1S97. 1975
- [19] Sabins, F.F.: Remote Sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14, 1999, 157-183
- [20] Mars, J.C. und I.C. Rowan: Regional Mapping of phyllic and argillic altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using ASTER data and logical operator algorithms. *Geosphere*, 2, 3, 161-86, 2006
- [21] Gläßer, C.; Birger, J.: Integriertes Langzeitmonitoring der Bergbaufolgelandschaften – Möglichkeiten und Grenzen. In: Gläßer, C. (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung von Folgelandschaften des Braunkohlebergbaus - Stand und Perspektiven in Wissenschaft und Praxis. Sonderband der Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung, Sonderheft 14, Berlin: Analytica-Verlag, 2004, S. 276-285
- [22] Schroeter, L.; Gläßer, C.: Analysis and monitoring of lignite mining lakes in Eastern Germany with spectral signatures of Landsat TM satellite data. *International journal of coal geology*. Amsterdam, Elsevier, Bd. 86.2011, 2011, S. 27-39
- [23] Cloutis, E. A.: Review Article Hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques. In: *International Journal of Remote Sensing* 17 (12), 1996, S. 2.215-2.242
- [24] Swayze, G., A.; Smith, K. S.; Clark, R. N.; Sutley, S. J.; Pearson, R. M.; Vance, J. S.; Hageman, P. L.; Briggs, P. H.; Meier, A. L.; Singleton, M. J, Roth, S.: Using imaging spectroscopy to map acid mine waste. *Environmental Science and Technology*, 34, 47-54. System For Multi-Temporal Mapping Of Acid Drainage-Related Minerals Using Airborne Hyperspectral Data 3rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy, Herrsching, 13-16 May 2003
- [25] Gläßer, C.; Groth, D.; Frauendorf, J.: Monitoring of hydrochemical parameters of lignite mining lakes in Central Germany using airborne hyperspectral casi-scanner data. In: *International Journal of Coal Geology*, Nr. 86 (2011), 2011, S. 40-53
- [26] Kurz, T.; Buckley, S.; Howell, J.; Schneider, D.; Integration of panoramic hyperspectral imaging with terrestrial lidar. *The Photogrammetric Record*, 26(134), 2011, S. 212-228
- [27] <http://www.r3-innovation.de/de/15435>
- [28] <https://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=3052>

Ersatzbrennstoffe in Kohlekraftwerken

Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen in Kohlekraftwerken



Autor: Stephanie Thiel
ISBN: 978-3-935317-29-0
Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky
Erscheinung: 2007
Gebund. Ausgabe: 314 Seiten
Preis: 30,00 EUR

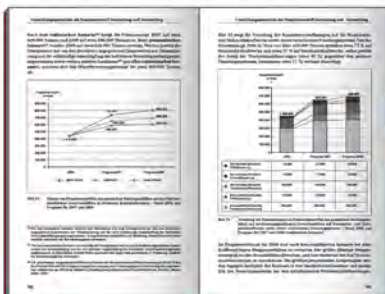
Im Bereich der Kohlekraftwerke bestehen grundsätzlich Potentiale zum Ausbau der Mitverbrennungskapazitäten für Ersatzbrennstoffe und zugleich hohe wirtschaftliche Anreize durch Einsparung von Brennstoffkosten sowie Zuzahlungen der Ersatzbrennstofflieferanten.

Um Ersatzbrennstoffe aus Siedlungsabfällen herzustellen, ist ein enormer aufbereitungstechnischer Aufwand erforderlich. Die Berichte der Kraftwerksbetreiber über Nichteinhaltungen der Spezifikationen machen deutlich, dass hier zum Teil noch erheblicher Optimierungsbedarf besteht.

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Untersuchung der Eignung von Ersatzbrennstoffen aus der mechanisch(-biologischen) Abfallbehandlung zur Mitverbrennung in Kohlekraftwerken aus verfahrenstechnischer, ökologischer und wirtschaftlicher Sicht sowie die Identifizierung der wesentlichen Einflussfaktoren und Optimierungsmöglichkeiten.

Hierzu wird zunächst der Stand der mechanisch(-biologischen) Abfallbehandlung in Deutschland hinsichtlich Anzahl, Kapazität und technischer Ausstattung der Anlagen dargestellt. Daran schließt sich eine detaillierte systemtechnische Analyse der Anlagen im Hinblick auf die Verfahrenskonzepte, verfahrenstechnischen Konfigurationen sowie die erzeugten Outputströme und deren Verbleib an.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die bislang durchgeführten und derzeit vorbereiteten Projekte zur Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Siedlungs- und Gewerbeabfällen in deutschen Kohlekraftwerken auf der Grundlage einer Literaturrecherche und der Befragung der Kraftwerksbetreiber untersucht.



Bestellungen unter www.vivis.de
oder

Dorfstraße 51
D-16816 Nietwerder-Neuruppin
Tel. +49.3391-45.45-0 • Fax +49.3391-45.45-10
E-Mail: tkverlag@vivis.de

vivis
TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Aschen • Schlacken • Stäube

– aus Abfallverbrennung und Metallurgie –

Karl J. Thomé-Kozmiensky.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013

ISBN 978-3-935317-99-3

ISBN 978-3-935317-99-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2013

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Ginette Teske, Ina Böhme, Petra Dittmann, Cordula Müller,
Fabian Thiel, Martin Schubert

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Foto auf dem Buchdeckel: Dipl.-Ing. Daniel Böni, KEZO Kehrrechtverwertung Zürcher
Oberland

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.