

Die Extraktion bergbaulich relevanter Merkmale aus 3D-Punktwolken eines untertagetauglichen mobilen Multisensorsystems

PRIV.-DOZ. RALF DONNER, DR. MATTHIAS RABEL, PROF. DIPL. -INF. INGRID SCHOLL, PROF. DR. ALEXANDER FERREIN, DIPL.-INF. MARC DONNER, DIPL.-GEOINF. ANDREAS GEIER, DR. ANDRÉ JOHN, DR. CHRISTIAN KÖHLER & SEBASTIAN VARGA, M.Sc.

In den drei Jahren 2015-2018 wurde ein mobiles untertagetaugliches Multisensorsystem mit autonomen Fahreigenschaften für die bergbauliche Lagerstättenerkundung entwickelt, als Demonstrationssystem hergestellt sowie unter Produktionsbedingungen erfolgreich getestet. Das Institut für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Bergakademie ist Teil des Entwicklerkonsortiums. Es ist zuständig für die markscheiderische und bergmännische Nutzbarkeit der mit dem Erkundungssystem gewonnenen Daten.

Nach einer ergebniszentrierten Projektvorstellung wird auf die am Markscheideinstitut entwickelten Lösungen für die automatisierte Erfassung der Kluftstruktur, für die Erfassung der Sohlenkontur, für die Korngrößenanalyse in gesprengtem Haufwerk, für die Detektion anthropogener Objekte aus 3D-Punktwolken sowie die geologische Vorerkundung mit Hilfe hyperspektraler Bilddaten eingegangen. Abschließend wird der zum Projektabschluss erreichte Stand zusammengefasst.

Das Projekt wird im Rahmen des Programms „R4 - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Forschung zur Bereitstellung von Rohstoffen von strategischer wirtschaftlicher Bedeutung“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung inklusive aller Teilvorhaben gefördert; jenes der TU Bergakademie Freiberg „Merkmalsextraktion zur Erhöhung der Ressourceneffizienz“ unter Nummer 033 R 126 F.

Schlüsselwörter – Bergbau, Risswerk, geologische Erkundung, 3D-Punktwolke, Hyperspektraldaten

1. Einleitung

Der Zugang zu wirtschaftsstrategischen Bodenschätzen ist für moderne Industriegesellschaften von essenzieller Bedeutung. Für Deutschland besteht für die Versorgung mit nichtenergetischen Rohstoffen, wie Stahlveredlern und Seltenen Erden, eine weitgehende Importabhängigkeit. Vorhandene heimische Lagerstätten weisen eine komplexe geologische Struktur mit geringen Abbaumächtigkeiten in großen Teufen auf. Um diese abbau-technisch anspruchsvollen Lagerstätten effektiv nutzen zu können, wurde in den drei Jahren 2015-2018 im Rahmen eines durch ein Mittelstandsförderprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung geförderten Projektes ein untertagetaugliches mobiles Positionierungs-, und Navigations- und Mappingsystem, UPNS4D+, für die Erkundung der Lagerstätte entwickelt, als Demonstrationssystem hergestellt sowie zunächst im Forschungs- und Lehrbergwerk

Reiche Zeche der TU Bergakademie Freiberg getestet, dann erfolgreich unter produktionsnahen Bedingungen in das Anhydritbergwerk der Firma maxit Baustoffwerke GmbH in Krölpa (Thüringen) portiert. Einige, der für das Erkundungssystem entwickelten Technologien wurden auf ein typisches Produktionsfahrzeug, einen untertägigen Lader der Firma GHH, übertragen. Das Institut für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Bergakademie ist Teil des Entwicklerkonsortiums. Es ist zuständig für die markscheiderische und bergmännische Nutzbarkeit der mit dem Erkundungssystem gewonnenen Daten, gegebenenfalls attributierte, georeferenzierte 3D-Punktwolken.

2. Die Ziele des Projektes UPNS4D+ insgesamt

Komplexität, Geringmächtigkeit, Teufe, Vertikalität und lebensfeindliche Arbeitsumgebungen wie hohe Temperaturen, Lärm, Gifte, Gase und Stäube, erfordern effiziente und in hohem Maße sichere Bergbautechnologien. Die Entwicklung eines untertagetäglichen Positionierungs- und Navigationssystems als Sensorträger im Rahmen des BMBF-Projektes UPNS4D+ (untertagetägliches Positionierungs-, und Navigations- und Mappingsystem 4D+) trägt zur Automatisierung eines schonenden, selektiven Abbaus wirtschaftstrategischer Rohstoffe unter den für einheimische Lagerstätten typischen anspruchsvollen Abbaubedingungen bei. Das Hauptaugenmerk der Automatisierung im Bergbau liegt aktuell in der autonomen Erfassung relevanter Informationen, deren Integration in das Bergwerksinformationssystem sowie deren Aufbereitung, Visualisierung und Auswertung für eine optimierte Entscheidungsfindung durch den leitenden Ingenieur. Zusammengefasst sind damit die Themen autonome Datenerfassung, Datenauswertung und -visualisierung aufgerufen. Datenerfassung beinhaltet die Entwicklung eines bergbautaughlichen Sensorträgers und dessen Ertüchtigung für weitgehend autonomes, kollisionsfreies Fahren in realistischen Umgebungen sowie die Georeferenzierung, Evaluierung und Kommunikation der aufgenommenen Daten.

Die sensorische Datenaufnahme erfolgt entweder als teilautonome Ersterkundung neu aufgefahrener Strecken oder als autonome Wiederholungsbeobachtung für Überwachung und Änderungsdetektion des Grubengebäudes und der technischen Infrastruktur. Dabei sind relevante Veränderungen des Bergwerks zu erfassen und zeitkritisch in die Navigationsgrundlage, zeitnah in die Lagerstättenmodellierung und von Zeit zu Zeit mit gebotener Genauigkeit und Zuverlässigkeit in das amtliche Risswerk zu übernehmen. Um die entsprechende Sensorik erweiterte Produktionsfahrzeuge können, wenn das 3D-Modell des Grubengebäudes vorliegt, autonome Wiederholungsmessungen ausführen.

3. Realisierung durch ein Projektkonsortium

Die Entwicklung eines teleoperiert oder autonom agierenden Multisensorsystems, das die genannten Aufgaben im modernen Untertagebergbau bei Einhaltung eines hohen Sicherheitsstandards erfüllen kann, lässt sich in die im folgenden Abschnitt dargestellten Teilvorhaben gliedern, die von den Projektpartnern in enger Kooperation zu realisieren waren.¹

3.1. Entwicklung und Herstellung einer mobilen Roboterplattform

Das in Absprache mit den Projektpartnern entwickelte und von der Fritz Rensmann GmbH & Co. etwa in Mitte der Projektlaufzeit bereit gestellte Fahrzeug zeichnet sich durch extreme Geländegängigkeit, durch einzeln gefederte Führungsrollen eines Kettenantriebes, eine flexible analoge und

¹ Die Berichterstattung über die Arbeitsbereiche der Projektpartner basiert auf nicht öffentlichen, teilweise vorläufigen Präsentationen zum kalendarischen Projektende. Das Interesse der Kooperationspartner, ihre Entwicklungsleistungen zunächst in eigenen Publikationen darzustellen, zieht eine gewisse Unbestimmtheit der folgenden Ausführungen nach sich. Ersatzweise sei auf die Veröffentlichungspflicht der Projektberichte im Leibniz-Informationszentrum Technik- und Naturwissenschaften, TIB, spätestens sechs Monate nach Projektende, verwiesen.

digitale Schnittstellenarchitektur für autonome Fahrfunktionen sowie durch ein Sicherheitskonzept nach ISO 12100 aus. Einige weitere technische Eigenschaften: Fahrzeuggeschwindigkeit: 0,14 - 1,5 m/s, variabel, Stop- und Go-Betrieb, Schienen- und Geländefahrt möglich, Beleuchtung: schwenk- und dimmbare LED-Scheinwerfer vorne, Auskopplung von 24 V zur Komponentenversorgung über DC/DC-Wandler, IP 67 für Antrieb, Energieversorgung und Fahrwerk, maximale Zuladung: 200 kg. 6-14 Stunden Fahrzeit. Damit steht ein elektrisch betriebenes Trägerfahrzeug für Realbetrieb in einem Bergwerk zur Verfügung.

Für die Entwicklung und Herstellung des Multi-Surface-Erkundungsfahrzeuges als Sensorträger zeichnet die Fritz Rensmann Maschinenfabrik, Diesellokomotiven, Getriebe GmbH & Co., Dortmund verantwortlich. Die Sensoren zur Kartengewinnung und zum sicheren, teleoperierten Fahren (SWAP-Plattform, automatisierter FARO-3D-LiDAR-Scanner, RGB-Kamera, Wärmebildkamera) wurden vom MSCOR-Institut der FH Aachen. Sensoren zur Navigation und Lokalisation für das autonome Fahren wurden vom AMT-Institut der RWTH Aachen entwickelt.

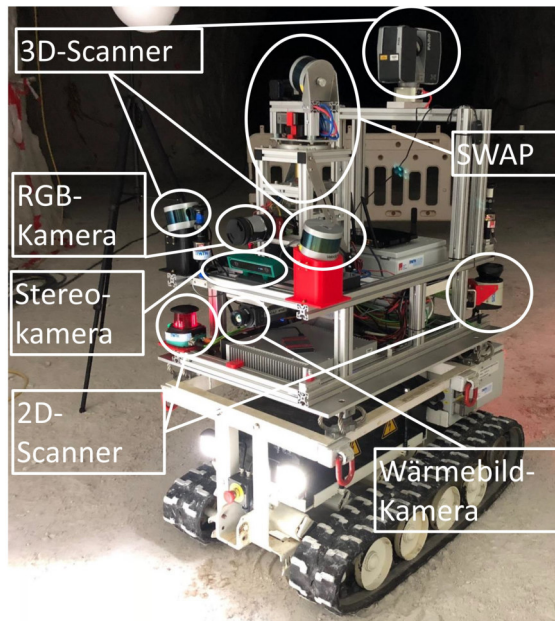


Abbildung 1: Multi-Surface-Erkundungsfahrzeug mit autonomen Fahrfunktionen als flexibler Sensorträger (Foto: [RWTH-Poster Objekt- und Umgebungserkennung]). Integriert wurden Sensoren zur Erzeugung von 3D-Umgebungskarten wie die SWAP-Plattform und der 3D-LiDAR FARO Focus 3D X Scanner [FH Aachen] sowie Sensorik zur Navigation und Lokalisation, insbesondere zum autonomen Fahren [RWTH Aachen]. 3D-LiDAR für dichte Oberflächenmodellierung, 2D-LiDAR für Fahrwegumgebungserfassung, RGB-Kamera zur Teleoperation, Wärmebildkamera für Personenerkennung. SWAP ist eine innovative Entwicklung der FH Aachen und erzeugt dichte hochauflösende 3D-Punktwolken Daten der Umgebung: auf einer rotierenden Sensorplattform befinden sich verschränkt arbeitende Sensoren: ein Velodyne VLP-16 PUCK LiDAR mit einem Hokuyo UTM-30LX-EW 2D laser range finder (LRF) (NEUMANN ET AL. 2017).

3.2. Autonom unterwegs im Bergwerk

Für die Fernsteuerung des Fahrzeuges (Teleoperation) bei der Ersterkundung steht ein konfigurierbares Anzeigetool der Daten der mitgeführten Sensoren zur Verfügung. Die Anzeige der Sensordaten und die Fahrzeugsteuerung erfolgt konventionell oder in einer Virtual Reality-Umgebung. Aus den bei der Ersterkundung erhobenen Scannerdaten wird mit Hilfe markseiderisch bestimmter Referenzpunkte oder aus georeferenzierten 3D-Referenzpunktewolken eine Navigationskarte im Bergwerkskoordinatensystem erzeugt und im Datenaustauschmodul mapit bereit gestellt (MASCOR, FH Aachen siehe Abschnitt 3.3). Sie dient als Grundlage zur Lokalisierung und globalen Pfadplanung für autonome Wiederholungsfahrten nicht nur des Erkundungssystems, sondern vor allem für autonom fahrende Produktionsfahrzeuge (Abschnitt 3.4). Die Daten der Sensoren dienen auch der Detektion von Hindernissen und Personen (Kollisionsschutz).

Auftragnehmer dieses Teilprojektes war das Institute for Advanced Mining Technologies (AMT) der RWTH Aachen, Leitung Tobias Hartmann.

3.3. Datenmanagement, Echtzeitverarbeitung und Visualisierung

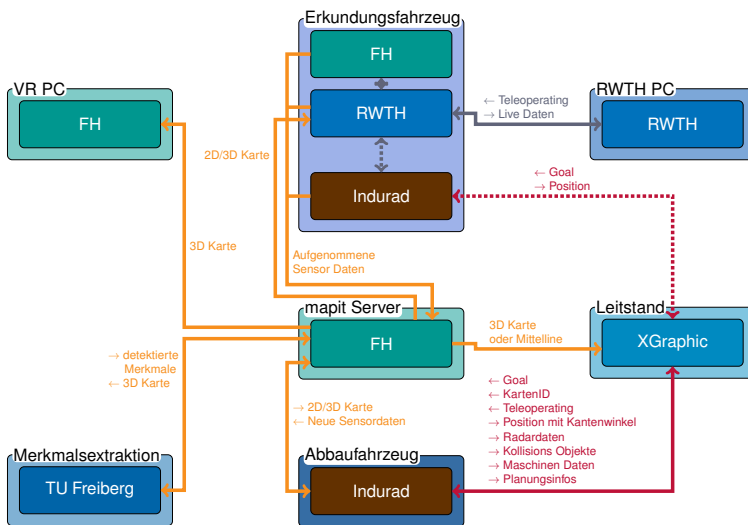


Abbildung 2: Von der Software mapit insgesamt realisierte IT-Kommunikation (FH-POSTER ÜBERSICHT 2018).

In dem Teilvorhaben Kartographie der FH Aachen wurde neben der automatisierten Erstellung von 3D-Bergwerkskarten ein Prototyp-Softwaresystem entwickelt, das Umgebungen, wie sie im Untertagebergbau vorkommen, abbilden und mit allen Projektpartnern kommunizieren kann.

Für die Datenerfassung muss eine geeignete schwingungsentkoppelte Roboterplattform mit der notwendigen Sensorik ausgestattet sein, siehe Abschnitt 3.1 und die Bildarstellungen in Abb. 3 und Abb. 4. Die von den Sensoren kommenden Daten werden mit aus der Robotik bekannten Algorithmen (SLAM, visuelle Odometrie) in konsistente Karten abgebildet, darunter sind auch Keyframes aus den optischen Daten oder aus den Radardaten. Für die Verwaltung, die Bearbeitung und den multidirektionalen Zugriff auf die verschiedenen Sensordaten wurde die Software „mapit“ entwickelt.

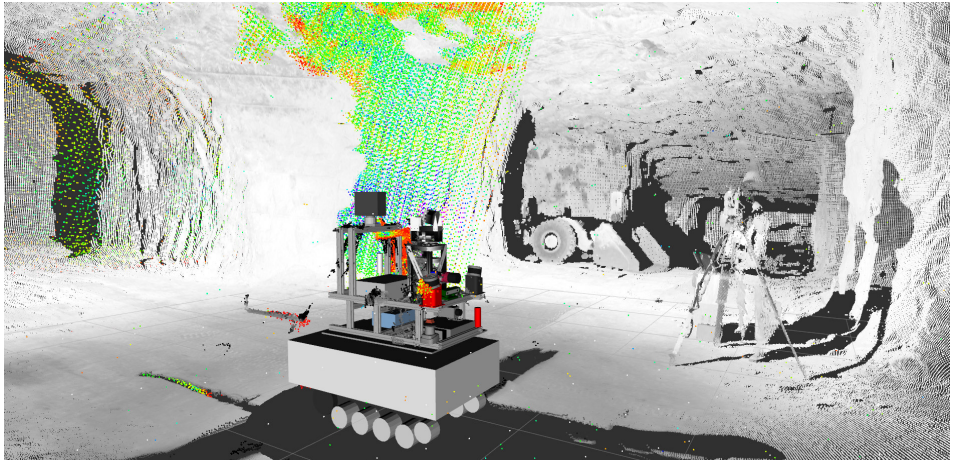


Abbildung 3: Registrierte Punktwolken vom FARO Focus3D X130 (in grau) überlagert mit den Live-Sensordaten (in Farbe) über 2 Sekunden von der SWAP-Plattform (FH-POSTER ÜBERSICHT 2018).

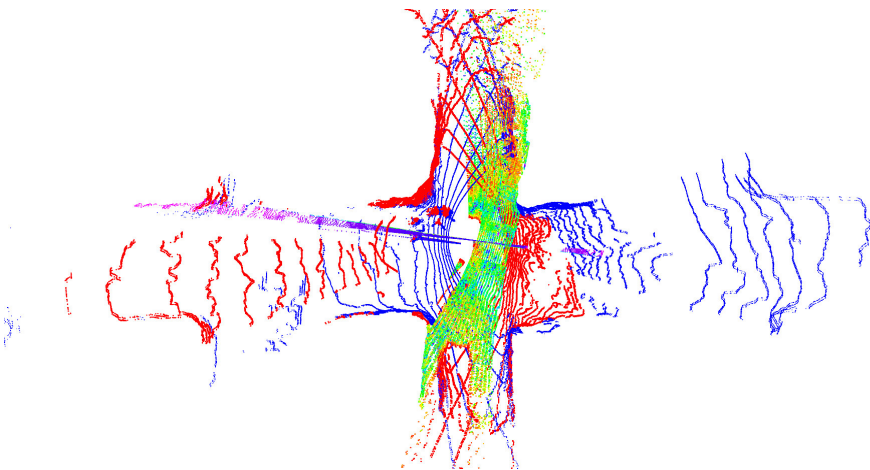


Abbildung 4: Vogelperspektive/Draufsicht der von der 3D-Sensorik aufgenommenen Daten für die schnelle Umgebungserfassung (FH-POSTER ÜBERSICHT 2018).

Sie ist modular aufgebaut und auf Erweiterbarkeit ausgelegt. Die Originaldaten werden geladen und persistent in einer Datenbank hinterlegt. Zugriffe erfolgen über definierte Schnittstellen. Alle an den Daten vorgenommenen Bearbeitungsschritte werden gespeichert, womit eine Konsistenz von Daten, Bearbeitungsschritten und Ergebnissen erreicht wird. Für die Datenkommunikation wurde eine Netzwerkschnittstelle entwickelt, über die transparent von lokalen und entfernten mapit-Instanzen zugegriffen werden kann. Eine Anbindung an externe Software (z.B. CloudCompare) wurde zum effizienten Arbeiten über Plugins umgesetzt. Zur besseren Veranschaulichung und Steuerung der Datenbearbeitungsschritte wurde eine grafische Benutzeroberfläche für mapit entwickelt. In dieser können mapit-Operatoren parametrisiert, ausgeführt und deren Resultate betrachtet werden. Eine VR-Unterstützung erlaubt ein besseres räumliches Verständnis der Kartendaten und hilft bei der Kontrolle durch den Benutzer während der Weiterverarbeitung. Durch Multi-View-Technologie können mehrere Personen gleichzeitig den gleichen Datensatz betrachten und kollaborieren.

Während der Erkundungsfahrt wird das Fahrzeug teleoperiert. Dabei werden ungefähr je 10 m eine vollsphärische Punktwolke aufgenommen und mit odometrischen Daten unter Verwendung der auf dem Roboter laufenden Software (Robot Operating System, ROS) gespeichert. Nach der Erkundungsfahrt werden diese Daten in das mapit-System integriert. In mapit werden diese Punktwolken mit verschiedenen Registrierungsalgorithmen in mehreren Durchläufen zu einer konsistenten Karte georeferenziert. Diese 3D-Punktwolken werden anschließend in eine 2D-Occupancy-Karte für die Planung autonomer Fahrten umgewandelt (FH-Poster mapit, 2018).

Bei nachfolgenden Fahrten lokalisieren sich Erkundungsfahrzeuge oder Produktionsfahrzeuge in der zuvor erstellten 2D-Umgebung. Es werden neue vollsphärische Punktwolken von bekannten und unbekannt Gebieten aufgenommen und diese nach der Fahrt in das mapit-System zur vorherigen integriert. Fährt das Fahrzeug außerhalb bislang erfasster Bereiche, wird die Datengrundlage nach der Fahrt im Postprocessing erweitert.

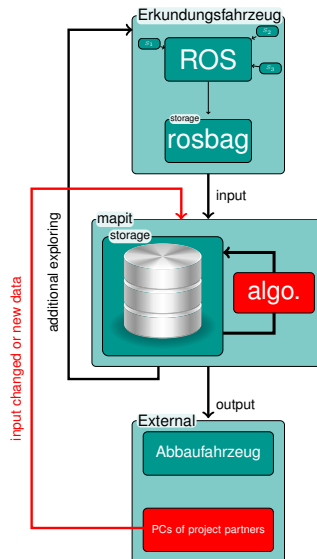


Abbildung 5: mapit-Workflow zur Generierung oder Aktualisierung/Erweiterung der 3D-Umgebung für die Fahrtenplanung oder Merkmalsextraktion (FH-POSTER ÜBERSICHT 2018).

Dieses Teilvorhaben wurde vom Institut für Mobile Autonome Systeme und Kognitive Robotik, MAS-COR, der Fachhochschule Aachen übernommen. Die Leitung hatte Ingrid Scholl.

3.4. Steuerung und Navigation des Produktionssystems

Mit einem Produktionsfahrzeug in realistischen Untertageumgebungen kollisionsfrei autonom fahren zu können stellt an die Übertragung der für das Erkundungsfahrzeug entwickelten Technologie erhebliche Anforderungen: Ein Niederflurlader für den Tiefbau ist kein europalettengroßes Kettenfahrzeug - Größe, Fahrverhalten und Ansteuerung sind etwas ganz anderes. Die Empfindlichkeit der beim Erkundungsfahrzeug eingesetzten optischen Sensoren verlangt den Übergang auf die wesentlich robustere RADAR-Technik.



Abbildung 6: GHH-Lader SLP-8H mit Sensorik ausgerüstet für autonomes Fahren in einer 3D-Umgebung im Einsatz bei maxit, Krölpä.

Zum Einsatz kamen auf dem Produktionsfahrzeug u. a.:

- frequenzschwenkende 2D-Radarsensoren an den vier Ecken des Fahrzeuges für Kollisionsschutz im Nahbereich
- ein Dopplerradar zur Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit
- verschieden positionierte und orientierte hochauflösende 2D-Radarumfeldscanner für die Erzeugung einer 3D-Modellierung der Umgebung für die lokale Fahrwegplanung und die Positionierung in der Strecke

- mehrere Trägheitsinertialsensoren für die Modellierung des Fahrweges und auch die Bestimmung der Position der Schaufel oder die Stellung des Knickgelenkes des Fahrzeuges
- eine Kamera für die redundante Visualisierung der Umgebung in der Entwicklungsphase

Dieses Teilvorhaben wurde in Zusammenarbeit zwischen der indurad GmbH, Aachen, vertreten durch Matthias Rabel, und der GHH Fahrzeuge GmbH, Gelsenkirchen, realisiert. Der indurad GmbH oblag auch die erfolgreiche Gesamtkoordination des Projektes.

3.5. Echtzeitvisualisierung im VR-Leitstand

Ziel dieses Teilvorhabens ist die Konzeption und Entwicklung einer übergeordneten Leitstandssoftware für die 2D- und 3D-Visualisierung der Umgebungsdaten im bergmännischen Risswerk. Die Integration heterogener Daten, wie 3D-Grubengebäude, aktuelle Messwerte verschiedenster Sensoren, technische Daten der eingesetzten Technik oder Infrastruktur, Positionsdaten der Fahrzeuge, vergebene Fahraufträge, aktuelle Berechnungsergebnisse, simulierte Szenarien, ermöglicht eine intuitive Überwachung des Gesamtsystems und eine zentrale Datenanalyse. Visualisierung und Interaktion erfolgen auf mobilen Endgeräten oder als immersive 3D-Visualisierung (Virtual Reality).

Die XGraphic Ingenieurgesellschaft mbH, Aachen, hat diesen Teil bearbeitet, die Leitung hatte David Buttgeret inne.

3.6. Ableitung operativer Größen risswerkrelevanter Merkmale, TU Bergakademie Freiberg

Dieses Teilvorhaben wurde vom Institut für Markscheidewesen und Geodäsie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg in Zusammenarbeit mit MILAN Geoservice GmbH, Spremberg bearbeitet. Die Orientierung lag in der Anwendung vorhandener Algorithmen, nicht in deren methodischer Entwicklung oder Perfektionierung. Für die Bearbeitung aller Teilaufgaben, inklusive der markscheiderischen Referenzierung und der Betreuung der Projektpartner bei Messeinsätzen im Forschungs- und Lehrbergwerk Reiche Zeche, Freiberg, standen zwei wissenschaftliche Mitarbeiter für die Projektlaufzeit zur Verfügung.

Die Ergebnisse der nachfolgend vorgestellten Arbeitspakete werden halbautomatisiert dem Markscheider zur Übernahme in das bergmännische Risswerk vorgeschlagen. Das Risswerk stellt als amtlich geführtes Kartenwerk eines Gewinnungsbetriebes eine Urkunde mit öffentlichem Glauben dar. Diese ist in regelmäßigen Abständen zu aktualisieren und bei dem zuständigen Bergamt vorzulegen. Beurkunden dürfen in Deutschland nur Assessoren des Markscheidefaches. Bevor Änderungen in das Risswerk übernommen werden können, sind diese durch den Markscheider zu prüfen.

Die digitale Risswerkfortführung erfolgt im Lehrbergwerk Reiche Zeche in AutoCAD. Über ein Plug-In (Screenshot in Abb. 7) werden hierfür die automatisch detektierten Änderungen zur Prüfung angeboten. Neben der Anzeige von Eigenschaften, samt 2D-Darstellung, ist durch Softwareanbindung zusätzlich eine Bewertung anhand der erfassten 3D-Punktwolken in CloudCompare möglich. Die Übernahme erfolgt in einen separaten Layer der AutoCAD-Datei und erleichtert somit die finale Einarbeitung. Die Ergebnisintegration in das AutoCAD-geführte Risswerk bearbeitete Andreas Geier.

3.6.1. Haufwerksanalyse

Die Ziele der Haufwerksanalyse im Rahmen von UPNS4D+ waren:

- die Charakterisierung der Verteilung von Korngrößen und -formen im Haufwerk, bspw. durch Bestimmung der Parameter der Rosin-Rammler-Sperling-Bennet-Häufigkeitsverteilung²

² Die RRSB-Verteilung ist eine grundlegende statistische Verteilung für Partikelkollektive. Obwohl 1936 an TU Bergakademie Freiberg entwickelt, ist sie seit den 1950er Jahren international vorwiegend unter der Bezeichnung Weibull-Verteilung bekannt, zurückgehend auf einen schwedischen Wissenschaftler.

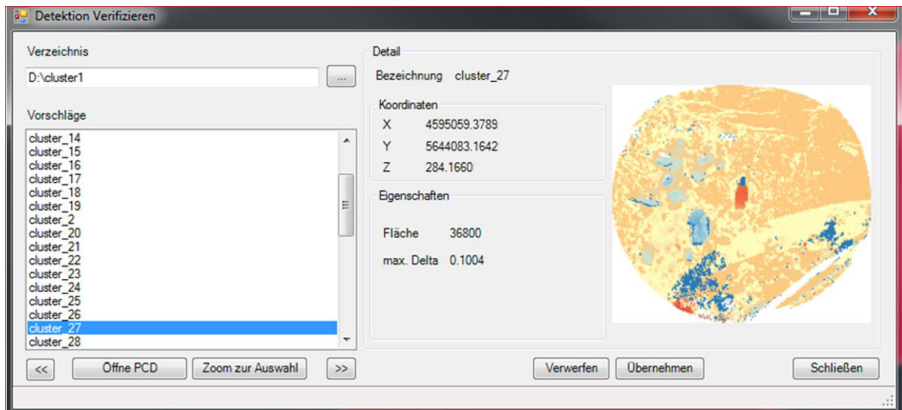


Abbildung 7: Menü zur Übernahme detektierter Sachverhalte in das Risswerk (Screenshot).

- ii. Erkennung großer Partikel (z.B. $\Phi > 50 \text{ cm}$) und ihrer Lage innerhalb des bergmännischen Haufwerkes

Erstes ermöglicht eine sukzessive Optimierung des Sprengregimes und eine Optimierung nachgeschalteter Zerkleinerungs- oder Aufbereitungsprozesse. Die Detektion großer Partikel, ii., wird die Automatisierung der Ladevorgänge vollenden. Die Haufwerksanalyse steigert also die Effizienz und reduziert die Umwelteinwirkungen.

Die praxisrelevanten Ansätze für die Charakterisierung der Korngrößenverteilung im Haufwerk reichen von der traditionellen Siebanalyse, bis hin zur digitalen halbautomatischen photogrammetrischen Bildauswertung. Eine vollständige Siebanalyse gilt auch heute noch als genaueste Methode. Da die Siebung des Haufwerkes sehr aufwändig und kostenintensiv ist, wird seit Jahrzehnten nach bildbasierten Alternativen gesucht (KATTNER 2000; WIPWAR & HIRSEMANN 2001; FLOTH 2013).

Aktuelle photogrammetrische Ansätze basieren auf der automatischen Segmentierung und Analyse von photogrammetrisch entzerrten digitalen Aufnahmen des Haufwerkes. Eine das Ergebnis mindernde Schwäche dabei bleibt jedoch die Tatsache, dass aus einseitig gemessenen Flächen einzelner Partikel Aussagen zum Volumen gewonnen werden müssen. Die Auswertung von photogrammetrisch oder durch Scannen generierten 3D-Daten des Haufwerkes erschien daher zielführend für eine realistischere Abschätzung der Äquivalentvolumina bzw. Korngrößen einzelner Partikel. Für die Bestimmung der Größen- und Formparameter einzelner Partikel, die jeweils durch vier manuell ausgewählte 3D-Punkte angesprochen werden, werden der Umgebung der selektierten Punkte Ellipsoide angepasst. Aus dem angepassten Ellipsoid wird der Radius einer Kugel gleichen Volumens (Äquivalenzradius) und aus den 3 Hauptachsen die Plattigkeit und Länglichkeit abgeleitet. Die Implementierung erfolgte in MatLab. Innerhalb der Projektlaufzeit konnte dieser Ansatz zur Ermittlung der Korngrößenverteilung aus 3D-Punktwolken jedoch nicht vollständig automatisiert werden. Immerhin ist mit ihm eine realistischere Modellierung unregelmäßiger Objekte des Haufwerkes gelungen. Demgegenüber konnte die Abschätzung der Lage großer Partikel im Haufwerk mit Hilfe eines Point Cloud Library (RUSU & COUSINS 2011)-basierten Konsolenprogrammes in C++ automatisiert werden. Alle großen Partikel werden erkannt, Abb. 8, gelegentlich werden größere Feinkornbereiche oder schlecht beleuchtete Gesteinscluster ebenfalls als großer Partikel klassifiziert. Die entscheidende Idee dafür ist die Segmentierung der Punktwolke auf Basis abgeschätzter Krümmungen. Die mittlere Punktdichte der Punktwolke soll 1 cm nicht überschreiten. Die erforderliche Rechenzeit steigt exponentiell mit der Punktzahl. Bearbeitung dieses Arbeitspaketes: André John.

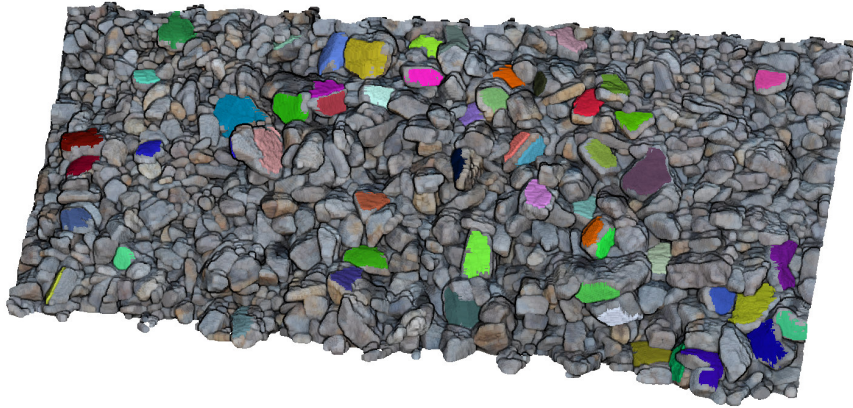
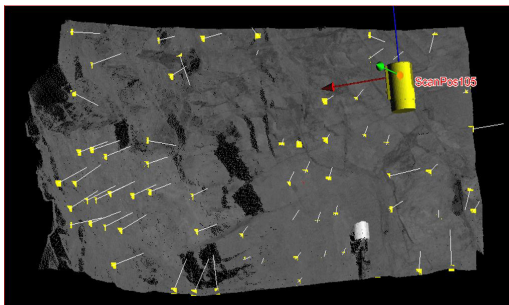
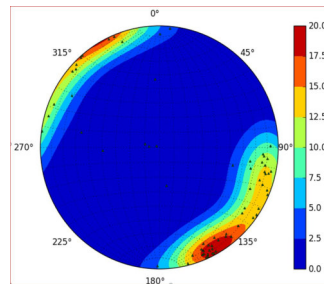


Abbildung 8: Haufwerksanalyse: Große Partikel und ihre Lage im Haufwerk wurden automatisch in einer 3D-Punktwolke detektiert.



(a)



(b)

Abbildung 9: (a) Punktwolke eines Stoßes mit Normalen der detektierten Ebenen. (b) Gefügedichteprojektion zur Darstellung der Klufflächenstatistik.

3.6.2. Analyse der Klufflächenstruktur

In der Tektonik und der Strukturgeologie wird die Klufflächenanalyse als Arbeitsmittel eingesetzt, um die Raumlage (Streichen und Fallen) einzelner Elemente tektonischer Körper zu beschreiben und aus der Gesamtheit dieser Elemente Rückschlüsse auf die Genese dieses Körpers ziehen zu können (WALLBRECHER 1986). Die Erfassung eines komplexen Aufschlusses ist zeitintensiv und nicht jeder Aufschluss ist leicht bzw. gefahrlos zugänglich, so dass der Einsatz von terrestrischem Laserscanning als indirektes Messverfahren naheliegend ist.

In den erfassten Punktwolken wird in Ausschnitten nach planaren Abschnitten gesucht – den geologischen Trennflächen. Aus der Ebenennormale der detektierten Elemente (Abb. 9 a) werden das Streichen (die Azimutrichtung) und das Fallen (die Neigung zur Horizontalen) abgeleitet und im Schmitz'schen Netz bzw. einer Gefügedichteprojektion (Abb. 9 b) dargestellt. Dieses Arbeitspaket wurde durch Andreas Geier bearbeitet.

3.6.3. Änderungsdetektion in 3D-Punktwolken

Punktwolken repräsentieren eine Oberfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt – der Epoche. Die Aufgabe der Änderungsdetektion besteht in der Feststellung von veränderten Bereichen innerhalb der erfassten Oberfläche zwischen zwei Epochen. Für die Änderungsdetektion aus Punktwolken existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen. Der Ansatz Multiscale model-to-model cloud comparison – (M3C2) (LAGUE ET AL. 2013) ermöglicht die Detektion von Änderungen ohne Modellierung einer Oberfläche und erzeugt Genauigkeitsmaße, die eine Bewertung zulassen. Ein abschließendes Region-Growing über gleichartige zusammenhängende Differenzen fügt diese zu Clustern zusammen und lässt die Ableitung von Schwerpunktkoordinaten, Fläche und Maximalveränderung zu.

Bearbeitung dieses Arbeitspaketes: Andreas Geier.

3.6.4. Geologische Vorerkundung auf Grundlage hyperspektraler Daten

In diesem Arbeitspaket waren für eine sensorgestützte Vorerkundung im Forschungs- und Lehrbergwerk Reiche Zeche folgende Teilaufgaben zu bearbeiten: Definition von Plattform, Sensorik und Beleuchtung sowie Entwicklung eines Klassifizierungsverfahrens.

Datengewinnung

Zur hyperspektralen Datengewinnung wurde eine Cubert UHD 185 SE Hyperspektralkamera mit einem Aufnahmewellenlängenbereich von 450 bis 950 nm (VIS-NIR) ausgewählt. Sie zeichnet bei einer Bildauflösung von 50×50 Pixel in 138 Spektren (4 nm Abstand) a 8 nm Breite auf. Die Pixelgröße beträgt mit dem ausgewählten 10,4 mm-Objektiv in 1 m Abstand etwa 1 cm^2 . Synchron wird im panchromatischen Bereich vom selben Bildfeld ein 1000×1000 Pixel Graustufenbild aufgenommen. Die Hyperspektralkamera wurde zur Erzeugung einer hyperspektralen 3D-Punktwolke mit zwei Logitech RGB-Kameras C920 (2304×1536 Pixel) kombiniert. Diese Konfiguration erlaubt das photogrammetrische Erzeugen einer räumlichen Punktwolke inklusive hyperspektraler Farbinformationen der aufgenommenen Szene.

Die Szene wird durch vier dimmbare Halogenstrahler mit je $2 \times 150 \text{ W}$ Leistung (Gesamtleistung 1200 W) beleuchtet. Durch diese technische Lösung können Effekte von Reflektionen und Abschattungen drastisch reduziert, jedoch nicht vollständig vermieden werden. Die aufgenommenen Messdaten sind lücken- und schattenbehaftet, was die Klassifikation beschränkt. Kameras und Beleuchtungseinrichtung können um $\pm 90^\circ$ geschwenkt und von $+90^\circ$ bis -60° geneigt werden. Schwenk-Neigeeinrichtung, Kameras und Beleuchtung werden automatisiert angesteuert. Für die Kalibrierung der Hyperspektralaufnahmen kann eine Spektralplatte in den Sichtbereich geklappt und Kalibrierungsaufnahmen für die hyperspektrale Vergleichbarkeit automatisiert gewonnen werden. Dies ist zu Beginn und am Ende einer Messfahrt sowie nach jeder Änderung der Beleuchtung erforderlich.

An einem zusätzlichen Pylonen können zwei photogrammetrische Messkameras mit zugehöriger LED-Beleuchtung oder ein Laserscanner integriert werden. Als mobiler Träger dieses Beleuchtungs- und Aufnahmesystems wurde ein schienentauglicher Unterbau konstruiert und hergestellt, Abb. 10. Dieser Unterbau beherbergt auch die Stromversorgung des Gesamtsystems sowie Steuerungseinheiten für Fahrzeug und Messelektronik.



Abbildung 10: Messfahrzeug der TU Bergakademie Freiberg im Einsatz im Untertageanhydritbergwerk maxit Baustoffe GmbH, Krölpa und im Forschungs- und Lehrbergwerk der TU Bergakademie Freiberg (Bildautoren: Ralf Donner und Steve Grehl)

Klassifikation

Das aufgenommene hyperspektrale Bild wird mit dem unüberwachten Klassifikationsverfahren Fuzzy C-Mean (FCM) klassifiziert. Dabei ist es jedoch nicht möglich, jedem Pixel die jeweilige Mineralklasse mit einer zufriedenstellenden Wahrscheinlichkeit von $> 90\%$, zuzuordnen. Mit der Einbindung von nachbarschaftlichen Beziehungen als Zusatzinformation werden verbesserte Klassifikationsresultate erreicht. Zuverlässig klassifizierte Bildelemente gehen als Stützstellen in eine geostatistische Simulation ein.

Das Ergebnis aus der Simulation wird mit der Wahrscheinlichkeit der FCM-Klassifikation verrechnet. Dadurch wird ein Klassifikationsverfahren realisiert, welches Nachbarschaftsbeziehungen berücksichtigt. Die für einen Transfer auf die untertägige Situation notwendige Optimierung der Beleuchtung ist Gegenstand laufender Entwicklung.

Dieses Arbeitsspaket verantwortet Sebastian Varga. Die integrierte Steuerung des Sensorsystems inklusive der Fahrzeugansteuerung wie auch die Erzeugung der hyperspektralen 3D-Punktwolken übernahm Marc Donner.



Abbildung 11: Zu klassifizierende Minerale eines Erzganges der Reichen Zeche des Forschungs- und Lehrbergwerkes

3.6.5. Automatische Ableitung der Stoßkanten

Das Bergwerkssystem und sein amtliches „Herzstück“, das Risswerk, enthalten die Stoßkanten mit einer Genauigkeit von ± 10 cm. Im Arbeitspaket „Grubenbaumonitoring“ wird eine automatische Detektion der Stoßkantenlinien neu aufgefahrner Bergwerksstrecken realisiert. Datengrundlage ist die vom Explorer aufgenommene georeferenzierte, farblose 3D-Punktvolke. Unstrukturierte bzw. amorphe Oberflächen waren neben Verdeckungen durch Kabel, Bewitterungsanlagen, Einbauten, Personen, Fahrzeuge größere Herausforderungen bei der automatisierten Grubenbaukartierung auf der

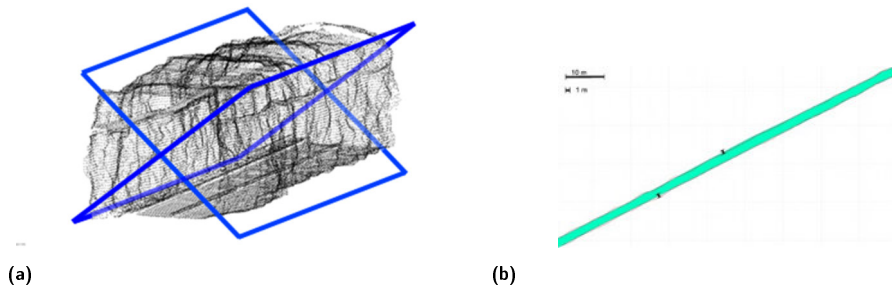


Abbildung 12: (a) Extraktion der Stoßkanten: Die Punkte, die über bzw. unter beiden Ebenen liegen, gehören hauptsächlich zu Sohle und Firste und können deshalb entfernt werden. Übrig bleiben rechter und linker Stoß. (b) Übereinstimmung von tachymetrisch und aus Punktvolken abgeleiteter Stoßkantenkonturlinien: Die Abweichungen sind auf eine Generalisierung bei der tachymetrischen Aufnahme zurückzuführen.

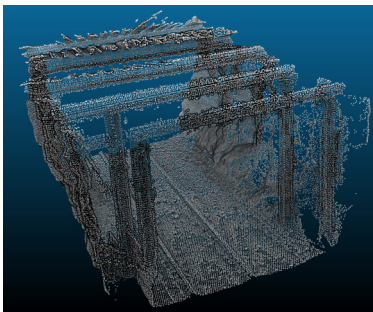
Grundlage von 3D-Punktwolken, da sie die Segmentierung in Sohle, Firste und Stöße erschweren. Die detektierten Stoßkanten werden als DXF-Polylinien in das Risswerk exportiert. Der Algorithmus ist robust gegenüber stark gefilterten Daten. Erst bei Punktabständen > 10 cm treten Abweichungen gegenüber dem konventionell erstellten Risswerk auf, die nicht auf eine Generalisierung bei der tachymetrischen Aufnahme zurückzuführen sind. Das Verfahren ist prinzipiell erfolgreich. Jedoch treten bei Abzweigungen oder komplexeren Streckenkreuzungen Fehler auf. Insbesondere für die Anwendung im Kammer-Pfeilerabbau sind weitere Entwicklungsarbeiten notwendig. Dieses Arbeitspaket wurde 2017 von Claudia Buhl bearbeitet.

3.6.6. Detektion infrastruktureller Installationen in der 3D-Punktwolke

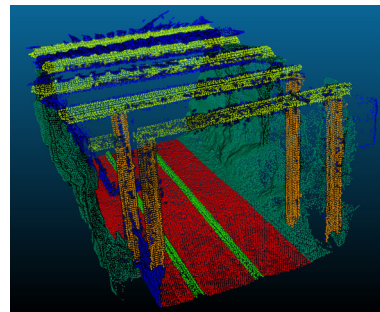
Zielstellung dieses Arbeitspaketes

Innerhalb des UPNS4D+-Projektes wird im Teilvorhaben „Merkmalsextraktion“ unter dem Aspekt der autonomen Kartierung eine automatische Erzeugung und Aktualisierung des Risswerks aus den vorhandenen Sensordaten angestrebt. Das Risswerk enthält u.a. Informationen über infrastrukturelle Installationen, wie z.B. Schienen oder Stempel. Die Position dieser Installationen gilt es aus den Sensordaten automatisch zu extrahieren.

Für die Detektion der Installationen werden nur die geometrischen Daten des Laserscanners herangezogen. Dieser liefert Messwerte in Form einer Punktwolke, d.h. einer ungeordneten Menge von Punkten, welche allein durch ihre Koordinaten $p = (x, y, z)$ gegeben sind. Die Punktwolke in Abb. 13 (a) zeigt einen untertägigen Streckenabschnitt und enthält ca. 120000 Punkte. Das Ziel, Positionen von infrastrukturellen Installationen aus den Sensordaten zu extrahieren, übersetzt sich für die vorliegenden Punktwolken in die Aufgabe, jedem einzelnen Punkt der Punktwolke ein zusätzliches Attribut in Gestalt eines Labels („Schiene“, „Stempel“, „Stoß“, etc.) zuzuordnen. Das Ergebnis einer solchen semantischen Klassifizierung ist in Abb. 13 (b) farblich kodiert dargestellt.



(a)



(b)

Abbildung 13: (a) Punktwolke eines untertägigen Streckenabschnitts mit ca. 120.000 Punkten. (b) Jedem einzelnen Punkt ist farblich kodiert ein Label („Schiene“ (hellgrün), „Stoß“ (dunkelgrün), „Stempel“ (orange)) zugeordnet.

Methoden

Die semantische Klassifikation von Punktwolken kann mit zwei generellen Herangehensweisen erfolgen, der Extraktion von „handgemachten“ geometrischen Merkmalen (Features) oder der Klassifizierung mit künstlichen Neuronalen Netzen (NN). Bei der Klassifizierung mit Neuronalen Netzen dienen die

Punktkoordinaten als Startwerte eines Neuronalen Netzes, welches die Label ableitet. Dieser Ansatz mittels Neuronaler Netzen wird im Folgenden vorgestellt, für die Klassifizierung anhand von geometrischen Features sei auf KÖHLER ET AL. (2018), BRODU & LAGUE (2012), HACKEL ET AL. (2016), WEINMANN ET AL. (2013) und WEINMANN ET AL. (2015) verwiesen.

Neuronale Netze

Neuronale Netze bestehen aus Knoten, welche in verbundenen Layern (Schichten) angeordnet sind. Die Verbindungen der einzelnen Layer heißen Gewichte. Ein NN besteht aus zwei oder mehr aufeinander folgenden Layern. Der erste Layer ist der Eingabe- oder Input-Layer, der letzte der Output-Layer, die zwischen ihnen liegenden heißen Hidden Layer (verborgene Schichten). In der normalen Anwendung (forward pass) gibt man die Werte auf den Knoten der Input-Layer vor und propagiert diese von Layer zu Layer bis zum Output-Layer. Die Werte der Output-Knoten stellen das Ergebnis dar. Es ist u.a. abhängig von den Gewichten der einzelnen Layer, welche einen Teil der Parameter des NN darstellen und durch Training an die entsprechende Aufgabe angepasst werden müssen. In unserem konkreten Anwendungsfall möchten wir ein NN zur semantischen Klassifizierung von Punktwolken benutzen, d.h. wir nutzen die Punkte der Punktwolke als Input und wollen als Ergebnis ein Label erhalten. Wir verwenden dabei eine spezielle Form von NN, die Faltenden Neuronalen Netze (FNN). Sie sind aus zwei generischen Layern aufgebaut, dem namengebenden Faltenden Layer und einem Pooling-Layer. In der Regel folgt auf einem faltenden Layer ein Pooling-Layer. Ein FNN besteht dann aus mehreren dieser Layer-Kombinationen.

Datenvorbereitung: Besetzungsgitter

Der Input für ein FNN ist ein geordnetes Grid, unsere Daten liegen allerdings als ungeordnete Punktwolke vor. Daher müssen die Daten vorbereitet werden, um ein FNN anwenden zu können. Dies erfolgt unter Verwendung eines Voxel-Grids (HACKEL, ET AL. 2017). In Abb. 14 wird dazu die Punktwolke in dreidimensionale Pixel (=Voxel) mit fester Kantenlänge eingeteilt. Ein Voxel wird als besetzt definiert, wenn mindestens ein Punkt der Punktwolke darin liegt. Für jedes besetzte Voxel werden nun die $N \times N \times N$ umgebenden Voxel betrachtet. Diese binären (eins - besetzt, 0 - unbesetzt) Voxel-Grids sind der Input für das dreidimensionale FNN. Der Output des FNN wird als Label für das zentrale Voxel definiert.

Architektur: 3D-faltendes Neuronales Netz

Die konkrete Architektur des verwendeten dreidimensionalen FNN ist in Abb. 15 dargestellt (HUANG & YOU 2016; MATURANA & SCHERER 2015). Die Input-Layer bestehend aus einem $16 \times 16 \times 16$ -Voxel-Grid. Es folgen die Faltung mit 32 verschiedenen $5 \times 5 \times 5$ Filtern und ein $\max()$ -Pooling mit entsprechend 32 Filtern der Dimension $2 \times 2 \times 2$. Ein zweiter Block von $5 \times 5 \times 5$ Faltung und $2 \times 2 \times 2$ Pooling schließt sich an. Abschließend folgen noch ein voll verbundener Layer, um alle Ergebnisse der 32 verschiedenen Filter zusammenzuführen und schließlich eine Softmax-Klassifizierungsschicht, welche Wahrscheinlichkeiten für unsere Label liefert. Das Label mit der höchsten Wahrscheinlichkeit wird als Klassifizierungsergebnis für die Punkte im zentralen Voxel des Voxelgrids angesehen.

Ergebnis: Klassifizierte Punktwolken

Die Ergebnisse in Form von klassifizierten Punktwolken sind in den Abb. 16 (a)-(c) dargestellt. Sie zeigen drei klassifizierte Szenen eines untertägigen Streckenabschnitts des Forschungs- und Lehrbergwerks „Reiche Zeche“ der TU Bergakademie Freiberg. Der mittlere Punktabstand der 3D-Punktwolke beträgt etwa 2 cm. Die zugeordneten Label sind farblich kodiert: rot - Boden, dunkelgrün - Stoß, hellgrün - Schiene, orange - Stempel, gelb - Stütze und blau - Sonstiges.

Die Klassifikation durch das FNN erfolgte unter Verwendung eines Voxelgrids mit einer Kantenlänge

eines einzelnen Voxels von 3.125 cm. Groß- und kleinskalige Elemente wurden nahezu vollständig korrekt gelabelt. Die im Training des FNN ermittelten Genauigkeitswerte von über 90% korrekt gelabelten Punkten finden sich damit in der Anwendung wieder. Dieses Arbeitspaket wurde durch Christian Köhler bearbeitet.

4. Die wichtigsten Ergebnisse des Projektes UPNS4D+

In den folgenden Abschnitten werden wesentliche, in den Teilvorhaben und Arbeitspaketen zum Projektende erreichte Ergebnisse dargestellt, aus Gründen der Übersichtlichkeit in Stichpunkten.

- Das elektrifizierte Kettenfahrzeug schafft als Multisurface-Sensorträger weiten Raum für Forschung und Entwicklung bergbautauglicher IT-Anwendungen (Fritz Rensmann Maschinenfabrik, Dortmund)
- Umsetzung einer referenzlosen Lokalisierung (AMT/RWTH)
- 3D-Erfassung der Umgebung als Navigationsgrundlage für autonomes Fahren von Explorer oder Produktionsfahrzeug (MASCOR/FH Aachen)
- Positionierung und lokale Navigation des Erkundungsfahrzeugs zum autonomen Fahren (AMT RWTH Aachen)
- Entwicklung eines für LiDAR und RADAR gemeinsam nutzbaren Reflektors (MILAN GmbH mit TU Freiberg und indurad GmbH)
- ROS-Anbindungen zur Visualisierung nahezu sämtlicher am Erkundungsfahrzeug befestigter Sensoren; Visualisierung der sukzessive aufgenommenen Punktwolken in nahezu Echtzeit (MASCOR/FH Aachen)
- Erzeugung einer globalen 3D-Karte im Postprocessing aus den 3D-Punktwolken der erkundeten Strecken (MASCOR/FH Aachen)
- globale Pfadplanung, Fahren und Kollisionsschutz des Erkundungssystems (AMT/RWTH, [div. RWTH-Poster UPNS4D+])
- mapit, Software für Austausch, Bearbeitung, Visualisierung und VR-Darstellung großer, mehrdimensionaler Datenmengen (MASCOR/FH Aachen)
- Entwicklung der Softwarebibliothek CuteVR, welche die Schnittstellen zu VR-Geräten vereinheitlicht und die Betrachtung sämtlicher Sensordaten in VR erlaubt. Der Benutzer kann hiermit virtuell neben dem Erkundungsfahrzeug "herlaufen". (MASCOR/FH Aachen)
- Eine Schnittstelle von mapit zu ROS erlaubt die Rückführung einer erzeugten Karte in den Kontext des Erkundungsfahrzeugs. So können während einer Nacherkundung aktuelle Sensordaten in einem zugehörigen Kartenausschnitt mit angemessener Auflösung visualisiert werden. (MASCOR/FH Aachen)
- Teleoperiertes und halbautonomes Fahren des GHH-Fahrladers in einer 3D-Umgebung (indurad GmbH mit GHH Fahrzeuge GmbH, Gelsenkirchen)
- Darstellung der aktuellen Fahrzeugpositionen, Maschinendaten und Remote-Steuerung des Fahrladers als Apps für mobile Endgeräte oder als VR-Visualisierung (XGraphic IGmbH, Aachen)

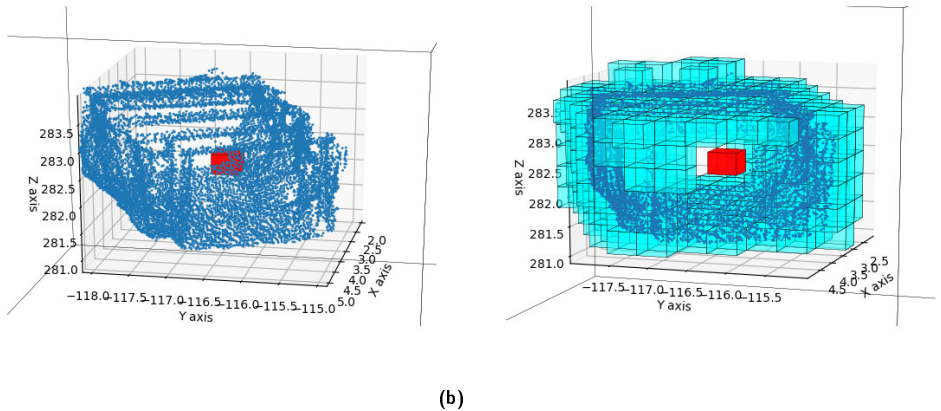


Abbildung 14: (a) Die ungeordneten Daten der Punktwolke mit einem einzelnen, in Rot dargestellten Voxel. In (b) sind alle besetzten Voxel des Voxel-Grids eingetragen. Jedes besetzte Voxel dient als zentrales Voxel eines $N \times N \times N$ großen Voxelgrids, welches als Input für das FNN verwendet wird.

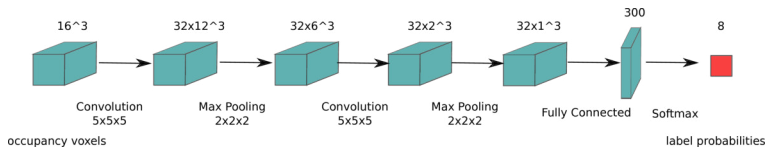


Abbildung 15: Die Geometrie des verwendeten FNNs. Die Würfel symbolisieren die einzelnen Layer, repräsentiert durch dreidimensionale Grids mit den darüber angegebenen Dimensionen. Die verwendeten Filter und deren Dimensionen sind darunter angegeben. Als Input dient ein $16 \times 16 \times 16$ großes binäres Voxel-Grid, als Ergebnis erhalten wir Wahrscheinlichkeiten für die Label.

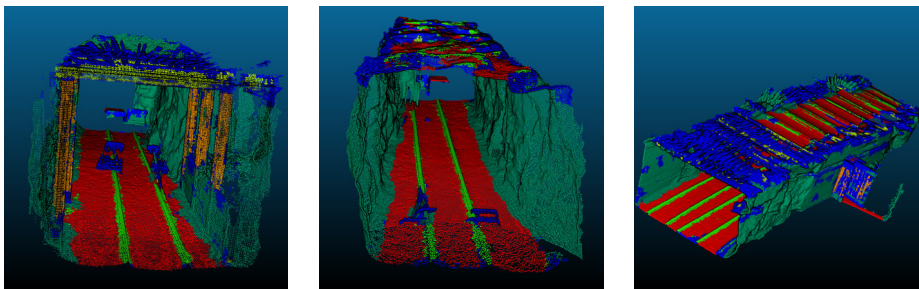


Abbildung 16: Klassifizierungsergebnisse mit 3D-Faltendem Neuronalem Netz. Die zugeordneten Label sind farblich kodiert: rot - Boden, dunkelgrün - Stoß, hellgrün - Schiene, orange - Stempel, gelb - Stütze und blau - Sonstiges.



Abbildung 17: Universalreflektor für LiDAR und RADAR.

- Software zur Erzeugung einer Klufflächenstatistik, Haufwerksanalyse, Stoßkantenkartierung, Objekterkennung infrastruktureller Installationen, Detektion von Änderungen, hyperspektraler Punktwolken und geologischen Vorerkundung auf Basis hyperspektraler Daten sowie Entwicklung und Herstellung eines schienentauglichen Sensorträgers für Hyperspektraltechnik und Beleuchtung inklusive Steuerungssoftware (TU Bergakademie Freiberg, Details siehe Abschnitt 3.6)

Literatur

- BRODU, N., & LAGUE, D. (2012): 3d terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi scale dimensionality criterion. Applications in geomorphology. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing(68), S. 121-134
- FLOTH, M. (2013): Analyse einer Gewinnungssprengung mithilfe eines Hochgeschwindigkeitskamera-Stereo-Systems, In: Luhmann, Müller [Hrsg.] Photogrammetrie-Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, Wichmann-VDE Verlag, S. 104-113, ISBN 978-3-87907-528-7
- HACKEL, T., SAVINOV, N., LADICKY, L., WEGNER, J. D., SCHINDLER, K., & POLLEFEYS, M. (2017): Semantic3d.net: A new large-scale point cloud classification benchmark. CoRR
- HACKEL, T., WEGNER, J. D., & SCHINDLER, K. (2016): Fast semantic segmentation of 3d pointclouds with strongly varying density. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 3(3).
- HIRSEMANN, A. (2001): Systematische digitale Haufwerksanalysen in verschiedenen Tagebaubetrieben mittels Verfahren Unifrag im Vergleich zu Wipfrag. - Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Studiengang Markscheidewesen und Geodäsie, Freiberg, 09.11.2001, (unveröffentlicht).

- Huang, J., & You, S. (2016): Point cloud labeling using 3d convolutional neural network. 23rd Inter-national Conference on Pattern Recognition (ICPR), (S. 2670-2675)
- INNOVATIONR4: <https://www.r4-innovation.de/de/upns4d.html>, Zugriff: 11.12.2018
- KATTNER, K. (2000): Projekt Hase, Untersuchung zum Einsatz der digitalen Bildverarbeitung für die Analyse der Kornformen- und Kornverteilung im Haufwerk und der Klüftigkeit im Gebirge. Zwischenbericht vom 14.01.2000
- KÖHLER, C., DONNER, M., & DONNER, R. (2018): Semantische Klassifizierung von 3D-Punktwolken. 19. Geokinematischer Tag. Freiburg. S. 159 – 171
- LAGUE, D., BRODU, N. & LEROUX, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z)
- MATURANA, D., & SCHERER, S. (2015): Voxnet: A 3d convolutional neural network for real-time object recognition. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Pitts-burgh
- NEUMANN, T., DÜLBERG, E., SCHIFFER, S. & FERREIN, A. (2017): A Rotating Platform for Swift Acquisition of Dense 3D Point Clouds. In ICIRA (1), volume 9834 of Lecture Notes in Computer Science, pages 257–268, 2016. Springer. Download: <https://pdfs.semanticscholar.org/d5ac/3f0239645d2fdf8b4893a98863af1ad06e23.pdf>; 7.1.2019
- FH-POSTER MAPIT (2018): T. Neumann, K. Krückel, D. Bulla, M. Claer, M. Meeßen, A. Ferrein & I. Scholl: UPNS 4D+: Robotik Karten. Unveröffentlichtes Poster der Abschlussdemonstration am 28.11. 2018 des Mobile Autonomous Systems & Cognitive Robotics Institute (MASCOR) der FH Aachen, "working in progress"
- FH-POSTER ÜBERSICHT (2018): T. Neumann, K. Krückel, D. Bulla, M. Claer, M. Meeßen, A. Ferrein & I. Scholl: UPNS 4D+: 6D Kartographie - Übersicht. Unveröffentlichtes Poster der Abschlussdemonstration am 28.11. 2018 des Mobile Autonomous Systems & Cognitive Robotics Institute (MASCOR) der FH Aachen, "working in progress"
- RWTH-POSTER UPNS4D+ (2018): T. Hartmann: Objekt- und Umgebungserkennung. Unveröffentlichtes Poster der Abschlussdemonstration am 28.11. 2018 des Institute of Advanced Mining der RWTH Aachen, "working in progress"
- RWTH-POSTER UPNS4D+ (2018): T. Hartmann: Teleoperation und Navigation. Unveröffentlichtes Poster der Abschlussdemonstration am 28.11. 2018 des Institute of Advanced Mining der RWTH Aachen, "working in progress"
- RWTH-POSTER UPNS4D+ (2018): T. Hartmann: Übersicht über das Erkundungsfahrzeug "Dora". Unveröffentlichtes Poster der Abschlussdemonstration am 28.11. 2018 des Institute of Advanced Mining der RWTH Aachen, "working in progress"
- XGRAPHIC-POSTER UPNS4D+ (2018): D. Buttgerit: Teilvorhaben Leitstand-Software. Unveröffentlich-tes Poster der Abschlussdemonstration am 28.11. 2018 der XGraphic IGmbH Aachen, "working in progress"
- RUSU, R.B. & COUSINS, S. (2011): 3D is here: Point Cloud Library (PCL). IEEE International Confer-ence on Robotics and Automation (ICRA), May, pp. 1 – 4
- WALLBRECHER, E. (1986): Tektonische und gefügeanalytische Arbeitsweisen; Ferdinand Enke Verlag Stuttgart; 1986; ISBN 3 432 95671 1
- WEINMANN, M., JUTZI, B. & MALLETT, A. C. (2013): Feature relevance assessment for the semantic interpretation of 3d point cloud data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (5)

WEINMANN, M., JUTZI, B., HINZ, S. & MALLET, C. (2015). Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. ISPRS Journal of Photo-grammetry and Remote Sensing (105), S. 286 – 304

WIPWARE: <http://www.wipware.com/wipfrag.php>