

Erfassung von Hochspannungsleitungen und Schutzräumen aus Laserscannern -

Entwicklung eines Workflows zur Verarbeitung von dreidimensionalen Punktwolken

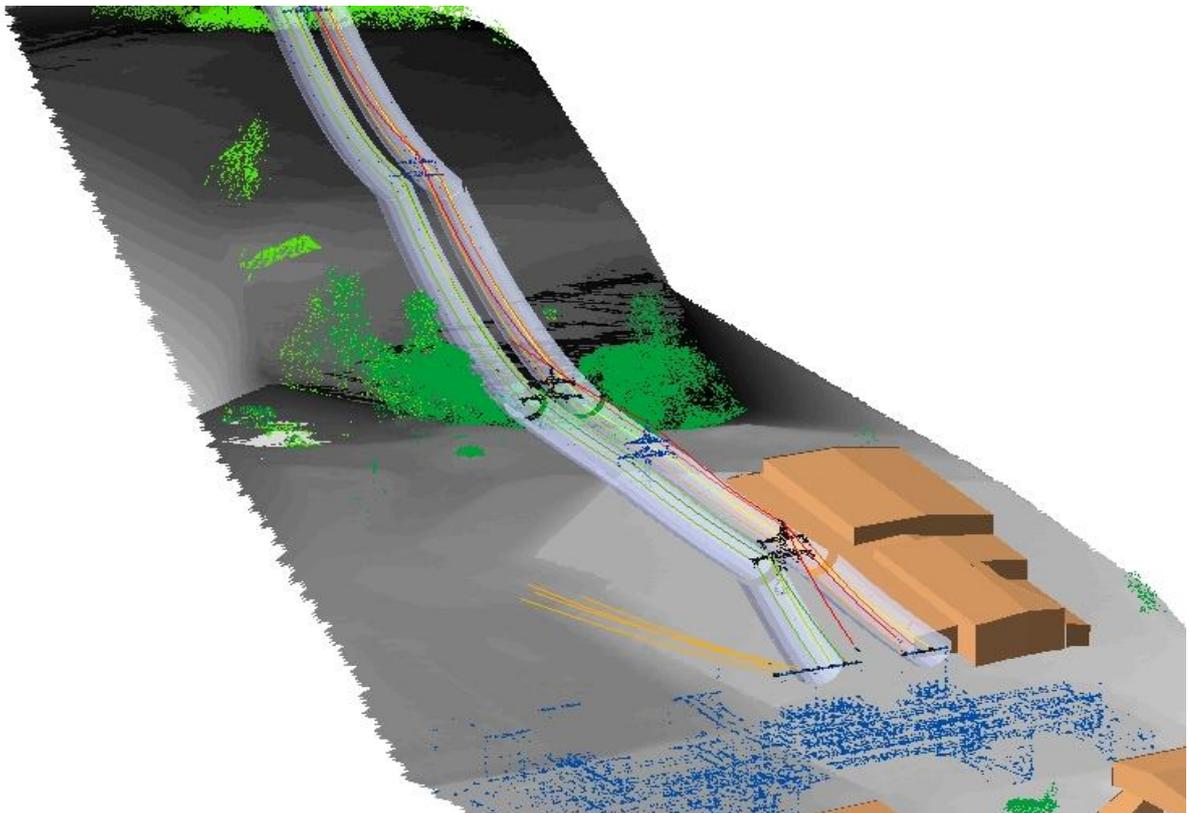
Master Thesis zur Erlangung des Titels

„Master of Science“

Im Rahmen des Studienganges UNIGIS MSc an der Universität Salzburg vorgelegt von

Thomas Strellen, U1005

UNIGIS 2003



Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, die vorliegende Master Thesis ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen, wörtlich oder inhaltlich, entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Raisting, der 15.04.2005

Thomas Strellen

Diplom Ingenieur(FH)

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung: Erfassung von Hochspannungsleitungen durch Laserscannmessung	- 7 -
2.	Aufgabenstellung, Problemanalyse	- 9 -
2.1	Gestaltung eines Workflow zur Erfassung von Hochspannungsleitungen und Schutzräumen entlang der Leitungstrasse aus Laserscanndaten	- 9 -
2.2	Problemstellung: Besonderheiten der Daten und der Erfassungsmethodik	- 10 -
3.	Technologie der Laserscannmessung	- 12 -
3.1	Messprinzip der flugzeuggestützten Laserscannaufnahme	- 12 -
3.2	Interaktion des Laserstrahls mit den erfassten Objekten	- 16 -
3.2.1	Auflösungsvermögen, Trennschärfe, Reflektionsleistung	- 17 -
3.2.2	Störende Einflussfaktoren	- 23 -
3.3	Orientierung der Laserscanndaten	- 24 -
3.3.1	DGPS	- 24 -
3.3.2	INS	- 25 -
3.3.3	Direkte Georeferenzierung	- 25 -
4.	Beschreibung der Aufnahmesituation und der vorliegenden Daten	- 28 -
4.1	Aufnahmekonstellation der Laserscannmessung zur Erfassung von Hochspannungsleitungen	- 28 -
4.2	Beschreibung der Testdaten	- 29 -
5.	Filterung der Laserdaten	- 31 -
5.1	Grundsätzlicher Ansatz zur Filterung von Laserscanndaten	- 31 -
5.2	Filterung des Geländemodells aus einer Punktwolke	- 33 -
5.2.1	Lineare Prädiktion (auch: Robuste Interpolation oder Interpolation nach kleinsten Quadraten)	- 34 -
5.2.2	Progressive TIN- Verdichtung	- 36 -
5.2.3	Morphologische Filterung und Dual Ranking	- 37 -
5.3	Zusammenfassung	- 42 -
6.	Filterung der Trasse L1035	- 43 -
6.1	Filterung des DGM	- 44 -
6.2	Bewertung des gefilterten DGM	- 51 -
6.3	Filterung der Leitungstrasse	- 53 -
6.4	Modellierung der Leitungstrasse	- 59 -
6.5	Bestimmung der Schutzräume	- 64 -
6.6	Digitales Situationsmodell	- 66 -
7.	Zusammenstellung und Beurteilung der Ergebnisse	- 68 -
8.	Ausblick auf weitere Möglichkeiten	- 71 -
9.	Literaturverzeichnis	-72-
10.	Internetquellen	-73-
11.	Weitere Quellen	-76-

Glossar

Anhang A: Allgemeine Einführung in die Lasertechnik

Anhang B: Oberflächeninterpolationsverfahren

Anhang C: VBA- Code zur automatisierten Berechnung eines Geländemodells

Anhang D: VBA- Code zur Interpolation der Seile

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Rohdaten L1035_11	- 9 -
Abb. 2: Prinzip der Laserscannmessung.....	- 13 -
Abb. 3: Scannmuster: Schwingspiegelscanner, Polygonscanner, Fasenscanner	- 13 -
Abb. 4: Objektgenauigkeit der Laserscannmessung, Maßstab ca. 1:200	- 15 -
Abb. 5: Beispiele für identifizierbare Objekte: Mast, Gebäude, Baum	- 16 -
Abb. 6: Auflösung der Laserscanndaten	- 17 -
Abb. 7: Trennschärfe der Laserscanndaten	- 19 -
Abb. 8: Prinzip des Lambertstrahler	- 19 -
Abb. 9: Einfluss der Rauigkeit auf den Streuquerschnitt.....	- 21 -
Abb. 10: Streuquerschnitte an verschiedenen Objekten	- 21 -
Abb. 11: Klassifikation nach Reflektionswerten.....	- 23 -
Abb. 12: Vektormodell der direkten Georeferenzierung	- 26 -
Abb. 13: Laserscannflug mit dem Hubschrauber	- 28 -
Abb. 14: Trainingsgebiet	- 30 -
Abb. 15: Datenkonsistenz	- 32 -
Abb. 16: Kovarianzfunktion zur linearen Prädiktion.....	- 34 -
Abb. 17: Trend- und Geländeoberfläche	- 35 -
Abb. 18: Triangulated-Irregular-Network	- 36 -
Abb. 19: Progressive TIN- Verdichtung	- 37 -
Abb. 20: Strukturelemente zur morphologischen Filterung	- 38 -
Abb. 21: FocalMax: das Maximum der umliegenden Pixel wird dem aktuellen Pixel zugeordnet.....	- 38 -
Abb. 22: Resultat der <i>Dilatation</i> mit dem FocalMax- Operator	- 38 -
Abb. 23: Berechnung der Standardabweichungen aus den benachbarten Pixeln	- 40 -
Abb. 24: Grauwertbild vor der Berechnung der Stdbaw.	- 40 -
Abb. 25: Bild nach der Berechnung.....	- 40 -
Abb. 26: Kandidaten der zu löschenden Punkt	- 41 -
Abb. 27: Verbleibendes Geländemodell.....	- 41 -
Abb. 28: Hillshade der Rohdaten, Los L1035, Teil 1.1	- 44 -
Abb. 29: Erste Pyramidenstufe, Suchradius 20 m	- 45 -
Abb. 30: Zweite Stufe, Suchradius 10 m.....	- 45 -
Abb. 31: Dritte Pyramidenstufe, Suchradius 5 m	- 45 -
Abb. 32: Vierte Stufe, Suchradius 1 m.....	- 45 -
Abb. 33: Fünfte Pyramidenstufe, Suchradius 0.5 m.....	- 46 -
Abb. 34: Differenz zwischen DGM20 und DGM10	- 46 -
Abb. 35: Hillshade des DGM 20-10.....	- 46 -
Abb. 36: Auswirkung einer Stützmauer auf das Filterverfahren	- 47 -
Abb. 37: Kompensation des Geländeversatzes durch Bruchkanten	- 48 -
Abb. 38: Ablaufdiagramm der DGM-Berechnung	- 50 -
Abb. 39: Hillshade des fertigen DGM L1035_11.....	- 51 -
Abb. 40: Ergebnisse der DGM- Berechnung: Qualität der Interpolation	- 52 -
Abb. 41: Hypothese: Aufragende Vegetation	- 52 -
Abb. 42: DGM- Verbesserung durch Einführung von Bruchkanten	- 53 -
Abb. 43: Orthofoto mit dem Topographiemodell als Grundlage für die Maskenerstellung	- 54 -
Abb. 44: Topographiemodell nach der vierten Erosion.....	- 55 -
Abb. 45: Flächenmaske, klassifiziert nach Flächengrößen.....	- 56 -
Abb. 46: Problemzone Scannrand und benachbarte Objekte	- 57 -
Abb. 47: Gefilterte Vegetation.....	- 58 -
Abb. 48: Abb. Aufhängepunkte an Tragmasten und Abspannmast	- 59 -
Abb. 49: Ergebnis der Interpolation der Leitungen	- 60 -
Abb. 50: Ergebnis der Cut/Fill Analyse	- 64 -
Abb. 51: Digitales Situationsmodell.....	- 67 -
Abb. 52: Digitales Situationsmodell: Detail	- 67 -

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Reflektionsgrad für verschiedene Materialien bei einer Wellenlänge von 1µm.....	- 22 -
Tab. 2: Leitungsverzeichnis.....	- 29 -
Tab. 3: Koordinatenliste eines einzelnen Seiles	- 61 -
Tab. 4: Zusammenstellung der Restklaffung am Mast Nr.180102.....	- 62 -
Tab. 5: Zusammenstellung der Mastkoordinaten.....	- 63 -

Formelverzeichnis

Formel 1: Auflösungsvermögen.....	- 17 -
Formel 2: Öffnungswinkel.....	- 17 -
Formel 3: LIDAR-Gleichung.....	- 20 -
Formel 4: Kalibrierungskonstante.....	- 20 -
Formel 5: Streuquerschnitt.....	- 21 -
Formel 6: Streuquerschnitt an Leitungen.....	- 21 -
Formel 7: Streuquerschnitt an großen Objekten.....	- 22 -
Formel 8: Georeferenzierung der LIDARdaten.....	- 26 -
Formel 9: Kovarianzfunktion zur linearen Prädiktion.....	- 34 -
Formel 10 Lineare Prädiktion:.....	- 35 -
Formel 11: Erosion.....	- 39 -
Formel 12: Dilatation.....	- 39 -
Formel 13: Opening.....	- 39 -
Formel 14: Closing.....	- 39 -
Formel 15: Dual Rank.....	- 39 -
Formel 16: Morphologische Erosion.....	- 45 -
Formel 17: Umsetzung der Erosion in Map Algebra.....	- 45 -
Formel 18: Pyramidenbildung umgesetzt in Map Algebra.....	- 45 -
Formel 19: Pyramidendifferenzen.....	- 46 -
Formel 20: Differenzmodell zwischen digitalem Geländemodell und digitalem Oberflächenmodell.....	- 52 -
Formel 21: Differenzmodell.....	- 53 -
Formel 22: Topographiemodell > 1,5m.....	- 53 -
Formel 23: Erweitertes Opening zur Modellierung der topographischen Masken.....	- 54 -
Formel 24: Erweitertes Closing zur Modellierung der topographischen Masken.....	- 55 -
Formel 25: Berechnung der Kompaktheit.....	- 56 -
Formel 26: Selektion über Attribute für Tragmasten.....	- 57 -
Formel 27: Map Algebra Ansatz zur Berechnung der Vegetationsmaske.....	- 58 -
Formel 28: Map Algebra Ansatz zur Berechnung des Leitungsmodells.....	- 59 -
Formel 29: Ausgleichende Gerade und Ausgleichendes Polynom.....	- 60 -
Formel 30: Berechnung einer Kettenlinie.....	- 65 -

Zusammenfassung

Die Laserscannertechnik als eine recht junge Disziplin der Photogrammetrie erfährt aktuell eine rasante Entwicklung. Die hohe Datendichte erlaubt eine detaillierte Darstellung des aufgenommenen Terrains. Dabei sind die Daten der Laserscannbefliegung nicht mehr nur Grundlage für die Generierung von Geländemodellen sondern auch Datengrundlage für die Erfassung komplexer topographischer Objekte. Die Erfassung von Hochspannungsleitungen deckt dabei ein weites Spektrum von möglichen Bearbeitungsszenarien ab. Die Ableitung eines DGM, von Vegetation, von Gebäuden und Anlagen und nicht zuletzt die eigentliche Hochspannungsleitung werden mehr oder weniger automatisch aus dem Datensatz gefiltert. Aufbauend auf diese Daten wird ein Schutzraum definiert, der einen Mindestsicherheitsbereich um die Leitungen festlegt. Mit diesem Schutzraum werden Vegetationspunkte oder sonstige Punkte im Bereich der Leitung selektiert und markiert. Als Thema innerhalb eines digitalen Situationsmodells stehen die so gewonnenen Daten gemeinsam zur Planung von Pflegemaßnahmen entlang der Hochspannungsleitung zur Verfügung und können entsprechend abgefragt werden.

Abstract

The technique of airborne Laser scanner data acquisition is a young but fast growing discipline of photogrammetric knowledge. Its high sampling rate of data allows very detailed representation of scanned terrain. In this case airborne Laser Scanner Data is not only used to calculate digital terrain models but also basic data to extract more or less complex topographic Objects The registration of power lines represents a wide spectrum of possible Workflows. Filtering of digital terrain models, vegetation, buildings and supplies and also the power line itself should be extracted more or less automatically out of the data. These data is built up to an protection folder around the lowest wires, which represents a save area along the power line. Within this save area all of the vegetation or topographies is selected and marked. As a special theme it would be added together with the other extracted data as a digital situation model in order to take care about the actual situation along the power line.

Vorwort

Der Autor als aktiver Photogrammeter hat seit seinem Studium der Vermessungstechnik in den achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts die gesamte Entwicklung der Photogrammetrie und der Erfassung dreidimensionaler räumlicher Daten durch nicht-terrestrische Methoden miterlebt.

Ausgehend von der analogen optisch-mechanischen Auswertung von Luftbildern direkt auf einen Zeichenträger über die rechnergestützte, analytische Auswertung hin zur Verarbeitung vielschichtiger digitaler Geoinformation aus digitalen Raumdaten, die weit über die Interpretation die Darstellung der Topographie oder Oberflächenbeschaffenheit hinausgeht, haben sich die Werkzeuge und die möglichen Aufgaben des Photogrammeters ständig erweitert. Die Arbeitsweise der Photogrammetrie wandelt sich in diesem Zusammenhang zusehends von der selektiven Datenerfassung im Zusammenhang mit der visuellen Interpretation von Bilddaten zur Modifikation und Entwicklung verschiedener Algorithmen aus unterschiedlichen Wissensgebieten zur Verarbeitung und Interpretation von zum Teil automatisiert gewonnenen Geodaten. Diese Wandlung der gesamten Arbeitsweise der Photogrammetrie erfordert ein völlig neues Datenverständnis. Nicht die Erstellung von detaillierten Einzelinformationen aus einer intuitiv interpretierbaren Datengrundlage steht im Mittelpunkt sondern die Extraktion von Einzelinformationen aus einer schier unüberschaubaren Datenflut unterschiedlichster Herkunft und Eigenschaften.

Die Verarbeitung von digitalen Sensordaten oder Laserscandaten und die ständige Auseinandersetzung mit neuen Sensoren, Daten und Methoden ist zentraler Bestandteil der täglichen Arbeit. Die Aufgabe des Photogrammeters ist es nun, für die jeweilige anstehende Aufgabe das passende, effektive und wirtschaftliche Verfahren zu finden, zu modifizieren und die Aufgabe zu den, vom Auftraggeber vorgegebenen Konditionen (Genauigkeit, Umfang, Preis) zu erfüllen. Diese individuelle Aufgabe bedarf in aller Regel einer Anpassung vorhandener Verfahren, Techniken, Algorithmen, um der speziellen Fragestellung gerecht zu werden. In diesem Zusammenhang lohnt es sich sehr, den Blick in benachbarte Wissensgebiete schweifen zu lassen, um Methoden und Ansätze verwandter Technologien nutzbar zu machen.

Das Ziel dieser Auseinandersetzung mit aktuellen Technologien ist die Erstellung eines effektiven Angebotes an möglichen technischen Dienstleistungen unter der Ausnutzung der verfügbaren Ressourcen.

An dieser Stelle möchte der Autor sich kurz bedanken bei den Herren Wolfgang Dee und Axel Hochgreve und der E.ON Netz GmbH für die Bereitstellung der Daten und zusätzlichen Informationen, Herrn Luc Amoureux von der Firma Fugro- Inpark, Niederlande für die detaillierten Informationen zum Aufnahmesystem und der Laserscannbefliegung, Frau Elke Kramer für die Redigierung der Arbeit und Überprüfung der Verständlichkeit, Herrn Rinaldo Crepez für Know How und Literatur, und Herrn Walter Wakolbinger, meinem Kompagnon, für seine Geduld und für das ‚Rückenfreihalten‘. Ganz besonders danke ich meiner Frau für Geduld, gutes Essen und Formulierungstipps.

1. Einführung: Erfassung von Hochspannungsleitungen durch Laserscannmessung

In Deutschland wird die Energieversorgung mit elektrischem Strom durch ein Verbundnetz von rund 1,6 Millionen Kilometern Leitungslänge von den Kraftwerken zu den Verbrauchern realisiert. 29 % oder 465.000 km dieser Leitungen sind überirdische Freileitungen (vgl. *Wikipedia: Stromnetz, 2003*). Das Übertragungsnetz für Hochspannung (50 bis 150 kV) sorgt für die regionale Verteilung des elektrischen Stromes von den Kraftwerken zu Umspannstationen und besonders auch zu großen Industriebetrieben.

Dieses Leitungsnetz und die gesamte Trasse der Leitungen bedürfen einer regelmäßigen Kontrolle und Überwachung. Insbesondere die trassennahe Vegetation stellt für den Betrieb der Freileitungen des Hochspannungsnetzes mit Masthöhen bis 30 m eine Gefährdung dar. Aus diesem Grunde werden die Freileitungstrassen umfassend dokumentiert. Seit einigen Jahren wird diese Erfassung der Leitungen und der begleitenden Topographie durch das Verfahren der Laserscannmessung realisiert. Bei diesem Verfahren wird von einem Hubschrauber aus mit einem gerichteten Laserstrahl die Entfernung zum Erdboden oder zu einem beliebigen topographischen Objekt auf der Erdoberfläche gemessen. Die Reflektion an den topographischen Objekten oder der Erdoberfläche wird als die dreidimensionale Koordinate eines Objektpunktes registriert und gemeinsam mit tausenden weiteren Objektpunkten als Punktwolke abgespeichert.

Die Laserscannmessung ermöglicht eine flächendeckende Erfassung der Trasse auch in schwer zugänglichen Gebieten abseits großer Verkehrswege und ist deshalb terrestrischen Erfassungsmethoden, die auf den direkten Kontakt mit dem zu vermessenden Objekt angewiesen sind, überlegen.

Darüber hinaus ist dieses Messverfahren durch den Einsatz besonderer Navigationsmethoden (GPS/INS – vgl. Kap. 3.3) von ortsnahen Passpunkten zur Einbindung der Messungen ins Landeskoordinatensystem relativ unabhängig.

Neben den Masten und den Seilen (= frei schwingende Leitungen) werden die begleitende Topographie (Bäume, Sträucher, Gebäude, kreuzende Leitungen) und die Geländeoberfläche erfasst. Ausgehend von dem, aus Laserscann Daten ermittelten Ist-Zustand der Seile, den Materialspezifikationen der Seile und der Position der Aufhängepunkte können die maximalen Ausdehnungen der Seile und das theoretisch mögliche Schwing-Verhalten ermittelt werden. Die Berechnung des Ausdehnungsverhaltens der Seile, verstärkt durch Eislast oder durch extremen Wärmeeinfluss würde jedoch den Rahmen dieser Master Thesis sprengen ist somit nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die Bestimmung der Schutzräume in Kapitel 6.5 ist ohne weiteres auf berechnete Seile unter oben genannten Bedingungen übertragbar.

Einige Ansätze zur Verarbeitung und Analyse von Daten einer Laserscannmessung werden in der Folge vorgestellt und erläutert. Besonderes Augenmerk gilt der Besonderheit der Laserscann Daten als räumliche Punktwolke, deren „Einzelmessungen sich mehr oder weniger zufällig über einen Flugstreifen verteilen“ (vgl. Katzenbeisser & Kurz, 2004, S.183) ohne expliziten Zusammenhang zwischen der Lage des gemessenen Einzelpunktes und des abgebildeten Objektes.

Im Vorfeld wird die Technologie der Laserscannmessung (Kapitel 3.1 und 3.2), die Orientierung und Referenzierung (Kapitel 3.3) der Punktwolke erläutert.

Im Folgenden werden die vorliegenden Daten mit Blick auf die Möglichkeiten der Analyse beschrieben (Kapitel 4). Darüber hinaus werden das technische Umfeld und die Besonderheiten der Dokumentation und Überwachung von Hochspannungsleitungen dargestellt (Kapitel 4.1).

Die theoretischen Ansätze zur Filterung von Laserscanndaten, ausgehend von mathematischen und statistischen Ansätzen der Oberflächeninterpolation (Anhang B) bis hin zum integrierten automatisierten Filterverfahren (Anhang C) werden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Bewältigung der vorliegenden Aufgabenstellung eingeschätzt (Kapitel 5.1).

Die Form der Daten als dreidimensionale Punktwolke ohne expliziten Lagebezug oder ausreichende semantische Sekundärinformation bedarf einiger ausgewählter Analysemethoden, die aus unterschiedlichen Fachgebieten wie zum Beispiel der Bildverarbeitung, der Fernerkundung, der Statistik oder der Hydrologie entlehnt werden. Der Aufbau der verwendeten Algorithmen und die daraus abgeleiteten Ergebnisse, aber auch deren praktische Anwendung mit dem Fokus auf eine potenzielle Implementierung werden beschrieben (Kapitel 6). Die weiterführende Nutzung der gewonnenen Daten wird aufgezeigt. Die Klassifikation eines Schutzraumes entlang der Leitungstrasse ist vorrangiges Ziel der Datenanalyse und wird entsprechend aus dem vorliegenden Datensatz extrahiert und dokumentiert (Kapitel 6.5).

Der Autor schließt die Thesis mit einer Bewertung der verwendeten Verfahren und der ermittelten Daten und versucht einen Ausblick auf weitere Entwicklungen im Bereich der Verarbeitung von Laserscanndaten zu geben.

Zur Bearbeitung der Daten werden ausschließlich Programme angewendet, die dem Autor bereits während des UNIGIS- Studienganges zur Verfügung standen und die nicht explizit zur Verarbeitung von Laserscanndaten vorgesehen sind. Kommerzielle Implementierungen einzelner Filterverfahren werden nicht verwendet.

Dies erfolgt aus folgenden Gründen:

- die Nutzung kommerzieller Implementierungen zu Testzwecken ist zum Teil funktional und zeitlich begrenzt,
- der Verfahrensablauf soll möglichst in einer einheitlichen Arbeitsumgebung demonstriert werden,
- die Modellierung der Analyseverfahren mit einer Standardsoftware ermöglicht eine detaillierte Betrachtung und somit das Verständnis der einzelnen Verfahrensschritte,
- die kommerziellen Implementierungen ermöglichen nicht alle gewünschten Arbeitsschritte und sind auf einzelne Teilbereiche der Aufgabenstellung spezialisiert.

2. Aufgabenstellung, Problemanalyse

2.1 Gestaltung eines Workflow zur Erfassung von Hochspannungsleitungen und Schutzräumen entlang der Leitungstrasse aus Laserscandaten

Hochspannungsleitungen durchziehen in lang gestreckten Korridoren das Land. Diese Trassen sind aus Gründen der Betriebssicherheit und Instandhaltung regelmäßig zu überwachen. Dabei werden auch räumliche Mindestabstände zwischen den Leitungen und der begleitenden Topographie erfasst.

Wegen der Ausmaße der Trassen, in Deutschland sind dies rund 465.000 km, und dem damit verbundenen Aufwand kommt eine terrestrische Aufnahme von Masten, Seilen und der umgebenden Topographie aus Kostengründen nicht in Frage. Als ein Verfahren der systematischen, flächendeckenden Datenerfassung bietet sich nun die Methode der Laserscannerfassung an (siehe Kapitel 1).

Die E.ON- Netz GmbH beauftragte im Bereich ihres Hochspannungsnetzes im Jahr 2004 die Befliegung und Auswertung von mehreren Losen. Aus dieser Befliegungskampagne wurden die Daten eines Trassenabschnittes von etwa 28.5 km Länge zur Bearbeitung zur Verfügung gestellt.

Die Trasse wurde mit einem Hubschrauber in geringer Höhe von ca. 80 m überflogen und die Oberfläche aller überflogenen Objekte mit einem Punktraster von 12-20 Punkten pro m² mit einem LIDAR- Sensorsystem (Light Detection and Ranging) abgetastet. Die Punktverteilung ist mehr oder weniger willkürlich und wird durch eine Mehrfachbefliegung in Überlappungsbereichen weiter verdichtet. Die Punktdichte hängt außerdem direkt von den verwendeten Sensorparametern wie Aufnahmefrequenz, Flughöhe und –geschwindigkeit ab.

Die aufgenommenen Punkte werden zum Zeitpunkt ihrer Registrierung im GPS-Koordinatensystem WGS-84 gespeichert. Dieses Koordinatensystem ist zurzeit das Referenzkoordinatensystem für Messungen mit dem *Global Positioning System* (GPS). In einem Postprocessing werden die WGS-84-Koordinaten in das jeweilige Landessystem mit Rechts- und Hochwert, Höhe und einem gemessenen Reflektionswert transformiert (vgl. Kapitel 3: „Orientierung der Laserscandaten, GPS/INS“). Diese dreidimensionale Punktwolke ist Basis für die weitere Daten-Analyse.

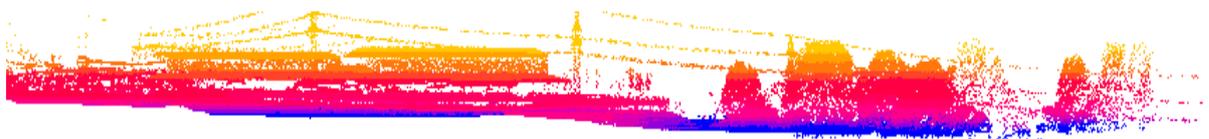


Abb. 1: Rohdaten L1035_11

In Abbildung 1 ist im Querschnitt die Informationsfülle des Laserscandatensatzes gut zu erkennen. Die Analyse der Daten erfordert nun, diese Punktwolke thematisch zu filtern. Die einzelnen gefilterten Themen müssen geeignet sein, den Erdboden, die Vegetation, trassenbegleitende Objekte und vor allem die Masten und Seile eindeutig in Lage und Höhe zu identifizieren. Mit einem solcherart differenzierten Situationsmodell lassen sich nun durch Bufferberechnung und Verschneidung Schutzräume entlang der Trasse berechnen. Diese Schutzräume sollen potenzielle Gefahrenzonen entlang der Hochspannungs-Trasse

dokumentieren und sinnvolle Maßnahmen (Freiholung der Trasse oder ähnliche raumordnende Eingriffe) zur Sicherung der Trasse ermöglichen.

Es werden Möglichkeiten entwickelt, aus der gegebenen dreidimensionalen Punktwolke, die ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) darstellt, sukzessive ein Digitales Geländemodell (DGM), welches ausschließlich die Erdoberfläche repräsentiert und ein normalisiertes Geländemodell nDGM als Differenzmodell zwischen DGM und DOM zu modellieren. Aus dem nDGM sind die Masten, Seile, hoch aufragende Vegetation und sonstige topographische Objekte abzuleiten und in ein Digitales Situationsmodell zu überführen. Die Seile sollen in diesem Zusammenhang zu Vektoren generiert werden. Die Schutzräume entlang der Trasse werden als klassifizierte Punktwolke gefordert. Eine Klasse mit Abstand von 0 – 3.5 m vom äußersten Seil entfernt, soll in roter Farbe visualisiert werden. Ein weiterer Bereich von 3.5 bis 5 m mit blauer Farbe.

Ein umfassender Workflow zur Erfassung von Hochspannungsleitungen und Schutzräumen aus Laserscanndaten wird derzeit nicht beschrieben. Die praktischen Ansätze stellen jeweils Kombinationen von rechnergestützten manuellen und automatisierten Verfahren dar, die mit dem Wechsel zwischen unterschiedlichen Softwarelösungen und erheblichen manuellen Eingriffen verbunden sind. So ist es üblich, die einzelnen Seile von Hand zu digitalisieren. Auch wird der Schutzraum entlang der Trasse ausschließlich als rechtwinkliger Korridor generalisiert.

Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität in Wien wird zurzeit intensiv an neuen Algorithmen zur Extraktion von Objekten und insbesondere auch zur Kantenextraktion aus LIDAR- Daten geforscht (vgl. Melzer, Briese, 2004).

2.2 Problemstellung: Besonderheiten der Daten und der Erfassungsmethodik

Die Erfassung von Objekten mittels Flugzeuggetragenen Laserscanner birgt ganz eigene Problemstellungen, die mithilfe neu entwickelter oder modifizierter Algorithmen und Lösungsansätzen aus dem Bereich der Fernerkundung, der Geostatistik, der Navigation und der Geoinformatik angegangen werden können.

Einige zentrale Probleme tauchen bei der Bearbeitung der Laserscanndaten und der Generierung der Bestimmung der Schutzräume auf:

- Die Genauigkeit und Qualität der ermittelten Daten wird beeinflusst durch eine Reihe von systematischen Fehlern bei der Erfassung des Flugpfades mit Global Positioning System (GPS) und Inertialsystemen (INS registriert die Achsenlage des Flugzeugs während der Aufnahme, vgl. Kapitel 3.3.2), Fehler in der Kalibrierung des Laser Range Finders (LRF, hier vor allem der Entfernungsmesser), des Scanners (Ablenkungseinrichtung) sowie der gegenseitigen Orientierung aller Komponenten. Diese Einflüsse werden im Kapitel 3.3, „Orientierung der Laserscanndaten“ kurz erläutert.
- Die Rohdaten der LIDAR- Erfassung liegen nach der erfolgten Orientierung im jeweiligen Landeskoordinatensystem als dreidimensionale Punktwolke vor. Eine Flächeninterpolation über den gesamten Datenbestand visualisiert die Punktwolke als digitales Oberflächenmodell DOM (oder Digital- Surface- Model DSM). Die einzelnen Reflektionen der ausgesendeten Laserstrahlen repräsentieren jeweils einen Oberflächenpunkt des angemessenen Objektes. Dies kann der Erdboden sein, aber auch ein Baum, ein Strauch, das Dach eines Gebäudes oder auch sehr kleine (oder schmale) Objekte wie eine Hochspannungsleitung. Die erfassten Punkte enthalten in

erster Linie rein geometrische Informationen: Lage und Höhe in einem (kartesischen) Koordinatensystem. Als einzige semantische Information ist ein Reflektions-Wert zu jedem Messpunkt erfasst. Dieser Reflektionswert resultiert aus der Fähigkeit des angestrahlten Objektes, die Strahlung mehr oder weniger diffus zurückzugeben. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, für unterschiedliche Oberflächen und Objektgrößen einen relativ diskreten Reflektionswert zu ermitteln. Überschneidungen in den Wertebereichen lassen jedoch keine strenge Klassifikation zu. Die Datenanalyse muss sich daher vor allem auf die räumliche Korrelation der Punkte untereinander stützen.

- Die durch die Laserscannbefliegung erfasste Hochspannungsleitung stellt den Ist-Zustand des Seils zum Zeitpunkt der Befliegung dar. Aufgrund der Dehnungseigenschaften der Seile durch Temperatureinfluss oder durch eine Eislast verändert sich der mögliche Einflussbereich der Seile und die Ausdehnung des Schutzraumes. Für die Berechnungen des Seildurchhanges unter bestimmten Bedingungen gibt es auf dem Markt umfangreiche Programme (z.B. Seil++ der imp-GmbH), die neben den eigentlichen Berechnungen auch die Vorgaben der entsprechenden Normen und Richtlinien (z.B. DIN VDE 0210: Bau von Starkstrom-Freileitungen mit Nennspannungen über 1 kV) berücksichtigen. Eine Berechnung der Seile unter unterschiedlichen Bedingungen findet im Rahmen dieser Master Thesis allerdings keinen Platz. Die Methoden zur Bestimmung der Schutzräume werden als Modell aus dem Ist-Zustand der Seile während der Befliegung abgeleitet.

Darüber hinaus gilt es, im Laufe des Verfahrens die Masse der Daten zu reduzieren und in für Geoinformations-Systeme verarbeitbare Formate zu überführen. Das Test-Gebiet mit einer Länge von nur 28.5 km wird von einem Datensatz mit 4,13 GByte in Ascii- Daten abgebildet. Eine spätere gemeinsame Visualisierung von Leitungsdaten, der begleitenden Topographie, einem Digitalen Geländemodell, den Schutzräumen und Katasterdaten wird vom Auftraggeber angestrebt. Daher ist es notwendig, möglichst viele Informationen zu generalisieren ohne der Präzision des Situationsmodells Abbruch zu tun.

Für die Erfassung der eigentlichen Leitung sollten jedoch unbedingt die originalen Messwerte verwendet werden, um eine zusätzliche Verfälschung im Zuge der Rasterinterpolationen zu minimieren (vgl. Melzer, Briese, 2004, S.3).

3. Technologie der Laserscannermessung

3.1 Messprinzip der flugzeuggestützten Laserscannaufnahme

Seit den frühen 90er Jahren des vorherigen Jahrhunderts ist das aktive Messverfahren der Laserscannermessung (ein Laserstrahl wird ausgesendet und von der Erdoberfläche oder topographischen Objekten teilweise reflektiert) ein etabliertes Standardverfahren zur großflächigen Erfassung der Erdoberfläche und Generierung von Gelände- und Oberflächenmodellen (vgl. Maas, Vosselmann, 2004). Um die Eignung der Erfassungsmethode mit Laserstrahlen für die Aufgabenstellung des Auftraggebers beurteilen zu können, müssen das Erfassungsprinzip und die einzelnen Komponenten des Erfassungssystems näher beschrieben werden.

Die Messung mit Laserscannern ist ein aktives Messverfahren, da ein Lichtstrahl ausgesendet wird, um ein Objekt zu beleuchten und die dort verursachte Reflektion zur Messung der Distanz zum Sensor genutzt wird. Im Gegensatz zur aktiven Messung verwenden die Fernerkundung und die analytische Photogrammetrie passive Messverfahren. Die Bildinformationen resultieren aus der natürlichen Reflektion des Sonnenlichts an der Oberfläche der observierten Objekte.

Nach dem Prinzip des Push- Broom- Verfahrens wird ein Laserstrahl von einem Flugzeug oder Hubschrauber aus, gesteuert durch eine Ablenkungsvorrichtung, zum Erdboden gesendet und die Reflektion von einem ebenfalls im Flugzeug befindlichen Sensor erfasst. Dabei werden die Entfernung zum Erdboden und die jeweilige Strahlungsrichtung registriert. Aus diesen Strecken und Winkelinformationen wird die Position der Messpunkte relativ zum Sensor errechnet. Über die aktuelle Position des Sensors aus zeitgleich registrierten GPS-Koordinaten und INS- Informationen zur Fluglage werden die Koordinaten der Messpunkte im GPS-Koordinatensystem errechnet (vgl. Kapitel 3.3.1).

Sehr genaue und hoch aufgelöste Befliegungen werden, nicht zuletzt wegen der möglichen niedrigen Fluggeschwindigkeit und geringen Flughöhen, mit Hubschraubern durchgeführt. Großflächige Aufnahmen aus großer Höhe wie die regelmäßigen Landesbefliegungen sind dagegen wirtschaftlicher mit einem Flugzeug abzuarbeiten.

Ein „Scanner“ lenkt den Laserstrahl rechtwinklig zur Flugrichtung ab und ertastet so einen ganzen Geländestreifen entlang des Flugweges. Die so genannte Swat Width entspricht der Auslenkung des Scanners im Verhältnis zur Flughöhe und beschreibt die Streifenbreite des aufgenommenen Flugstreifens.

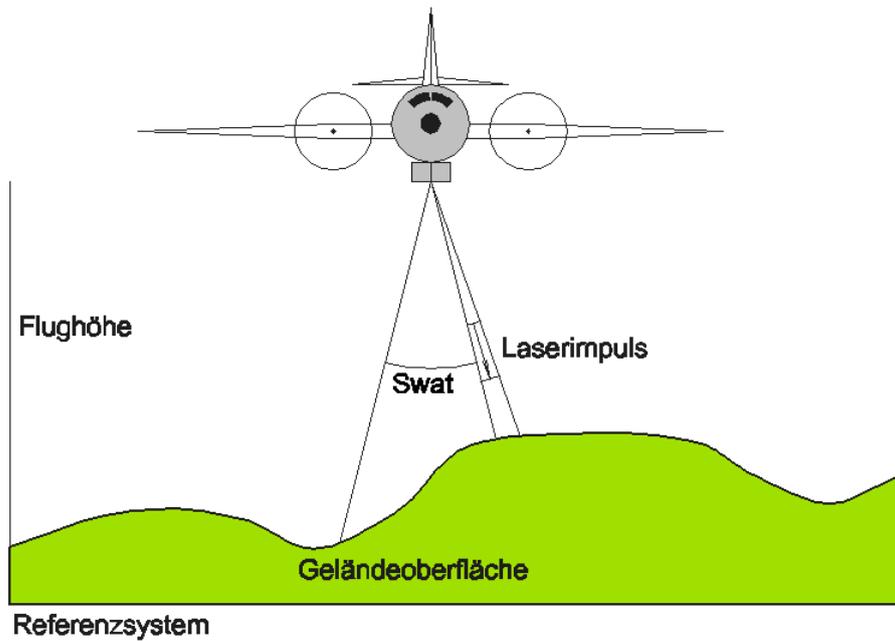


Abb. 2: Prinzip der Laserscannmessung

Je nach dem technischen Aufbau des Scanners unterscheidet man das Muster der aufgenommenen Messpunkte als Schwingspiegel-, Polygon- oder Fasermuster. Beim Schwingspiegelverfahren erscheint die Punktverteilung auf dem Erdboden wie eine gestauchte Sinuswelle. Die Punktdichte ist an den äußersten Randgebieten des einzelnen Flugstreifens sehr groß, aber aufgrund von Winkelfehlern nicht verwendbar. Im Mittelbereich nimmt dagegen die Punktdichte ab und die Daten werden zuverlässiger. Arbeitet der Scanner mit einem rotierenden Polygonspiegel, ergeben sich gleichmäßigere Punktabstände linear von einer Seite des Aufnahmestreifens zur anderen. Beim Faserscanner wird der Laserstrahl mit Hilfe von Prismen in Fasern aufgeteilt. Eine geringe Schwingung der Prismen ermöglicht eine flächenhaftere Verteilung der Einzelmessungen.

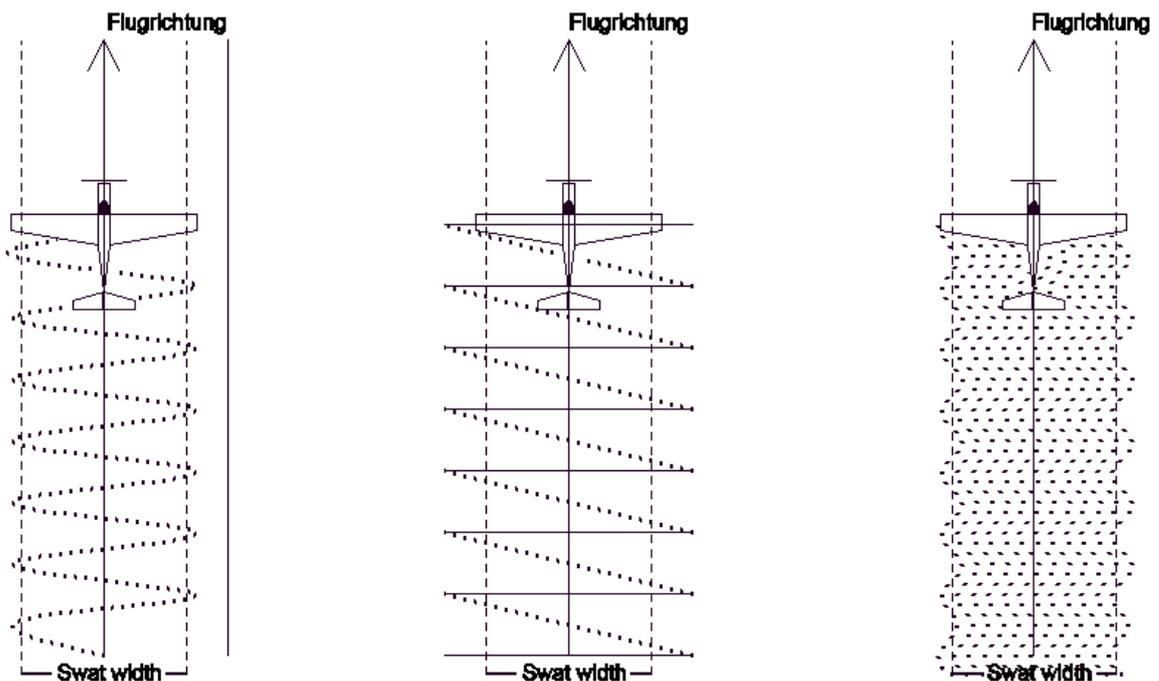


Abb. 3: Scannmuster: Schwingspiegelscanner, Polygonscanner, Faserscanner

Es besteht die Möglichkeit der Messung mit „Pulsed Laser Light“, basierend auf der Zeitmessung zwischen Senden und Empfangen des Lichtimpulses (Wehr / Lohr, 1999). Der Laserstrahl wird mit einer vorgegebenen Messrate ausgesendet und die Laufzeit eines oder mehrerer reflektierter Impulse (First Pulse oder Last Pulse) werden registriert. Mit dem First-Pulse- Echo werden topographische Objekte und Vegetation erfasst. Das Last- Pulse- Echo dringt bis zur Erdoberfläche hindurch.

Dieses Messverfahren stellt den aktuellen Stand der Technik dar und liegt auch der Laserscannmessung zu dieser Master Thesis zugrunde.

Eine Methode, die sich gerade in der Erprobung befindet, ist die Messung mit „Continuous Waves“: Ein kontinuierlicher Laserstrahl wird ausgesendet und der Vergleich der Phasenlagen zwischen vom Scanner ausgehendem und eintreffendem Signal bestimmt die Entfernung zum gemessenen Punkt. Dieses Verfahren erfordert allerdings die Registrierung und Verarbeitung eines Vielfachen der Datenmenge, die beim Pulsed- Laser- Verfahren gemessen werden.

Die Erfassung von Masten und Seilen wird mit den Messwerten des First- Pulse- Echos realisiert. Um eine größere Auswertefläche zu erfassen, kann das Gebiet in mehreren Flugstreifen abgearbeitet werden. Eine rechnerische Verknüpfung findet in der Regel nicht statt, da durch die willkürliche Punktverteilung keine eindeutige Punktverknüpfung als Grundlage für eine Blockausgleichung, vergleichbar mit den Verfahren der analytischen oder digitalen Photogrammetrie, möglich ist. Eine absolute Lage- oder Höhenorientierung der Punktwolke über Passpunkte ist ebenfalls nur bedingt möglich. Zur Stabilisierung der Lage- und Höhengenaugigkeit können mit Hilfe von signalisierten, ebenen Referenzflächen mit bekannter Höhe und Ausdehnung, Transformationen der Punktwolke erfolgen.

Die geforderte Genauigkeit einer Laserscannmessung ist also ein relativer Begriff: „Gesucht wird ein Höhenmodell, das die gesamte Topographie möglichst präzise repräsentiert, gefordert wird allerdings oft die Genauigkeit von Einzelpunkten“ (vgl. Katzenbeisser, Kurz 2004, S.179 ff.). Obwohl die tatsächliche Genauigkeit der Einzelmessung der Laserscandaten relativ hoch ist, ist der einzelne Messpunkt doch von der Auswahl her nicht selektiv und die Erfassungsgenauigkeit einzelner Objekte ist somit abhängig von der Dichte der gemessenen Punktwolke. Dies unterscheidet das Verfahren der Laserscannerfassung von den Verfahren der analytischen Photogrammetrie oder der terrestrischen Vermessung, die ausschließlich selektive, ausgewählte Einzelpunkte oder ganze komplexe Objekte als direkte Konstruktion mit Hilfe von Vektoren erfassen.

Die Punktverteilung ist in Abhängigkeit von Fluggeschwindigkeit, Flughöhe, Auslenkung des Scanners und Scannrate willkürlich. Eine diskrete Fläche innerhalb des erfassten Geländes wird durch eine Anzahl von zufälligen Treffern durch Messpunkte abgedeckt. Die genaue Begrenzung der Fläche variiert um das Maß des durchschnittlichen Punktabstands. Mit größerer Punktdichte lässt sich die Geometrie des erfassten Objektes sicherer eingrenzen.



Abb. 4: Objektgenauigkeit der Laserscannmessung, Maßstab ca. 1:200

Nach dem Shannon-Theorem (C.E. Shannon, 1916-2001, amerikanischer Informationstheoretiker) muss die Schrittweite des abtastenden Signals halb so groß sein wie die kleinste zu erfassende Form (vgl. Katzenbeisser und Kurz, 2004). Im Umkehrschluss ist eine gegebene Punktdichte von 12 bis 20 Punkten pro m^2 geeignet, Objekte mit einer Kantenlänge $> 0.50 \text{ m}$ zu entdecken. Im Kapitel 3.2.1 wird auf die Auflösung als Maß für die Wiedergabe von Details näher eingegangen. Weiterführende Aufgaben wie zum Beispiel die Erstellung von True- Orthofotos bedürfen nach wie vor einer expliziten analytischen Auswertung von Bruchkanten.

Mit der Information der Punktdichte innerhalb eines diskreten Objektes ist dieses entdeckte Objekt aber weder identifiziert noch beschrieben. Vielmehr ergibt sich die Klassifizierung und Beschreibung des Objekts aus der räumlichen Verteilung aller Punkte, die direkt das Objekt abbilden. Eine Aussage über die relative Höhe über Grund ist darüber hinaus nur mit den begleitenden Messpunkten in der direkten Objektumgebung zu treffen.

Die exakte Identifizierung von Objekten erfolgt auf Basis von räumlichen Definitionen des zu messenden Objektes. Folgende Beispiele dienen bei der Analyse der Daten als Hypothese zur Formulierung des Lösungsansatzes:

- Ein Gebäude erhebt sich mindestens zwei Meter über die Erdoberfläche, besitzt eine Form, die von Kanten geprägt ist, die häufig im rechten Winkel zueinander stehen.
- Ein Mast erhebt sich auf kleiner Grundfläche hoch in die Höhe und erweitert sich in einer bestimmten Höhe zu Auslegern, die die Isolatoren und die Leitungen tragen.
- Eine Hochspannungsleitung spannt sich von Mast zu Mast; hängt dabei in einem gewissen Maße durch.

- Vegetation bildet unregelmäßige Volumina über der Erdoberfläche mit asymmetrischer Oberfläche und Begrenzung.
- Die Erdoberfläche ist eine unregelmäßige geschlossene Fläche unterhalb der begleitenden Topographie.

Form und Ausmaß des erfassten Objekts ermöglichen in gewissen Grenzen seine Identifizierung. Nach erfolgter Identifizierung können dann weiterführende, differenzierte Aussagen getroffen werden: eine geradlinige Kante an höchster Stelle des Gebäudes ist die Firstlinie oder der höchste Punkt eines Masts ist die Mastspitze und Ausgangspunkt für das Erd- oder Blitzschutzseil. Diese Informationen gelten nur innerhalb der oben diskutierten Objektgenauigkeit. Die Abgrenzung einzelner Objektklassen bedarf eines gewissen Trainings und geschachtelter Kriterien, da diese Entscheidungskriterien überlappen können.



Abb. 5: Beispiele für identifizierbare Objekte: Mast, Gebäude, Baum

Grundsätzlich muss an dieser Stelle betont werden, dass die abgebildeten Objekte nicht in ihrer gesamten Dimension abgebildet werden können. Nach den Filterverfahren bleibt immer ein gewisses Maß an Randunschärfe und somit an Unsicherheit in der Ausdehnung des einzelnen Objekts. Signifikant ist diese Unsicherheit bei den einzelnen Seilen der Hochspannungsleitung. Die Registrierungen auf dem Seil können zwar sehr gut die Position des Seils im Raum wiedergeben, jedoch werden Anfang und Ende niemals exakt durch einen Laserscannpunkt abgebildet oder sind als solche zu identifizieren. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse jeder Filterung kritisch zu hinterfragen und zu prüfen.

3.2 Interaktion des Laserstrahls mit den erfassten Objekten

Ein geringer Teil der Laserstrahlen wird direkt von den Leitungen und den Masten reflektiert. Der überwiegende Teil der Reflektionen erfolgt am Erdboden, an der Vegetation und an sonstigen topographischen Objekten wie zum Beispiel Gebäuden. Diese Reflektion an den angestrahlten Objekten erfolgt in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit diffus. Das heißt, ein wesentlich geringerer Teil der ausgesendeten Strahlung erreicht letztendlich den Sensor und kann erfasst werden. Der überwiegende Teil der ausgesendeten Strahlung wird unregelmäßig gestreut oder von den angestrahlten Objekten absorbiert.

Mit dem Wissen um Streuung und Absorption kann einerseits der Laser entsprechend der Aufgabenstellung dimensioniert werden und andererseits kann aus dem Maß der reflektierten Strahlung in gewissem Maße eine weiterführende Aussage zu den erfassten Objekten getroffen werden. Diese Aussagefähigkeit entspricht jedoch nicht in seiner Differenzierbarkeit der Informationsdichte panchromatischer Sensordaten, die mit mehreren

Kanälen pro Pixel unterschiedliche Frequenzbereiche des elektromagnetischen Spektrums abdecken.

3.2.1 Auflösungsvermögen, Trennschärfe, Reflektionsleistung

In der klassischen Fotografie bezeichnet das Auflösungsvermögen einer fotografischen Aufnahme die Fähigkeit des Bildes, einzelne Objekte visuell zu trennen. Im Zusammenhang mit einem regelmäßigen Rasterbild oder der Körnung eines Filmes ist diese Umschreibung leicht nachvollziehbar. Bei der Laserscannmessung ist der Punktabstand der Einzelmessungen nicht gleich der Rasterweite einer Oberflächenaufnahme, aber jeder Einzelmesspunkt besitzt eine individuelle Ausdehnung beim Auftreffen auf der Erdoberfläche. Diese Ausdehnung db ist abhängig vom Öffnungswinkel des Senders β , der Flughöhe h und dem Scannwinkel θ , unter dem der Strahl zur Erde gesandt wird:

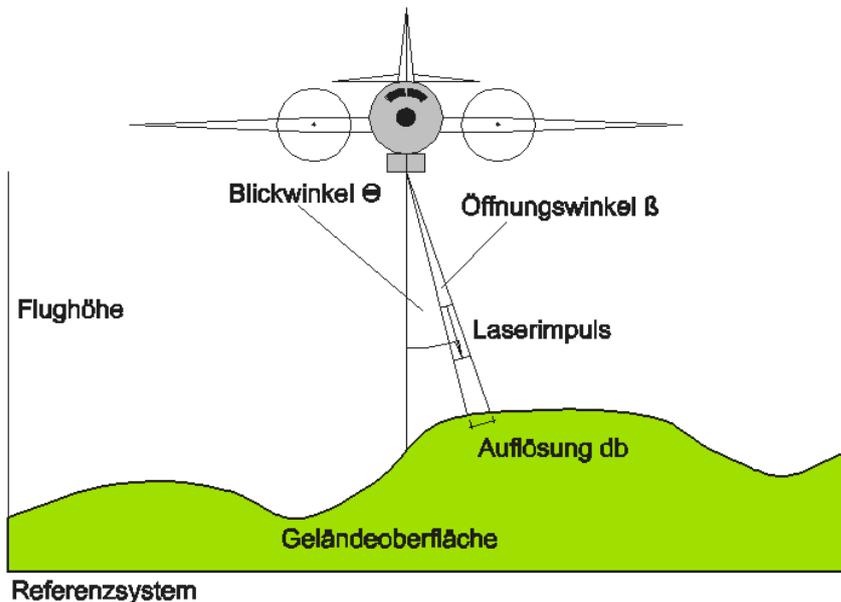


Abb. 6: Auflösung der Laserscandaten

Der Öffnungswinkel β hängt wiederum von der Wellenlänge λ , dem Durchmesser der Apertur D (Durchmesser der Öffnung als Maß für die Leistung eines optischen Systems) und einer gerätespezifischen Konstante K_a ab. Die Konstante K_a bezieht sich auf die Leistungsfähigkeit des Resonators (vgl. Kapitel 3.1) und die spezifischen Eigenschaften eingesetzter Filter und optischer Linsen.

$$db = h * \beta / \cos \theta$$

db = Auflösung an der Erdoberfläche in m

h = Flughöhe in m

β = Öffnungswinkel in mrad

θ = Scannwinkel in Grad

Formel 1: Auflösungsvermögen

$$\beta = K_a * \lambda / D$$

β = Öffnungswinkel in mrad

K_a = Gerätekonstante

λ = Wellenlänge in nm

D = Apertur

Formel 2: Öffnungswinkel

Rechenbeispiel bei ebenem Gelände:

$$\begin{aligned}\lambda &= 904 \text{ nm} \\ h &= 80 \text{ m} \\ \beta &= 2 \text{ mrad} \\ \theta &= \pm 30^\circ \\ \Rightarrow db_{\text{Nadir}} &= 0.16 \text{ m} \\ \Rightarrow db_{30^\circ} &= 0.18 \text{ m}\end{aligned}$$

(Quelle: Befliegungsfirma Fugro- Inpark, NL)

Die besonderen Eigenschaften des Laserlichts ermöglichen eine sehr exakte Streckenmessung von der abgetasteten Erdoberfläche zum Sensor und durch die Möglichkeit, den Strahl stark zu bündeln, werden bei einigen Systemen sehr diskrete Bereiche der Erdoberfläche abgetastet. Die relative Streckenmessgenauigkeit eines kalibrierten Lasers ist im Verhältnis zu den übrigen Einflüssen der Positionsbestimmung gering und wird zum Beispiel von der Airborne 1 Corporation mit 5-7 cm unabhängig von der Flughöhe angegeben.

Die Auflösung innerhalb einer dreidimensionalen Punktwolke bezieht allerdings auch die Höhenunterschiede benachbarter Punkte ein und differiert entsprechend der Geländemorphologie vom obigen Ansatz. Ist der Blick des Scanners senkrecht nach unten gerichtet ($\theta = 0^\circ$), entspricht die Entfernung vom Scanner zur Erdoberfläche exakt der Flughöhe.

Der Intensitätsverlauf durch den Querschnitt eines Laserstrahls ist jedoch nicht linear sondern entspricht einer Glockenkurve mit abnehmender Intensität in den Randbereichen. Ursache ist die Beugung an den optischen Linsen der Sendeeinheit als Folge der Wellencharakteristik des Lichtes (vgl. IFT, 2003).

Die erreichbare Trennschärfe zweier benachbarter Objekte ist abhängig von der Länge des Laserimpulses $d\tau$ und der Gruppengeschwindigkeit v_g und entspricht dem Signalabstand zweier am Sensor eintreffender Laserimpulse. Wenn diese überlappen, ist eine Trennung nicht möglich. Die Gruppengeschwindigkeit v_g ist etwas geringer als die Lichtgeschwindigkeit und entspricht der Geschwindigkeit, mit der sich die Energie eines Wellenpaketes aufgrund des Wellencharakters des Lichtes ausbreitet. Diese Geschwindigkeit entspricht auch der Signalausbreitungsgeschwindigkeit (vgl. Brockhaus, 1989) $v_g \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Die räumliche Differenz zwischen zwei Punkten beträgt dR m. Entsprechend kommen die reflektierten Signale mit einer Zeitverzögerung von $dT = 2 \cdot dR / v_g$ am Sensor an. Faktor 2, da der Strahl die Strecke Sensor-Erdboden zweimal durchlaufen muss. Die Zeitverzögerung dT muss größer sein als die Signaldauer $d\tau$. Mit $d\tau = 0.5 \cdot v_g \cdot d\tau$ ergibt sich so ein Mindestabstand oder räumliches Trennungsvermögen von 0.15 m bei einer Impulslänge von einer Nanosekunde. Die Impulsdauer ist entsprechend der gewünschten Trennschärfe anzupassen.

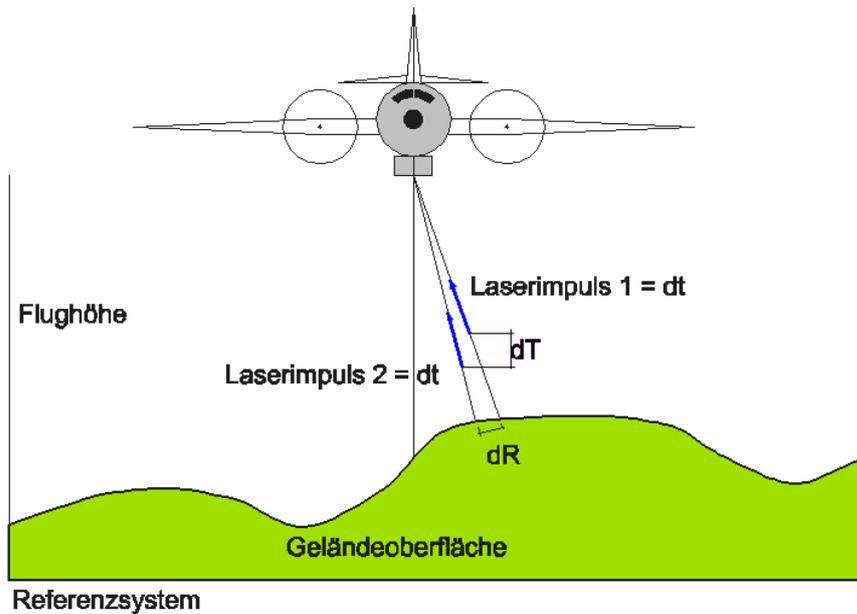


Abb. 7: Trennschärfe der Laserscandaten

Nur ein Bruchteil der gesendeten Lichtleistung wird in Richtung des Empfängers gestreut und erreicht den Sensor. In Abhängigkeit des Streuquerschnittes (so genannter Volumenextinktionskoeffizient) σ_{ext} ist die Leistung des Rückstreusignals vor allem von der Rauigkeit der reflektierenden Oberfläche abhängig. Ein rauher Körper streut das Licht nicht so gerichtet wie ein glatter Körper. Entsprechend ist der empfangene Anteil des Rückstreusignals an rauen Oberflächen geringer. Rauigkeit ist dabei relativ zur verwendeten Wellenlänge zu sehen. Die Rauigkeit einer Oberfläche wird mit der Rückstreuleistung eines Lambertstrahlers verglichen. Diese idealisierte Fläche besitzt eine ebene Oberfläche und streut diffus innerhalb einer absolut regelmäßigen Lichtverteilungskurve, die wie ein Kreis auf der Reflektionsebene steht. Mit zunehmender Entfernung von der Mittelsenkrechten nimmt die Lichtstärke I mit dem Kosinus des Ausstrahlungswinkels ρ ab (vgl. Brockhaus, Band 13,1990).

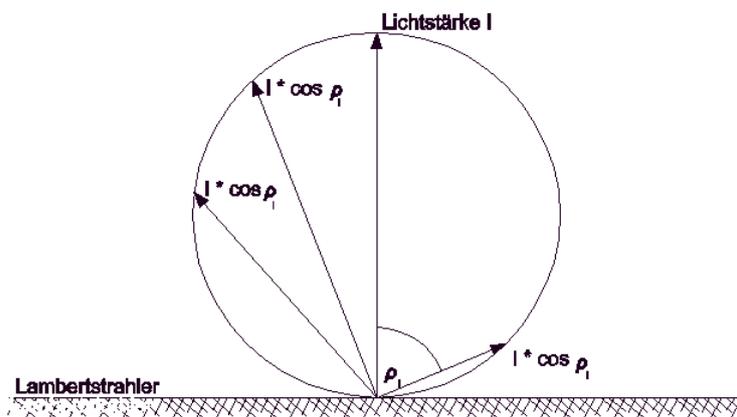


Abb. 8: Prinzip des Lambertstrahler

Die tatsächliche Intensität der am Sensor empfangenen Reflektion wird jedoch von einigen Faktoren beeinflusst, die in der LIDAR- Gleichung zusammengefasst werden:

$$P(r) = \frac{C_{ceilo}}{r^2} \beta_{lid}(\lambda, r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma_{ext}(\lambda, r') dr'\right)$$

$P(r)$ = Rückstrahlleistung
 C_{ceilo} = Kalibrierungskonstante
 β_{lid} = Volumenrückstreukoeffizient
 λ = Wellenlänge
 r = Entfernung vom Sender zum Objekt
 σ_{ext} = Volumenextinktionskoeffizienten

Formel 3: LIDAR- Gleichung

Quelle: Crewell, Susanne: „Grundlagen der Fernerkundung: LIDAR Ceilometer“,
<http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~crewell/vorles/FE_vorles/fe_atmos_aktiv.html> (30.1.2005)

Die Leistung des Rückstreusignals aus einer bestimmten Entfernung r , die zu einem Zeitpunkt $t=2 \cdot R / v_g$ nach der Aussendung gemessen wird, ergibt sich aus dem Verhältnis einer Kalibrierungskonstante C_{ceilo} zum Quadrat der Entfernung r multipliziert mit einem Volumenrückstreukoeffizienten β_{lid} (in Abhängigkeit von Wellenlänge und Entfernung r) und einer Dämpfung für die Distanz vom Sender zum Objekt und wieder zurück mit dem Volumenextinktionskoeffizienten σ_{ext} (Maß der Reduktion der Signalleistung in Abhängigkeit von Wellenlänge und Entfernung r).

C_{ceilo} resultiert dabei aus der durchschnittlichen Pulsleistung P_0 , der Pulsdauer τ , der Empfangsfläche des Sensors A und einer Korrektur ϵ als Maß der Empfängereffizienz und Verluste durch zwischengeschaltete optische Komponenten:

$$C_{ceilo} = P_0 \cdot \tau \cdot A \cdot \epsilon \cdot 0.5$$

Formel 4: Kalibrierungskonstante

Auf eine detaillierte Herleitung der obigen Formeln wird an dieser Stelle verzichtet (vgl. Crewell, Susanne, 2005). Auch wird die Formel in der Literatur in unterschiedlicher Form beschrieben (vgl. Wagner, Ulrich, Briese, 2003), ausgehend von der so genannten Radargleichung.

Wichtig ist, dass die Leistung des Rückstreusignals abhängig ist von der Strahlungsleistungsdichte S_0 und dem Streuquerschnitt σ des reflektierenden Objektes, eines instrumentenspezifischen Wirkungsgrades und einer Dämpfung, die durch atmosphärische Einflüsse verursacht wird (vgl. Kapitel 3.2.2).

Der Streuquerschnitt σ einer Oberfläche ergibt sich aus dem Querschnitt der reflektierenden Fläche dA , einem Reflektionsgrad p und einem Raumwinkel Ω , der abhängig von der Rauigkeit der Oberfläche das einfallende Licht mehr oder weniger breit streut. Unter der Annahme, dass die Strahlung vom reflektierenden Objekt innerhalb eines Streukegels mit der Öffnung Ω gleichmäßig gestreut wird, ergibt sich $\sigma = 4 \cdot \pi \cdot p \cdot dA / \Omega$. Je rauer die reflektierende Oberfläche, desto weiter öffnet sich der Streukegel Ω . Die Rauigkeit steht dabei im direkten Verhältnis zur Wellenlänge der einfallenden Strahlung: für Wellenlängen zwischen 1mm und 1m (Mikrowellen) gilt Asphalt oder Boden als glatt, für Wellenlängen im sichtbaren Bereich hingegen ist erst eine Glasfläche wirklich glatt (vgl. Wagner, Ullrich, Briese, 2003).

Befindet sich der Sensor außerhalb des Streukegels, so ist das angestrahlte Objekt für den Sensor unsichtbar.

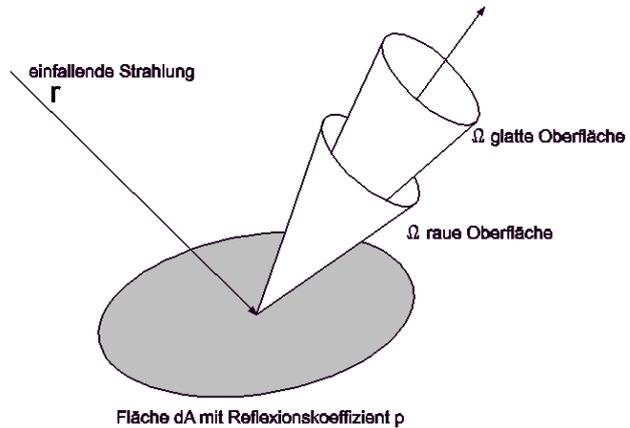
Streuquerschnitt eines Lambertstrahlers:

$$\delta_{Lam} = 4 * \rho * dA$$

Allgemeiner Streuquerschnitt:

$$\delta = 4 * \pi * \rho * dA / \Omega$$

- δ = Streuquerschnitt
- ρ = Reflexionsgrad
- dA = Reflektionsfläche (Querschnitt des Laserstrahls)
- Ω = Raumwinkel des Streukegels



Formel 5: Streuquerschnitt

Abb. 9: Einfluss der Rauigkeit auf den Streuquerschnitt
Quelle: Wagner, Ullrich, Horn, 2003

Der Streuquerschnitt ergibt sich in Abhängigkeit der Fläche $dA = R * \beta$ mit R gleich der Entfernung vom Sensor zum Objekt und β gleich dem Öffnungswinkel. Diese Fläche unterscheidet sich nicht nur durch eine materialabhängige Rauigkeit und Oberflächenbeschaffenheit, sondern auch durch eine entsprechende Form und Ausdehnung. Die Streuung an Körpern, die kleiner sind als der Querschnitt des Laserstrahls, ergibt sich in Anlehnung an den Ansatz zur Berechnung des Lambertstrahlers zu $\delta_{Objekt} = 4 * \rho_{Objekt} * dA_{Objekt}$ und einem Dimensionsfaktor d_{Objekt} .

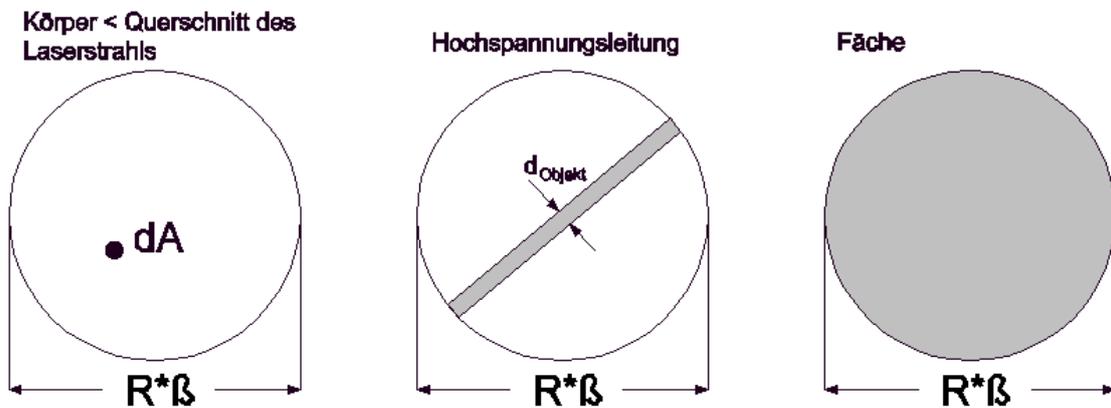


Abb. 10: Streuquerschnitte an verschiedenen Objekten
Quelle: Wagner, Ullrich, Horn, 2003

Für die in der Master Thesis betrachtete Hochspannungsleitung folgt daraus:

$$\delta_{Leitung} = 4 * \rho_{Leitung} * d_{Leitung} * dA_{Leitung}$$

Zahlenbeispiel:

- $d_{Leitung} = 5 \text{ cm}$
- $R = 60 \text{ m}$
- $\beta = 2 \text{ mrad}$
- $\rho_{Leitung} = 0.8$
- $\delta_{Leitung} = 0,02 \text{ m}^2$

Formel 6: Streuquerschnitt an Leitungen

Für eine Fläche, die größer als der Querschnitt des einfallenden Laserstrahls ist, ergibt sich

$$d_{\text{Objekt}} \text{ zu } R^2 \cdot \beta^2 / 4 \text{ und } \delta_{\text{Fläche}} = \pi \cdot \rho_{\text{Fläche}} \cdot R^2 \cdot \beta^2$$

Formel 7: Streuquerschnitt an großen Objekten

Der Grad der Streuung und der damit korrespondierende Streuquerschnitt können nun herangezogen werden, um das reflektierte Signal zu bewerten. Im Text von Wagner, Ullrich und Briese, 2003, S. 231, wird eine Tabelle aufgeführt, die den Reflektionsgrad einiger Materialien und Oberflächen bei einer Wellenlänge von 1µm beschreibt. Als Referenz dient hier der Lambertstrahler mit einem Raumwinkel von π.

Material	Reflektionsgrad bei 1µm	d _{Objekt}	Streuquerschnitt
Lambertstrahler	1	1 m ²	
Ahornblatt	0,4	ca. 0.005 m ²	0.008 m ²
Eichenblatt	0,65	ca. 0.001 m ²	0.0026 m ²
Weizen Stängel	0,9	ca. 0.0005 m ²	0.0018 m ²
Weizen Frucht	0,65	ca. 0.0005 m ²	0.0013 m ²
Edelstahl	0,2-0,6	0.08 m ²	0.016 – 0.048 m ²
Edelstahl oxidiert	0,1-0,2	0.08 m ²	0.008 – 0.016 m ²
Aluminiumfolie	0,8-0,9	0.08 m ²	0.064 – 0.072 m ²
Kupfer	0,9	0.08 m ²	0.072 m ²
Chrom	0,6	0.08 m ²	0.048 m ²
Platin	0,45-0,6	0.08 m ²	0.036 – 0.048 m ²
Sandboden nass	0,15	0.08 m ²	0.012 m ²
Sandboden trocken	0,3	0.08 m ²	0.024 m ²
Schluff trocken	0,6	0.08 m ²	0.048 m ²
Asphalt	0,2	0.08 m ²	0.016 m ²
Terra Cotta	0,3	0.08 m ²	0.024 m ²
Zement	0,4	0.08 m ²	0.032 m ²
Wasser (senkrechter Einfall)	<0,01	0.08 m ²	0.0008 m ²
Wasser(schleifender Einfall)	0,3	0.08 m ²	0.024 m ²
Schnee	0,25	0.08 m ²	0.020 m ²

Tab. 1: Reflektionsgrad für verschiedene Materialien bei einer Wellenlänge von 1µm
Für d_{Objekt} gilt: Flughöhe = 80m, β = 2 mrad

Quellen: Jelalian (1992), Kraus und Schneider (1988) und Egan (1985) in Wagner, Ullrich, Briese: „Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche“, (2003)

An dieser Stelle lässt sich schon erkennen, dass mit den Reflektionswerten der Einzelmessungen keine eindeutige Klassifizierung der reflektierenden Oberflächen möglich ist. Ebene Flächen wie Asphalt und Dachflächen lassen sich voneinander trennen. Aber eine Differenzierung zwischen aufragender Vegetation und Grünflächen ist praktisch nicht möglich. Die Reflektionswerte überlappen stark und eine Trennung unterschiedlicher benachbarter Bodenklassen ist nicht sicher möglich.

Die weiterreichenden Möglichkeiten der Interpretation der Reflektionswerte ist zurzeit Thema wissenschaftlicher Auseinandersetzung (vgl. Nardinocchi et al., 2003; Schiewe, Ehlers, 2004). Die Möglichkeiten der Klassifikation der Reflektionswerte wird in dieser Master Thesis nicht weiter verfolgt.

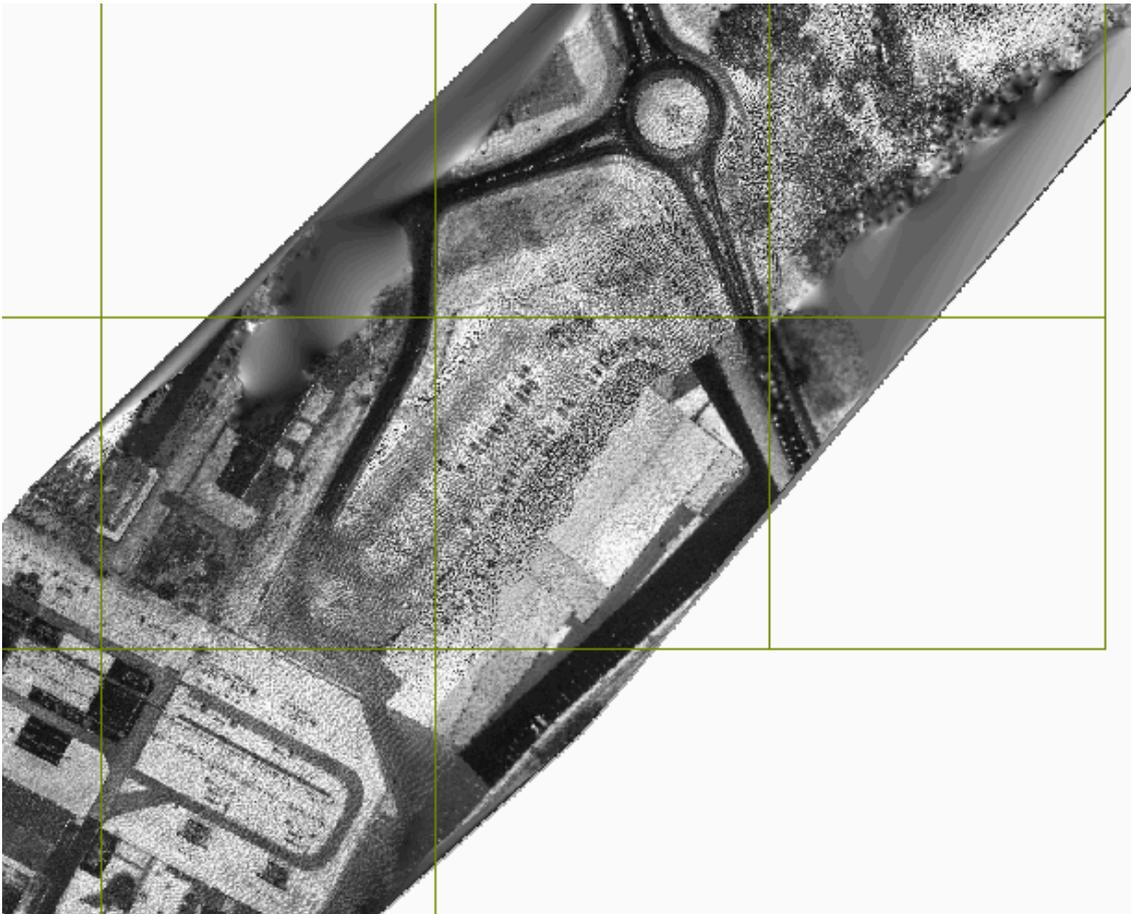


Abb. 11: Klassifikation nach Reflektionswerten

3.2.2 Störende Einflussfaktoren

Beim Durchlaufen der Atmosphäre muss der Laserstrahl die Strecke vom Sender zum Objekt und vom Objekt zum Empfänger durchlaufen. Auf diesem Weg wird der Strahl durch Streuvorgänge und Absorption vermindert (vgl. auch Kapitel 3.2.1: LIDAR- Gleichung). Die Sensoren der Fernerkundung sind auf optimale Fenster innerhalb des elektromagnetischen Spektrums ausgerichtet, um diese Verluste zu minimieren. Ähnlich wird die Bauart des Lasers so gewählt, dass die Laserscannmessung in Bereichen des Spektrums stattfinden, in denen entweder die Dämpfung durch natürliche Einflüsse gering ist oder diese ausreichend exakt berücksichtigt werden kann.

Störende Hintergrundstrahlung, verursacht durch Streulicht und Reflektion des Sonnenlichts an Aerosolen, dem Erdboden und der Topographie, die ebenfalls den Sensor erreicht, wird durch Interferenzfilter weitgehend eliminiert. Diese sind nur für ein enges Frequenzband durchlässig.

Die Wellenlänge eines häufig zur Laserscannmessung eingesetzten Nd:YAG Lasers beträgt $1.06 \mu\text{m}$. In diesem Bereich (Übergang vom sichtbaren Licht ($0,5 - 0,9 \mu\text{m}$) zum nahem Infrarot) beträgt die Dämpfung $0.2 - 0.8 \text{ dB/km}$ bei klarer Atmosphäre und bei dunstiger Atmosphäre durch Wasserdampf, Wassertröpfchen und Aerosolen bis zu 3.9 dB/km (nach Jelalian, 1992, vgl. Wagner, Ullrich, Briese, 2003, S.226). Diese Dämpfung verursacht bei einer Wellenlänge von 1m und 1mm Wasser innerhalb des Strahlungsweges zu einem Fehler von $4 * 10^{-4} \text{ m}$. Hochgerechnet auf 25 mm Wasserdampf wäre dies ein Einfluss von 0.02 m . Dies entspricht der mittleren Wassersäule innerhalb der Gesamtatmosphäre (vgl. Wagner, Ullrich, Briese, 2003, S.226).

3.3 Orientierung der Laserscanndaten

Aufgrund der besonderen Geometrie der Punktwolke ist es sehr schwierig, einerseits die einzelnen Flugstreifen untereinander zu verknüpfen und andererseits die Orientierung und den Maßstab der Punktwolke durch Passpunkte abzusichern.

Zur Stabilisierung der Höhen- und Lagegenauigkeit können mit Hilfe von signalisierten ebenen Referenzflächen mit bekannter Höhe und Ausdehnung Transformationen der Punktwolke erfolgen. Diese Referenzflächen müssen im Untersuchungsgebiet eingerichtet, eingemessen, überwacht und nach dem Flug wieder abgebaut werden. Ein solcher Aufwand wird nur in Ausnahmen betrieben, da die Kosten unverhältnismäßig hoch sind.

Morsdorf et al. haben dieses Verfahren im Heft 4/2004 der Zeitschrift für Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik der DGPF beschrieben. Eine solche Verbesserung hat im Rahmen der Erfassung zur Dokumentation von Hochspannungsleitungen nicht stattgefunden. Es muss also eine alternative Möglichkeit der Georeferenzierung der Daten genutzt werden.

Die Orientierung der Laserscanndaten erfolgt ausschließlich mit den während des Fluges aufgezeichneten Daten der Fluglage und der Navigation. Einerseits wird der gesamte Flugpfad durch die Daten eines Differentiellen GPS dokumentiert und andererseits werden die Parameter der Fluglage mit dem so genannten Inertial Navigationssystem registriert. „Die hohe photogrammetrische Genauigkeitsanforderung“ (Cramer, 2003) führte zur Entwicklung integrierter Systeme, die vor allem wegen ihrer gemeinsamen Synchronisation zueinander kalibriert werden müssen.

3.3.1 DGPS

Um die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit GPS zu erhöhen, werden zusätzlich zu den Satellitensignalen noch Korrekturdaten benötigt. Diese reduzieren die Restfehler weiter. Korrekturdaten werden von einer oder mehreren Referenzstationen, die an genau vermessenen Punkten Soll/Ist-Vergleiche durchführen, generiert. Ein Netz von dauerhaft eingerichteten Referenzstationen und jederzeit abrufbaren Referenzdaten ist seit Jahren im Aufbau. Nur durch ein differentielles Verfahren zwischen mobilem GPS und Referenzstation zur Eliminierung der Fehlerquellen wird eine ausreichende Genauigkeit der Positionsbestimmung des Sensors erzielt. Allerdings waren in der Vergangenheit zur sicheren Bestimmung dreidimensionaler Positionen lange Erfassungszeiten notwendig, um Mehrdeutigkeiten sicher zu lösen. Seit dem Abschalten der künstlichen GPS-Verschlechterung durch *selective Availability* im Mai 2000 ist auch eine zeitliche Verdichtung statischer Referenzbeobachtungen problemlos möglich. Referenzdaten zu kinematischen Beobachtungen werden nun mit Epochenabständen von Sekunden interpoliert. Damit ist eine Versorgung mit Referenzdaten während der Erfassungsphase des Laserscannfluges in ausreichend hoher Frequenz möglich. Dabei gilt, je kürzer das Intervall der Einzelmessungen, desto geringer sind die Unsicherheiten einer Interpolation des Weges zwischen zwei registrierten Positionen.

Verknüpft man alle Referenzstationen im Umkreis des Befliegungsgebietes, so lassen sich die Genauigkeiten und die Zuverlässigkeit des Systems weiter erhöhen. Außerdem werden Korrekturmodelle zur Berücksichtigung entfernungsabhängiger Einflüsse der Troposphäre, der Ionosphäre und Fehler in den Satellitenephemeriden bereitgestellt.

Die gemeinsame Integration dieser Lösungen ermöglicht eine genaue Positionierung auch während kinematischer Messungen in einer Größenordnung von bis zu 5 cm in der Lage und 8 bis 13 cm in der Höhe (vgl. Wanninger, 2003).

3.3.2 INS

Das *Inertial Navigations System (INS)*, auch als *Inertial Measure Unit (IMU)* bezeichnet, zeichnet während der Flugphase nach dem Prinzip der Massenträgheit über drei Beschleunigungsmesser den Impuls in Lage und Höhe und mit drei Kreismesseinheiten die Rotationsbewegung entlang der Flugzeugachsen auf. Mit diesem System wird die Orientierung und die Geschwindigkeit des Flugzeugs relativ zur, durch das GPS bestimmten, aktuellen Position registriert. Das gesamte System ist ständiger Dynamik ausgesetzt und zufällige und systematische Fehler summieren sich während der INS- Aufzeichnung auf, vergleichbar mit einem freien Polygonzug. Die Absolutgenauigkeit ist dabei von der aktuellen Betriebsdauer beziehungsweise von der gesamten Flugzeit abhängig. Ein Flug, der ausschließlich mit INS, mittlerer Genauigkeit navigiert werden würde, würde nach einer Minute eine Missweisung von 0.3 - 0.5 m und nach einer Stunde eine Missweisung von 1 – 3 km (vgl. Ressler, 2002) aufweisen. Aus diesem Grunde wird die INS- Navigation durch die GPS-Daten ergänzt.

3.3.3 Direkte Georeferenzierung

Das Verfahren der direkten Georeferenzierung der Laserscanndaten ist eine extrapolierende Methode der Punkttransformation und somit von der Genauigkeit der einzelnen Ausgangsparameter in hohem Maße abhängig. Außerdem ist durch das Push- Broom-Prinzip mit seinen internen Bewegungsparametern und die externe Fortbewegung des Systems die Geometrie der registrierten Daten beeinträchtigt. GPS und INS arbeiten zunächst unabhängig voneinander. Über eine Kalmanfilterung werden die Zeitreihen der GPS- und INS- Registrierungen interpoliert und vergleichbar gemacht. Eine zeitliche Synchronisation der Systeme und eine räumliche Kalibrierung der Komponenten zueinander ist die Basis für die erreichbare Genauigkeit des Gesamtsystems. Die unterschiedlichen Datenraten der Einzelkomponenten (GPS: 1-10 Hz, INS: rd. 200 Hz, Scanrate: 50 Hz) müssen mit einer entsprechend hohen Genauigkeit (< 1 msec, vgl. Ressler, 2002) synchronisiert werden.

Der räumliche Zusammenhang zwischen GPS, INS und Sensor, der durch die Dynamik des Messprozesses einer ständigen Beeinträchtigung unterliegt, muss diesen hohen Anforderungen entsprechen. Eine solch hohe Systemintegrität ist nur durch regelmäßige Laborkalibrierung zu erreichen. Die mögliche Genauigkeit integrierter GPS/INS- Systeme ist in der Höhe abhängig von der Systemgenauigkeit der GPS- Epoche. Das heißt, die Fehler der GPS- Messung durch atmosphärische Einflüsse, Messgenauigkeit der Laufzeiten, Präsenz der Satelliten gehen stark in die Höhengenaugkeit des Gesamtsystems ein. Die erreichbare Lagegenauigkeit wird zusätzlich beeinflusst durch Zeitoffsetfehler zwischen Sensor und GPS/INS, dies verfälscht die Lage in Flugrichtung und Fehlern in der Erfassung der Rollwinkel und Kurswinkel, die eine Verdrehung der Sensorgeometrie bewirken. Am Rand des Aufnahmestreifens erzeugen diese Fehler zusätzlich Höhendifferenzen.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Geometrie der Orientierungsparameter bei der Photogrammetrie wurden Systeme und Verfahren entwickelt, um den Einfluss der einzelnen Fehlerquellen bei der direkten Georeferenzierung aufzudecken und zu kompensieren. Dabei kann die aktuelle Leistungsfähigkeit des Navigationssystems vor und nach der Befliegung durch einen Kalibrierungsflug verifiziert werden. Die Ergebnisse der GPS/INS Daten werden in die Blockausgleichung der Aerotriangulation eingeführt, um diese einerseits bei der Parameterschätzung zu berücksichtigen und andererseits deren eigene Integrität zu verifizieren. Die verbleibenden Unsicherheiten können im Endeffekt nur noch durch die Verwendung von Passpunkten kompensiert werden.

Allerdings sind diese Verfahren nicht oder nur bedingt auf die Laserscannmessung übertragbar. Eine Verbesserung durch Passpunkte ist in der Lage nur in Dimensionen größer als die Punktdichte möglich (vgl. Kapitel 3.2). Das Höhenniveau kann durch die Verwendung von signalisierten Referenzflächen im Untersuchungsgebiet kalibriert werden. Bei exakter Berücksichtigung der Integrationsmodelle für die einzelnen Komponenten und idealen Navigationsbedingungen wird mit einer Genauigkeit von etwa 5 - 10 cm in der Lage und einer Lagewinkelgenauigkeit von etwa 0.003 – 0.005° ausgegangen.

Die absolute Genauigkeit der extrapolierten Laserscannpunkte ist wiederum abhängig von der Entfernung vom Sensor zum beobachteten Objekt und ergibt sich nach den Modellen der Fehlerfortpflanzung als Summe der Einzeleinflüsse im Verhältnis zur Flughöhe.

Darüber hinaus sind die maßstäblichen Einflüsse des Bezugssystems zu berücksichtigen. GPS- Koordinaten werden im Koordinatensystem WGS- 84 angegeben. Das Zielsystem in Deutschland ist in der Regel ein Meridianstreifen des amtlichen Gauss- Krüger- Systems mit eigenem Bezugsellipsoid und Korrekturwerten für Distanzen und Koordinatenwerte in Abhängigkeit der Distanz zum Mittelmeridian. Das zugehörige Höhenmodell ist das Deutsche Haupthöhennetz DHHN von 1992. Gemeinsam werden die einzelnen Parameter der direkten Georeferenzierung in folgender Skizze deutlich:

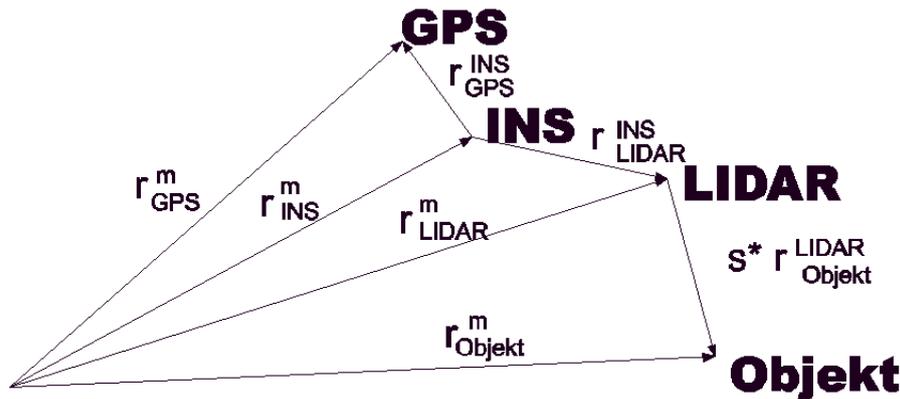


Abb. 12: Vektormodell der direkten Georeferenzierung
(Quelle: Müller et al., modifiziert, 2003)

$$\mathbf{r}_{\text{Objekt}}^m = \mathbf{r}_{\text{LIDAR}}^m + s * \mathbf{R}_{\text{INS}}^m * \mathbf{R}_{\text{LIDAR}}^{\text{INS}} * \mathbf{r}_{\text{Objekt}}^{\text{LIDAR}}$$

m	=	Maßstabsfaktor des verwendeten Koordinatensystems/Bezugssystem
s	=	Maßstabsfaktor für das Höhenreferenzsystem des Bezugssystems
$\mathbf{r}_{\text{Objekt}}^m$	=	Vektor zwischen Objektpunkt und Nullpunkt des Bezugssystems
$\mathbf{r}_{\text{GPS}}^m$	=	Vektor zwischen GPS-Antenne und Nullpunkt des Bezugssystem
$\mathbf{r}_{\text{INS}}^m$	=	Vektor zwischen INS und Nullpunkt des Bezugssystem
$\mathbf{r}_{\text{LIDAR}}^m$	=	Vektor zwischen Sensor und Nullpunkt des Bezugssystem
$\mathbf{r}_{\text{Objekt}}^{\text{LIDAR}}$	=	Vektor vom Einzelpixel am Sensor zum Objektpunkt
$\mathbf{R}_{\text{INS}}^m$	=	Rotationsmatrix zwischen INS und Bezugssystem
$\mathbf{R}_{\text{LIDAR}}^{\text{INS}}$	=	Rotationsmatrix zwischen INS und Sensor

Quelle: Müller et al., modifiziert, 2003
Formel 8: Georeferenzierung der LIDARdaten

Genauere Aussagen zur Genauigkeit der vorliegenden Messung liegen nicht vor. Katzenbeisser (PFG, 2004) schlägt als Erwartungsmaß für eine Laserscannbefliegung bei 1000 m Flughöhe eine zu erwartende Genauigkeit von ± 0.15 m in der Höhe und < 0.20 m in der Lage vor. Aufgrund der niedrigen Flughöhe sind die Einflüsse durch Winkelfehler im INS gegenüber der GPS/INS- Navigationsgenauigkeit zu vernachlässigen. Die Trennschärfe ermöglicht eine Objektauflösung von ca. 15 cm.

Mit der Streckenmessgenauigkeit und der zu erwartenden Genauigkeit der GPS/INS-Navigation ergibt sich eine absolute Genauigkeit von maximal 15 cm in der Höhe und Lage. Differenzen im Geoid als Grundlage für das Höhenreferenzmodell innerhalb des Untersuchungsgebietes werden nicht berücksichtigt, da eine detaillierte Information zu den Geoidundulationen nicht zur Verfügung steht. Die Grenzen des Systems liegen in der Interpretierbarkeit der Daten.

Die Aufgabenstellung seitens des Auftraggebers sieht neben der Erfassung der Schutzräume links und rechts der Trasse auch die Erfassung der Masten und Leitungen vor. Ginge es nur um die Beschreibung eines Sicherheitsabstandes entlang der Trasse, so wäre es ein Leichtes, zum Beispiel aus Orthofotos der Landesvermessung die Trasse mit relativ großer Unsicherheit zu digitalisieren und einen Korridor mit einem großzügigen Abstand entlang der Trasse zu definieren.

Eine Identifizierung der Objekte entlang der Schutzzone und eine möglichst genaue Verortung der Masten, Leitungen und der begleitenden Topographie sind jedoch gefordert. Eine individuelle Filterung der einzelnen Situationskomponenten ist notwendig. Die Reihenfolge der einzelnen Filterungen ermöglicht in diesem Zusammenhang die Nutzung einzelner selektierter Komponenten als Ausgangsbasis für verfeinerte Filterung. So wird im ersten Schritt ein Geländemodell und ein Topographiemodell extrahiert. In einem weiteren Schritt wird die gesamte großflächige Topographie gefiltert. Anschließend wird aus den verbleibenden Daten die Leitung extrahiert und dann die überzähligen Leitungspunkte aus dem Vegetationsdatensatz entfernt. Als letzter Arbeitsgang werden die Vegetationspunkte innerhalb des Schutzraumes klassifiziert und die einzelnen Komponenten in ein Situationsmodell überführt.

4. Beschreibung der Aufnahmesituation und der vorliegenden Daten

4.1 Aufnahmekonstellation der Laserscannmessung zur Erfassung von Hochspannungsleitungen

Die Firma Fugro- Inpark bietet mit ihrem **FLI-MAP®** (*Fast Laser Imaging and Mapping Airborne Platform*) System, montiert unter einem Hubschrauber, ein ideales Werkzeug zur Erfassung von lang gestreckten schmalen Trassen bei relativ niedriger Flughöhe. Der verwendete Scanner ist das System TopoSense von OSI- Laser- Scan. Die Scannrate wird mit etwa 50 Hz und 200 Laserimpulsen pro Scann angegeben. Die Wellenlänge des *class 1 diode Lasers* ist 904 nm (vgl. Anhang A).

Je nach Aufgabenstellung beträgt die Flughöhe des Hubschraubers nur 75 – 80 m über Grund. Die Swat- Weite beträgt rund 2 x 46 m bei einem Auslenkwinkel von $\pm 30^\circ$.

Insbesondere die geringe Fluggeschwindigkeit von 50-60 km/h und die gute Manövrierbarkeit des Hubschraubers ermöglicht es, auch Besonderheiten der Trasse wie abrupte Richtungsänderungen abzarbeiten.

Es können ca. 10.000 Punkte pro Sekunde erfasst werden. Dies entspricht einer Punktdichte von rund 20 Punkten pro Quadratmeter mit einer relativen Genauigkeit von 3-5 cm. Unter Berücksichtigung der Navigationseinflüsse sind entsprechend absolute Genauigkeiten für Einzelobjekte von 25 cm in der Lage und 10 cm in der Höhe zu erwarten.

Pro Anflug können rund 65 Kilometer Trasse beflogen werden. Dabei werden entlang der Trasse alle 20 Kilometer GPS-Referenzstationen benötigt, die die Navigation des Hubschraubers und die Georeferenzierung der erfassten Punktwolke mit differentiellm GPS ermöglichen (vergleiche Kapitel 3.3.1).

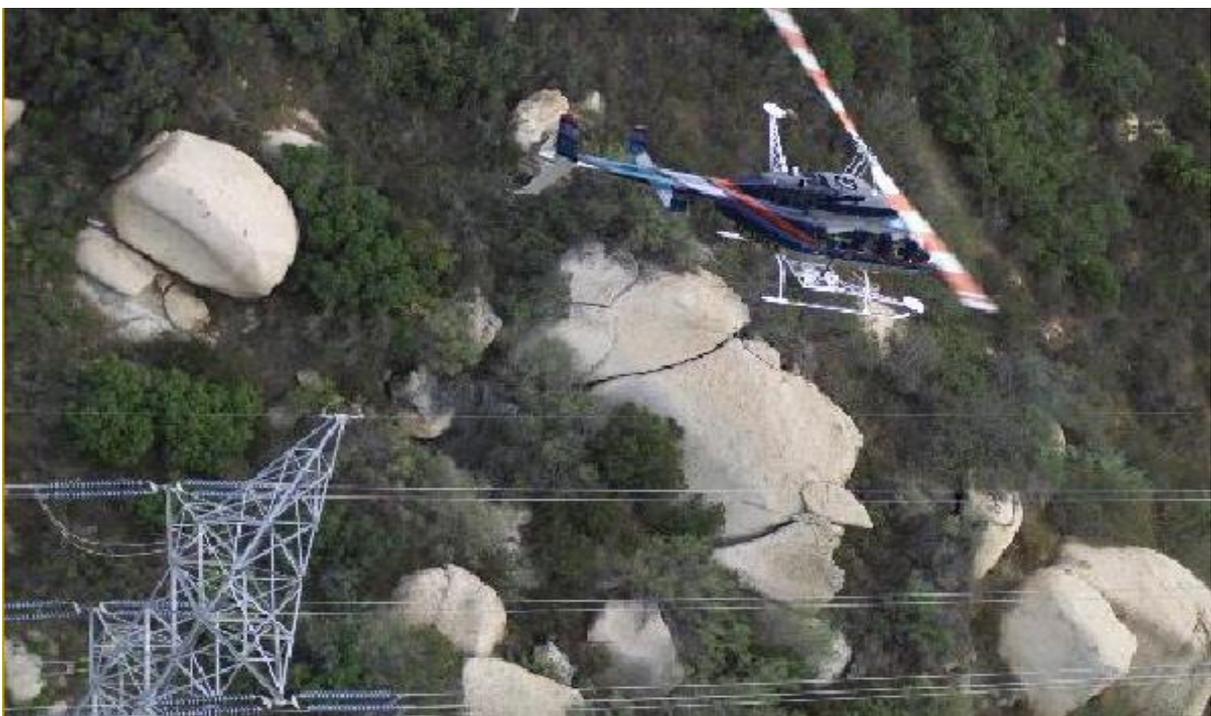


Abb. 13: Laserscannflug mit dem Hubschrauber

Quelle: <http://www.fugro.nl/survey/onshore/flimap.asp?service=%2Fsurvey%2Fonshore%2Fflimap.asp> vom 15.01.2005

4.2 Beschreibung der Testdaten

Die Testdaten bilden die Trasse Nr. 1035 einer 110-kV-Leitung von Petersberg nach Lauterbach in Hessen ab. Die gescannte Trasse ist etwa 28.5 km lang und mit einer durchschnittlichen Punktdichte von 12 bis 20 Punkten erfasst. Diese hohe Punktdichte der Laserscannmessung erlaubt neben der detaillierten Abbildung der Erdoberfläche auch die Identifizierung diskreter Objekte aus der erfassten Punktwolke. Eine Differenzierung von Objekten > 2m² erscheint möglich. Allerdings muss sich die Auswertung der Punktwolke vor allem auf die Analyse räumlicher Informationen beschränken. Ein semantischer Informationsgehalt, vergleichbar mit den Farbinformationen bei Satellitenaufnahmen oder Fotos steht noch nicht mit ausreichender Aussagekraft zur Verfügung (vgl. Kapitel 3.2).

Ergänzend zu den Laserdaten wurde die gesamte Trasse fotografisch mit digitalen Senkrechtaufnahmen aufgenommen, georeferenziert und als Orthofotos zur Interpretation bereitgestellt. Diese Orthofotos eignen sich sehr gut, die Informationen, die aus den gescannten Daten erschlossen werden zu verifizieren. Da die Orthofotos ihre Orientierung aus den Parametern der GPS/INS- Orientierung beziehen (vgl. Kapitel 3.3), können diese nicht zur Verbesserung oder Überprüfung der Lagegenauigkeit der Laserscanndaten herangezogen werden. Auch liegen keine weiterführenden Daten wie zum Beispiel Katasterdaten, eine photogrammetrische Auswertung oder sonstige räumliche Daten vor.

Leitungslisten mit Informationen zu den einzelnen Trassenabschnitten stehen ebenfalls zur Verfügung. Hier ist jeder Mast mit seiner Masthöhe und den spezifischen Feldparametern (ein Feld ist der Bereich zwischen zwei Masten) verzeichnet. Es fehlen die Lagekoordinaten der einzelnen Masten.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	LTG	SPG	NAME 1	NAME 2	KENNUNG	VON-BW	VON MAST	BIS-BW	BIS MAST	SEILTYP	TEIL-ANZ	SEIL-DIN	SEIL-DIN-DAT	H-ZUG
2	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115343	043	115344	044	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
3	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115344	044	115345	045	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
4	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115345	045	115346	046	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
5	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115346	046	115347	047	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
6	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115347	047	115348	048	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
7	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115348	048	115349	049	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
8	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115349	049	115350	050	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
9	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115350	050	115351	051	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
10	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115351	051	115352	052	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
11	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115352	052	115353	053	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
12	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115353	053	115354	054	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
13	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115354	054	115355	055	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
14	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115355	055	115356	056	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
15	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115356	056	115357	057	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
16	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115357	057	115358	058	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
17	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115358	058	115359	059	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
18	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115359	059	115360	060	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
19	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115360	060	115361	061	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
20	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115361	061	115362	062	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
21	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115362	062	115363	063	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
22	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115363	063	115364	064	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
23	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115364	064	115365	065	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
24	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115365	065	115366	066	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
25	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115366	066	115367	067	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
26	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115367	067	115368	068	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
27	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115368	068	115369	069	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
28	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115369	069	115370	070	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
29	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115370	070	115371	071	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
30	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115371	071	115372	072	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
31	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115372	072	115373	073	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
32	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115373	073	115374	074	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0
33	1035	110	DIPPERZ	LAUTERBACH	3	115374	074	115375	075	AL/ST 120/21	1	48204	196205	80.0

Tab. 2: Leitungsverzeichnis

Der gesamte Datensatz besitzt ein Volumen von 4.13 Gigabyte im Ascii- Format. Da keine auf die Verarbeitung von LIDAR- Daten hin optimierte Software zum Einsatz kommt, wird ein Trainingsgebiet von etwa 1.5 km Länge isoliert und in drei weitere Teilgebiete mit jeweils 50 m Überlappung unterteilt:

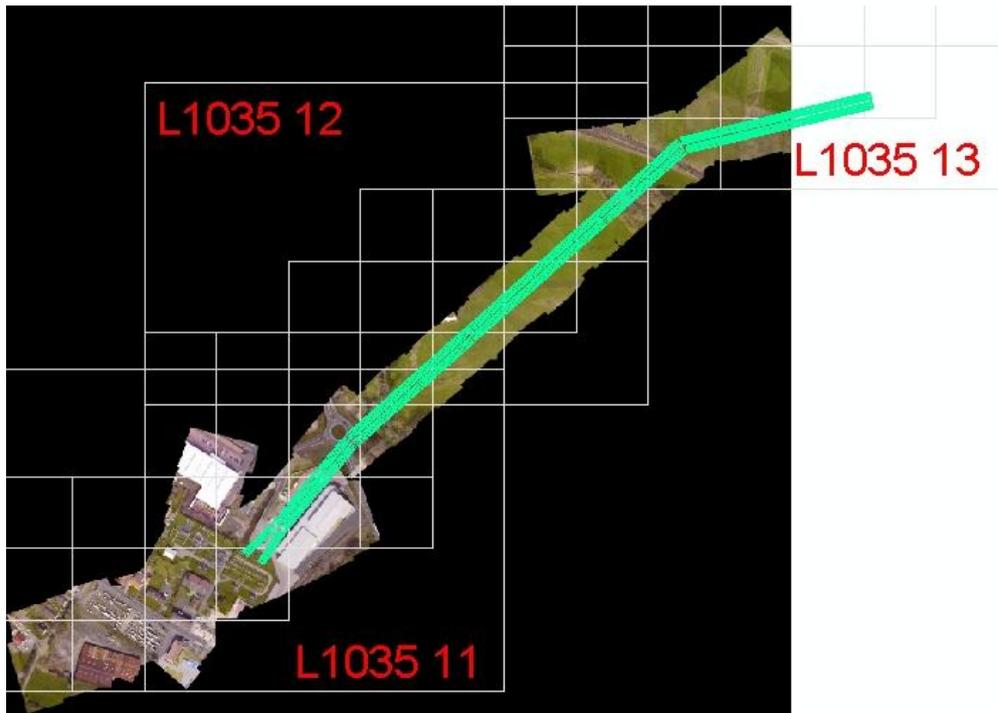


Abb. 14: Trainingsgebiet

- L1035_1: 1.910.792 Punkte
- Gebietsausdehnung:
 - Trassenbreite: 110 m
 - Trassenlänge: 1.500 m

Aufgeteilt in drei Teilgebiete:

- L1035_11: 858.535 Punkte
 - Trassenbreite: ca. 110 m
 - Trassenlänge: 550 m
- L1035_12: 456167 Punkte
 - Trassenbreite: 95 m
 - Trassenlänge: 550 m
- L1035_13: 643180 Punkte
 - Trassenbreite: 100 m
 - Trassenlänge: 550 m

Die Nomenklatur innerhalb dieser Master Thesis ist der Arbeitsumgebung entsprechend gewählt und entspricht nicht den Vorgaben der E-ON Netz. Die Software beschränkt jedoch die Namenslängen auf 13 Zeichen, so dass sich ein Kompromiss nicht vermeiden lässt.

5. Filterung der Laserdaten

5.1 Grundsätzlicher Ansatz zur Filterung von Laserscann Daten

Die dreidimensionale, unregelmäßige Punktwolke der Laserscannbefliegung beinhaltet alle First-Return-Signale, die von den Objekten und dem Erdboden reflektiert werden. Diese Datenfülle muss gefiltert werden, um einzelne Objekte selektiv erfassen oder klassifizieren zu können. Für die einzelnen Modellstufen (DGM, nDOM, DSM) kommen unterschiedliche Filter und Interpolationsansätze zum Einsatz, die jeweils im Rahmen ihrer Anwendung beschrieben werden. Aus der räumlichen Korrelation der Messpunkte zueinander und ihrer absoluten Position im Raum wird auf die topographische Zugehörigkeit geschlossen.

Die Verfahren der Geostatistik und der räumlichen Analyse bieten sich als Werkzeuge für die Bearbeitung an.

Dr. Waldo Tobler's „first law of geography“ (Tobler, 1969; in Barnes, 2004) dazu:

“...everything is related to everything else, but near things are more related than distant things”.

Diese Relation räumlich nahe positionierter Objektpunkte ist die Voraussetzung für den Einsatz von Techniken der morphologischen Bildverarbeitung zur Analyse der Daten.

Zu jeder Teilfragestellung im Zusammenhang mit der Datenanalyse lässt sich eine räumlich relationale Hypothese aufstellen. Punkte, die gemeinsam eine Fläche mit wenig Veränderung in der Morphologie bilden, sich aber von der weiteren Umgebung um mehrere Meter in der Höhe unterscheiden, könnten zum Beispiel als Gebäude identifiziert werden, wenn sie eine gewisse Mindestgröße überschreiten.

Eine weitere Hypothese geht davon aus, dass die jeweils niedrigsten Punkte einer Gruppe wahrscheinlich den Erdboden repräsentieren. Somit lässt sich der jeweilige Ansatz zur Selektion oder Filterung der geforderten Objektgruppe ableiten. Die identifizierten Objekte werden in weiteren Schritten als Masken zur Separation der Daten verwandt. In einem ersten Schritt wird ein Geländemodell aus den Gesamtdaten gefiltert. Aus dem Differenzmodell zwischen Punktwolke und Geländemodell werden kompakte Objekte wie Gebäude selektiert oder kleinformatige Objekte, Autos, niedere Vegetation, Reflektionen an Zäunen und Hecken eliminiert. Eine ideale Reihenfolge der Operationsschritte ist maßgeblich für eine effiziente Bearbeitung des Datensatzes, entwickelt sich jedoch erst während der Bearbeitung.

In der Literatur wird eine ganze Reihe von mehr oder weniger unterschiedlichen Ansätzen diskutiert, die zum Teil spezielle Programmierung benötigen. Einige dieser Verfahren lassen sich jedoch so reduzieren, dass sie auch mit Standardsoftware betrieben werden können. Die Vorgehensweise, diese Verfahren Schritt für Schritt in Standardprogrammen abzuarbeiten (in diesem Falle mit ESRI ArcGIS (Spatial- Analyst- Extension und 3D-Analyst-Extension)) hat den Vorteil, alle Stufen der Bearbeitung nachzuvollziehen. Dabei vermittelt sich ein gutes Gefühl für die Datenmengen und die möglichen Probleme und Feinheiten der Filterparameter, die die Qualität des gewonnenen Datenmodells stark beeinflussen. Dies stellt klar einen Kompromiss dar, denn für verschiedene Schritte der Filterungen fehlen zum Teil die notwendigen Werkzeuge. Andererseits bieten diese Programme die Möglichkeit, die Arbeitsabläufe zu automatisieren und im Batch- Betrieb zu betreiben. Nur die Datenmenge beschränkt die Möglichkeiten der automatisierten Bearbeitung.

In professionellen Anwendungen werden die Filteralgorithmen ohne Umwege und mit optimierten Zugriffsalgorithmen programmiert. Dabei ist natürlich eine effektivere Auslastung der Rechnerleistung und eine Umgehung überflüssiger Zwischenschritte möglich (z.B. muss

in ArcGis ein Rasterdatensatz, der als Grundlage für die Interpolation einer Oberfläche dienen soll, erst in ein 3D-Punktshape übertragen werden etc.).

Ein erster Schritt ist, alle Punkte, die die Erdoberfläche darstellen, aus der Punktwolke zu selektieren. Dieser Vorgang wird als Filterung bezeichnet.

Bei der Filterung der Daten zur Erstellung von Digitalen Geländemodellen werden die Punkte, die nicht zur Erdoberfläche gehören, als „Fehler“ bezeichnet (ein Teil dieser Fehler wird später benötigt, um topographische Objekte über der Erdoberfläche zu analysieren: Gebäude, Leitungen, Masten). Man unterscheidet drei grundsätzliche Arten von Fehlern:

- zufällige Fehler sind zufällige Streuungen um den tatsächlichen Höhenwert eines Einzelpunktes in Abhängigkeit des Aufnahmesystems (allgemein als Standardabweichung des Aufnahmesystems bezeichnet).
- Grobe „Fehler“ im Sinne der DGM-Filterung können einerseits verursacht werden durch Reflektionen an Objekten, die nicht zur Oberfläche gehören oder durch Messfehler wie Multi- Path- Effekte. Diese zu unterscheiden funktioniert praktisch nur, wenn man die räumliche Verteilung dieser Ausreißer analysiert. Treten diese „Fehler“ lokal gehäuft auf, stellen sie ein topographisches Objekt dar. Ein gewisses Maß an Restfehlern im Bereich der Topographie wird sich nicht vermeiden lassen. Im Testgebiet wird unter anderem eine Umspannstation mit erfasst und die tatsächliche Ausdehnung der Isolatoren und Aufbauten ist sicherlich nicht sauber differenzierbar.
- Systematische Fehler werden zum Beispiel verursacht durch Reflektion an niedriger Vegetation, besitzen in der Regel kein sehr großes Maß und sind entsprechend sehr schwierig zu eliminieren. Diese Fehlerklasse sollte im Vorfeld der Bearbeitung berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit wäre, Teilgebiete der Erfassung über einen Korrekturfaktor abzusenken.

Systematische Fehler können durch Fehler in den Orientierungen der einzelnen Flugstreifen auftreten. Aus einer Nachbarschaftsstatistik, die die Bandbreite der Höheninformation innerhalb eines definierten Umfeldes analysiert, lässt sich ein Maß für den Höhenversatz zwischen den Streifen ermitteln. Liegen die Daten nach Flugstreifen getrennt vor, kann dieser Versatz ausgeglichen werden.

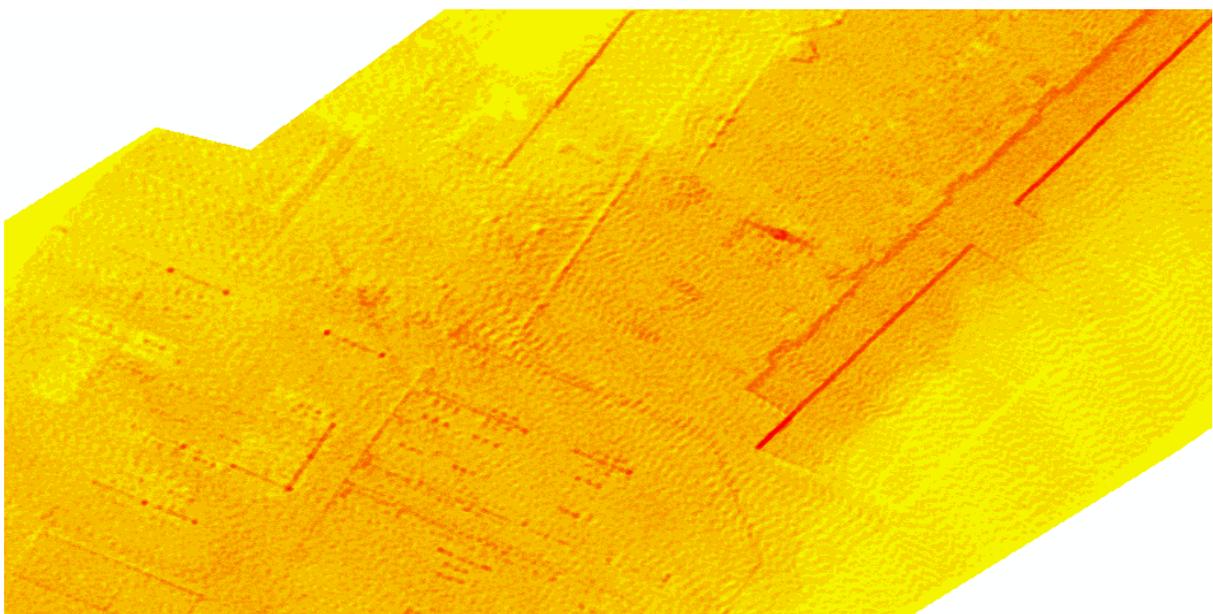


Abb. 15: Datenkonsistenz: Im Überlappungsbereich der Flugstreifen ist ein systematischer Höhenunterschied zwischen benachbarten Punkten von $< 0.2\text{m}$ nachgewiesen.

Im Falle der vorliegenden Daten, die zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengefasst sind, ist eine Korrektur nicht mehr möglich. Eine absolute Genauigkeitsabschätzung wird durch den Mangel an vergleichbarer Höhen- und Lageinformation ebenfalls erschwert. Der direkte Vergleich zum Beispiel mit der Lagegeometrie aus Katasterdaten würde immerhin die absolute Positionierung stützen.

Mit Hilfe verschiedener Algorithmen ist es nun möglich, die Punktwolke entsprechend zu analysieren und die Bodenpunkte von den Fehlern und den Reflektionen an topographischen Objekten über Grund zu trennen. Zentrales Ziel ist dabei, eine ausreichend große Punktdichte zu erhalten, um ein flächendeckendes Geländemodell interpolieren zu können, das dem tatsächlichen Geländeverlauf so weit wie möglich angepasst ist. Kritische Bereiche sind vor allem Gebiete mit abrupten Veränderungen z.B. an Stützmauern oder steilen Böschungen und Gebiete, in denen nur ein kleiner Teil der Reflektionen tatsächlich vom Erdboden stammt.

Mit der Hypothese der Erdoberfläche als eine gewissermaßen stochastische Oberfläche (die Koordinaten der einzelnen Messungen schwanken in gewissen Maßen um die wahre Höhe und Lage – so genannte regionalisierte Variablen (E.Lorup,2003)), deren Stichproben in hohem Maße korrelieren, werden nicht nur deterministische sondern geostatistische Ansätze benötigt, um die Oberfläche modellieren.

Die eigentlichen Filterverfahren zum Isolieren der Erdoberfläche und der aufgesetzten topographischen Objekte werden im Falle dieser Arbeit als Modelle in hintereinander gestaffelten Einzeloperationen realisiert. Räumliche Interpolationsverfahren sind dabei immer wieder in die Modelle eingebunden und werden im Anhang B kurz erläutert.

5.2 Filterung des Geländemodells aus einer Punktwolke

Die Interpolation der Erdoberfläche kann nur mit den Punkten erfolgen, von denen man sicher ausgehen kann, dass sie die Höhe der Erdoberfläche repräsentieren. Um die Punktwolke also auf endgültige Interpolation vorzubereiten und die überzähligen topographischen Punkte (und auch die Fehler) zu eliminieren, werden sehr unterschiedliche Verfahren beschrieben, die in klassische Programme zur Berechnung von Geländeoberflächen integriert wurden. Diese Selektion von Daten aus einer Punktwolke nennt man Filterung. Die Eliminierung der topographischen Punkte über der Erdoberfläche ist dabei relativ einfach, doch die Ausprägung polymorpher Details der Erdoberfläche stellt die eigentliche Herausforderung dar. Einige Ansätze, entwickelt am IPI der Universität in Hannover (*Dual Rank Filtering*) und am IPF der Technischen Universität in Wien, basierend auf *Linearer Prädiktion oder progressiver TIN-Verdichtung* werden in der Folge vorgestellt.

Die beschriebenen Filterverfahren nutzen klassische Interpolationsverfahren, verknüpfen diese mit gezielten Vorgaben und Klassifikationsansätzen und reduzieren so die Datenmenge, die dann letztendlich zur Oberflächeninterpolation geeignet ist (Morphologische und Hierarchische Filterung) oder reduzieren die Daten und interpolieren die Oberfläche in einem gemeinsamen Ansatz (z.B. Lineare Prädiktion).

Bei allen diesen Verfahren wird davon ausgegangen, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen Bodenpunkten und Nicht-Boden-Punkten (Gebäude, Topographie, Vegetation) gibt. Dieser Unterschied drückt sich durch Informationen über die Neigung in der Umgebung des Punktes oder die räumliche Punktdichte aus und wird statistisch analysiert.

5.2.1 Lineare Prädiktion (auch: Robuste Interpolation oder Interpolation nach kleinsten Quadraten)

Aus einer gegebenen Punktwolke wird eine genäherte Oberfläche durch eine lineare Prädiktion (=“Voraussage“), also eine im geostatistischen Sinne geschätzte Oberfläche gebildet, deren Interpolationswerte linear über Gewichte aus den vorgegebenen Stützpunkten entwickelt werden. Als Funktion zur Überbrückung der Stützpunktwischenräume wird eine Kovarianzfunktion herangezogen, die folgende Form besitzt:

$$C_{(P_i P_k)} = C(0) * e^{-A \left(\frac{P_i P_k}{b} \right)^2}$$

$C(0)$ = ist die Kovarianz für $P_i P_k = 0$ (sog. Scheitelwert)

$C_{(P_i P_k)}$ = Kovarianz zwischen den Punkten P_i und P_k

b_{const} = Neigung der Kovarianzfunktion (reduziert auf 25%)

V_{zz} = Varianz aus n Stützpunkthöhen Z_i

V_{ss} = Varianz des systematischen Fehleranteils

V_{rr} = Quadrat der Genauigkeit der Interpolation an der Stelle $P(x,y)$

A = konstanter Maßstabsfaktor (empirisch ermittelt)

Formel 9: Kovarianzfunktion zur linearen Prädiktion

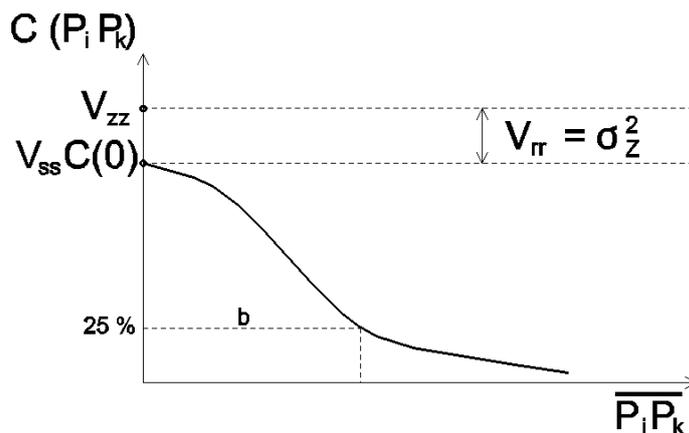
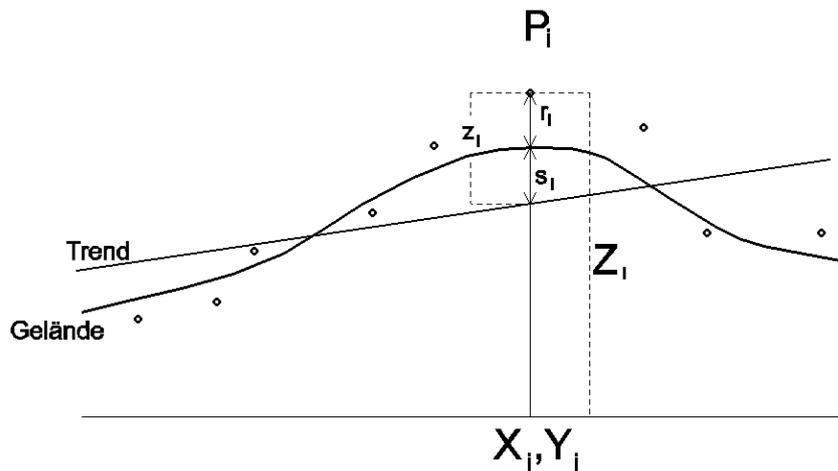


Abb. 16: Kovarianzfunktion zur linearen Prädiktion

Quelle: <http://www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/lehveranstaltungen/scripte/laserfiltpart1.pdf>

Diese Kovarianz zwischen den Punkten P_i und P_k bildet ein Gewicht für den Einfluss der Höhe Z_i im Verlauf der weiteren Interpolation. Ist der Abstand der Punkte P_i und P_k sehr klein, ist die Kovarianz (und damit das Gewicht von Z_i) sehr groß (gegen 0.99). Ist hingegen der Abstand der Punkte sehr groß, geht die Kovarianz gegen 0.



- P_i = Stützpunkt
- Z_i = gemessene Stützpunkthöhe
- z_i = deterministischer Anteil der Höhe Z_i
- r_i = unregelmäßiger Anteil
- s_i = systematischer Anteil

Abb. 17: Trend- und Geländeoberfläche
Quelle: K.Kraus: Photogrammetrie, Band 3, 2000

Im ersten Schritt wird eine Trendfläche zum Beispiel mit einer Low- Level Polynom- Interpolation errechnet. Mit Hilfe dieser Trendoberfläche werden die deterministischen Anteile in Z_i eliminiert. Das Resultat für das gesamte Untersuchungsgebiet ist ein Vektor \underline{z} mit den Differenzen z_i zwischen Trend und Stützpunkt.

$$\underline{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix}$$

Der Vektor $\underline{c}^T = [C(P_iP_1), C(P_iP_2), \dots, C(P_iP_n)]$ beinhaltet die Kovarianzen der Stützpunkte zwischen gemessener und interpolierter Höhe. Die Kovarianz- Matrix enthält die Kovarianzen zwischen den Einzelmessungen.

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} \underline{V}_{zz} & C(P_1P_2) & \dots & C(P_1P_n) \\ C(P_1P_1) & \underline{V}_{zz} & \dots & C(P_2P_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C(P_nP_1) & C(P_nP_2) & \dots & \underline{V}_{zz} \end{bmatrix}$$

Die interpolierte Oberfläche im Punkt P_i ergibt sich somit aus

$$U_i = \underline{c}^T \underline{C}^{-1} \underline{z}$$

Formel 10 Lineare Prädiktion:

Die Berechnung der Trendfläche und anschließende Interpolation wird in Form einer ‚Moving- Window‘- Operation mit jeweils gleich großem Suchfenster durchgeführt (nicht zuletzt, um die Kovarianz- Matrix nicht zu groß werden zu lassen). Die Punkte der umliegenden acht Maschen werden allerdings mit in die Interpolation einbezogen.

Im Rahmen dieser Vorgehensweise bietet sich die Bestimmung der Trendfläche ebenfalls aus einer ‚Moving- Window‘- Operation in der Form $Z_i = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i$ an. Als Steuerparameter dieser Interpolation werden Schwellwerte für die Unterschiede zwischen Trend und Messung angegeben. Iterativ werden die Punkte eliminiert, die den Schwellwert $I_{tp} > \delta_i$ mit $\delta_i = Z_i - Z_{Trend}$ überschreiten.

Im nächsten Schritt wird die Differenz zwischen den mithilfe der Kovarianz- Matrix geschätzten Höhen u_i und der nach Abspaltung des Trends ermittelten Messungen z_i mit einem Schwellwert t_{pre} verglichen. Ist $t_{pre} > z_i$, so wird dieser Punkt ebenfalls eliminiert (vgl. Lohmann, Koch, Schaeffer, 2000 und Kraus, 2000).

Dieser Interpolationsansatz ist einerseits in der Software SCOP++ (INPHO, Stuttgart und Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien) als auch in der Software DTMCOR und RASCOR des Institute of Photogrammetrie and Engineering Surveys (IPI), Hannover implementiert und ist vergleichbar mit der Gewichtsbestimmung über die Semivarianzen beim Kriging.

Da der Interpolationsalgorithmus auch auf einer Ableitung beruhen kann, bei der die Summe der Quadrate der Residuen zum Minimum werden, spricht man auch von der Interpolation nach kleinsten Quadraten (vgl. Kraus, 2000). Die Interpolation durch lineare Prädiktion erfordert einige Vorarbeiten an Trainingsgebieten, ergibt aber dann sehr gute Ergebnisse auch in Gebieten, in denen große Bereiche durch Vegetation und Waldgebiete abgedeckt sind. Allerdings müssen die Berechnungsparameter den morphologischen Gegebenheiten des Geländes angepasst werden. Die Filterung größerer Objekte benötigt eine entsprechende Maschenweite, die ausreichend groß sein muss, um auch zum Beispiel größere Gebäude zu überbrücken. Damit werden aber starke Undulationen des Geländes verfälscht (geglättet) wiedergegeben. Eine alternative Vorgehensweise müsste die Aufteilung des Erfassungsgebietes nach Klassen verschiedener Morphologie und Topographie und die anschließende Bearbeitung mit dem Dual-Rank-Filter sein.

5.2.2 Progressive TIN- Verdichtung

Das TIN (Triangulated- Irregular- Network) ermöglicht eine Repräsentation einer Oberfläche unter Verwendung aller geeigneten Stützpunkte, Kanten und Gerippelinien. Insbesondere Maxima, Minima, Brüche, Mulden und Sattel können bei der Triangulation berücksichtigt werden und so die reale Morphologie exakter abbilden als eine Rasterinterpolation, die eine Schätzung der Oberfläche im geostatistischen Sinne darstellt. Die Berechnung und Verspeicherung eines TIN ist allerdings sehr rechen- und speicherplatzintensiv.

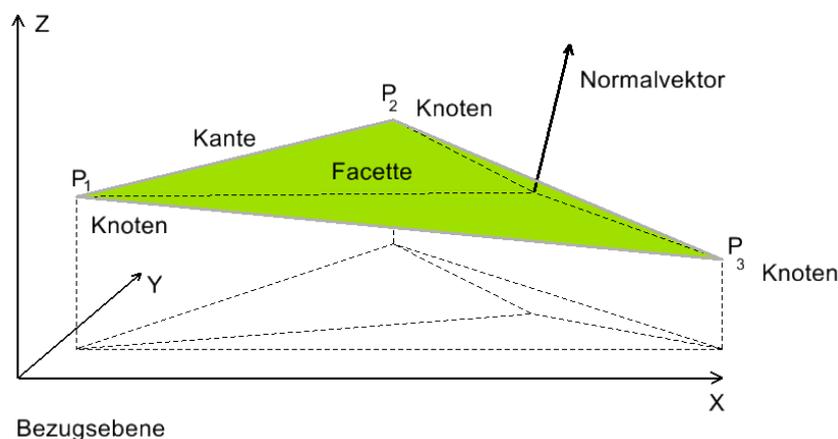


Abb. 18: Triangulated-Irregular-Network

Nach der Bestimmung einiger sicherer Bodenpunkte, zum Beispiel mit Hilfe einer Neighborhood- Statistik, die für ein ‚Moving- Window‘ mit relativ großer Maschenweite die jeweils kleinsten Geländehöhen ermittelt (Vorsicht mit Fehlerhöhen, die unter die Erdoberfläche reichen) wird ein TIN (Triangulated- Irregular- Network) errechnet. Weitere Punkte zur Verdichtung der Dreiecksflächen werden nun dem TIN hinzugefügt, indem aus dem Verhältnis von Abstand zu den Dreieckspunkten und Steigungswinkel in den Eckpunkten des Dreiecks zum potenziellen Neupunkt die Parameter des Neupunktes bestimmt werden. Wird dabei ein Schwellenwert überschritten, wird dieser Punkt abgelehnt als Nicht-Boden-Punkt. Der Schwellenwert wird in Abhängigkeit der Morphologie des Geländes festgelegt.

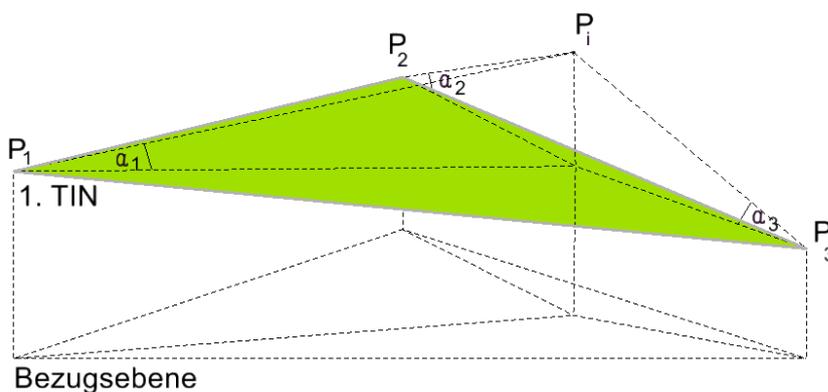


Abb. 19: Progressive TIN- Verdichtung

Verschiedene Versionen dieses Verfahrens gehen vor allem von unterschiedlichen Vorarbeiten aus. An Stelle der ersten Dreiecksvermaschung wird eine konvexe Hüllkurve über die als Bodenpunkte identifizierten Stützpunkte gerechnet. Die Punkte, die im folgenden Analyseschritt unterhalb der Hüllkurve liegen, können gleich als Bodenpunkte identifiziert werden.

Die Software TerraScan (Terrasolid Oi, Helsinki), eine Extension zur Bentley Microstation, basiert auf einer progressiven TIN- Verdichtung.

5.2.3 Morphologische Filterung und Dual Ranking

Die morphologische Filterung hat ihren Ursprung in der digitalen Bildbearbeitung und basiert auf Algorithmen zur Mustererkennung. Überträgt man die Rohdaten der Laserscandaten in eine Grauwertdarstellung, bei der die Helligkeit der Grauwerte die absoluten Höhen wiedergibt, dann erscheinen über dem Grund erhabene Objekte als helle Flächen.

Mit den Werkzeugen der mathematischen Morphologie können diese Objekte identifiziert, hervorgehoben oder eliminiert werden. Diese Methode beruht auf der Interpretation eines durch ein vorgegebenes Strukturelement modifizierten Grauwertbildes. Ein zweidimensionales Strukturelement wird als eine Art Schablone über die zweidimensionale Grauwertdarstellung der Punktwolke in Form einer ‚Moving- Window‘- Funktion geschoben. Die Strukturelemente sind einfache geometrische Gebilde, die je nach Form und Ausprägung unterschiedliche Funktionen erfüllen:

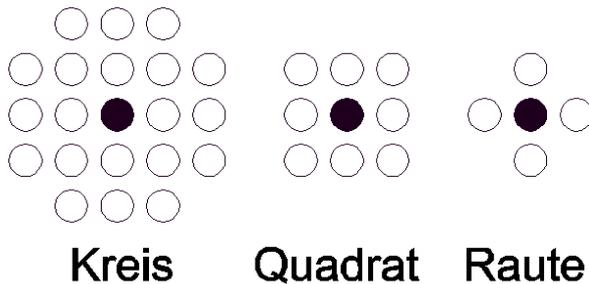


Abb. 20: Strukturelemente zur morphologischen Filterung
 Quelle: <http://vv11.te3.fh-heilbronn.de/German/ver.php?contr=theor2>

Im Prinzip findet eine morphologische Transformation des Grauwertbildes statt. Die Strukturelemente dienen dabei als "Transformationsparameter". Das Ergebnis dieser Transformation ist ein neues Bild mit ganz bestimmten Eigenschaften, die eine Interpretation ermöglichen. Durch Kombination unterschiedlicher Operationen und unterschiedlicher Strukturelemente lassen sich nun Informationen über die zu analysierenden Objekte sammeln.

Einige der Operatoren mit den Abfrageparametern Mean, Minimum, Maximum, Differenz, Summe oder Standardabweichung etc. können in vielen GIS- und Fernerkundungsprogrammen als fokale Neighborhood- Statistik simuliert werden.

Im Gegensatz zu lokalen Statistiken, die nur das einzelne Pixel, allerdings über verschiedene Themen hinweg (zum Beispiel Zeitreihen), verarbeiten, interpretiert die Neighborhood-Statistik die direkte Umgebung des aktuellen Pixel. Es wird beispielsweise mit einem 3x3 Pixel-Strukturelement nach dem *Maximum*- Wert der benachbarten Pixel gesucht und dieser Wert an das aktuelle Pixel übergeben. Dies entspricht der morphologischen *Dilatation*, die die Ausdehnung der zu analysierenden Objekte vergrößert.

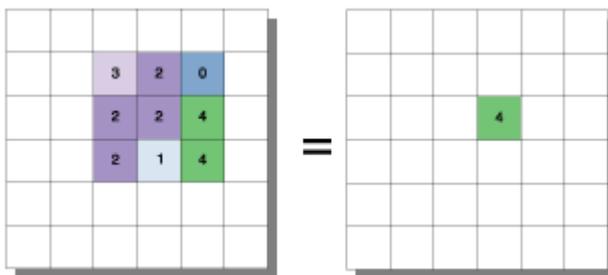


Abb. 21: FocalMax: das Maximum der umliegenden Pixel wird dem aktuellen Pixel zugeordnet
 Quelle: Spatial Analyst Functional Reference

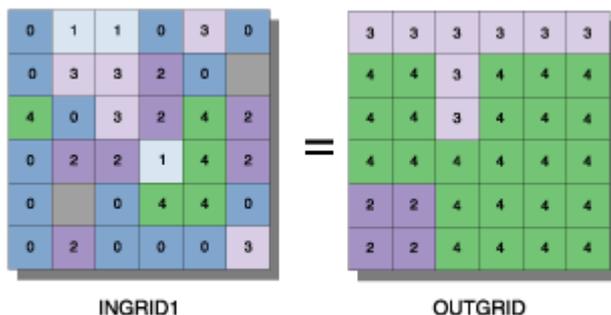


Abb. 22: Resultat der *Dilatation* mit dem FocalMax- Operator
 Quelle: Spatial Analyst Functional Reference

Damit werden zum Beispiel Details der Nachbarschaft verdrängt. Zum anderen verringert die *Erosion* die Ausdehnung des Objektes, indem das strukturierende Element am inneren Rand des Objektes entlang geführt wird. Der Bezugspunkt bestimmt den neuen Wert der Objektpunkte innerhalb der Objektgrenzen. Das Strukturelement enthält die Verarbeitungsvorschrift für die Nachbarpixel des aktuell bearbeiteten Bildpunktes.

Exkurs: Anwendung morphologischer Operatoren

Morphologische Operatoren werden zur Erfüllung bestimmter Aufgaben in Kombinationen gestaffelt. Die Umsetzung innerhalb der Bildverarbeitungs- oder GIS- Software erfolgt durch den Einsatz der so genannten *Map Algebra*. Mit dieser Kommandoschreibweise lassen sich auch komplexe Kombinationen von Rasteroperationen miteinander verknüpfen und mit Hilfe eines Rasterkalkulators entsprechend abarbeiten. Die Schreibweise, die bei den morphologischen Operatoren zum Einsatz kommt ist eine modifizierte Symbolik aus der Mengenalgebra mit einigen zusätzlichen Symbolen:

b = Rasterbild

i = Maske

Erosion: $b \ominus i = \{x | (b)_y \subseteq b\}$ oder $x_p = \min(z_p)$ mit $(x_p, y_p, z_p) \in w$

[Erosion_von_XYL1035_11R] = Focalmin([XYL1035_11R],Rectangle,3,3,NoData)

Formel 11: Erosion

Dilatation: $b \oplus i = \{x | (b)_y \subseteq b\}$ oder $x_p = \max(z_p)$ mit $(x_p, y_p, z_p) \in w$

[Dilatation_von_XYL1035_11R] = Focalmax([XYL1035_11R],Rectangle,3,3,NoData)

Formel 12: Dilatation

Opening: $b \bullet i = (b \ominus i) \oplus b$

[Opening_von_XYL1035_11R] =
Focalmax(Focalmin([XYL1035_11R],Rectangle,3,3,NoData),Rectangle,3,3,NoData)

Formel 13: Opening

Closing: $b \circ i = (b \oplus i) \ominus b$

[Closing_von_XYL1035_11R] =
Focalmin(Focalmax([XYL1035_11R],Rectangle,3,3,NoData),Rectangle,3,3,NoData)

Formel 14: Closing

Ein Ansatz für die morphologische Filterung ist die Dual-Rank-Filterung wie sie im Programm HALCON realisiert ist (vgl. Lohmann, Koch, Schäfer, 2000).

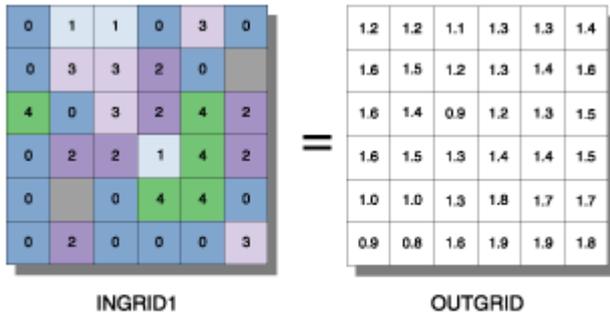
Dual Rank: $(b \circ i)_k = (b \ominus_k i) \oplus_k b$

Formel 15: Dual Rank

Grundlage der morphologischen Operatoren ist jeweils eine Rasterung des Datenbestandes. Mit dieser Rasterung ist allerdings immer auch ein Genauigkeitsverlust des Einzelpunktes

verbunden, da dessen Höheninformation auf eine Rasterzelle mit fester Kantenlänge und Position übertragen wird.

Im ersten Schritt der Vorbereitung des *Dual-Ranking* werden in den gerasterten Laserscandaten abrupte Höhenunterschiede durch einen Standardabweichungs-Filter detektiert und als neues Bild generiert:



Expression: FOCALSTD(INGRID1, RECTANGLE, 3, 3)

Abb. 23: Berechnung der Standardabweichungen aus den benachbarten Pixeln
Quelle: Spatial Analyst Functional Reference

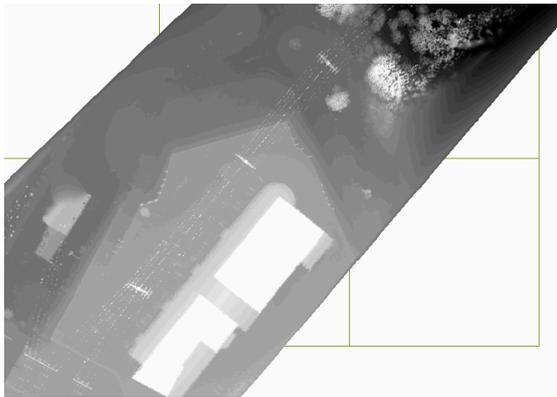


Abb. 24: Grauwertbild vor der Berechnung der Standardabweichung

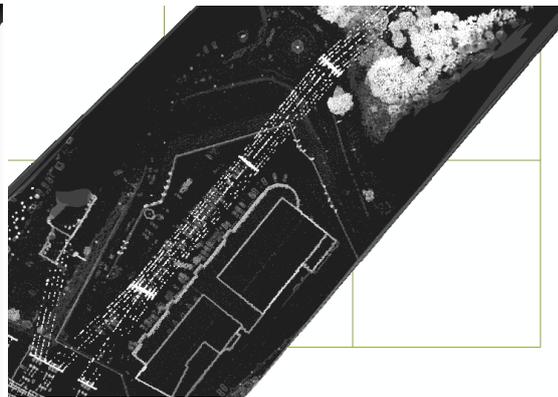


Abb. 25: Grauwertbild nach der Berechnung der Standardabweichung

Eine Reklassifizierung mit einem Threshold- Parameter isoliert die Bereiche großer Höhenunterschiede (steile Anstiege oder Abfälle). Der Treshold- Parameter ist abhängig von der zum Beginn der Filterung noch unbekanntem Morphologie des Geländes und kann nicht direkt aus der Berechnung der Standardabweichungen abgeleitet werden. In der Regel wird dieser Parameter durch Berechnungen an Trainingsgebieten, die sicher nur Bodenpunkte beinhalten, bestimmt. Im aktuellen Beispiel wird bei einer Rasterweite von 0.25 m ein Threshold von 1 m angehalten.

Die so erhaltenen Bereiche größter Höhenunterschiede umfassen alle Objekte, die über das Gelände herausragen und sind im nächsten Schritt so zu verdichten, dass die gesamten Objekte jeweils als geschlossene Flächen erhalten werden (an dieser Stelle schweigen sich die Autoren im Aufsatz „Approaches to the filtering of laser scanner data“ (vgl. Lohmann, Koch, Schaeffer, 2000) über die verwendete Methode aus. Wahrscheinlich ein Betriebsgeheimnis der Softwareschmiede). Die Flächenfüllung der geschlossenen Objekte kann jedoch zum Beispiel aus dem Differenzmodell zweier Datenpyramidenstufen gewonnen werden (vgl. Kapitel 6).

Diese Objekte können jedoch noch nicht endgültig aus der Punktwolke entfernt werden, denn es können sich durchaus weitere verwertbare Höhenwerte innerhalb von Innenhöfen

oder zwischen den Einzelbäumen eines als gemeinsames Objekt identifizierten Waldes befinden.

Aus diesem Grunde wird das Grauwertbild in einzelne Grauwertschichten zerlegt, indem das Grauwert- Histogramm auf Basis einer Gauss'schen Verteilung gestreckt und die differenzierten Grauwertbereiche in eigene Raster separiert werden. Diese Schichten bilden im Idealfall die zu selektierenden Objekte als geschlossene Fläche ab. Die Teilregionen mit den jeweils dunkelsten Grauwerten (= geringste Höhen) werden als wahrscheinlichste Stützpunkte der Erdoberfläche identifiziert. Die größten zusammenhängenden Regionen heller Grauwerte sind dagegen mit großer Wahrscheinlichkeit sicher zu eliminierende Punkte (zum Beispiel Gebäude). Über die GröÙte dieser Flächen wird ein Rechteck eingepasst, dessen Schmalseite die GröÙe einer Suchmaske für das folgende Duale Ranking bestimmt. Dieser Filter sortiert nun alle Grauwerte innerhalb dieser Maske in aufsteigender Reihenfolge und bestimmt nun alle Werte, die zu einem vorab festgelegten Wertebereich k gehören.

Nun wird von einem Grauwert an der Position $k\%$ ausgehend ein modifiziertes *morphologisches Opening* gerechnet. Anschließend wird an der Position $(100 - k)\%$ ein modifiziertes *morphologisches Closing* gerechnet, bis iterativ der gesamte Grauwertebereich gefiltert ist.

Dieser Dual-Rank Filter reduziert die Grauzwischenstufen, die die topographischen Objekte umgeben und erzeugt ein Grauwertbild, das als Maske von den Originaldaten abgezogen wird. Der verbleibende Datensatz enthält ausschließlich Punkte, die als Bodenpunkte in Frage kommen. Dieser Datensatz wird noch einmal über eine Normalverteilung gestreckt und mit den ursprünglich als potenzielle Bodenpunkte identifizierten Stützpunkten zu verglichen. Die Differenzen dieser zwei Punktgruppen sollen Fehlklassifizierungen vorbeugen beziehungsweise aufdecken. Als Schwellwert dieser Fehlersuche bietet sich die großzügige Auslegung der *à priori* Genauigkeit der Einzelmessung (berücksichtigt werden zum Beispiel auch systematische Fehler durch die Vegetation). Ein Differenzwert von unter 0.5 m in normalem Gelände macht sicherlich keinen Sinn (vgl. Lohmann, Koch, Schaeffer, 2000).

Die entstandenen Lücken werden durch eine einfache Interpolation überbrückt und die Übergänge mit einem Mittelwertfilter (3x3) geglättet.

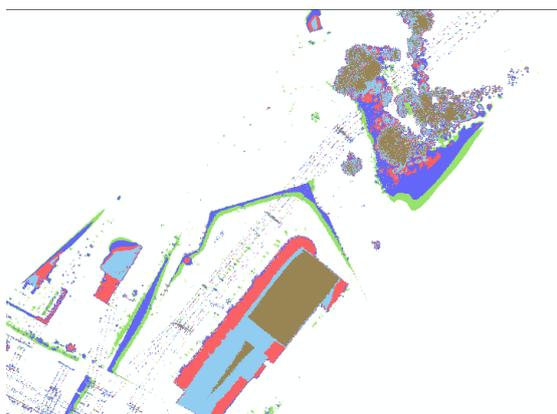


Abb. 26: Kandidaten der zu löschenden Punkte

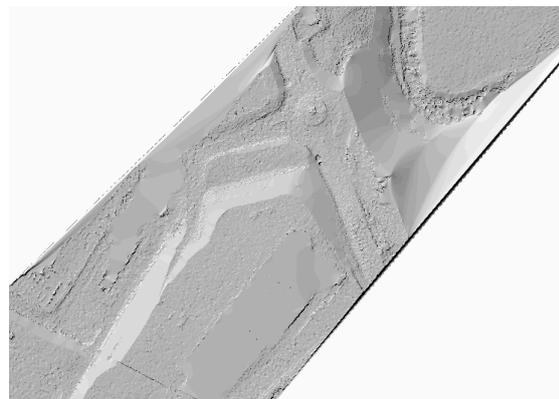


Abb. 27: Verbleibendes Geländemodell

Gebäude und großflächige regelmäßige Objekte werden mit diesem Verfahren zuverlässig aus dem DGM entfernt. Auch Einzelbäume werden gut erkannt und eliminiert. Allerdings ist

die Filterung bei niedriger Vegetation und bei dichter Vegetation und Waldgebieten nicht sehr zuverlässig und nur wenige Stützpunkte überstehen die Filterung.

Die Stützpunkte in freiem Gelände werden unverändert der Interpolation zugeführt. In diesen Bereichen ist die erreichbare Genauigkeit des Verfahrens entsprechend der Genauigkeit der Originalmessungen.

5.3 Zusammenfassung

Die oben genannten Filterverfahren stellen drei unterschiedliche, gebräuchliche Ansätze der Filterung von Laserscanndaten dar. Weitere Möglichkeiten ergeben sich im Prinzip als vielfältige Modifikationen dieser Ansätze. Auch bietet es sich an, einzelne Komponenten der jeweiligen Verfahren zu kombinieren, wenn dies nicht unnötig zu Lasten der Rechenzeit geht. Durch eine hierarchische Pyramidenbildung kann zum Beispiel die lineare Prädiktion effektiver gestaltet werden (sehr interessant bei der Berechnung von Stadtmodellen mit sehr vielen Nicht-Boden-Punkten). Die meisten Verfahren benötigen Schwellwerte zur Entscheidung, ob der aktuell betrachtete Stützpunkt nun Bodenpunkt oder Nichtbodenpunkt ist. Dieser Wert kann in Abhängigkeit von der Geländemorphologie als 1%-Quantile der sortierten Höhen einer Bearbeitungsmasche oder durch eine Gewichtsfunktion an einer angepassten Spline- Interpolation bestimmt werden. In jedem Fall setzt der Einsatz der Parameter ein hohes Maß an Erfahrung und in aller Regel das Einführen von Trainingsgebieten voraus. Damit ist jedoch schon eine zuverlässige Filterung der Geländemodelle aus Laserscanndaten in hohem Maße gewährleistet.

Die Entwicklung geht dahin, zusätzlich Kantenextrahierungsalgorithmen einzuführen. Damit wird eine detaillierte Auswertung auch in sehr bewegtem Gelände möglich.

Bei der Auseinandersetzung mit dem Verfahren des Dual-Ranking wird auch die Möglichkeit der Filterung von topographischen Objekten offensichtlich. Über morphologische Operatoren lassen sich Masken erstellen, die zur Selektion der Objektpunkte der jeweiligen Objektklassen dienen. Dieser Vorgang wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

6. Filterung der Trasse L1035

Im Gegensatz zur Filterung des Geländemodells ist es bei der Extraktion der Leitung wichtig, von den Originaldaten auszugehen und Genauigkeitsverluste durch die Rasterung der Daten zu vermeiden. Nach der Filterung des Geländemodells und verschiedener topographisch relevanter Objekte wird die eigentliche Leitung unter Verwendung der Originaldaten modelliert. Die aus Rasterdaten und einer quasi 2.5 D Darstellung der Trasse abgeleitete Position der Leitung dient hier als Suchmaske, indem die Mastspitzen aus den interpolierten Oberflächendaten genähert erfasst werden und mit Abstandskorridoren die Stützpunkte der Leitung identifiziert werden.

Die einzelnen Modellstufen der Hochspannungsleitungstrasse L1035 werden mit modifizierten Filteralgorithmen im Rahmen der durch die Software gegebenen Möglichkeiten bearbeitet. Die strenge Implementierung der im Kapitel 5 beschriebenen Filterverfahren ist aufwändig und bedarf einer mächtigeren Programmierumgebung als die der MapObjects-Modelle der ESRI- Software oder die Makroumgebung von Clarks IDRISI. Eine Filterung mit dem Programm Surfer 8.2 ist sehr stark auf die statistische Bearbeitung von Datensätzen ausgerichtet, bietet aber im Bereich der Visualisierung und Kombination der Ergebnisse nicht die gleichen Möglichkeiten wie das ESRI- ArcGIS.

Zielsetzung dieser Thesis ist nicht das Erproben einer vorhandenen Implementierung oder die Durchführung einer Datenerfassung mit den bisher vorhandenen Mitteln. Vielmehr soll anhand der komplexen Aufgabenstellung das Potenzial der möglichen Verfahren erprobt werden.

Zum Einsatz kommt die Standardsoftware ArcGis 8.2 mit den Extensionen Spatial Analyst und 3D-Analyst. Zum Teil wurden die Extensionen mit Visual- Basic- Modulen auf Basis von MapObjects- Funktionalitäten ergänzt. Der aufwändige Vorgang der DGM-Filterung wurde in seiner Gesamtheit mit einem VBA- Macro gesteuert (Anhang C).

Die kommerzielle Filterung einer gesamten Trasse benötigt auf jeden Fall die getestete Implementation in einer entsprechenden Softwareumgebung, die im Weiteren Volumenberechnungen, die Ableitung von Profilen und Höhenlinien und die nahtlose Übergabe des DGM an ein Programm zur Berechnung von Orthofotos und weitere Konvertierungen ermöglicht.

Für die Filterung und Verarbeitung von Hochspannungsleitungen werden darüber hinaus Funktionalitäten benötigt, die zurzeit nur in CAD-Systemen realisiert sind. Die Konstruktion von Zylindern über Polylinien zur Festlegung des Schutzraumes entlang der unteren Seile gehört zu diesen Funktionalitäten.

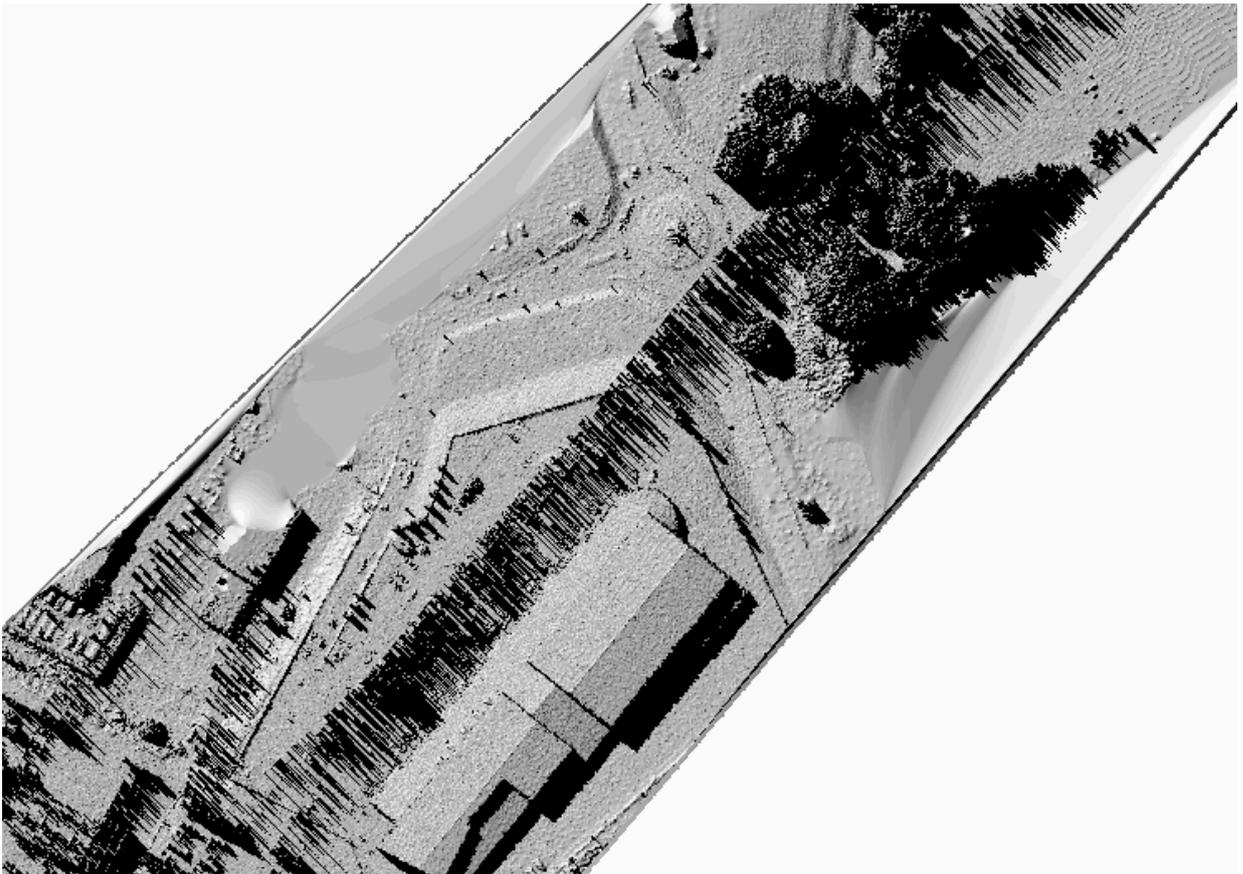


Abb. 28: Hillshade der Rohdaten, Los L1035, Teil 1.1

6.1 Filterung des DGM

In Ermangelung der zum Teil sehr kostspieligen Software und mit Blick auf die Aufgabenstellung wurde eine modifizierte hierarchische Interpolation durchgeführt, die mit einfachen Rasteroperationen und Interpolationen bewerkstelligt werden kann. Das Testgebiet ist sehr eben und ohne markante Einschnitte oder Aufschüttungen. Außerdem ist das eigentliche Ziel die Isolation der Nicht-Boden-Punkte, die relativ sicher aus der Punktwolke separiert werden können.

Das angewandte Verfahren entspricht vom Ansatz her einer linearen Prädiktion ohne die statistische Komponente der Kovarianzfunktion in Kombination mit morphologischen Operatoren. Eine exakte Umsetzung der Kovarianz-Matrix innerhalb der genutzten Software sprengt den Rahmen dieser Master Thesis. Entsprechend streng wird jedoch das Ergebnis der verwendeten Filterung interpretiert.

Im ersten Schritt werden Datenpyramiden unter Verwendung einer Neighborhood- Statistik nach Minimum- Kriterium errechnet. Dies entspricht dem morphologischen Operator der *Erosion*.

Die Zellgröße beträgt hierbei 0,25 m und die Statistik wird mit Suchradien von 20m, 10m, 5m und 1m gerechnet. Durch den Suchradius der ersten Pyramidenstufe wird die Entfernung großer Gebäude (im Beispiel des Trassenabschnittes L1035_11 der große Supermarkt südöstlich der Leitungstrasse) gewährleistet. Bei größeren Gebäuden besteht die Gefahr, dass eine Suchmaske komplett innerhalb des Gebäudes zu liegen kommt. In diesem Falle wird fälschlich die jeweils niedrigste Höhe innerhalb des Suchradius als Stützpunkt identifiziert und in die Berechnung des Geländemodells aufgenommen. Durch eine übergeordnete Pyramidenstufe kann dieser Fehler vermieden werden. Dies ist jedoch mit

einer erheblichen Verlängerung der Rechenzeit verbunden (vgl. Dimensionierung der Suchmaske bei der morphologischen Filterung). Die Pyramidenbildung ist im weitesten Sinne als morphologische Erosion oder Generalisierung zu verstehen.

Erosion: $b \ominus i = \{x | (b)_y \subseteq b\}$ oder $x_p = \min(z_p)$ mit $(x_p, y_p, z_p) \in w$

Formel 16: Morphologische Erosion

In der Folge werden die einzelnen Operationen als Rechenvorgänge nach Maßgabe der *Map Algebra* formuliert (vgl. Riedl 6 Kalsek, 2000). Der Vorgang wird für das erste Teilgebiet des Untersuchungsgebietes wie folgt beschrieben:

[DGM20_von_XYL1035_11] = Focalmin([XYL1035_11R],Circle,80,Data)
(Die abgearbeitete Nachbarschaft ist kreisförmig mit einem Radius von 20 m (= 80 Pixel zu je 25cm))

Formel 17: Umsetzung der Erosion in Map Algebra

Die weiteren Pyramidenstufen werden analog gebildet:

[DGM10_von_XYL1035_11] = Focalmin([XYL1035_11R],Circle,40,Data)
[DGM5_von_XYL1035_11] = Focalmin([XYL1035_11R],Circle,20,Data)
[DGM1_von_XYL1035_11] = Focalmin([XYL1035_11R],Circle,10,Data)
[DGM05_von_XYL1035_11] = Focalmin([XYL1035_11R],Circle,2,Data)

Formel 18: Pyramidenbildung umgesetzt in Map Algebra

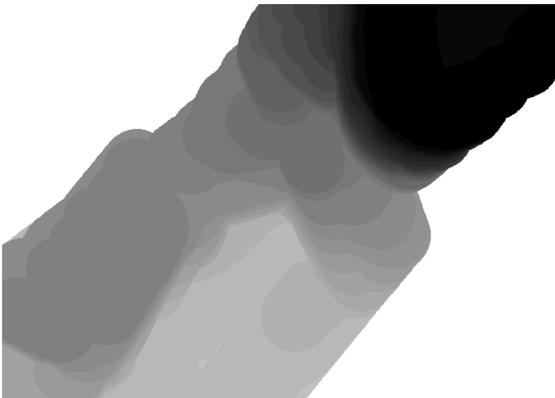


Abb. 29: Erste Pyramidenstufe, Suchradius 20 m

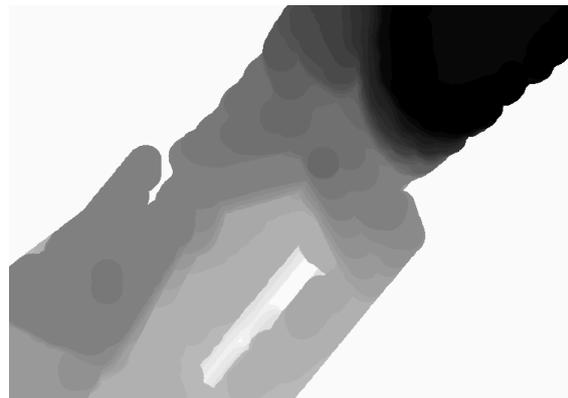


Abb. 30: Zweite Pyramidenstufe, Suchradius 10 m



Abb. 31: Dritte Pyramidenstufe, Suchradius 5 m

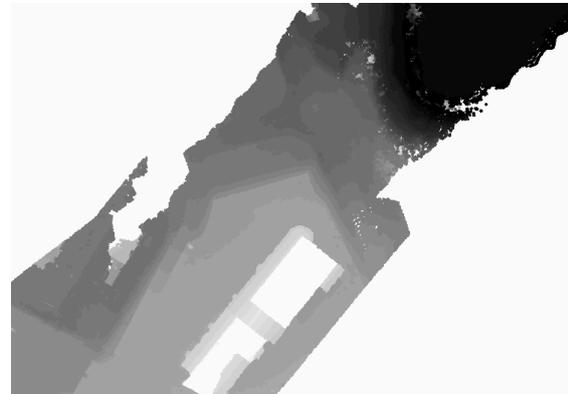


Abb. 32: Vierte Pyramidenstufe, Suchradius 1 m

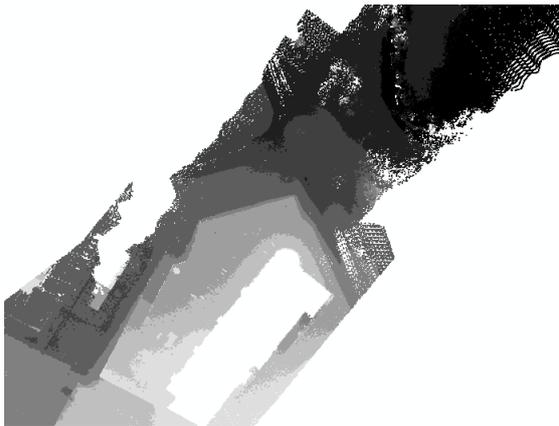


Abb. 33: Fünfte Pyramidenstufe, Suchradius 0.5 m

Jede dieser Pyramidenstufen verdichtet in einem späteren Iterationsschritt das Geländemodell weiter und führt zu größerer Detailschärfe.

Zur Verdichtung der Stützpunktkandidaten zur DGM-Berechnung wird die zweite Pyramidenstufe von der ersten abgezogen:

$$[\text{Diff-DGM20-DGM10_L1035_11}] = [\text{DGM20_L1035_11}] - [\text{DGM10_L1035_11}]$$

Formel 19: Pyramidendifferenzen



Abb. 34: Differenz zwischen DGM20 und DGM10

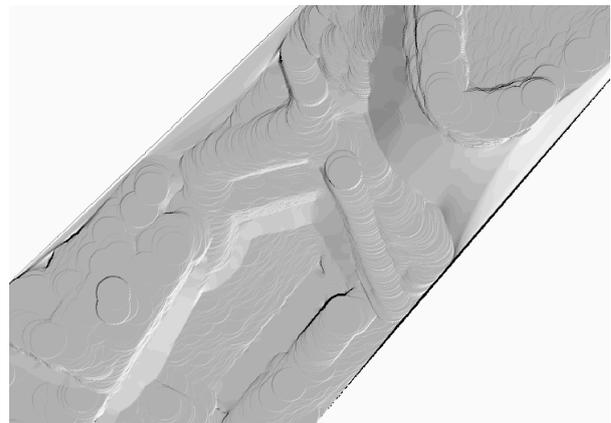


Abb. 35: Hillshade des DGM 20-10

Dem Differenzbild wird der Teil der Daten abgetrennt, der am wahrscheinlichsten nicht zu den Bodenpunkten gehört. Nach einigen Versuchen mit verschiedenen Schwellwerten (1%-Quantile, Standardabweichung und realen Differenzwerten) wurden zwischen der Pyramidenstufe 20m und 10m nach einer Natural-Breaks-Klassifikation alle Werte jenseits der ± 3.6 m als Nicht-Boden-Punkte eliminiert. Dieser Wert ergibt sich aus dem Tangens eines geschätzten Steigungswinkels von 20° auf einer Strecke von 10 m. Mit jeder neuen Pyramidenstufe wird dieser Winkel vergrößert, um morphologischen Kleinformen besser Rechnung zu tragen. Dieser Winkel erfüllt eine ähnliche Aufgabe wie die Kovarianz beim Verfahren der Linearen Prädiktion (vgl. Kraus, 2003), resultiert aus Berechnungen in Trainingsgebieten, ist jedoch nicht so aufwendig zu berechnen. Die so gewonnene Punktwolke dient als Basis für eine erste Oberflächeninterpolation nach dem Verfahren der Inverse-Distance of Weight (IDW). Wiederum wird ein Differenzmodell zwischen erster Iteration (DGM20-DGM10) und nächster Pyramidenstufe (DGM5_NbrMin of XYL1035_11_z) gebildet.

Eine Reklassifikation eliminiert alle Punkte, die eine Höhendifferenz von $\tan 30^\circ * 5 \text{ m} = 2.8 \text{ m}$ überschreiten und dient als Basis für die nächste Interpolation. Mit der Einführung jeder weiteren Pyramidenstufe und der Verwendung eines Datenkorridors, der in der Regel über dem Niveau der Pyramidenstufe liegt, wird das Geländemodell weiter einer detaillierten Abbildung der Erdoberfläche angenähert. Die dritte Iteration arbeitet mit einem Suchradius von einem Meter und eliminiert alle Punkte, die sich $\tan 40^\circ * 1 \text{ m} = 0.83 \text{ m}$ über dem Gelände befinden. Im Rahmen des in dieser Master Thesis analysierten Datensatzes sind fünf Iterationsschritte vorgesehen. Die letzte Schrittweite ist ein Suchradius von 0.5 Metern. Punkte innerhalb eines Korridors von $\tan 45^\circ * 5 \text{ m} = 0.5 \text{ m}$ zwischen den Daten der letzten Interpolation und der 0.5 m- Datenpyramide werden zur Interpolation des endgültigen DGM herangezogen. An dieser Stelle der Bearbeitung wäre die Einführung einer neigungsabhängigen Komponente interessant. Bei ebenem Gelände wird der Höhenpuffer auf einen Korridor von $dh * \text{Neigung in \%}$ reduziert. Dies erfordert jedoch noch einige Zwischenschritte zur Neigungsberechnung, die mit den Mitteln der verwendeten Software einen erheblichen zusätzlichen Zeitaufwand verursachen.

Lücken im Modell, die durch die Morphologie des Geländes verursacht werden, werden sukzessiv verdichtet. Lücken, verursacht durch topographische Objekte, bleiben erhalten und müssen durch eine Interpolation überbrückt werden.

Probleme bereiten bei diesem, wie bei allen Interpolationsverfahren, abrupte Höhendifferenzen, zum Beispiel verursacht durch Stützmauern. Interpolationsverfahren sind nicht in der Lage, Kanten exakt abzubilden, da diese Formen von den Algorithmen nicht ohne weiteres von störenden Höheninformationen der Topographie abgegrenzt werden können. Eine Trimmung der Kanten und eine in den Details generalisierte Oberfläche ist die Folge.

Das hier angewendete Filterverfahren nähert sich von unten an die Stützmauer an und die Unterkante wird mit der richtigen Höhe abgebildet. Die interpolierte Oberfläche der vorherigen Iteration kommt unterhalb des Geländeverlaufs zu liegen. Die Punkte entlang der Oberkante der Stützmauer liegen außerhalb des Korridors für die Verwendung der Punkte bei der nächsten Iteration. In Abhängigkeit der Höhe der Stützmauer wird das Geländemodell an der Oberkante der Stützmauer verfälscht. Wählt man den Höhenkorridor großzügiger, werden unter Umständen Strukturen ins DGM übernommen, die nicht erwünscht sind.

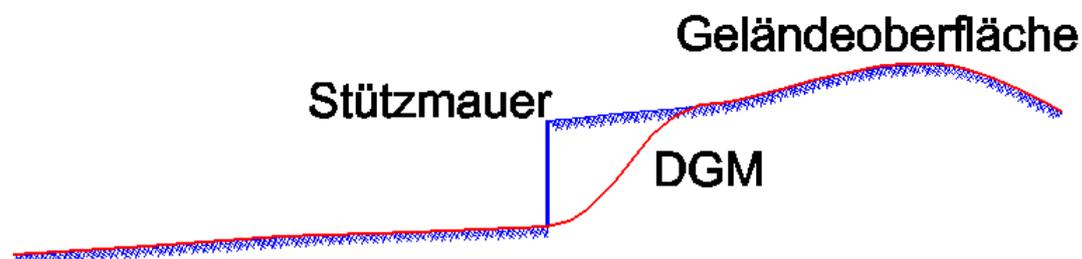


Abb. 36: Auswirkung einer Stützmauer auf das Filterverfahren

Die Bruchkanten werden auf sichere Bodenpunkte der ursprünglichen Punktwolke aus der Laserscannbefliegung interpoliert und in die letzte Iteration der Berechnung des Geländemodells eingefügt. Die Identifizierung der Stützmauer lässt sich einfach durch die Visualisierung des nDGM oder Differenz- DGM zwischen Originalpunktwolke und interpoliertem DGM ermitteln. Die Bereiche entlang der Stützmauer erscheinen als auffällige lang gestreckte Punktanhäufungen, die im rückwärtigen Bereich der abgestützten Oberfläche

unhomogen ausfransen, entlang der Stützmauer aber eine gerade Kante bilden. Die Stützmauer im Bild ist mit einer Höhe von etwa 2 m ein typisches Beispiel für diese Problematik.

Alternativ können die betreffenden Gebiete auch selektiert und dem Datensatz für die nächste Interpolation zugefügt werden.



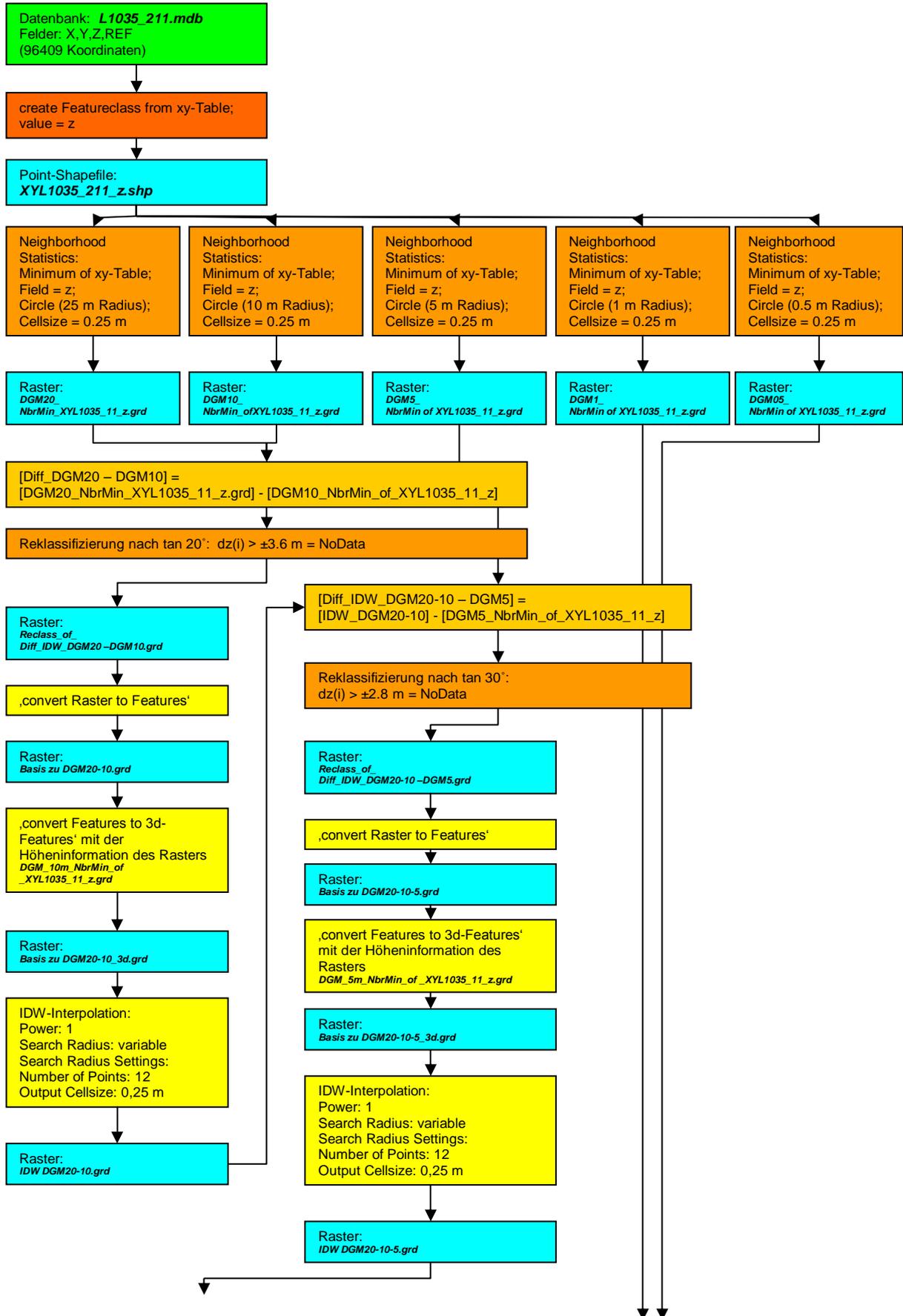
Abb. 37: Kompensation des Geländeversatzes durch Bruchkanten

Die Verfahren zur Kantenextraktion aus den originalen Laserscandaten sind zurzeit in der Erprobung. Die Entwickler der Software SCOP++ experimentieren bereits erfolgreich mit Kantenextraktionsalgorithmen (Gespräch mit J. Seile von INPHO Stuttgart am 31.03.2005, Dissertation von Dr. Briese, 2004).

Das jeweilige Interpolationsverfahren ist innerhalb der verwendeten Software sehr rechenintensiv und zeitaufwändig. Daher wird zur Bearbeitung der Punktwolke ein Makro verwendet, welches die einzelnen Bearbeitungsschritte als VBA- Code automatisiert (Anhang D). Der Funktionsablauf ist in folgendem Ablaufschema beschrieben:

Das Ablaufdiagramm in Abbildung 38 zeigt die notwendigen Schritte zur DGM- Filterung bei der Bearbeitung am Beispiel der Software ArcGIS mit den Extensionen Spatial Analyst und 3D-Analyst. Einige Zwischenschritte betreffen reine Formatkonvertierungen, die von der Software erwartet werden. So muss die Ausgangsbasis für eine Oberflächeninterpolation immer ein 3D- Punktshapefile sein. Eine integrierte Programmierung wird unter Vermeidung dieser Bearbeitungsschritte entsprechend effektiver arbeiten.

Filterung eines DGM aus Laserscandaten



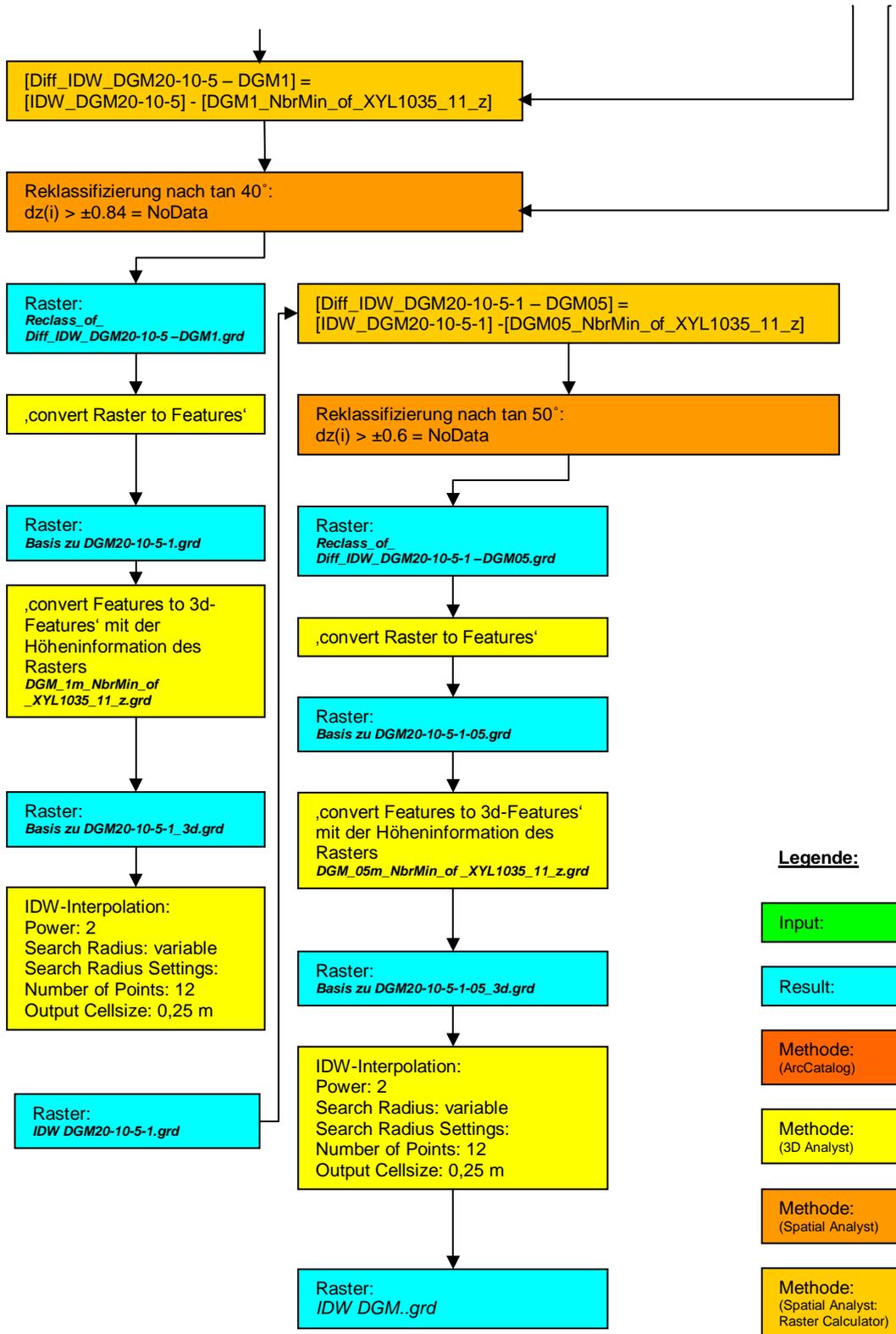


Abb. 38: Ablaufdiagramm der DGM-Berechnung

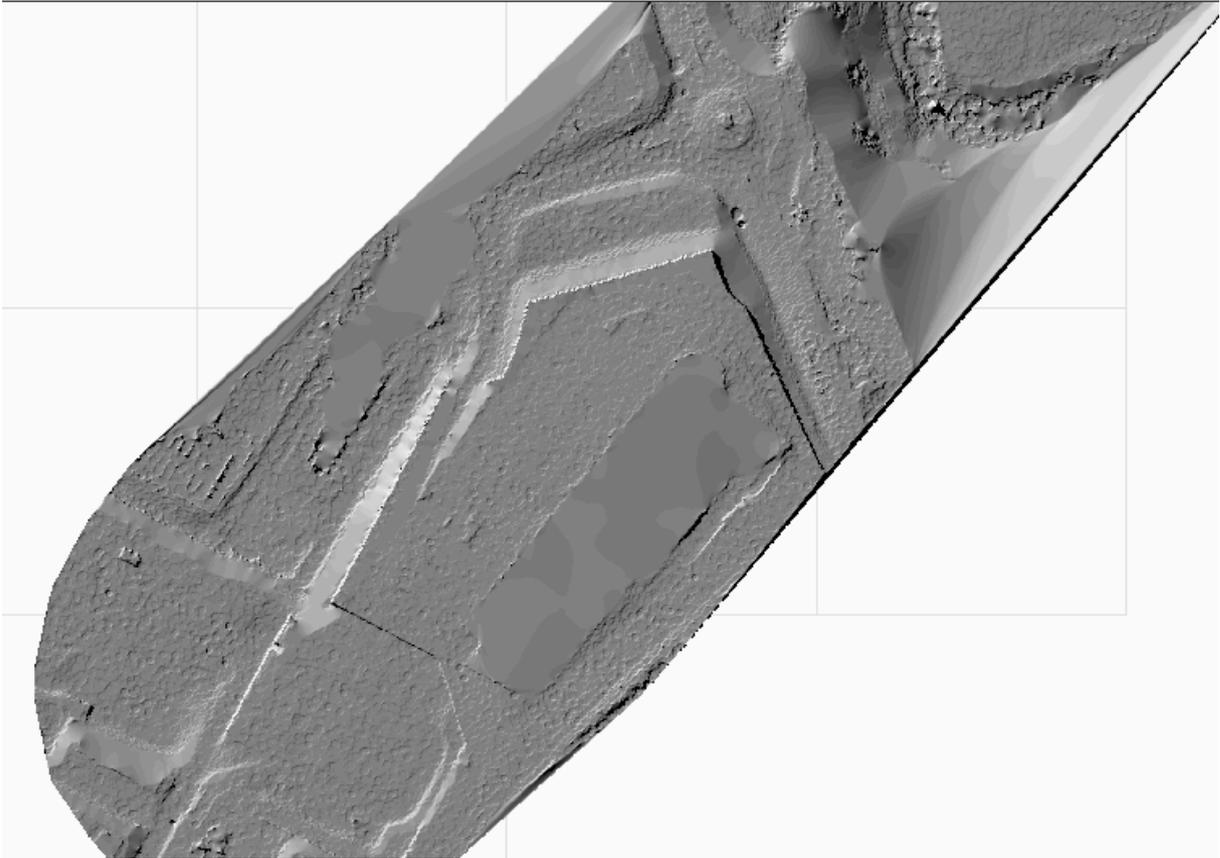


Abb. 39: Hillshade des fertigen DGM L1035_11

Die Interpretation der Verteilung der Restklaffungen und der Lücken im DGM ermöglicht eine Beurteilung des gerechneten DGM und dient als Ansatz für eine weitere Überarbeitung des Geländemodells.

6.2 Bewertung des gefilterten DGM

Die in Kapitel 6.1 beschriebene Filterung berücksichtigt nicht die statistisch ableitbare Verhältnismäßigkeit vom Abstand der Stützpunkte zum entsprechenden Höhenunterschied, wie es die Kovarianz-Matrix bei der linearen Prädiktion vermag. Stattdessen wird im Umkreis um einen jeweils innerhalb der Pyramidenstufe niedrigsten Stützpunkt entschieden, welche Punkte in die nächste Interpolation einfließen. In flachem Gelände schmiegt sich dieses Geländemodell von unten relativ gut an die abzubildende Oberfläche an, liegt aber tendenziell eher zu tief. Wird das Gelände steiler, so verstärkt sich dieser Eindruck. Dies resultiert aus der bevorzugten Verwendung der jeweils tiefsten Punkte. Erst in den letzten Iterationsschritten durchbricht die Interpolationsfläche die Punktwolke in einzelnen Fällen wie zum Beispiel Grabensohlen. Die folgende Grafik als Differenzabbildung zwischen gerechnetem Geländemodell und digitalem Oberflächenmodell veranschaulicht das Ergebnis der Filterung.

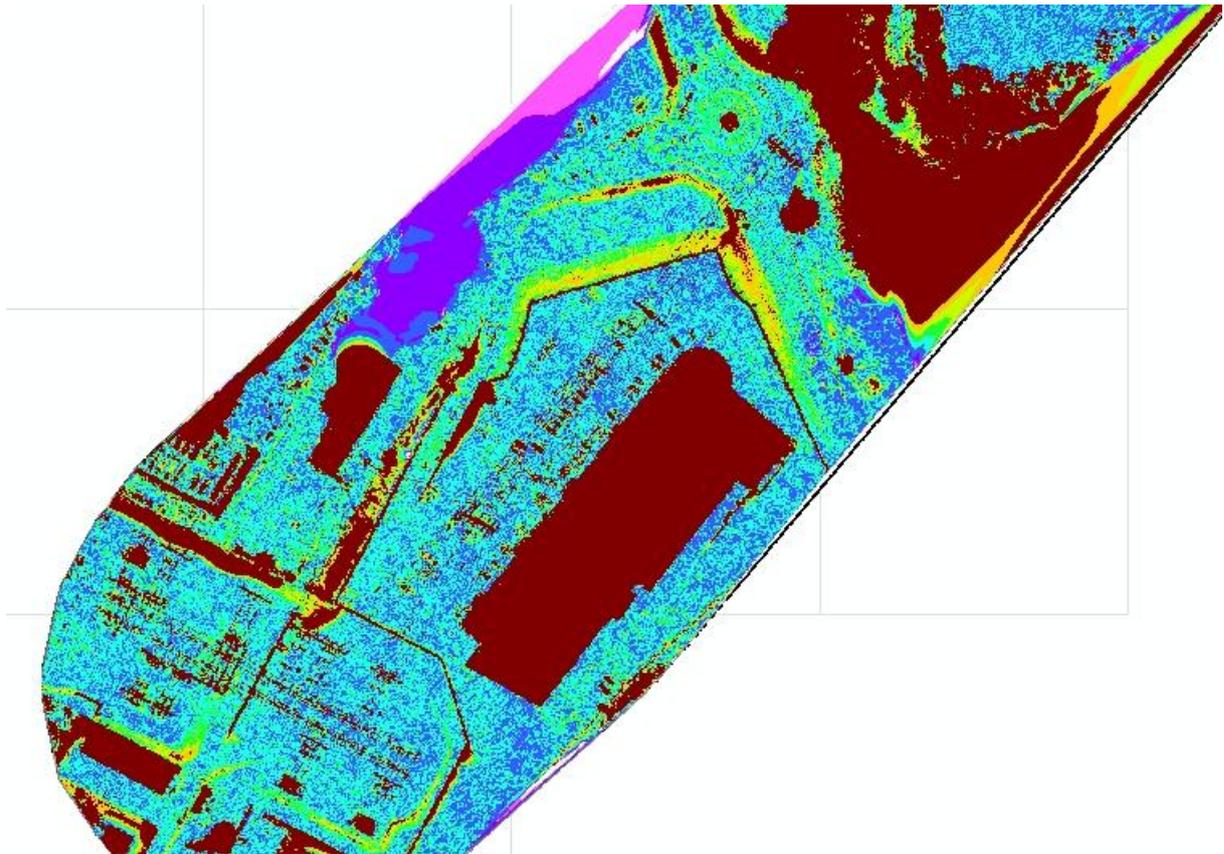


Abb. 40: Ergebnisse der DGM- Berechnung: Qualität der Interpolation

Von dem gefilterten Geländemodell wird das digitale Oberflächenmodell abgezogen und der entstandene Datensatz reklassifiziert.

$$[\text{Diff-DGM_L1035_11} - \text{DOM_L1035_11}] = [\text{DGM_L1035_11}] - [\text{DOM_L1035_11}]$$

Formel 20: Differenzmodell zwischen digitalem Geländemodell und digitalem Oberflächenmodell

Die Abbildung zeigt das Ergebnis der Klassifizierung. Die Klassengrenzen liegen in 10-cm-Schritten ausgehend von einem Wert von -0.2 m. Alle Höhendifferenzen über 0.6 m sind als aufragende Topographie durch die dunklen Passagen gekennzeichnet.

In ebenen Bereichen liegen die Differenzen im positiven Bereich zwischen 0 m und 0.20 m. Diese Differenz resultiert einerseits aus den in Kapitel 5.1 beschriebenen Streuungen durch eine vermutete Differenz in den GPS- Höhen, andererseits in dem Manko, dass das Filterverfahren sich auf die jeweils niedrigsten Nachbarschaftspunkte stützt und somit für systematische Fehler dieser Art anfällig ist. Etwas gewagt wäre die Interpretation der größeren Differenzen in den Daten im Bereich des Verkehrskreisels als aufragende niedere Vegetation.

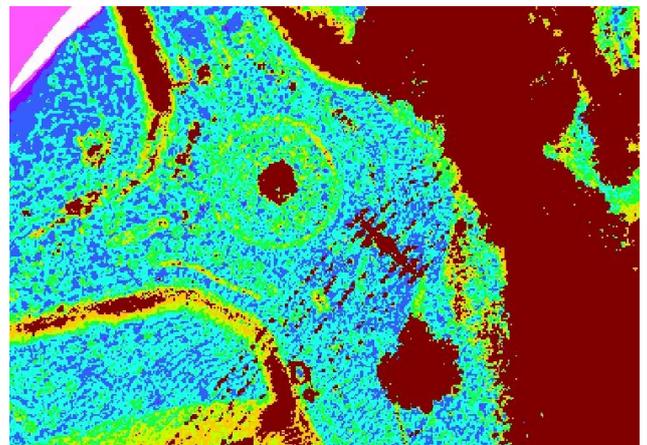


Abb. 41: Hypothese: Aufragende Vegetation

Eine Differenzierung von niederer Vegetation bis 0.30 m und unbewachsenen Flächen wird durch die Streuung der gefilterten Daten vereitelt. Dagegen kann man davon ausgehen, dass

Rasterpunkte über 0.5 m über dem Gelände eindeutig als topographische Punkte oder Vegetation klassifizierbar sind.

Gute Ergebnisse werden durch die manuelle Verbesserung der Ausgangsdaten erreicht. Die Stützmauer im Bereich der Umspannanlage ist durch Einführung der Bruchkanten besser modelliert. Die verbleibenden (dunklen) Partien resultieren aus der Lageunsicherheit durch die Digitalisierung aus dem Orthofoto. Die Problematik des ungenauen Orthofotos als Folge eines undifferenzierten Geländemodells ist hinreichend bekannt (vgl. Kraus, 1990, Pflug et al, 2004).

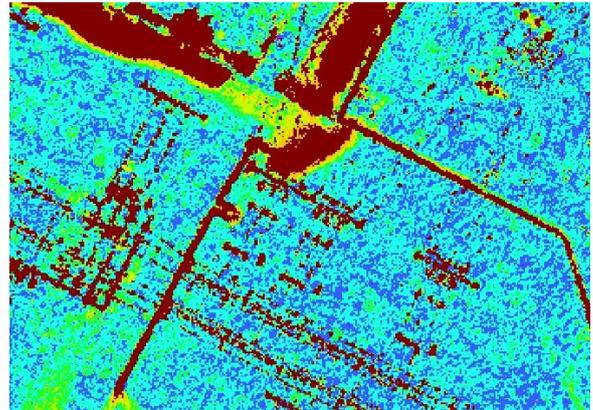


Abb. 42: DGM- Verbesserung durch Einführung von Bruchkanten

Das hier angewandte Filterverfahren stellt einen Kompromiss dar. Ziel ist, das Topographiemodell aus der Punktwolke zu isolieren. Für eine exakte Filterung zum Beispiel der niederen Vegetation ist das Verfahren zu ungenau und verursacht eine systematische Restklaffung. Die Filterverfahren, die in kommerziellen Programmen implementiert sind, arbeiten wesentlich effektiver. Doch auch bei diesen Programmen ist eine Parameterbestimmung an Trainingsgebieten und eine entsprechende Erfahrung notwendig. Zur Beschreibung des Arbeitsablaufs und der notwendigen Vor- und Nachbereitung eignet sich jedoch das gezeigte Verfahren gut, da die Prinzipien der Filterung offensichtlich zu Tage treten.

6.3 Filterung der Leitungstrasse

Ist das Geländemodell zur Zufriedenheit modelliert, so kann im nächsten Arbeitsschritt das Topographiemodell beziehungsweise das normalisierte Oberflächenmodell als Differenz zwischen DGM und DOM berechnet werden (vgl. Pfeifer, 2003).

$$[\text{Diff_IDW-DGM}] = [\text{XYL1035_11Raster}] - [\text{IDW-DGM}]$$

Formel 21: Differenzmodell

Die verbleibende Punktwolke dient als Datengrundlage zur Selektion der Topographie, Vegetation, Gebäude und der Masten und Leitungen. Um störende Objekte in Bodennähe (Autos, niedrige Vegetation, Stützmauern < 1.5 m) im Vorfeld zu eliminieren, wird der Datensatz entsprechend reklassifiziert.

$$[\text{Topographiemodell} > 1.5] = 1.5 < [\text{Diff_IDW-DGM}]$$

Formel 22: Topographiemodell > 1,5m

In diesem Zusammenhang wird man immer Kompromisse eingehen müssen. Die Wahl des Ausschnittes muss dem zu selektierenden Objekt Rechnung tragen. Stichproben können diese Auswahl unterstützen. Unter Berücksichtigung dieses Korridors lässt sich ein Datensatz durch Reklassifikation generieren, der in erster Linie die Masten und Seile enthält. Wird aus dem Topographiedatensatz 3 m bis Maximum über Grund eine Maske gebildet, die Vegetation und begleitende Gebäude abdeckt. So können damit die Leitung und die Masten isoliert werden. Insbesondere Objekte, die nahe beieinander stehen, müssen erst durch Erosion voneinander getrennt werden.

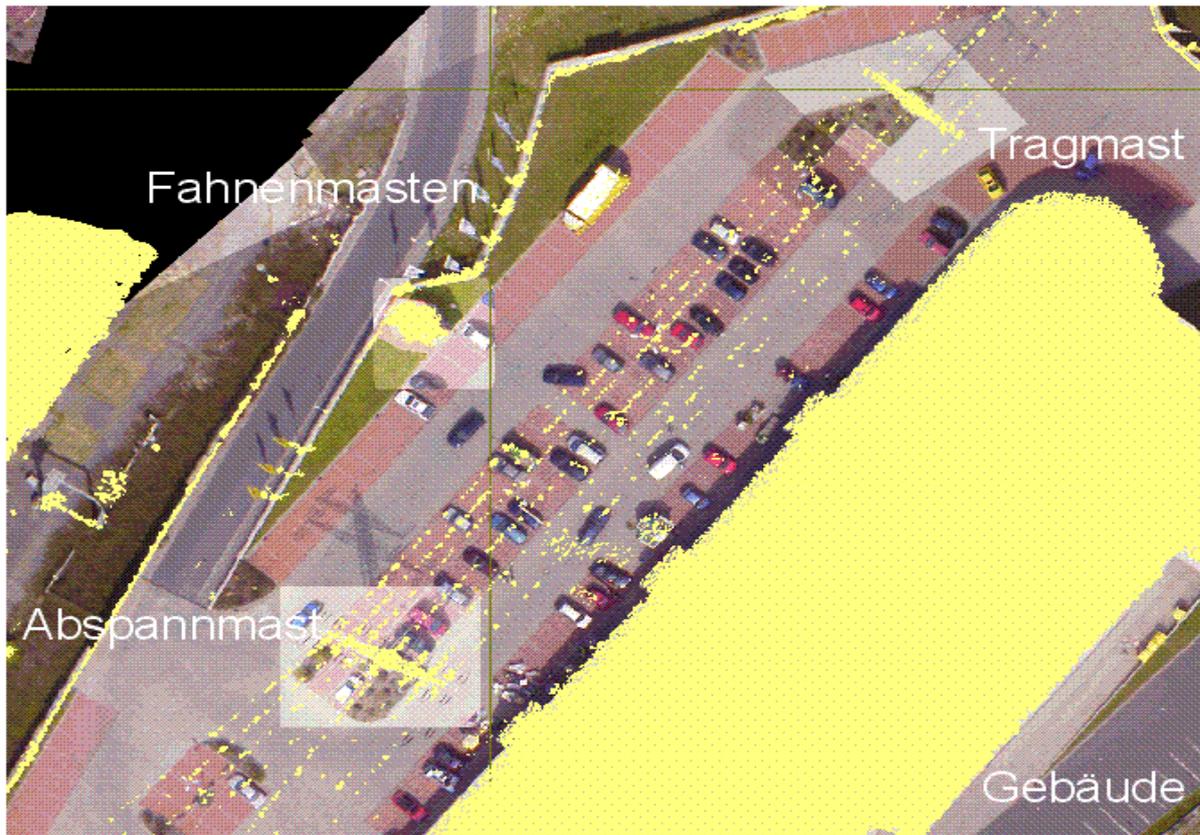


Abb. 43: Orthofoto mit dem Topographiemodell als Grundlage für die Maskenerstellung

Ein erweitertes Opening eliminiert sowohl die Pixel der Leitung als auch sonstige störende Details. In einem ersten Schritt werden die Kleinformen, offene Strukturen und Lücken entlang der Gebäudebegrenzung mit einer Dilatation verschlossen.

Anschließend werden Flächen, die Gebäude und Vegetation darstellen, durch gestaffelte Dilatationen soweit verdichtet, dass sie geschlossene Flächen bilden.

[1te_Dilatation_von_Topographiemodell > 1.5m Faktor 3] = Focalmax([Topographiemodell > 1.5m],Circle,3,Data)

[1te_Erosion_von_Topographiemodell > 1.5m] =
Focalmin([1te_Dilatation_von_Topographiemodell > 1.5m], Circle,3,NoData)

[2te_Erosion_von_Topographiemodell > 1.5m] =
Focalmin([1te_Erosion_von_Topographiemodell > 1.5m],Circle,3,NoData)

[3te_Erosion_von_Topographiemodell > 1.5m] =
Focalmin([2te_Erosion_von_Topographiemodell > 1.5m],Circle,3,NoData)

[4te_Erosion_von_Topographiemodell > 1.5m] =
Focalmin([3te_Erosion_von_Topographiemodell > 1.5m],Circle,3,NoData)

Formel 23: Erweitertes Opening zur Modellierung der topographischen Masken

Nach der vierten Erosion sind die Reflektionen an den Seilen, an Fahrzeugen, Fahnenmasten und sonstigen störenden Objekten eliminiert. Eine beschleunigte Erosion durch ein größeres Strukturelement würde jedoch die Formen der kompakteren Objekte irreversibel beeinträchtigen.



Abb. 44: Topographiemodell nach der vierten Erosion

Mit den nun folgenden Dilatationen werden Lücken und Ränder der potenziellen Gebäude und der Vegetation aufgefüllt und kompakt gestaltet. Um auch Kleinformen zu verschließen wird der Radius des Strukturelements (Kreis) verringert und stattdessen eine Dilatation zusätzlich eingeführt.

$[4te_Dilatation_von_Topographiemodell > 1.5m] =$
 $Focalmax([4te_Erosion_von_Topographiemodell > 1.5m], Circle, 5, Data)$

$[5te_Dilatation_von_Topographiemodell > 1.5m] =$
 $Focalmax([4te_Dilatation_von_Topographiemodell > 1.5m], Circle, 5, Data)$

$[Topographiemaske_von_Topographiemodell > 1.5m] =$
 $Focalmax([5te_Dilatation_von_Topographiemodell > 1.5m], Circle, 3, Data)$

Formel 24: Erweitertes Closing zur Modellierung der topographischen Masken

Iterativ wird die Anzahl und die Kombination der einzelnen Schritte ermittelt. Eine Berechnung, die mit einer Erosion beginnt, führt zur verstärkten Auflösung kompakter Flächen, die bei dieser Konstellation erst nach mehreren folgenden Dilatationen wieder verschlossen werden. Da die gebildeten Flächen als Maske dienen sollen, um aus der 3D-Punktwolke die notwendigen Höhenpunkte zu isolieren, müssen diese Flächen etwas größer und dichter als die ursprünglichen Rasterflächen ausfallen, um eine komplette Abdeckung der Objekte zu erreichen. Auch sollen alle Lücken innerhalb der kompakten Flächen geschlossen werden.

Benachbarte Objekte, die in diesem Maskierungsvorgang ineinander fließen, müssen separat in einem späteren Schritt über die Höheninformation getrennt werden. Auch ist eine

Maskenbildung in verschiedenen Höhenstufen denkbar. Zum Beispiel eine Höhenstufe für niedrige Gebäude nahe der Trasse und eine weitere Höhenstufe für alle Gebäude und Masten. In dieser Form wird die Filterung der Topographie nach Flächen- und Formkriterien unterstützt.

Die Erfahrung aus diesem Vorgang zeigt, wie sensibel die Daten auf die Einstellung der Parameter reagieren. Auch bei dem Betrieb einer integrierten Software werden die morphologischen Filtervorgänge immer an Trainingsgebieten erprobt werden müssen. Die Form und die Dimension des Strukturelements ist dabei ausschlaggebend für die Präparierung der Kleinformen. Die Reihenfolge der einzelnen Erosionen und Dilatationen bestimmt, ob einzelne Pixelgruppen erhalten bleiben oder restlos eliminiert werden. Die Fahnenmasten zum Beispiel sind so kompakt, dass sie mit der Erosion nicht zu entfernen sind. In einem späteren Schritt werden auch sie selektiert und in den Schutzraum überführt.

Alternativ kann dieser Vorgang durch eine so genannte *Zonal Geometry* Funktion ersetzt werden. In einem programmierten Ansatz wird dabei der Übergang zu den Polygonflächen ersetzt durch Rasterflächen. Eine räumliche Zuordnung der originalen Punktwolke zu diesem Raster ist jedoch immer Generalisierungseffekten unterworfen. Der Ansatz zur Berechnung der Kompaktheit wird in folgendem Basic-Statement zusammengefasst:

```
Dim pArea as IArea
Set pArea = [shape]
dblArea = pArea.area
Dim pCurve as ICurve
Set pCurve = [shape]
dblLength = pCurve.Length
dblKomp = (dblArea/(dblLength ^ 2/(4*3.1415927))) ^ 0.5
```

Formel 25: Berechnung der Kompaktheit

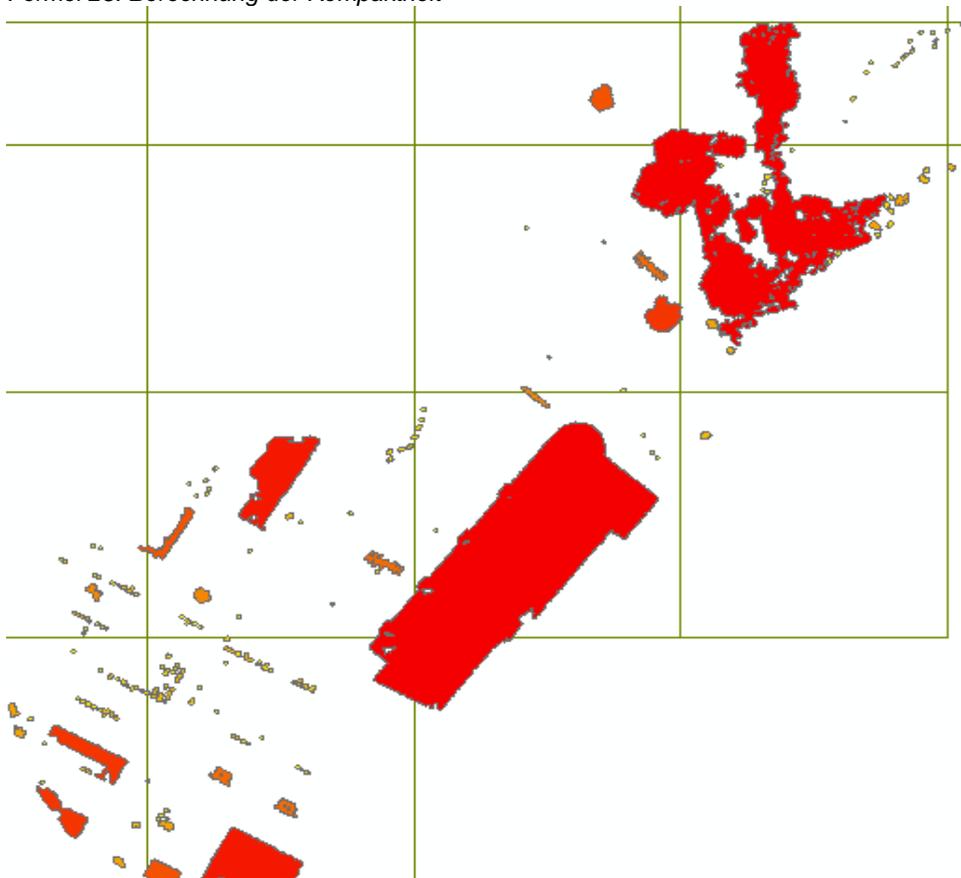


Abb. 45: Flächenmaske, klassifiziert nach Flächengrößen

Tragmasten mit den herabhängenden Isolatoren besitzen eine Kompaktheit um 0.58 und eine Fläche von 22 bis 25 m². Dagegen können Abspannmasten mit annähernd horizontal abgespannten Isolatoren durch eine Kompaktheit von 0.42 und eine Fläche von 51 – 55 m² identifiziert werden. Gebäude besitzen eine Kompaktheit von 0.5 bis 0.8 und per Definition eine Fläche von wenigstens 40 m². Problematisch ist das Verschmelzen einzelner Maskenbereiche zu einer gemeinsamen Fläche. Diesem Phänomen muss entgegen gewirkt werden, indem zum Beispiel eine Maskenbildung nach einzelnen Höhenkorridoren erfolgt. Die Entscheidung, wie die Korridore definiert werden, muss im Einzelfall entschieden werden.



Abb. 46: Problemzone Scannrand und benachbarte Objekte (in diesem Falle ein Gebäude und ein Tragmast)

Über eine Selektion nach Attributen werden die Masken für die Masten, Gebäude und zusammenhängende Vegetation in einzelnen Shapefiles abgelegt.

Die Abfrage für Tragmasten lautet:

"Area" > 20 AND "Area" < 25 AND "Kompakt" > 0.5 AND "Kompakt" < 0.6

Formel 26: Selektion über Attribute für Tragmasten

Die Masken werden zur Selektion der Punkte aus der 3D-Punktwolke des Topographiemodells verwendet. Die Maße für die Flächenausdehnung und der Grad der Kompaktheit können über ein Trainingsgebiet empirisch eingegrenzt werden. Fehlklassifizierungen lassen sich bei dieser Aufgabenstellung leicht visuell verifizieren. Andererseits lässt sich die Verifikation wohl nicht umgehen, da die Kriterien für die unterschiedlichen Selektionsklassen überlappen. Auch genügen die Masken nicht, alle Stützpunkte exakt zu filtern. Störendes Restrauschen lässt sich nicht vermeiden und muss erneut durch ein Opening bereinigt werden. Aus der Kombination **Topographiemodell – Gebäudemaske - Mastenmaske - Vegetationsmaske** ergeben sich die verbleibenden Stützpunkte entlang der Seile.

Aus den Punktwolken der Masten wird der jeweils höchste Punkt als Mastspitze isoliert und in eine Tabelle überführt. Mit den Lagekoordinaten und der Masthöhe wird eine dreidimensionale Polylinie entlang der gesamten Trasse als Trassenführung gebildet. Um die einzelnen Seile zu separieren, werden durch Parallelverschiebung Kopien der trassennahen Polylinie gebildet und mit den tatsächlichen Höhen der Seile aus der Laserscannmessung verschnitten (siehe Kapitel 6.4).

Die Vegetationsmaske ist in der Abgrenzung besonders schwierig. Eine Filterung über die Größe und die Kompaktheit kollidiert mit der Selektion von komplexeren Gebäuden. Aus dem Topographiemodell werden zuerst Masten und Gebäude herausgerechnet.

$$[\text{Vegetationsmaske}] = [\text{Topographiemodell}] - [\text{Gebäuderaster}] - [\text{Abspannmasten}] - [\text{Tragmasten}]$$

Formel 27: Map Algebra Ansatz zur Berechnung der Vegetationsmaske

Die Filterung der Vegetation über das Maß der Kompaktheit scheitert an der möglichen Dichte beliebiger Bäume, die im Maß der Kompaktheit und Fläche mit Sonderbauten, zum Beispiel dem Pavillon auf dem Gelände des Supermarktes, verwechselt werden können. Grundsätzlich ist die Selektion der Objekte problematisch, da die Kriterien zur Selektion sich gegenseitig überschneiden. Weitere Kriterien sind einzuführen. Es bietet sich zum Beispiel an, aus dem Grad der Neigung benachbarter Pixel ein zusätzliches Entscheidungskriterium einzufügen. Ist diese sehr unhomogen, lässt dies auf Vegetation schließen. In einem späteren Arbeitsschritt sind die Leitungsteile aus dem Vegetationsmodell zu rechnen, die genau über der Vegetation liegen und bei der Selektion der Vegetationspunkte mit erfasst werden.

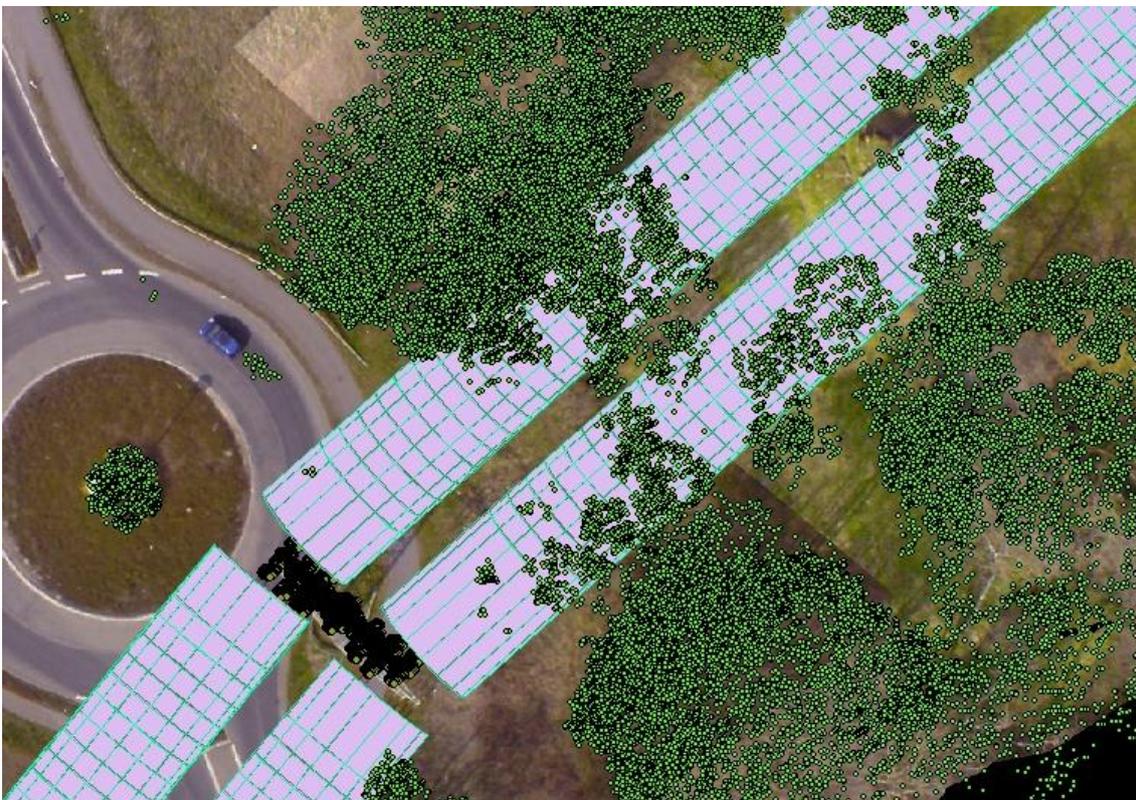


Abb. 47: Gefilterte Vegetation

(hier zusammen mit dem Schutzraum (die falsch selektierten Punkte auf der Straßenfläche sind wahrscheinlich Reflektionen des Fahrzeugs: Foto und Laserscannaufnahme sind mit geringfügigem Zeitversatz entstanden)

6.4 Modellierung der Leitungstrasse

Die Maske der Masten dient zur Selektion der Laserscannpunkte, die zur Abbildung der Masten notwendig sind. Es werden die Originaldaten verwendet, um bei der Abbildung der Masten Genauigkeitsverluste durch das Rasterresampling zu vermeiden. Über eine räumliche Selektion mit dem Ansatz „Selektiere Punkte aus dem Topographiemodell_3d, deren Mittelpunkt innerhalb der Flächen des Layers Abspannmasten liegt“ werden die jeweiligen Stützpunkte in separate Dateien abgelegt.

Aus diesen Punktwolken mit jeweils rund 1200 Punkten pro Mast werden die jeweils höchsten Punkte als Mastspitzen interpretiert und in eine Koordinatenliste überführt. Diese Koordinatenliste ist einerseits Grundlage für die Ergänzung der Leitungsverzeichnisse. Andererseits wird über diese Mastspitzen eine Polylinie konstruiert, die zur weiteren Selektion der Seile dient. Außerdem wird über die Punktwolke der Masten eine ausgleichende Gerade berechnet, die die horizontale Achse durch Mast und Ausleger repräsentiert. Für die Tragmasten dient diese Achse als Zielgerade für die Interpolation der Aufhängepunkte. An den Abspannmasten muss diese Achse um etwa 2.5 m parallel verschoben werden, um der Auslenkung der Isolatoren gerecht zu werden.



Abb. 48: Aufhängepunkte an Tragmasten (oben und links) und Abspannmastern (Quelle: Wikipedia (2003))

Die Maske zur Bestimmung der Leitungsstützpunkte wird aus dem Differenzmodell des gesamten Topographiemodells und der einzelnen Topographiemodelle (Gebäude und Vegetation) abgeleitet.

$$[\text{Leitungsmodell}] = [\text{Topographiemaske_von_Topographiemodell} > 1.5\text{m}] - [\text{Topographiemodell} > 1.5\text{m}]$$

Formel 28: Map Algebra Ansatz zur Berechnung des Leitungsmodells

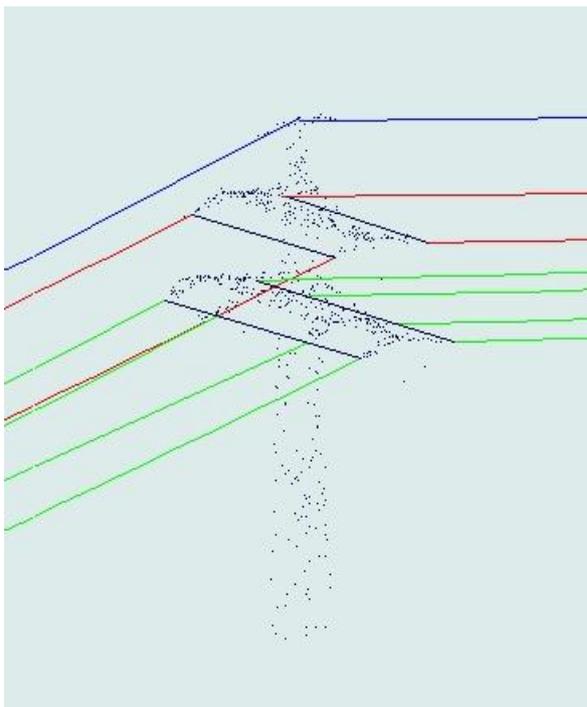
Diese Maske dient zur Selektion der Leitungspunkte aus dem Originaldatensatz. Nur mit den Originaldaten lässt sich eine adäquate Genauigkeit bei der späteren Interpolation erreichen. In den Programmen zur Bildverarbeitung und in den meisten RasterGIS-Programmen wird die inhomogene Punktwolke immer erst in ein regelmäßiges Raster überführt und durch entsprechende Zellengröße findet mit jedem Resampling eine Veränderung beziehungsweise Generalisierung der Lage der Stützpunkte statt. Die spätere Interpolation der Leitungen als räumliches Polynom stellt jedoch auch eine Generalisierung dar. In der Summe sind diese Veränderungen an den Daten unbedingt gering zu halten.

Die gewonnene Punktwolke ist noch einmal visuell zu überprüfen, um fälschlich selektierte Punkte zu eliminieren. Bodenpunkte oder bodennahe Topographiepunkte fallen in diesem Zusammenhang sofort auf.

Da die Trasse sich in gestreckter Form über Land hinzieht, kann man die Koordinatenliste der Mastspitzen zum Beispiel über Insertsort sortieren und als Grundlage eines Vektorstranges verwenden, der die gesamte Trasse von Mast zu Mast repräsentiert. Korrekturen werden eventuell nötig, wenn mehrere Trassen nebeneinander verlaufen sowie im Bereich der Umspannwerke. Hier werden die Seile in einem späteren Schritt mit den Verteilerstellen der Umspannanlage manuell verknüpft.

Innerhalb einer CAD-Software (in diesem Falle Bentley Microstation 2004 Edition) wird die Mittelachse der Trasse parallel dupliziert. Der durchschnittliche horizontale Seilabstand der 110KV- Leitung beträgt 3.0 m vom Blitzschutzseil zum innersten Leitungsseil und jeweils ca. 1.8 m zu jedem weiteren Leitungsseil. Mit einem Korridor oder Buffer von einem Meter Breite lassen sich somit alle Stützpunkte der Leitungsseile und des Blitzschutzseiles separat selektieren.

Aus den selektierten Stützpunkten eines Seiles wird nach der Methode der kleinsten Quadrate ein ausgleichendes Polynom in einem zweistufigen Ansatz berechnet. Im ersten Rechengang wird eine ausgleichende Gerade horizontal durch die Punktwolke des Seils gerechnet. Mit den jeweiligen Stützpunkthöhen und den Abszissen entlang der ausgleichenden Geraden wird dazu die Seilhöhe als Polynom 2.ter Ordnung berechnet.



Ausgleichende Gerade:

$$Y_i - v_i = a * X_i + b$$

Y_i = Rechtswert des Stützpunktes

X_i = Hochwert des Stützpunktes

a, b = Koeffizient der Geradengleichung

v_i = Verbesserungen

Ausgleichendes Polynom:

$$Y_i - v_i = a_0 + a_1 * X_i + a_2 * X_i^2$$

Y_i = Höhe des Seils

X_i = Abszisse entlang der ausgleichenden Geraden

a_0, a_1, a_2 = Koeffizienten des Polynoms

v_i = Verbesserungen

Formel 29: Ausgleichende Gerade und Ausgleichendes Polynom

Abb. 49: Ergebnis der Interpolation der Leitungen auf die selektierte Punktwolke

In Anhang D wird der Quellcode zur Seilinterpolation beschrieben. Die Ergebnisse der Interpolation werden in Tabellen zusammengefasst und stehen zur weiteren Beurteilung zur Verfügung.

Exemplarisch zeigt die folgende Tabelle die Koordinatenliste eines solchen ausgeglichenen Seils.

Nr	X	Y	Z	vi(Lage)	vi(Hoehe)
1	3528148.81	5612469.63	309.32	4.52E-02	-0.13515187
2	3528149.07	5612469.70	309.30	6.70E-02	-7.70E-02
3	3528149.75	5612469.86	309.24	3.12E-02	-2.53E-02
4	3528149.39	5612469.77	309.28	0.101187602	-9.43E-02
5	3528150.09	5612469.94	309.22	0.061913585	-1.35E-02
6	3528149.69	5612469.84	309.25	9.92E-02	-0.16963269
7	3528151.59	5612470.30	309.09	0.090900305	-6.94E-02
8	3528152.21	5612470.45	309.04	5.11E-02	-5.03E-02
9	3528152.17	5612470.44	309.04	4.07E-02	-1.71E-02
10	3528154.87	5612471.09	308.82	0.03020658	-2.65E-02
...
...
...
148	3528403.15	5612530.69	317.38	3.61E-03	1.05E-02
149	3528403.38	5612530.74	317.41	1.12E-02	-6.58E-02
150	3528403.80	5612530.84	317.48	2.93E-02	2.68E-02
151	3528405.34	5612531.21	317.71	7.80E-03	0.168805611
152	3528405.43	5612531.23	317.72	1.32E-02	-8.35E-03
153	3528405.62	5612531.28	317.75	8.94E-03	4.95E-04
154	3528405.53	5612531.26	317.74	6.30E-02	-0.07207518
155	3528406.36	5612531.46	317.86	5.40E-02	-8.67E-02
156	3528406.80	5612531.56	317.93	4.36E-02	-0.16024803

Koeffizienten der
ausgleichenden
Gerade:

a= 0.240041977

b= 6.626824656

Polynomparameter:

a0= 309.374235

a1= -8.37E-02

a2= 4.36E-04

Sqr[vv](Lage)/(n-2): 4.88E-02

Sqr[vv](Höhe)/
(n-3): 0.109090068

Tab. 3: Koordinatenliste eines einzelnen Seiles

Die modellierten Seile reichen jedoch nur bis zum letzten, dem Seil zuzuordnenden Stützpunkt. Der Abstand vom gerechneten Seil zum Aufhängepunkt differiert im Einzelfall um einige Meter. Eine exakte Abgrenzung zwischen Isolator und Seil ist besonders schwierig bei den Tragmasten, da die Isolatoren von den Mastauslegern herunterhängen und der tiefste Punkt des Isolators in der Regel nicht durch Laserscannpunkte abgebildet wird.

Ein Kompromiss kann nun die räumliche Verschneidung der Seile sein. Allerdings stellt dies eine Extrapolation des Seilverlaufs dar und projiziert somit den Fehler der Seilinterpolation und der geometrischen Bedingungen, die durch die CAD-Software vorgegeben sind. Hier ist vor allem die Umwandlung der Kurve in ein Polygon mit festgelegtem Punktabstand zu nennen. Dieser Punktabstand ist wiederum als Kompromiss zwischen Auflösung des Seils in Segmente und Datenmenge bei der Festlegung des Schutzraumes zu sehen. Die folgende Tabelle zeigt die Restklaffung der verschnittenen Leitungsseile zum ersten Tragmast der Trasse zwischen Feld 2 und 3 (Nr.180102) mit den Koordinaten R = 3527645.15, H = 5611998.02, Höhe 329.04 m.

Seil	Lageversatz	Höhe Feld 1	Höhe Feld 2	D(Höhe)
3 (links)	0.03 m	318.29	318.45	-0.16
2 (links)	0.03 m	321.29	322.01	-0.03
1 (links)	0.03 m	318.42	318.45	-0.03
Blitzschutz	0.03 m	329.04	329.08	-0.04
1 (rechts)	0.01 m	318.32	318.31	0.01
2 (rechts)	0.02 m	321.84	321.87	-0.03
3 (rechts)	0.01 m	318.41	318.28	0.13

Tab. 4: Zusammenstellung der Restklaffung am Mast Nr.180102

Das Ergebnis dieses Vergleichs ist überraschend gut. Die größte Höhendifferenz an den Tragmasten innerhalb des Untersuchungsgebietes liegt bei 0.29 m. Eine Mittelung der Höheninformationen aller Seile ergibt die Seilaufhängungspunkte mit einer Standardabweichung von 0,16 m. Die großen Differenzen in den Höhen entsprechen der Erwartung, wenn man sich eine Punktwolke zur Interpolation näher betrachtet. Die Standardabweichungen der Höhen der Polynomregression weisen schon auf eine größere Streuung innerhalb der erfassten Leitungsstützpunkte hin. An anderen Masten differieren ebenfalls immer wieder einzelne Seile. Überprüft man jedoch die Koordinatenliste der Seilbestimmung, so ergeben sich keine signifikanten Fehlinterpolationen, die das Polynom zur Bestimmung der Seile ablenken könnten. In der Lage streuen die Aufhängepunkte an allen Masten unter 0.05 m. Die Interpolation auf die Punktkette der Leitungen bildet die Leitung sehr gut in Lage und Höhe ab. Der eigentliche Aufhängepunkt ist dagegen in aller Regel nicht durch einen Laserpunkt bestimmt und muss daher aus einer Linienverschneidung gerechnet werden. Dabei wird als Verschneidungsziel eine ausgleichende Gerade durch den Punkthaufen des Mastes und seiner Ausleger berechnet. In der Summe ist das Ergebnis dieser Konstruktion sicher akzeptabel. Es muss jedoch betont werden, dass die Angaben zur Genauigkeit nur relativ zu werten sind. Eine Aussage zur absoluten Genauigkeit innerhalb des Landessystems kann nicht ohne Vergleichsmessungen vor Ort getroffen werden, da die GPS/INS- Orientierung nur relativ genau in Relation zum Landessystem sein kann. Die mögliche Absolutgenauigkeit liegt entsprechend bei etwa 0.15 m in der Lage und 0.25 m in der Höhe.

Vergleicht man die Lagekoordinaten der Masten aus der Schwerpunktberechnung mit den Ergebnissen der Verschneidung der Blitzschutzseile, so ergeben sich auch hier Differenzen < 5 cm. Das heißt, die Selektion der Mastspitzen als Klassifikationsergebnis aus der gefilterten Punktwolke ist in der Lage- und Höhengenaugigkeit vergleichbar mit den Ergebnissen der Polynomverschneidung.

In der Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Bestimmung der Mastspitzen zusammengetragen. Rechtswert, Hochwert und Höhe sind das Ergebnis der Messung aus Laserscanndaten. Die Bauwerkshöhen aus den vorgegebenen Leitungslisten geben die Höhe des ersten Auslegers über Normalnull an. Die Funktion dieses Wertes erschließt sich nicht aus der Liste. Zieht man die Daten aus der Spalte Hoehe-EOK von diesem Wert ab, erhält man die Höhe der Erdoberfläche an der Stelle des Mastes. Die Differenzen dh(m) ergeben zusammen mit den Daten der Spalte HOEHE-EOK die gesamte Bauwerkshöhe.

BW	HOEHE-EOK	HOEHE-NN	GKRECHTS	GKHOCH	Höhe(ist)	dh(m)
115421	19.64	318.20	3528411.36	5612525.85	327.46	-9.26
115422	15.37	309.68	3528148.81	5612462.83	317.94	-8.26
115423	13.64	301.37	3528030.88	5612357.06	309.60	-8.23
115424	17.66	308.80	3527855.44	5612200.09	317.99	-9.19
115425	13.25	314.26	3527688.55	5612050.68	322.46	-8.20
180102	12.02	318.39	3527645.15	5611998.02	329.06	-10.67
115426	16.20	323.76	3527588.91	5611930.24	331.99	-8.23
115427P	9.14	316.70	3527556.61	5611884.66	322.74	-6.04

von Bauwerk	bis Bauwerk	Feldlänge(soll)	Feldlänge(ist)
115421	115422	269.70	270.00 m
115422	115423	158.30	159.51 m
115423	115424	235.70	234.31 m
115424	115425	224.00	224.01 m
115425	180102	68.40	68.16 m
180102	115426	88.30	88.19 m
115426	115427P	58.60	59.43 m

Tab. 5: Zusammenstellung der Mastkoordinaten

Ein alternativer Ansatz zur Selektion der Leitung wird von Dr. Th. Melzer und Dr. Ch. Briese (2004) beschrieben. Mit einer iterativen Hough Transformation wird nach Entfernen aller Bodenpunkte die Punktwolke auf Linienelemente und Anisotropie hin untersucht. Mit dem RANSAC (Random Sample Consensus) Algorithmus werden die Seile dann auf die Punktwolke interpoliert (vgl. Melzer, Briese, 2004). Im vorliegenden Beispiel wird statt des RANSAC Algorithmus eine einfache Polynomregression gerechnet.

Bei jedem Ansatz zur Filterung der Seile ist es sehr schwierig, mehrere Leitungen, die direkt übereinander liegen, zu erfassen. Eine Lösung dieses Problems wäre wiederum die Bildung von Höhenkorridoren, um die einzelnen Seile in mehreren Stufen zu erfassen. Sind die Seile erst einmal einzeln selektiert, ist die Vektorisierung relativ einfach möglich. Die Softwareprodukte, die auf die Verarbeitung von großen Punktmengen und Rasterdatensätzen spezialisiert sind, bieten jedoch in der Regel nicht die notwendigen Werkzeuge, um diese dreidimensionalen Geometrien zu realisieren.

6.5 Bestimmung der Schutzräume

Die Dimensionierung für Schutzräume entlang der Trasse ist in der DIN VDE 0210, Kapitel 12: „Mindestabstände im Gelände“ und Kapitel 13: „Mindestabstände und Leitungsausführung im Bereich von baulichen Anlagen und Verkehrsräumen“ beschrieben. Innerhalb dieser Vorschriften ist eine genaue Regelung für Abstände von topographischen Objekten zur Leitung getroffen. Die Mindestabstände zu Bauwerken werden in diesem Zusammenhang schon beim Bau der Bauwerke oder der Leitung innerhalb der Planung berücksichtigt. Kritisch ist, dass die trassenbegleitende Vegetation sich nicht dieser Vorschrift unterwirft. Aus diesem Grund müssen im Bereich der Trasse Schutzräume definiert werden, die von Vegetation und möglichen sonstigen topographischen Objekten freizuhalten sind.

Vom Auftraggeber wird ein Mindestschutzraum von 3.5 und 5m ausgehend von den untersten äußeren Seilen gefordert. Gängige Praxis war bisher, einen einfachen Korridor mit senkrechten Außenwänden mit dem Mindestabstand von 3.5 und 5 m links und rechts entlang der äußeren Seile zu etablieren. Die Vegetation unter der Leitung wurde entsprechend großzügig in den Bereich des Schutzraumes klassifiziert. Ein strengerer Ansatz ist durch die Modellierung eines dreidimensionalen Schutzraumes in Form einer Zylinderhalbschale entlang der äußeren Seile realisiert. Bei dieser Konstruktion müssen jedoch die Schutzräume unter allen Seilen definiert werden, da die Bereiche um die inneren schwingenden Seile nicht durch die äußeren Schutzräume abgedeckt sind.

Die Zylinder werden mit festgelegtem Radius über die Leitungen gerechnet und zu einer gemeinsamen Oberfläche vereinigt. Um innerhalb der Software mit dem Schutzraum als Oberfläche arbeiten zu können, muss diese in ein TIN umgeformt werden. Mit einer Cut/Fill Funktion werden alle Topographiepunkte selektiert, die innerhalb des Schutzraumes zu liegen kommen. Diese Funktion arbeitet im Raum und kann somit die Geometrie des Schutzraumes berücksichtigen. Das Testgebiet ermöglichte nur in wenigen Bereichen die Überprüfung der Daten- Selektion innerhalb des Schutzraumes.

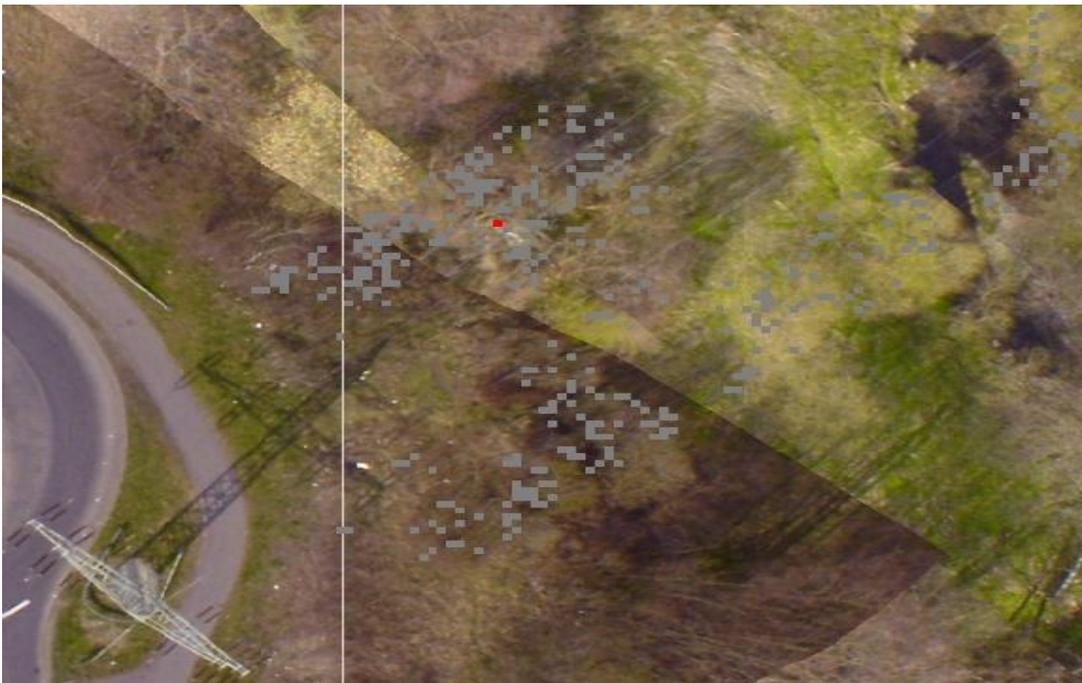


Abb. 50: Ergebnis der Cut/Fill Analyse
(in grau die Vegetationspunkte unterhalb des Schutzraumes, in rot die Vegetationspunkte innerhalb des Schutzraumes)

Die morphologische Filterung der Vegetation dicht an der Leitung ist etwas aufwändig, da nicht ohne weiteres zwischen den Daten der Leitung und der Vegetation unterschieden werden kann. Zu diesem Zweck wird ein weiterer zylinderförmiger Suchraum mit einem sehr geringen Radius (zum Beispiel 0.25 m) um die Leitung konstruiert. Dieser Suchraum filtert die Punkte aus der Vegetationspunktwolke, die von der eigentlichen Leitung herrühren. Übrig bleibt die reine Vegetationspunktwolke.

Die im Rahmen dieser Master Thesis durchgeführte Berechnung der Schutzräume erfolgte auf der Basis der Ist- Position der Leitung unter den klimatischen und technischen Bedingungen, die zum Zeitpunkt des Fluges bestanden. Letztendlich wird es jedoch Aufgabe sein, die weiter prozessierten Leitungsdaten als Grundlage für die Berechnung der Schutzräume heranzuziehen. In einem externen Programm (zum Beispiel Seil++ der Firma imp GmbH) sind die Seile mit den Parametern aus den Leitungslisten, den vorgegebenen Feldlängen und den aus den Laserscanndaten ermittelten Seilaufhängungspunkten zu berechnen. Diese Berechnung erfolgt nach der Funktion zur Berechnung einer Kettenlinie.

$$z = 0.5 * a * (e^{x/a} + e^{-x/a})$$

z = Höhe des Leitungspunktes

x = Abszisse

e = Eulersche Zahl

a = Elastizitätskonstante der Leitung

Formel 30: Berechnung einer Kettenlinie

Die Einführung zusätzlicher Parameter wie die Zuglast an den Seilen und die Tatsache, dass die Seile an den Tragmasten nicht fixiert sondern nur eingehängt sind, macht die Berechnung der Seile entsprechend aufwändig. Eine Integration dieses Formelwerkes in eine gemeinsame Berechnungsumgebung ist infolge dieses Aufwandes nicht möglich.

6.6 Digitales Situationsmodell

Die einzelnen Komponenten werden zu einem digitalen Situationsmodell zusammengefasst. Dieses Modell dient zur gemeinsamen Bewertung und Visualisierung der einzelnen Komponenten. So wird neben den baulichen Anlagen und dem Geländemodell insbesondere der Schutzraum in Relation zur Topographie und explizit die Bereiche der Topographie und Vegetation ausgewiesen, die in den Schutzraum hineinreichen. Das Situationsmodell stellt dabei die Daten in selektiver, generalisierter Form dar. Durch Farb- und Formgebung, Signaturen und den Zugriff auf das betreffende Koordinatensystem liefert das Situationsmodell die Grundlage zur Planung und Verwaltung des dargestellten Objektraumes. Die einzelnen Komponenten besitzen volle GIS-Funktionalität und können entsprechend räumlich selektiert und mit weiteren Attributen versehen werden.

Es ist sinnvoll, die Komponenten in eine jeweils der Aufgabe entsprechende Datenform zu bringen. So wird die Geländeoberfläche als Rasterdatensatz vorgehalten, um die Geländeformen durch eine entsprechende Oberflächengestaltung zu unterstützen. Ein Hillshading oder eine farbliche Höhenstufenvisualisierung bietet sich hier an. Gebäude werden als dreidimensionale Raumkörper inklusive Schattenwurf visualisiert. In diesem Zusammenhang besteht auch die Möglichkeit, die Gebäude durch Aufprägen von fotografischer Zusatzinformation oder Verwendung von Signaturen so genannt fotorealistisch zu visualisieren. Die Leitungen werden als Polylinie in einem Vektorformat vorgehalten und sind so, Seil für Seil und Feld für Feld selektier- und editierbar. Die Vegetation wird nach wie vor als Punktwolke dargestellt. Dies kommt der inhomogenen Gestalt der Vegetationskomponenten am nächsten. In diesem Zusammenhang macht auch eine Separierung nach Einzelobjekten (zum Beispiel Einzelbäume eines Waldes) keinen Sinn. Dieses Thema ist von Morsdorf, et al. 2004 beschrieben.

Eine weitergehende Selektion von topographischen Einzelheiten wie zum Beispiel die Armaturen der Umspannstation oder die Fahnenmasten im Bereich des Supermarktes sind durchaus ebenfalls möglich. Dazu werden jedoch einige manuelle Eingriffe in den Datensatz notwendig sein. Diese kleinförmigen topographischen Objekte sind nicht ohne weiteres von niedriger Topographie, Fahrzeugen und ähnlichen Details zu differenzieren und bedürfen gesonderter Ansätze.

Ein großes Manko bei der Gestaltung des digitalen Situationsmodells ist die Unzuverlässigkeit des 3D-Scene Viewers, der offensichtlich nicht in der Lage ist, Raster und Punktdaten gemeinsam zu visualisieren.

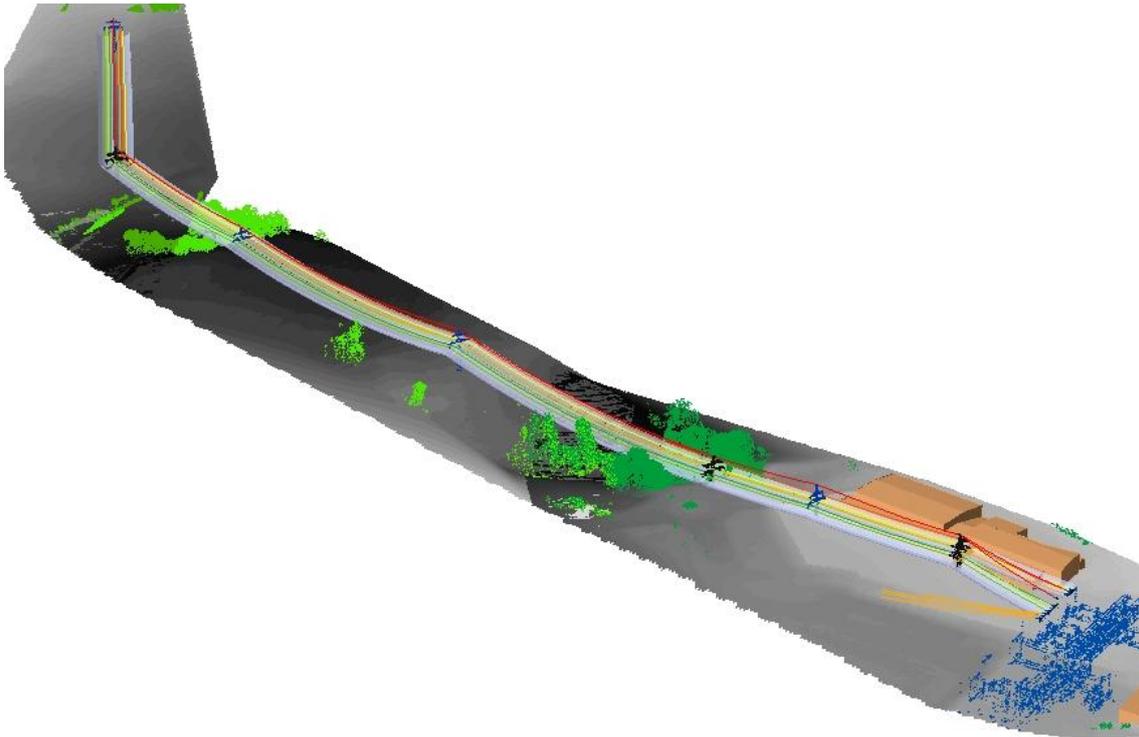


Abb. 51: Digitales Situationsmodell

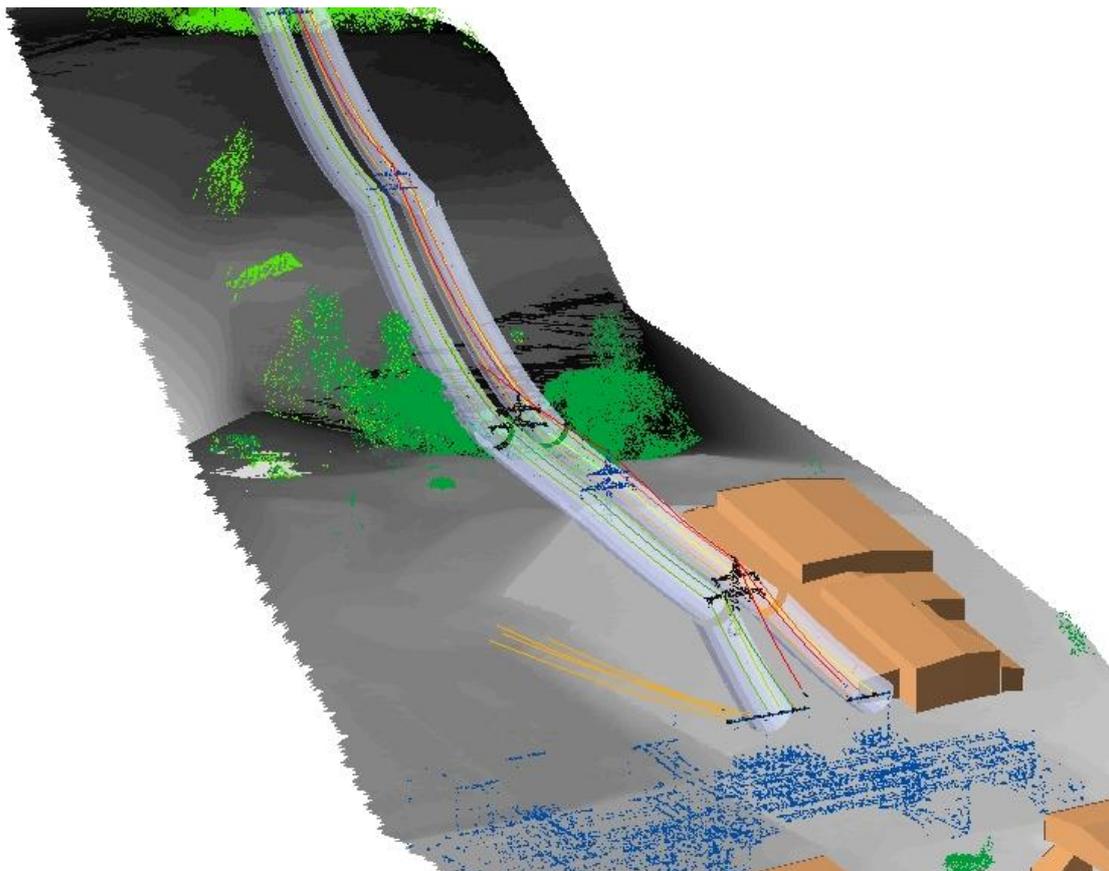


Abb. 52: Digitales Situationsmodell: Detail

7. Zusammenstellung und Beurteilung der Ergebnisse

Softwareprodukte zur Verarbeitung von großen Punktmengen bieten mittlerweile ein großes Spektrum an Werkzeugen um Laserscandaten zu filtern. Diese Werkzeuge müssen jedoch auf die individuelle Aufgabe hin angepasst werden. Diese Anpassungsarbeit, die sich vor allem auf die Auswahl der Parameter zu den einzelnen Algorithmen bezieht, bedarf einer intensiven Auseinandersetzung mit der Eigenheit der Daten als räumliche Punktwolke ohne differenzierte semantische Information. An den maßgeblichen Instituten in Deutschland und Österreich werden in diesem Zusammenhang ständig neue Verfahren und Algorithmen erprobt und verbessert. Im Rahmen dieser Master Thesis sind ausschließlich Programme und Applikationen zum Einsatz gekommen, die nicht explizit zur Verarbeitung von Laserscandaten entwickelt wurden, aber durch Modifikation eine relativ integrierte Verarbeitung der Daten ermöglichten. Eine durchgehende Integration des gesamten Arbeitsablaufes ist jedoch auch mit den genutzten Programmen nicht möglich.

Im Folgenden sind die Erfahrungen mit der gewählten Arbeitsumgebung kurz umrissen. Die Filterung des Geländemodells des Testgebietes ist mit Blick auf die Aufgabenstellung ausreichend. Ein exakteres Geländemodell bedarf der zusätzlichen Unterstützung von Bruchkanten. Insbesondere im Bereich der Bebauung und innerhalb komplexerer Anlagen sind vor allem Stützmauern in ihrer Höhe durch Kanten gesondert abzufangen. Der Ablauf der Filterung ist durch ein Makro auf der Basis von ESRI- MapObjects automatisiert worden. Der letzte Iterationsschritt muss allerdings unterbrochen werden, um manuell schon heraus gefilterte Daten wieder in den Oberflächeninterpolationsprozess einzufügen. Diese Verbesserung des Geländemodells erfolgt durch visuelle Überprüfung der gerechneten Oberfläche und dem Vergleich mit den zugehörigen Orthofotos.

Die verwendete Software ist nur bedingt zur Verarbeitung von solch großen Punktmengen geeignet. Eine Stückelung in Trassenabschnitte von rund 500 m Länge ist keine wirtschaftliche Lösung für diese Aufgabe. Die ständige, notwendige Fertigung von Zwischenprodukten und die notwendige Formatierung zwischen den einzelnen Verarbeitungsschritten bläht darüber hinaus die Datenmenge um ein Vielfaches auf. Der Arbeitsablauf pro Iteration ergibt neben den Ausgangsdaten ein Differenzraster in gleicher Größe des ursprünglichen Rasters, einen Datensatz der Reklassifikation, der etwas kompakter ausfällt, eine Zwischenstufe als 2D- Punktshapefile und letztendlich ein 3D- Punktshapefile als Berechnungsgrundlage für die eigentliche Oberflächeninterpolation. Das heißt, die ursprüngliche Datenmenge wird mit jeder Iteration etwa um Faktor 5 vergrößert. Nomenklatur und Speicherorganisation müssen auf diesen Umstand vorbereitet sein.

Andererseits bieten entsprechend leistungsfähige Softwareprodukte in der Regel nicht die weiterführenden Werkzeuge um die Lösung individueller Teilprobleme wie die Interpolation der Seile oder die Modellierung der Schutzräume zu gewährleisten. Die integrierte Softwarelösung steht noch aus. Eine mögliche effektive Arbeitsumgebung stellt sicher das Programm TerraScan von Terrasolid Oi aus Finnland dar. Diese Software arbeitet direkt auf der Basis von Bentley Microstation und bietet somit den gesamten Funktionsumfang, der für die Konstruktionsarbeiten benötigt wird. Allerdings ist in den vergangenen Versionen der Microstation die Kapazität und das Datenfassungsvermögen zu begrenzt, um die Datenmengen einer Laserscannbefliegung zu verarbeiten. Als Alternative wird mit einer virtuellen Simulation der Punktwolke gearbeitet. Erst wenn die Daten gefiltert sind, wird der Datensatz in das eigentliche CAD-System überführt. Eine CAD- Software hat den großen Vorteil des direkten Zugriffs auf das einzelne Objekt, zum Beispiel den einzelnen Punkt oder das berechnete Seil. Editierprozesse in einer GIS- Software sind dagegen sehr aufwändig. In der Regel muss das gesamte Datenthema editierfähig definiert werden. Dieser Vorgang

alleine kann bei 900.000 Punkten schon einige Minuten dauern. Die Philosophien der einzelnen Softwareentwickler aus der CAD- und der GIS- Welt differieren in diesem Zusammenhang noch sehr stark. Außerdem ist die GIS- Welt noch sehr der 2.5-D Anschauung von Daten verhaftet. Um zur visuellen Kontrolle die Daten aus einer Seitenperspektive anzusehen, müssen diese erst in einen externen 3D- Viewer transferiert werden. Dieser Aufwand ist sehr zeitraubend, aber notwendig.

Die Möglichkeit, aus den Daten eine solche Vielzahl von Objekten zu extrahieren, zeigt einerseits das Potenzial der Datenerfassung durch Laserscannbefliegung und andererseits die Möglichkeiten der Verarbeitung, die mit unterschiedlichsten Software- Werkzeugen möglich ist. Das Situationsmodell in seiner Gesamtheit ist wiederum ein ideales Hilfsmittel einerseits zur Bewertung der Daten und andererseits zur Nutzung der extrahierten Informationen.

Betrachtet man die erreichte relative Genauigkeit zum Beispiel der erfassten Seile, so zeigt sich, dass unter bestimmten Umständen auch eine Objektextraktion sehr genau möglich ist. Die Restklaffungen der Seile an den Tragmasten beziehungsweise die Restklaffungen an den Blitzschutzseilen sind leider das einzige Kriterium einer Genauigkeitsbetrachtung. Dabei muss betont werden, dass ein interpoliertes Datenelement auf seine Genauigkeit geprobt wird. Die einzelnen Seile werden auf eine Punktwolke interpoliert, die die Oberfläche der Seile repräsentiert. Die Stützpunkte der Seile können sowohl von oben, als auch von der Seite reflektiert worden sein. Nach DIN 48201 – 48204 sind Nennquerschnitte zwischen 25 und 50 mm² üblich. Aus den vorliegenden Daten lässt sich jedoch nicht ohne weiteres der tatsächliche Querschnitt der Seile abschätzen, da die innere Genauigkeit der Laserscannmessung die Dimensionen des Regelquerschnitts der Seile übersteigt.

Die Natur der inhomogenen Punktwolke als Datengrundlage ermöglicht die Interpolation von Oberflächen mit einer sehr hohen Genauigkeit. Eine exakte Lage- und Höhenbestimmung ist jedoch praktisch nur durch Verschneidung interpolierter Flächen- oder Linienelemente möglich (vgl. Katzenbeisser, Kurz 2004, S.179 ff.). Vor diesem Hintergrund fällt die Bewertung der Ergebnisse positiv aus.

Die Extraktion der einzelnen Themen erfolgte nach einigem Experimentieren mit großer Zuverlässigkeit. Durch visuelle Überprüfung oder die Einführung von Bewertungsverfahren (zum Beispiel die Interpretation des Differenzmodells zwischen interpoliertem DGM und Originaldaten) wurden die extrahierten Themen verifiziert und weiterverarbeitet.

Eine räumliche Selektion von Vegetationspunkten innerhalb eines Schutzraumes ist als Auftrag/Abtrag Funktion einfach zu realisieren. Das Ergebnis kann im Situationsmodell farblich abgesetzt werden und dient so direkt zur Planung von Eingriffen. Zur systematischen Aufbereitung einer gesamten Trasse sind nun noch weiterführende Hilfsmittel zu entwickeln. So werden Extraktions- und Sortier Routinen für die Ausgabe von Formularen zur Beschreibung der einzelnen Seile benötigt. In diesen Formularen werden die notwendigen Daten zusammengestellt, die für eine weitere Berechnung der Seile unter Einfluss von bestimmten Temperaturen oder Eislast benötigt werden. Wichtig ist dabei, die Kompatibilität der Schnittstellen zu den weiterführenden Programmen zu gewährleisten. Die Rückführung der gerechneten Daten in das Situationsmodell und die endgültige Berechnung der Schutzräume ist dann nach dem Ansatz in Kapitel 6.5 durchzuführen.

Abstandsmessungen zu topographischen Objekten sind innerhalb des Situationsmodells direkt möglich. Das Testgebiet beinhaltet leider keinen Fall kreuzender Leitungen, der als Demonstrationsbeispiel interessant wäre.

Das Fazit der Auseinandersetzung mit den Daten einer Laserscannbefliegung ist einerseits, dass die Verarbeitung von nicht selektiv erfassten großen Datenmengen eine grundlegend eigene Herangehensweise an die Verarbeitung dieser Daten erfordert. Im Gegensatz zu selektiv erfassten Daten, die in aller Regel schon bei der Entstehung verifiziert werden und in der Folge als „richtig“ (in Relation zur Aufgabe und den angewandten Verfahren) angesehen werden können, muss bei der großen Masse von Daten, die aus einer Laserscannbefliegung resultieren, mit einer gewissen Menge an fehlerhaften und einer gewissen Menge an für die Aufgabe nicht benötigten Daten ausgegangen werden. Diese Denkschwelle muss ständig bewusst sein, um die Analyse der Daten entsprechend vor- und nachzubereiten. Die Beurteilung der Ergebnisse ist dabei immer auch eine Abschätzung, die mit empirischen Mitteln nicht oder nur sehr schwer zu stützen ist.

Mit anderen Worten: der hohe Grad der Automation und die neuen Formen räumlicher Daten machen die Verarbeitung dieser Daten nicht einfacher.

8. Ausblick auf weitere Möglichkeiten

Die automatisierte Kantenextraktion ist das aktuelle Thema vieler wissenschaftlicher Arbeiten im Umfeld der Verarbeitung von Laserscanndaten. Die Filteralgorithmen sind in ihren Grundzügen ausgereift und werden in verschiedenen Standalone- oder integrierten Programmen implementiert. In diesem Kontext sind in naher Zukunft wegweisende Entwicklungen zu erwarten. Die Werkzeuge sind sehr weit entwickelt; es fehlt jedoch noch die praktische Umsetzung und Integration. So ist der Markt für Softwareprodukte, die für die Verarbeitung von Laserscanndaten in Frage kommt, noch sehr überschaubar. Außerdem ist die Filterung der Daten bei den meisten Projekten ein externer Arbeitsablauf, der die Vor- und Nachbereitung der Daten notwendig macht. Bei komplexeren Aufgaben bedeutet dies einen ständigen Wechsel zwischen den einzelnen Programmen. Jede Konvertierung kostet jedoch Zeit und kann unter Umständen auch Qualitätsverluste verursachen.

Ein anderes Manko der aktuellen Softwaresituation ist, dass die Filterung der Daten häufig an Dritte vergeben oder schon von der Befliegungsfirma durchgeführt wird. Die Parameterentscheidung findet also nicht mehr im Rahmen der Projektkompetenz und aufgabenspezifisch statt, sondern wird pauschalisiert. Die so gewonnenen Daten entsprechen damit nicht mehr den eigentlichen Bedürfnissen des Nutzers. Dabei wird, schon wegen der großen Datenmenge, häufig ein Großteil der Daten durch Filterung unwiederbringlich eliminiert und steht so nicht zur Sekundärnutzung zur Verfügung. Es ist zu hoffen, dass einerseits die Speicher- und Verarbeitungsmöglichkeiten für so große Datenmengen weiterentwickelt werden und andererseits die Verarbeitung der Daten durch entsprechende Werkzeuge intuitiver und flexibler gestaltet wird.

Durch die Entwicklung neuer Systeme wird in naher Zukunft auch eine verstärkte Nutzung von Reflektionswerten und Intensitätsabbildungen möglich sein. Kombinationen von First- und Last-Echo, gemeinsame Analyse von Video und RGB- Scann Aufzeichnungen und höhere Punktdichten werden die Analyse der Laserscanndaten weiter voranbringen. Zur Bewältigung dieser Daten sind dann weitere Algorithmen notwendig, die unter Berücksichtigung der spezifischen Besonderheiten der einzelnen Datenformen weiterreichende Extraktionen und Klassifikationen zulassen. Es gibt eine ganze Reihe von interessanten Ansätzen zur gemeinsamen Interpretation von Höheninformation und Textur (Eckstein, Steger, 1996) und Multispektralsensoren (Pflug et al, 2004). Die durch neue digitale Sensoren gewonnenen Daten, die sich vor allem dadurch auszeichnen, dass sie zur gleichen Zeit, das heißt unter den gleichen Bedingungen entstanden sind, bringen ebenfalls die Möglichkeit einer gemeinsamen Auswertung von räumlicher und semantischer Information. Die Integration dieser Daten und ihre Verarbeitung und die Bewältigung der enormen Datenmassen, die damit verbunden sind, werden in den nächsten Jahren die Aufgabe für Entwickler von Algorithmen und Software sein.

9. Literatur

Albertz, Jörg: *„Einführung in die Fernerkundung“*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 2001, ISBN 3-534-14624-7

Benning, Wilhelm: *„Statistik in Geodäsie, Geoinformation und Bauwesen“*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2002, ISBN 3-87907-383-X

Blaschke, Thomas, Salzburg: *„MScModul8: Räumliche Analysemethoden“*, UNIGIS-Salzburg, Lehrgangsmaterialien, 2003

Brase, B.; Anders –von Ahlfen, A.; Lubatschowski, H.: *„Grundlagen der Lasertechnik“*, In: Brockhaus: Die Bibliothek Mensch Natur und Technik Band 5, 2000

Bröckner, Bernhard: *„DTV Atlas der Atomphysik“*, Deutscher Taschenbuch Verlag, 3. Auflage 1985, ISBN 3-423-03009-7

Cramer, Michael, Stuttgart: *„Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung“*, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 4/2003, Seite 267 ff.

Ehlers, Manfred; Schiewe, Jochen, Osnabrück: *„Digitale flugzeuggetragene Fernerkundungs-Sensoren: Neues Potential und neue Auswertemethoden“*, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 6/2004, Seite 463 ff.

Ehlers, Manfred; Schiewe, Jochen, Osnabrück: *„Semantisches Potential digitaler flugzeuggetragener Fernerkundungs-Sensoren“*, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 6/2004, Seite 463 ff.

Hug, Christoph, Poing: *„Airborne Laserscanning und direkte Sensororientierung“*, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 4/2003, Seite 303 ff.

Katzenbeisser, Rolf; Kurz, Sven, Biberach: *„Airborn Laser-Scanning, ein Vergleich mit terrestrischer Vermessung und Photogrammetrie“*, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 3/2004, Seite 179 ff.

Knabenschuh M., Petzold B., Bonn: *„Data post-processing of Laser Scan Data for Countrywide DTM production“*, Photogrammetrische Woche 1999, Wichmann Verlag, ISBN 3-87907-340-6

Kraus, Karl, Wien: *„Universitätslehrgang Laserscanning – Datenerfassung und anwendungsorientierte Modellierung“*, *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, Heft 4/2003, Seite 219 f.

Kraus Karl, Wien: *„Photogrammetrie I“*, Verlag Dümmler, Köln, 1990, ISBN 3-427-78643-9

Kraus Karl, Wien: *„Photogrammetrie II“*, Verlag Dümmler, Köln, 1996, ISBN 3-427-78653-6

Kraus Karl, Wien: *„Photogrammetrie III“*, Verlag Dümmler, Köln, 2000, ISBN 3-427-78751-6

Lohr, U., Ravensburg: *„High Resolution Laserscanning, not only for 3D-City Models“*, in *Photogrammetrische Woche 1999*, Wichmann Verlag, ISBN 3-87907-340-6

Lorup, Eric J., Zürich: „MScModul5: Geostatistik“, UNIGIS-Salzburg, Lehrgangsmaterialien, 2003

Mass, Hans-Gerd, Dresden; Vosselmann George, Delft: *Flugzeug-Laserscanning*, Editorial zum Heft 4/2004 *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF

Möller, Matthias, Arizona; Zeil Peter, Salzburg: „MScWahlpflicht Modul: Fernerkundung“, UNIGIS-Salzburg, Lehrgangsmaterialien, 2003

Morsdorf, F.; Meier E.; Allgöwer B.; Nüesch D., Zürich: „Clusteranalyse von LIDAR-Vektordaten zur Erfassung geometrischer Eigenschaften von einzelnen Bäumen“, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 4/2004, Seite 259 ff.

Müller, Rupert; Gintautas, Palibinskas; Reinartz Peter; Schroeder, Manfred; Amann, Volker; Stätter, Rolf; Oberpfaffenhofen: „From Airborn Digital Raw Data to Image Maps“, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 4/2003, Seite 317 ff.

Pfeifer, Norbert, Delft: „Oberflächenmodelle aus Laserdaten“, *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, Heft 4/2003, Seite 243 f.

Pflug, Manfred; Rindle, Peter; Katzenbeisser, Rolf, Biberach: „True- Ortho- Bilder mit Laser-Scanning und multispektralem Zeilenscanner“, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 3/2004, Seite 173 ff.

Schiewe, Jochen, Osnabrück: „Ein regionen- basiertes Verfahren zur Extraktion der Geländeoberflächen aus Digitalen Oberflächen- Modellen“, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 2/2001, Seite 81 ff.

Traun, Chritoph: „MScModul2: Räumliche Daten: Repräsentation von Oberflächen“, UNIGIS-Salzburg, Lehrgangsmaterialien, 2003

Wagner, Wolfgang, Wien; Ullrich, Andreas, Horn; Briese, Christian, Wien: „Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche“, In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation*, Heft 4/2003, Seite 223 f.

Wanninger, L., Neuwied: „Permanente GPS-Stationen als Referenz für präzise kinematische Positionierung“, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik*, Zeitschrift der DGPF, Heft 4/2003, Seite 343 ff

10. Internetquellen

[Airborne 1 Corporation], Informationsbroschüre „LIDAR Accuracy“, <<http://www.airborne1.com/technology/LiDARAccuracy.pdf>> (07.03.2005)

Barnes, Trevor: „A Paper Related to Everything but More Related to Local Things“, University of British Columbia, 2004 <http://www.geog.ubc.ca/~tbarnes/ANNA_09402004.pdf> (05.01.2005)

Boebel T.: „Flugzeugposition und Flugzeuglagebestimmung“, Alfred-Wegener Institut Bremerhaven, 2000 <<http://www.awi-bremerhaven.de/GPH/phd/tboebel/node10.htm>> (07.03.2005)

Briese Ch.; Pfeifer N.; Dorninger P.: „Applications of the robust interpolation for DTM Determination“, 2003

< http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/Briese_Pfeifer_Dorninger.pdf> (16.01.2005)

Briese Ch.: "Three Dimensional Modelling of Breaklines from Airborne Laser Scanner Data", 2004

< http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/ISPRS_2004_Istanbul/Airborne_Laser_cb.pdf> (16.01.2005)

Briese Ch.: "Breakline Modelling from Laser ScannerData ",2004

< http://www.ipf.tuwien.ac.at/phdtheses/diss_cb_04.pdf> (16.01.2005)

Bretar F., Chesnier M., Roux M., Pierrot-Deseilligny M., Institut Géographique National : „Terrain Modelling and Airborne Laser Data Classification using multiple pass filtering“

<<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/287.pdf>> (16.01.2005)

Crewell, Susanne: „Grundlagen der Fernerkundung: LIDAR Ceilometer“, Meteorologisches Institut, Universität Bonn, Wintersemester 2002/03

<http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/~crewell/vorles/FE_vorles/fe_atmos_aktiv.html> (30.01.2005)

Dümpgen, Lutz :Institut für Mathematische Statistik und Versicherungslehre IMSV, "Lineare Modelle I-II", Bern,2004

<<http://www.stat.unibe.ch/~duembgen/LinMod/>> (22.02.2005)

Eckstein W.; Steger C.: "Fusion of digital Terrain Models and Texture for Object extraction", FG BV, Informatik IX, Technische Universität München, 1996

<<http://www9.in.tum.de/papers/1996/IARSC-96-Eckstein-Steger.pdf>> (16.01.2005)

Eckstein, W.; Munkelt, O.: "Extracting Objects from Digital Terrain Models", in Remote Sensing and Reconstruction for Three-Dimensional Objects and Scenes, Toni F. Schenk, Editor, Proc. SPIE 2572, Juli 1995

<<http://www.radiq.informatik.tu-muenchen.de/people/eckstein/paper.htm>> (28.02.2005)

Fischer, Robert.B.: "The Ransac (Random Sample Consensus Algorithm)", Science and Engineering at the University of Edinburgh 2002

<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/FISHER/RANSAC/> (25.03.2005)

Fraunhofer Institut für Lasertechnik IFT (2003): „Laser Tutorial“,

<<http://www.ilt.fraunhofer.de/ilt/php/default.php?web=1&id=100048&lan=ger&dat=2>> (15.01.2005)

Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung (2004): „Morphologie“,

<<http://a7www.igd.fhg.de/lectures/morphologie.pdf>> (26.02.2005)

Gerätespezifikation des ALS50 Airborne Laser Scanner der Firma Leica Geosystems

<http://gis.leicageosystems.com/products/documents/ALS50_product_description.pdf> (15.01.2005)

Lorup,E.J.: „Präsentation Map Algebra“,1999

<http://www.geo.sbg.ac.at/staff/lorup/lv/ranalyse2000/Praesentation_MAP_ALGEBRA.pdf> (28.02.2005)

Lohmann. P; Koch A.; Schaeffer M.: "Approaches to the Filtering of Laser Scanner Data", ,IAPRS, Vol.XXXIII, Amsterdam, 2000

<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2000/lohmann/paper_470.pdf> (18.02.2005)

Lohmann P.: "*Filtering of Laserscan Data*", Institute for Photogrammetrie and Geoinformation, Hannover, 2000
<<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/lehveranstaltungen/scripte/laserfiltpart1.pdf>>
(18.02.2005)

Mayrhofer, Volker: "*Laser-Höhenmessung*", in Forum Naturwissenschaftlicher Unterricht, Österreichische Physikalische Gesellschaft, 2005
<<http://pluslucis.univie.ac.at/FBA/FBA00/mayerhofer/k2.pdf>> (18.02.2005)

Melzer, Thomas; Briese, Christian: "*Extraction and Modeling of Power Lines from ALS Point Clouds*", Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität Wien, 2004
<http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/melzer_powerlines_OAGM_2004.pdf> (27.03.2005)

Nardinocchi, C.; Forlani, G.; Zingaretti, P.: "*Classifikation and Filtering of Laser Data*", Commission III, WG3, IAPRS, 2003
<http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Nardinocchi_ALSD_D2003.PDF> (18.02.2005)

Keqi Zhang, Shu-Ching Chen, *Member, IEEE*, Dean Whitman, Mei-Ling Shyu, *Member, IEEE*, Jianhua Yan, Chengcui Zhang, *Student Member, IEEE*:
"*A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurements From Airborne LIDAR Data*", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 41, NO. 4, APRIL 2003
<<http://www.cs.fiu.edu/~chens/PDF/TGRS.pdf>> (19.02.2005)

Passini, R.; Jacobsen K.: "*Filtering of Digital Elevation Models*", Institute for Photogrammetrie and Geoinformation, Hannover, 2002
<<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2002/paper/ftplj02.pdf>> (19.02.2005)

Ressler, Camillo: "*Direkte Georeferenzierung von Luftbildern in konformen Kartenabbildungen*", Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Wien, 2002
<http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/car_VGI-paper_direkte_Georef_in_Kartenpro.pdf>
(15.01.2005)

Ressler, Camillo: "*The OEPPE-Test 'Integrated Sensor Orientation and it's Handling within the hybrid Block- Adjustment Programm Orient'*", Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Wien, 2002
<http://www.ipf.tuwien.ac.at/publications/car_oeepe01/OEEPE_workshop_RESSL_OEEPE-publication.pdf>(15.01.2005)

Riedl, L.; Kalasek, R.: "*MapModels – Programmieren mit Datenflußgraphen*, in Strobel, J.; Dollinger, F.(Hgg.): *Angewandte Geographische Informationssysteme XIV: Beiträge zum AGIT-Symposium*" Salzburg 2000. H. Wichmann Verlag Heidelberg.
ISBN 3-87907-324-4
<<http://srf.tuwien.ac.at/MapModels/Agit98/Paper.htm>> (26.02.2005)

Schneider Mathias: "*Einfluss von GPS/INS-Orientierungselementen auf die automatische AT*", Studienarbeit an der Universität Stuttgart, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie (IFP), 2002
<<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/lehre/studienarbeiten/Schneider/Schneider.html>>
(14.11.2004)

[Fugro inpark] Allgemeine Information der Firma Fugro, Niederlande:

<<http://www.fugro.nl/survey/onshore/flimap.asp?service=%2Fsurvey%2Fonshore%2Fflimap.asp>>

(15.01.2005)

[Flimap] Allgemeine Informationen der Firma Flimap, USA:

<<http://12.166.196.68/flimap.com/web/uploads/factsheet.pdf>> (15.01.2005)

Wehr, A.; Lohr, U.: „Airborne Laser Scanning – an introduction and overview“, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54(68-82), 1999

<<http://www.cnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1136.pdf>> (15.01.2005)

[Wikipedia] : „Stromnetze“, 2005

<<http://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz>> (12.03.2005)

11. Weitere Quellen

Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE: DIN VDE0210 im VDE-Schriftenwerk, 1985

Richtlinie für die CAD-Bearbeitung Laserdaten im Netzbereich des Regionalzentrums Nord, Beta-Version 2.3, Ausgabe vom 01.01.2004

Informationsmaterial der Firma Toposys- GmbH, Topographische Systemdaten GmbH

Glossar

Aerotriangulation	Verfahren der Photogrammetrie durch Verknüpfung der einzelnen Luftbilder über identische Punkte in den Nachbarmodellen homogene Auswerteblocke mit vielen Modellen zu bilden mit dem Ziel einer hohen inneren und äußeren Orientierung und der Einsparung von Passpunkten.
Anisotropie	Richtungsabhängigkeit einer Wertegruppe
Blockausgleichung	Ausgleichungsverfahren zur Berechnung der Orientierungsparameter auf Basis von räumlichen Strahlungsbündeln zwischen Bildkoordinaten und den zugehörigen Projektionszentren. Ein Zwischenschritt über eine Modellbildung entfällt.
Closing	Dilatation gefolgt von einer Erosion mit dem Ziel, Lücken zwischen einzelnen Regionen komplexer Objekte zu schließen.
Datum	Bezugssystem für die Darstellung der Erdoberfläche
DGM	Digitales Geländemodell (Beschreibung der Erdoberfläche mit Beschreibung der Struktur (inklusive Bruchkanten, Gerippelinien etc.))
DHM	Digitales Höhenmodell (Beschreibung der Erdoberfläche ohne Festlegung der Struktur)
Dilatation	Fügt Pixel zur Umgebung eines Objektes innerhalb eines Rasterdatensatzes hinzu.
DOM	Digitales Oberflächenmodell als Gesamtmodell der zum Beispiel aus Laserscanndaten oder Autokorrelation gewonnenen Punkte
Erosion	Entfernt Pixel aus der Umgebung eines Objektes innerhalb eines Rasterdatensatzes
Extinktion	Auslöschung oder Tilgung
Filterung	Trennung von Boden-Punkten und Nicht-Boden-Punkten aus der Punktwolke der Laserscanndaten
First Pulse	Erstes Echo eines reflektierten Laserstrahls zur Erfassung von topographischen Objekten über der Erdoberfläche
Inertialsystem	Physikalisches System, in dem jede Bewegung gemäß dem Trägheitsgesetz erfolgt.
Insertsort	Sortieralgorithmus, der durch Entfernen und Einfügen einzelner Werte die Reihenfolge eines Datensatzes so lange verändert, bis die gewünschte Reihenfolge erreicht ist.
INS	Inertiales Navigations System, vgl. Inertialsystem

Kalmanfilterung	Statistisches Filterverfahren, um z.B. zeitliche, funktionale Vorgänge zu schätzen
Kohärenz	Eigenschaften zweier Wellen gleicher Frequenz, in ihren Phasen entweder überein zustimmen oder in ihren Phasen eine konstante Differenz zu besitzen
Kovarianz	Die Kovarianz $cov(x,y)$ beschreibt den Grad des miteinander Variierens (oder Kovariierens) zweier Messwertreihen x und y . Die Kovarianz ist die Summe der gemittelten Abweichungsprodukte zweier Variablen.
Kriging	Geostatistisches Verfahren, dass mit Hilfe explorativer Variographie Schätzungen über die Oberflächengestalt räumlicher Phänomene ermöglicht
LASER	L ight A mplification by S timulated E mission of R adiation
Last Pulse	Letztes Echo eines reflektierten Laserstrahls zur ausschließlichen Erfassung der Erdoberfläche
Lichtquant	Energieeinheit des elektromagnetischen Feldes, z.B. ein Lichtquant (Welle)
LIDAR	L ight D etection and R anging – Messung von Entfernung, Geschwindigkeit und Richtung durch Aussenden eines Laserstrahls und Empfangen des reflektierten Signals
Lineare Prädiktion	Statistische Interpolationsmethode basierend auf der abnehmenden Korrelation benachbarter Punkte (auch Interpolation nach kleinsten Quadraten)
Map Algebra	Auf Basis von Ablaufdiagrammen entwickelte Makroumgebung zur intuitiven Programmierung von analytisch-kartographischen Modellen
Morphologie	Lehre von der Form
Morphologische Operatoren	Gruppe von Algorithmen zur Bearbeitung von (Grauwert-) Bilddaten
nDGM	Normalisiertes digitales Geländemodell ist das Differenzmodell von digitalem Geländemodell und digitalem Oberflächenmodell
Neighborhood-Statistik	(Rasterbasierte) Statistik, die die Werte der näheren Umgebung in die Bestimmung des aktuellen Punktwertes einbezieht
Opening	Erosion gefolgt von einer Dilatation mit dem Ziel, Lücken zwischen einzelnen Objekten zu vergrößern
Panchromatischer Sensor	Große Bandbreite des elektromagnetischen Spektrums erfassender Sensor
Photon	Energieeinheit des elektromagnetischen Feldes innerhalb des Lichtspektrums bei der Betrachtung des Lichts als Teilchen

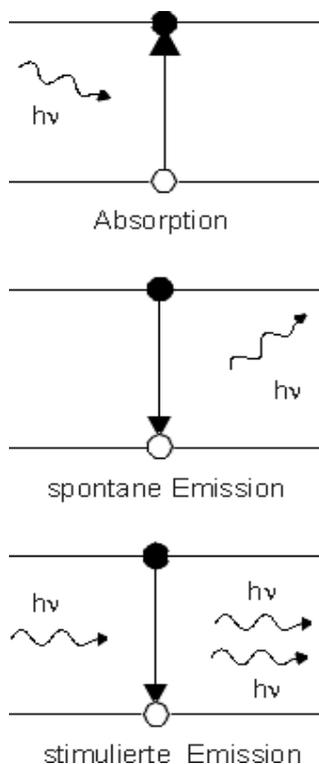
Push-Broom	Operationsverfahren von Scannern. Durch ein bewegliches Ablenkmodul wird der Laserstrahl oder der reflektierte Lichtstrahl in den Sensor gelenkt. Somit kann eine große Aufnahme­fläche mit einem sehr kleinen Sensor erfasst werden.
Quantile	Wert, der die Messwerte so aufteilt, dass der Anteil α der Daten kleiner ist und der Anteil $1-\alpha$ der Daten größer. Bei einem 95%-Quantile sind also 95% der Messwerte kleiner als das Quantile und 5% der Messwerte größer.
Resampling	Neuberechnung eines regelmäßigen Rasters mit dem Ziel, die Zellengröße oder –ausrichtung neu festzulegen
Swat	engl. Schwarte, Breite des Aufnahmegebietes eines Sensors rechtwinklig zur Flugrichtung in Abhängigkeit zur Flughöhe über Grund
Threshold	Schwellwert oder Begrenzung eines Wertebereichs
Thresholding	Konvertierung eines Grauwertbildes in ein Schwarz-Weiß-Bild
WGS84	World Geodetic System 1984: Weltweites Referenz- Ellipsoid als Basis der GPS-Vermessung, aus Satellitenbeobachtung hergeleitet

Anhang A: Allgemeine Einführung in die Lasertechnik

1960 wurde der erste funktionsfähige LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation: "Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung"), ein Rubinlaser mit einer Wellenlänge von 694.3 nm, vom amerikanischen Physiker Theodore H. Maiman von den Hughes Research Laboratories in Malibu/Kalifornien entwickelt.

Das Prinzip des Lasers beruht auf der Tatsache, dass die beschleunigte Bewegung elektrisch geladener Teilchen zur Emission elektromagnetischer Strahlung führt.

Absorbiert ein Atom oder Molekül ein ankommendes Quant oder Photon, wird dessen Energie in Anregungsenergie des Atoms umgewandelt. Das angeregte Atom kann nun seine Anregungsenergie durch den Wechsel des Energieniveaus unter Abgabe eines Lichtquants weitergeben. Laut Albert Einstein gibt es für ein Elektron drei verschiedene Möglichkeiten, um von einem Energieniveau zum anderen zu wechseln:



- durch Absorption eines Photons gelangt das Elektron in das nächst höhere Energieniveau, sofern die vom Photon transportierte Energiemenge der Differenz zwischen den Energien dieser Niveaus entspricht,
- durch spontane Emission eines Photons wechselt das Elektron in das nächst tiefere Energieniveau (die so emittierten Photonen sind in Richtung und Phase völlig unabhängig voneinander und bilden somit ein inkohärentes Licht),
- durch ein ankommendes Photon wird das Elektron nach Aussendung eines weiteren Photons dazu gebracht, das Energieniveau zur nächst tieferen Stufe zu verlassen. Die Richtung des neu emittierten Photons ist die gleiche, wie die Richtung des ankommenden Photons, das heißt, in dem Kontakt bewegen sich zwei Photonen in die gleiche Richtung und mit gleicher Phase weiter. Dieses Licht ist kohärent.

(vgl. Brockhaus, *Bibliothek Mensch Natur und Technik Band 5*, 2000, S. 122 f.)

Abb. 1: Mögliche Emission nach Albert Einstein

Quelle: <http://www.ilt.fraunhofer.de/ilt/php/default.php?web=1&id=100048&lan=ger&dat=2> vom 15.01.2005

Gelingt es, die elektromagnetische Emission in Phase und Richtung gleich zuschalten, entsteht ein hochkonzentrierter Lichtstrahl mit stabiler Amplitude und geringer spektraler Bandbreite.

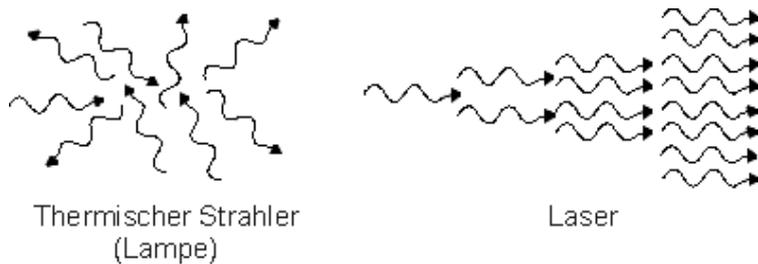


Abb. 2: Inkohärentes und kohärentes Licht

Quelle: <http://www.ilt.fraunhofer.de/ilt/php/default.php?web=1&id=100048&lan=ger&dat=2> vom 15.01.2005

Das Auftreten dieser Prozesse hängt von der Besetzung der jeweiligen Energieniveaus ab. Im Gleichgewichtszustand ist das niedrigere Niveau immer stärker besetzt als das höhere Niveau. In diesem Zustand ist eine stimulierte Emission praktisch nicht möglich. Enthält aber das höhere Niveau mehr Elektronen als das niedrige, sind die Bedingungen für eine stimulierte Emission gegeben. Diese so genannte „Besetzungsinversion“ wird durch die Energiezufuhr von außen ermöglicht: Energie wird in das System gepumpt oder gepulst.

Die Erzeugung von Laserlicht benötigt also ein Medium, das in der Lage ist, aufgrund einer systematischen Energiezufuhr von außen einen regelmäßigen, phasengleichen Strom von Lichtquanten zu emittieren. Dieses so genannte „aktive Medium“ kann fest (amorph oder kristallin), flüssig oder gasförmig sein. Je nach Aggregatzustand des aktiven Mediums ist die Zuführung der Energie unterschiedlich realisiert (z.B. bei Gaslaser durch regelmäßige Gasentladungen; Fest- oder Flüssigkeitslaser können nur optisch „gepumpt“ werden).

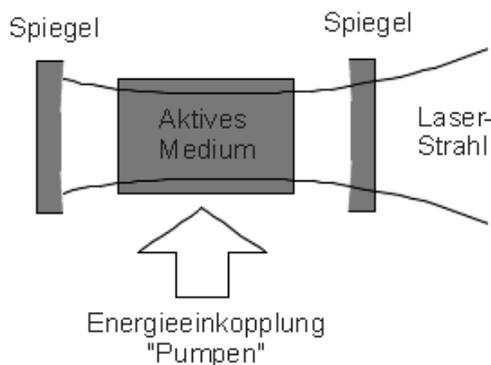


Abb. 3: Funktionsprinzip eines Lasers

Quelle: <http://www.ilt.fraunhofer.de/ilt/php/default.php?web=1&id=100048&lan=ger&dat=2> vom 15.01.2005

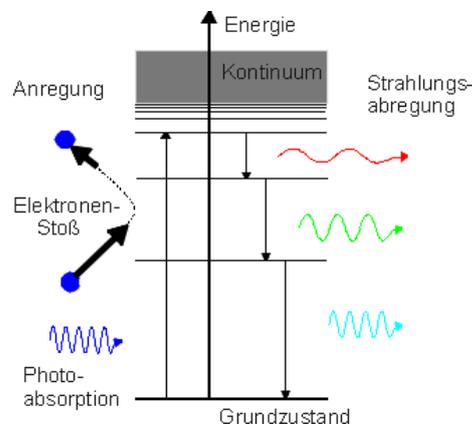


Abb. 4: Stimulierte Emission

Es wird elektrische Energie auf freie Elektronen übertragen, die wiederum ihre Energie durch Stöße gegen die Atome oder Moleküle des aktiven Mediums weitergeben. Diese Form der eingebrachten Strahlung wird absorbiert und die Energie bei einer bestimmten (längeren) Wellenlänge (dem Licht) emittiert.

Die Energie des emittierten Photons ist gleich der Energiedifferenz zwischen den beiden Energieniveaus, zwischen denen gewechselt wurde. Jedoch die Wellenlänge und Frequenz ist nun eine andere und lässt sich, durch Auswahl des aktiven Mediums beeinflussen. Damit die stimulierte Emission die spontane Emission (die sich nicht vermeiden lässt) übertrifft, wird mit Hilfe eines optischen Resonators (im Prinzip eine Spiegelfläche) das emittierte Strahlungsfeld in das emittierende Medium rückgekoppelt. Das Ergebnis ist ein zielgerichteter, phasengleicher (=kohärenter) Lichtstrahl mit geringer spektraler Bandbreite,

stark gebündelt und somit genau definierten Eigenschaften. Dieser Strahl eignet sich nicht nur zur Beleuchtung von Objekten, sondern hat Einzug gefunden in die Materialbearbeitung, Messtechnik, Medizintechnik, Spektroskopie und viele weitere Anwendungsgebiete (vgl. Fraunhofer IFT, 2005).

Laser	Wellenlänge	Leistung	Betriebsart	Aufgabe
Halbleiter-Dioden-Laser				
Einzeleioden	infrarot bis sichtbar	1 mW - 100 mW	kontinuierlicher und gepulster Betrieb	Optoelektronik
Dioden-Laser Barren	infrarot bis sichtbar	bis 100 W	kontinuierlicher und gepulster Betrieb	Pumplichtquelle für Festkörperlaser
Festkörperlaser				
Nd:YAG-Laser	1.06 µm	1 W - 3 kW	kontinuierlicher und gepulster Betrieb	Materialbearbeitung, Messtechnik, Medizin
Rubin-Laser	Rot	einige MW	gepulster Betrieb	Messtechnik, Puls-Holografie
Gas-Laser				
CO ₂ -Laser	10.6 µm	1 W - 40 kW (100 MW im Pulsbetrieb)	kontinuierlicher und gepulster Betrieb	Materialbearbeitung, Medizin, Isotopentrennung
Excimer-Laser	193 nm, 248 nm, 308 nm, 351 nm (und weitere Linien)	1 kW - 100 MW	gepulster Betrieb, Pulslänge 10 ns - 100 ns	Mikrobearbeitung, Laserchemie, Medizin
HeNe-Laser	632.8 nm (prominenteste Linie)	1 mW - 1 W	kontinuierlicher Betrieb	Messtechnik, Holografie
Argon-Ionen-Laser	515 nm - 458 nm (mehrere Linien)	1 mW - 150 W	kontinuierlicher und gepulster Betrieb	Drucktechnik, Pump Laser für Dyelaseranregung Medizin
Farbstofflaser-Laser	infrarot bis UV kontinuierlich (verschiedene Farbstoffe)	1 mW - 1 W	kontinuierlicher und gepulster Betrieb	Messtechnik, Spektroskopie, Medizin

Tab. 1: Übersicht über gebräuchliche Laser mit dem Nd:YAG-Laser, der in der Laserscannmessung Verwendung findet

Quelle: <http://www.ilt.fraunhofer.de/ilt/php/default.php?web=1&id=100048&lan=ger&dat=2> vom 15.01.2005

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Mögliche Emission nach Albert Einstein	4
Abb. 2: Inkohärentes und Kohärentes Licht	5
Abb. 3: Funktionsprinzip eines Lasers	5
Abb. 4: Stimulierte Emission	5

Tabellenverzeichnis:

Tab. 1: Übersicht über gebräuchliche Laser mit dem Nd:YAG-Laser, der in der Laserscannmessung Verwendung findet	6
---	---

Anhang B: Oberflächeninterpolationsverfahren

Zur Interpolation als Teil der Algorithmen zur Filterung von Laserscandaten stehen, je nach verwendeter Software, unterschiedliche Ansätze zur Verfügung:

- Trend-Interpolation
- Natural Neighbors
- Inverse Distance Weighted Interpolation
- Spline Interpolation (minimum curvature)
- Kriging und Lineare Prediktion

Die Basis jedes Interpolationsverfahrens ist die Flächensumation. Die interpolierte Oberfläche wird aus einer Masse von Teilflächen zusammengesetzt (Rasterzellen oder Dreiecksmaschen). Die einzelnen Interpolationsverfahren stellen nun unterschiedliche Ansätze lokaler Verdichtung zu einer lückenlosen Oberfläche dar. Wird die Oberfläche als Raster interpoliert, kann dessen Zellgröße an die jeweilige Aufgabe angepasst werden. Die Verdichtung erfolgt entweder direkt zwischen einigen Stützpunkten (wie bei der Natural-Neighbor-Interpolation) oder mit steuerbarem lokalem Umgriff, der über die direkten Nachbarn hinausgeht.

Trend-Interpolation

Die Trend-Interpolation bedient sich einer polynomialen Regression, um eine Oberfläche über die Stützpunkte des gesamten Untersuchungsgebietes möglichst ideal anzupassen. Hier werden jedoch die Höhen der Stützpunkte nicht zwingend angehalten. Mit Hilfe der polynomialen Regression ist es möglich, „grobe Fehler“ aus dem Datensatz zu eliminieren (Kraus, 2000). Dies ist jedoch kein Interpolationsverfahren im eigentlichen Sinne sondern die Bestimmung einer Trendfläche, die die Oberfläche genähert in Abhängigkeit des Grades des verwendeten Polynoms repräsentiert. Es stehen nun verschiedene Regressionsgrade zur Verfügung:

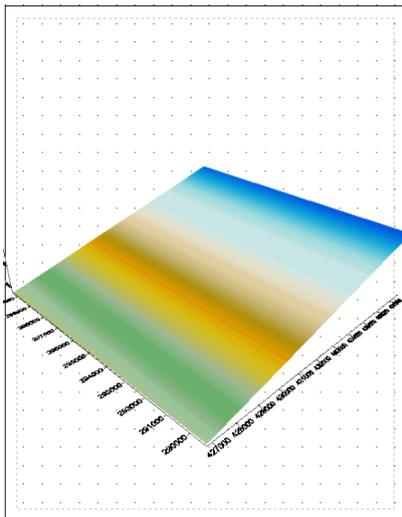


Abb. 5: Lineare Regression:
 $Z(x,y) = A + Bx + Cy$

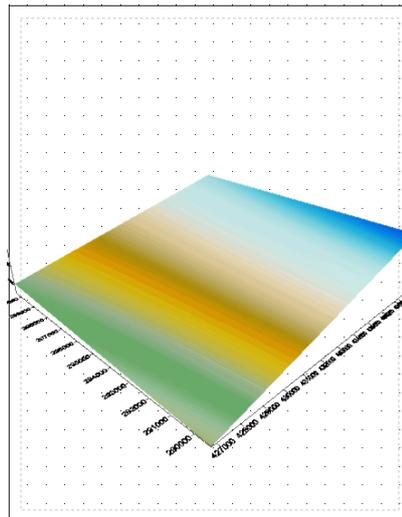


Abb. 6: Bi-Lineare Regression:
 $Z(x,y) = A + Bx + Cy + Dxy$

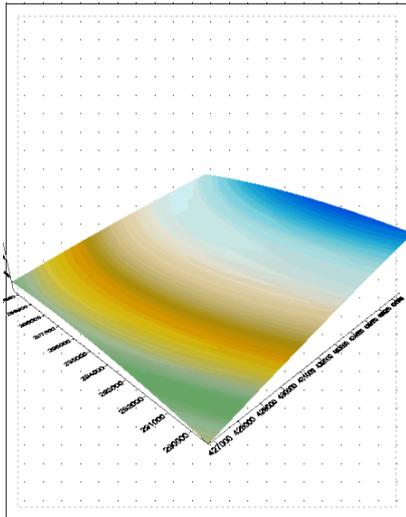


Abb. 7: Polynomiale Regression (quadratisch):
 $Z(x,y) = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2$

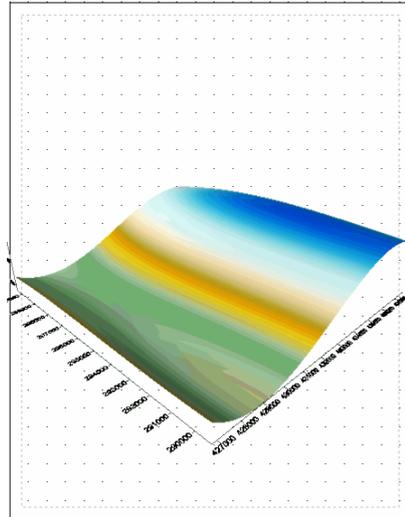


Abb. 8: Polynomiale Regression (kubisch):
 $Z(x,y) = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3$

Alle Abbildungen 1-4 berechnet mit Surfer 8. Die Daten repräsentieren den Gaisberg, eine Gebirgslandschaft östlich von Salzburg (Testdaten zu UNIGISModul5:Geostatistik, 2003)

Im Rahmen der Linearen Prädiktion beziehungsweise der Interpolation nach kleinsten Quadraten wird die Trend-Interpolation verwendet, um den deterministischen Anteil an den Stützpunkthöhen zu eliminieren.

Natural Neighbors:

Die einfachste Möglichkeit einer strengen Oberflächeninterpolation wird mit der Bildung und Verdichtung von Thiessen-Polygonen erreicht. Dabei wird den einzelnen Punkten auf Basis der kürzesten Entfernung zum nächsten Nachbarn eine Fläche zugeordnet und mit der entsprechenden Höhe versehen. Das Resultat ist praktisch ein Blockbild mit im Grundriss unregelmäßigen Blöcken. Die Höhe des zu schätzenden Punktes (zum Beispiel ein Punkt eines regelmäßigen Rasters) wird nun innerhalb einer Fläche, die zwischen drei benachbarten Stützpunkten gebildet wird, mit dem Gewicht der Thiessen-Fläche trianguliert.

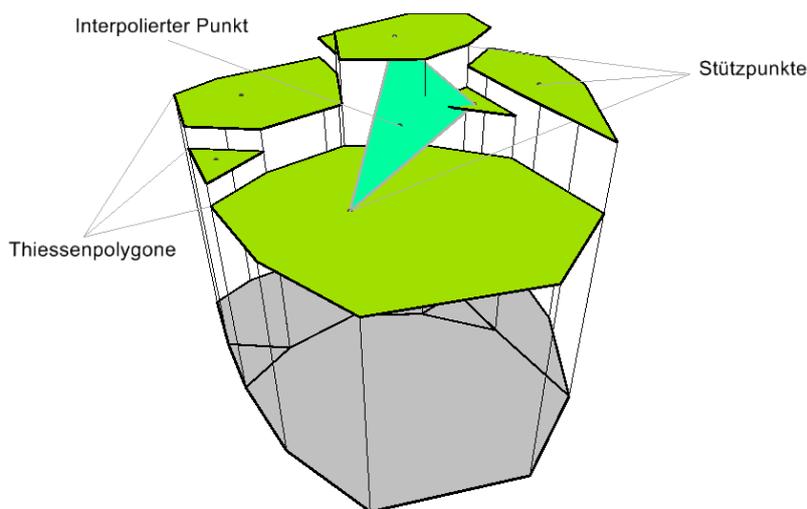


Abb. 9: Natural-Neighbors-Interpolation

Mit diesem Verfahren werden jedoch nur die jeweils drei benachbarten Punkte in die Berechnung eingeführt. Datencluster und Zonen mit lichter Stützpunktbesezung verfälschen das Ergebnis entsprechend. Andererseits ist dieses Verfahren sehr einfach und die Berechnung erfolgt auch bei großen Datenmenge sehr schnell.

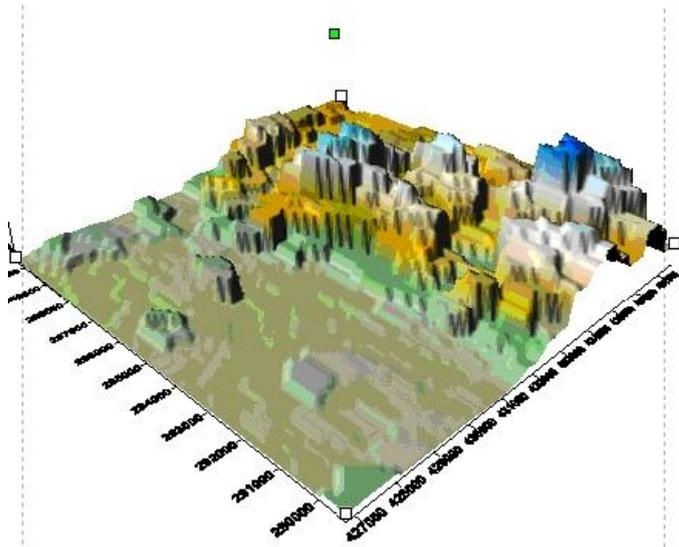


Abb. 10: Natural Neighbor Interpolation gerechnet mit Surfer 8

Inverse Distance of Weighted Interpolation:

Die Methode der Inverse Distance to a Power nutzt lokale Mittelwerte. Das heißt, alle nächsten Nachbarn werden gemittelt. Als Gewichtung wird dabei die inverse geometrische Distanz $1/d_i$ eingeführt:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N (1/d_i) V_i}{\sum_{i=1}^N (1/d_i)}$$

v = zu schätzender Wert
 v_i = Verbesserung
 d_i = Distanzen

Um den Effekt des Einflusses der inversen Distanzen zu verstärken, wird ein Exponent p (Power) eingeführt. Der Wert wird in der Regel zwischen 1 und 3 gewählt. Je höher der p-Wert, desto stärker werden die allernächsten Nachbarn berücksichtigt. Resultat ist dann eine unruhigere Oberfläche.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N (1/d_i^p) V_i}{\sum_{i=1}^N (1/d_i^p)}$$

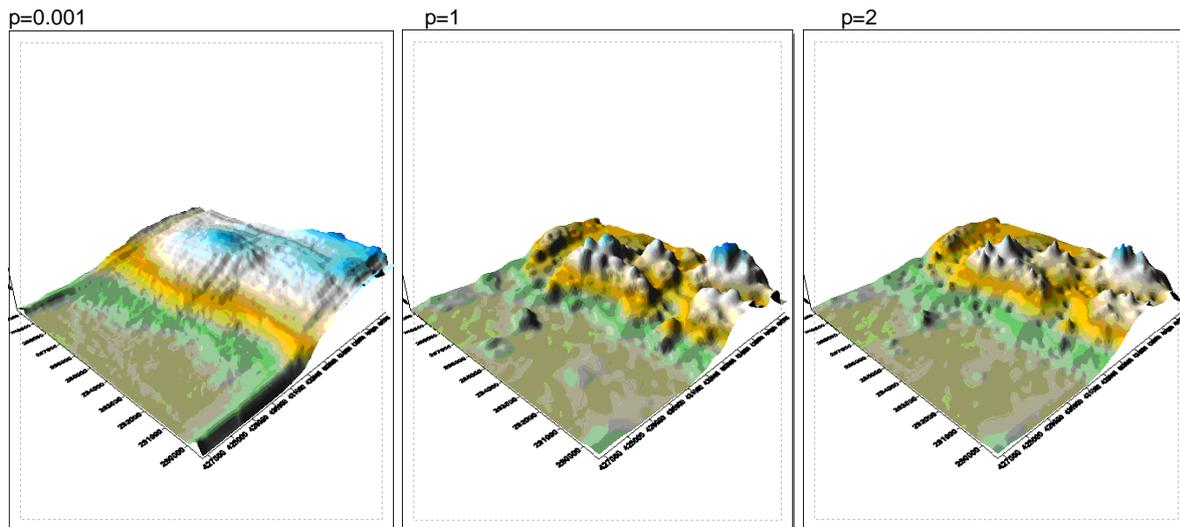


Abb.11: IDW Interpolation gerechnet mit Surfer 8

Allerdings werden Datencluster bei der Gewichtung überbewertet und über Lücken (z.B. wenn Vegetation den Blick zur Erdoberfläche behindert) hinweg interpoliert. Mit einem Suchradius wird die Anzahl der Punkte, die zur Interpolation der Einzelhöhe herangezogen werden soll, reduziert. Hier ist darauf zu achten, den Suchradius der tatsächlichen Stützpunktdichte anzupassen, um Lücken in der Berechnung zu vermeiden. In Abhängigkeit des gewählten Suchradius und der Stützpunktdichte ist die IDW- Interpolation sehr zeitaufwändig, bildet Details aber je nach Powerkoeffizient gut ab.

Spline Interpolation (Minimum Curvature):

Als Spline bezeichnet man ein stückweises Polynom, das stetig ist. Die Lücken zwischen den Stützpunkten werden also lokal von aneinander gereihten Funktionen überbrückt, die optimal und mit möglichst geringer Krümmung an die Stützpunkte der Nachbarschaft angepasst sind. Zwingend ist, dass alle Stützpunkte der Umgebung in die Berechnung eingehen (in der Literatur wird das Verfahren beschrieben wie eine flexible Gummifläche, die über die Stützpunkte gezwungen wird). Voraussetzung ist eine optimale Aufteilung des Untersuchungsgebietes in Segmente, die von Software zu Software verschieden, durch einen Iterationsprozess ermittelt werden.

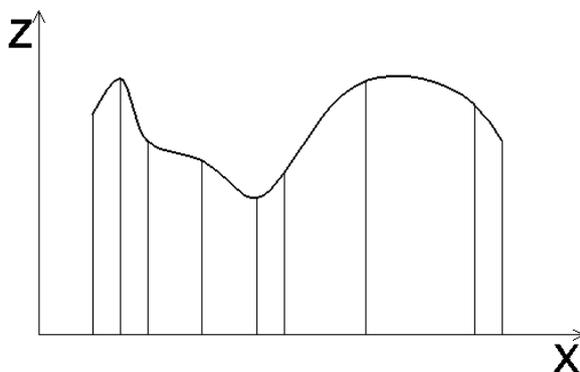


Abb. 12: Spline Interpolation über Stützpunkte

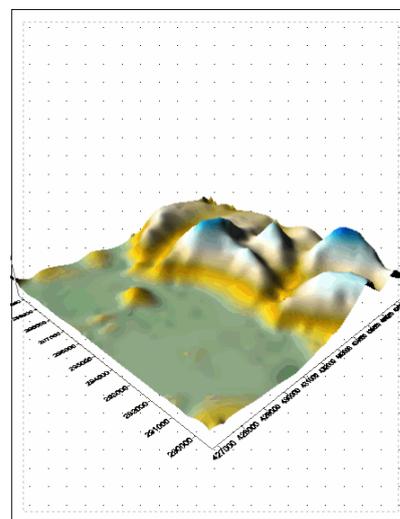


Abb.13: Spline-Interpolation gerechnet mit Surfer 8, Tension=0, Relaxation = 1

Bei der Berechnung der Spline- Oberfläche kann mit der Anzahl der beteiligten Stützpunkte (auch durch die Veränderung des Suchradius um den Stützpunkt), einem Relaxationsfaktor („Weichheit“ des Polynoms, realisiert durch eine Multiplikationskonstante) und einem Tensionsfaktor (eine Art Gewichtungsfaktor, der das jeweilige Polynom stärker über die Stützpunkte zwingt) das Ergebnis der Interpolation gesteuert werden. Im UNIGIS- Skript zum Modul 8 beschreibt Dr. T. Blaschke den Tensionswert als „...Gewichte, die ursprünglich an Stahlseile gehängt wurden, welche die Balken des Schiffsrumpfes umspannen“, (Blaschke T, 2003). Insbesondere ein größerer Umgriff um den aktuellen Stützpunkt gestaltet die Oberfläche homogener. Die Spline Interpolation gilt als approximative Interpolationstechnik und bildet die Stützpunkte nicht zwingend ab.

Kriging und Explorative Variographie

Kriging ist der Oberbegriff einiger geostatistischer Schätzverfahren, die auf Basis von vorab durchgeführten variographischen Analysen eine Oberfläche über eine Anzahl von Stützpunkten interpolieren. Das ordinary Kriging, als eine mögliche einfache Variante des Kriging, wird auch als *best linear unbiased Estimator* bezeichnet. Hierbei steht *best* für die Minimierung der Fehlervarianzen zwischen einem Semivariogramm und dem zu schätzenden Punkt, *linear* für die gewichtete lineare gemeinsame Verwendung der Stützpunkthöhen und *unbiased* (unverzerrt) für das Bestreben, den mittleren Fehler der Schätzungen gegen 0 zu bringen.

Grundlage für die Schätzung der Oberfläche ist die Annahme, dass die Stützpunkte in ihrer Verteilung im Raum einer so genannten Autokorrelation unterliegen. Das heißt, die zu schätzende Oberfläche ist nicht das Ergebnis eines kalkulierten Prozesses (oder dieser Prozess ist in seinen Auswirkungen nicht bekannt), aber man geht davon aus, dass die Stützpunkte der Oberfläche einen räumlichen Zusammenhang besitzen.

Diese räumliche Abhängigkeit betrifft jedoch nur die Distanz der Stützpunkte untereinander und wird als Grundlage für die spätere Interpolation benötigt. Das Maß für die räumliche Korrelation ist das Semivariogramm, welches in einem interaktiven Verfahren gewonnen wird. Es wird ein empirisches Semivariogramm aus der Gesamtheit der Daten des Untersuchungsgebietes abgeleitet.

Punktpaare innerhalb eines festgelegten Abstandes (Lagwidth) werden in Abhängigkeit der Anzahl der Stützpunkte gebildet (von der Software wird in der Regel eine Lagwidth von 1/3 des Untersuchungsgebietes angeboten).

Die mittlere Semivarianz innerhalb eines Lag wird bestimmt durch:

$$\gamma(h) = 1/(2*n) * \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i - h_k)]^2$$

- $\gamma(h)$ = Ordinate = mittlere Semivarianz innerhalb eines Lag im Abstand h
- z = Wert der Einzelmessung
- x_i = Einzelmessung der benachbarten Punkte
- h_k = Abszisse = Lagwidth oder Abstandsklasse
- n = Gesamtzahl der Messungen

(Quelle: *Spatial Analyst Reference, ArcMap 8.2, How kriging works,2003*)

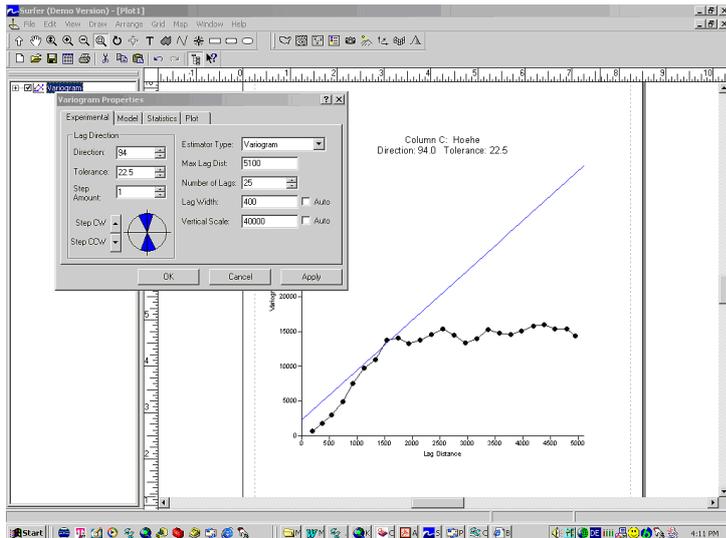


Abb. 14: Einzelnes empirisches Semivariogramm gerechnet mit Surfer 8

Die gesamte Variographie ist ein iterativer Prozess, bei dem die einzelnen Komponenten Schritt für Schritt entwickelt werden. Die optimale Lag Width und der Nugget-Effekt (ein Maß für Messfehler und Werteschwankungen unterhalb der Erfassungsgenauigkeit) wird bei omnidirektionaler Variographie bestimmt. Im Anschluss wird mit eingeschränktem Öffnungswinkel (zum Beispiel ein Öffnungswinkel von 22.5°) nach anisotropen (richtungsabhängigen) Korrelationen in alle Richtungen gesucht. Dieser Vorgang bedarf der systematischen Wiederholung der Variographie, und die Beurteilung der ermittelten Parameter erfordert eine intensive Auseinandersetzung mit der Thematik und den möglichen auftretenden Phänomenen.

Das Ergebnis dieses empirischen Prozesses wird, ausgehend von der Annahme, dass das empirische Semivariogramm für das gesamte Untersuchungsgebiet repräsentativ ist, durch ein theoretisches Semivariogramm (zum Beispiel die Kombination einer Linearen, Gauss'schen oder Exponentiellen Funktion) ersetzt, dass die Lücken zwischen den empirischen Varianzen überbrückt. Da man davon ausgeht, dass nahe beieinander liegende Punkte stärker korrelieren als weiter entfernte, stellt sich das Semivariogramm als monoton ansteigend dar.

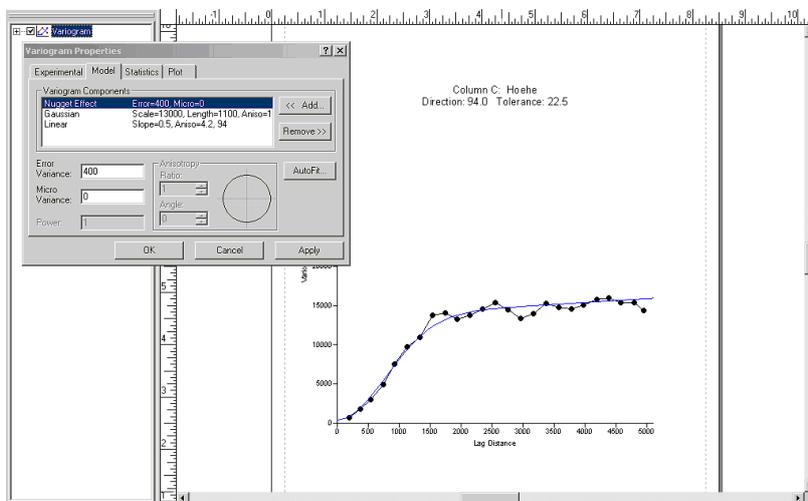


Abb. 15: Theoretisches, modelliertes Variogramm gerechnet mit Surfer 8

Erreicht das Semivariogramm asymptotisch den Wert der maximalen Varianz, stellt dies die äußerste Grenze der räumlichen Korrelation dar. Jenseits dieser Grenze sind die Stützpunkte des Untersuchungsgebietes nicht mehr voneinander abhängig. Diese Grenze wird als *Sill* (Schwelle) bezeichnet.

Beim Kriging werden nun innerhalb eines bestimmten Gebiets die geschätzten Punkte $Z(S_i)$ in ein regelmäßiges Raster interpoliert.

$$\bar{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i)$$

S_0 = Stützpunkt

$Z(S_i)$ = Stützpunkthöhe

λ_i = unbekanntes Gewicht der Einzelmessung

S_0 = zu schätzender Punkt der Oberfläche

\bar{Z} = geschätzte Höhe am Punkt S_0

(Quelle: *Spatial Analyst Reference, ArcMap 8.2, Seite 75,2003*)

Das Gewicht der Einzelmessung λ_i (beim Inverse Distance Ansatz resultiert dieses Gewicht aus dem Abstand der benachbarten Punkte) ergibt sich aus den statistischen Abständen der beteiligten Nachbarn (x_1, x_2, \dots, x_n) und den Ergebnissen des Semivariogramms.

Das Kriging ist von seiner Handhabung sehr aufwändig und rechenintensiv und eignet sich im Grunde nicht zur Interpolation von Geländemodellen (nicht zuletzt wegen der großen Anzahl der Stützpunkte). Die Erfahrungen aus dem Umgang mit der Variographie sind jedoch nützlich bei weiterführenden Filterungen mit Blick auf anisotrope Phänomene.

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Lineare Regression.....	7
Abb. 2: Bi-Lineare Regression.....	7
Abb. 3: Polynomiale Regression (quadratisch)	8
Abb. 4: Polynomiale Regression (kubisch).....	8
Abb. 5: Natural-Neighbors-Interpolation.....	8
Abb. 6: Natural Neighbor Interpolation gerechnet mit Surfer 8	9
Abb. 7: IDW Interpolation gerechnet mit Surfer 8.....	10
Abb. 8: Spline Interpolation über Stützpunkte.....	10
Abb. 9: Spline-Interpolation gerechnet mit Surfer 8, Tension=0, Relaxation = 1	10
Abb. 10: Einzelnes empirisches Semivariogramm gerechnet mit Surfer 8	12
Abb. 11: Theoretisches, modelliertes Variogramm gerechnet mit Surfer 8.....	12

Anhang C: VBA-Code zur automatisierten Berechnung eines Geländemodells

Die Berechnung des Geländemodells als hierarchische Filterung und Interpolation ist ein iterativer Prozess mit sich wiederholenden Berechnungsschritten und Datentransformationen. Die einzelnen Interpolationen und Rastertransformationen erfordern einen erheblichen Rechenaufwand, der jeweils mehrere Stunden in Anspruch nimmt. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, solche Berechnungen makrogesteuert abzuwickeln. Innerhalb der ESRI- Software ermöglicht eine Visual- Basic- Umgebung die Programmierung eines solchen Ablaufs. Dabei werden Objekte aus dem Softwarekernel als Objekte in den Programmcode eingearbeitet. Dies ermöglicht eine effizientere Datenverarbeitung, da Visualisierungsschritte und Datenzwischenstufen übergangen werden können.

In Zukunft werden so genannte Modelbuilder die Möglichkeit bieten, sich wiederkehrende Berechnungsvorgänge intuitiv als graphischen Workflow zu modellieren, testen, verbessern und letztendlich als Produktionsmittel einzusetzen. In der Fernerkundungssoftware IDRISI oder Erdas Imagine sind diese Modelbuilder bereits realisiert und in der neuen Generation der ESRI- Produkte ebenfalls. Mit diesen Werkzeugen erübrigt sich eine aufwändige Programmierung auf Makroebene, die das folgende Beispiel darstellt.

Das Makro arbeitet das Ablaufdiagramm Abbildung 38 in Kapitel 6.1 iterativ ab. Ein Formular zur Parametersteuerung kann nun abschließend entworfen werden, um die Steuerung des Makros intuitiv zu gestalten.

'Batch-Prozess zum Steuern der SpatialAnalyst und 3D-Analyst-Funktionen zum Interpolieren
'eines Geländemodells aus Lidardaten
'Als Input dient ein 3D-PointShapeFile mit den Spalten X,Y,Z,Ref

```
Sub spatial_dgmbatch()  
    spatial_lic.GetSpatialAnalystLicense
```

```
    Dim sPath As String  
    Dim sFilename As String  
    Dim sFieldName As String
```

```
    Dim sCellsize1 As Double  
    Dim sCellsize2 As Double  
    Dim sCellsize3 As Double  
    Dim sCellsize4 As Double  
    Dim sCellsize5 As Double  
    Dim sDGMCellsize As Double
```

```
    Dim pDGM20 As IRaster  
    Dim pDGM10 As IRaster  
    Dim pDGM5 As IRaster  
    Dim pDGM1 As IRaster  
    Dim pDGM05 As IRaster
```

```
    Set pDGM20 = New Raster  
    Set pDGM10 = New Raster  
    Set pDGM5 = New Raster  
    Set pDGM1 = New Raster  
    Set pDGM05 = New Raster
```

.In einer späteren Version wird zu diesen Parametern eine Eingabemaske erstellt:

```
sPath = "f:\L1035_11\  
sFilename = "XYL1035_11"  
sCellsize1 = 20  
sCellsize2 = 10  
sCellsize3 = 5  
sCellsize4 = 1  
sCellsize5 = 0.5  
sDGMCellsize = 0.25  
sFieldName = "Z"
```

' Eine AnalysisUmgebung wird Initialisiert
' spatial_enviroment.SetAnalysisEnvironment

' Erstellung eines RasterMaker operator
Dim pRMakerOp As IRasterMakerOp
Set pRMakerOp = New RasterMakerOp
Dim pEnv As IRasterAnalysisEnvironment
Set pEnv = pRMakerOp

' Bereitstellung des output workspace für Rasterdaten
Dim pWS As IWorkspace
Dim pWSF As IWorkspaceFactory
Set pWSF = New RasterWorkspaceFactory
Set pWS = pWSF.OpenFromFile(sPath, 0)
Set pEnv.OutWorkspace = pWS

' Initialisierung der aktuellen ArcMap-Umgebung
Dim pMxDoc As IMxDocument
Set pMxDoc = ThisDocument
Dim pMap As IMap
Set pMap = pMxDoc.FocusMap

' Bereitstellung des output workspace für ein Shapefile
Dim pFWFact As IWorkspaceFactory
Dim pFeatureWorkspace As IFeatureWorkspace

Set pFWFact = New ShapefileWorkspaceFactory
Set pFeatureWorkspace = pFWFact.OpenFromFile(sPath, 0)

' Öffnen des Shapefile mit den Originaldaten
Dim pFLayer As IFeatureLayer
Set pFLayer = New FeatureLayer
Set pFLayer.FeatureClass = pFeatureWorkspace.OpenFeatureClass(sFilename)
pFLayer.Name = pFLayer.FeatureClass.AliasName

' Einlesen des Shapefile aus der Map-Umgebung
Dim pFClass As IFeatureClass
Set pFClass = pFLayer.FeatureClass

' Zuordnung des FeatureClassDescriptor aus den Shape-Feldern
Dim pFDescr As IFeatureClassDescriptor
Set pFDescr = New FeatureClassDescriptor
pFDescr.Create pFClass, Nothing, sFieldName

' Bildung der Datenpyramiden:
' 1. Stufe: Zellgröße 20m, Kreisförmig und jeden Ausgangspunkt

' Erstellung eines sog. Spatial operator (Spatial Analyst: Neighborhood Statistics)
Dim pNeighbOp As INeighborhoodOp
Set pNeighbOp = New RasterNeighborhoodOp

' Festlegen der Zellengröße
Set pEnv = pNeighbOp
pEnv.SetCellSize esriRasterEnvValue, sDGMCellsize

' Parameter zur neighborhood statistics
Dim pHood As IRasterNeighborhood
Set pHood = New RasterNeighborhood
pHood.SetCircle sCellsize1, esriUnitsMap

' Durchführung der Spatial operation: Ergebnis ist ein neues Raster
Set pDGM20 = pNeighbOp.FocalStatistics(pFDescr, esriGeoAnalysisStatsMinimum, pHood, True)

' Das Raster wird der Map zugefügt
Dim pDGM20Layer As IRasterLayer
Set pDGM20Layer = New RasterLayer

pDGM20Layer.CreateFromRaster pDGM20
pDGM20Layer.Name = "DGM20_NbrMin_of_XYL1035_211_z"
pMap.AddLayer pDGM20Layer

' Bildung der Datenpyramiden:
' 2. Stufe: Zellgröße 10m, Kreisförmig und jeden Ausgangspunkt

' Erstellung eines sog. Spatial operator (Spatial Analyst: Neighborhood Statistics)
Set pNeighbOp = New RasterNeighborhoodOp

' Festlegen der Zellengröße
Set pEnv = pNeighbOp
pEnv.SetCellSize esriRasterEnvValue, sDGMCellsize

' Parameter zur neighborhood statistics
Set pHood = New RasterNeighborhood
pHood.SetCircle sCellsize2, esriUnitsMap

' Durchführung der Spatial operation: Ergebnis ist ein neues Raster
Set pDGM10 = pNeighbOp.FocalStatistics(pFDescr, esriGeoAnalysisStatsMinimum, pHood, True)

' Das Raster wird der Map zugefügt
Dim pDGM10Layer As IRasterLayer
Set pDGM10Layer = New RasterLayer

pDGM10Layer.CreateFromRaster pDGM10
pDGM10Layer.Name = "DGM10_NbrMin_of_XYL1035_211_z"
pMap.AddLayer pDGM10Layer

' Bildung der Datenpyramiden:
' 3. Stufe: Zellgröße 5m, Kreisförmig und jeden Ausgangspunkt

' Erstellung eines sog. Spatial operator (Spatial Analyst: Neighborhood Statistics)
Set pNeighbOp = New RasterNeighborhoodOp

' Festlegen der Zellengröße
Set pEnv = pNeighbOp
pEnv.SetCellSize esriRasterEnvValue, sDGMCellsize

' Parameter zur neighborhood statistics
Set pHood = New RasterNeighborhood
pHood.SetCircle sCellsize3, esriUnitsMap

' Durchführung der Spatial operation: Ergebnis ist ein neues Raster
Set pDGM5 = pNeighbOp.FocalStatistics(pFDescr, esriGeoAnalysisStatsMinimum, pHood, True)

' Das Raster wird der Map zugefügt
Dim pDGM5Layer As IRasterLayer
Set pDGM5Layer = New RasterLayer

pDGM5Layer.CreateFromRaster pDGM5
pDGM5Layer.Name = "DGM5_NbrMin_of_XYL1035_211_z"
pMap.AddLayer pDGM5Layer

' Bildung der Datenpyramiden:

' 4. Stufe: Zellgröße 1m, Kreisförmig und jeden Ausgangspunkt

' Erstellung eines sog. Spatial operator (Spatial Analyst: Neighborhood Statistics)

Set pNeighbOp = New RasterNeighborhoodOp

' Festlegen der Zellengröße

Set pEnv = pNeighbOp

pEnv.SetCellSize esriRasterEnvValue, sDGMCellsize

' Parameter zur neighborhood statistics

Set pHood = New RasterNeighborhood

pHood.SetCircle sCellsize4, esriUnitsMap

' Durchführung der Spatial operation: Ergebnis ist ein neues Raster

Set pDGM1 = pNeighbOp.FocalStatistics(pFDescr, esriGeoAnalysisStatsMinimum, pHood, True)

' Das Raster wird der Map zugefügt

Dim pDGM1Layer As IRasterLayer

Set pDGM1Layer = New RasterLayer

pDGM1Layer.CreateFromRaster pDGM1

pDGM1Layer.Name = "DGM1_NbrMin_of_XYL1035_211_z"

pMap.AddLayer pDGM1Layer

' Bildung der Datenpyramiden:

' 5. Stufe: Zellgröße 0.5m, Kreisförmig und jeden Ausgangspunkt

' Erstellung eines sog. Spatial operator (Spatial Analyst: Neighborhood Statistics)

Set pNeighbOp = New RasterNeighborhoodOp

' Festlegen der Zellengröße

Set pEnv = pNeighbOp

pEnv.SetCellSize esriRasterEnvValue, sDGMCellsize

' Parameter zur neighborhood statistics

Set pHood = New RasterNeighborhood

pHood.SetCircle sCellsize5, esriUnitsMap

' Durchführung der Spatial operation: Ergebnis ist ein neues Raster

Set pDGM05 = pNeighbOp.FocalStatistics(pFDescr, esriGeoAnalysisStatsMinimum, pHood, True)

' Das Raster wird der Map zugefügt

Dim pDGM05Layer As IRasterLayer

Set pDGM05Layer = New RasterLayer

pDGM05Layer.CreateFromRaster pDGM05

pDGM05Layer.Name = "DGM05_NbrMin_of_XYL1035_211_z"

pMap.AddLayer pDGM05Layer

' Vorbereitung zur 1. Iteration

' Übergabe der Rasterdaten an ein Pointshapefile

' Erstellung FeatureClassDescriptor unter Verwendung eines value field

Dim pGeoDs As IGeoDataset

Set pGeoDs = pDGM20Layer.Raster

Dim pRDescr As IRasterDescriptor

Set pRDescr = New RasterDescriptor

sFieldName = "Value"

pRDescr.Create pGeoDs, Nothing, sFieldName

```

' Erstellung eines sog. conversion operator (3D-Analyst: convert raster to feature)
Dim pConversionOp As IConversionOp
Set pConversionOp = New RasterConversionOp

' Durchführung der conversion to feature
Dim pOutFCClass As IFeatureClass
sFilename = "Basis_zu_DGM_20.shp"
Set pFCClass = pConversionOp.RasterDataToPointFeatureData(pRDescr, pFeatureWorkspace,
sFilename)

' Das Shapefile wird der Map zugefügt
Set pFLayer = New FeatureLayer
Set pFLayer.FeatureClass = pFCClass
pFLayer.Name = "Basis_zu_DGM_20"
pMap.AddLayer pFLayer

sFilename = "Basis_zu_DGM_20_3d.shp"
-----
' Aufruf des Moduls "create_shape3d
Dim pFCClassneu As IFeatureClass
Set pFCClassneu = create_shape3d.createShape3d(sPath, sFilename, esriGeometryPoint)

' Aufruf des Moduls "Raster_to_shape_3d
Dim pFCClass3D As IFeatureClass
Set pFCClass3D = Raster_to_shape3d.ExtractValueTOPointFeatureClass(pDGM20, pFCClassneu,
pFCClass, "Grid_Code")

' Das Shapefile wird der Map zugefügt
Set pFLayer = New FeatureLayer
Set pFLayer.FeatureClass = pFCClass3D
pFLayer.Name = "Basis_zu_DGM_25_3d"
pMap.AddLayer pFLayer

'1.Iteration: Eine IDW-Oberfläche wird interpoliert
'Initialisierung eines Interpolations-Operators (3D-Analyst:Interpolation Inverse Distance to Power)
Dim pIntOp As IInterpolationOp
Set pIntOp = New RasterInterpolationOp
Dim pRadius As IRasterRadius
Set pRadius = New RasterRadius
pRadius.SetVariable 2
Set pEnv = pIntOp

' Durchführung der Interpolation
pEnv.SetCellSize esriRasterEnvValue, sDGMCellsize
pFDescr.Create pFLayer.FeatureClass, Nothing, "Shape"

Dim pIDWRaster As IRaster
Set pIDWRaster = pIntOp.IDW(pFDescr, 1, pRadius)

' Das Raster wird der Map zugefügt
Dim pIDWRLayer As IRasterLayer
Set pIDWRLayer = New RasterLayer

pIDWRLayer.CreateFromRaster pIDWRaster
pIDWRLayer.Name = "IDW_of_DGM25"
pMap.AddLayer pIDWRLayer
-----
' Die zweite Datenpyramidenebene [DGM10_NbrMin_of_XYL1035_211_z.grd] wird von der IDW-
Oberfläche abgezogen
' Erstellung eines mathoperator (Spatial-Analyst: rastercalculator)
Dim pMathOp As IMathOp
Set pMathOp = New RasterMathOps

```

```

' Durchführung der Spatial operation: Ergebnis ist ein neues Raster
Dim pDiffRaster As IRaster
Set pDiffRaster = pMathOp.Minus(pIDWRLayer.Raster, pDGM10Layer.Raster)

Dim pDiffLayer As IRasterLayer
Set pDiffLayer = New RasterLayer

pDiffLayer.CreateFromRaster pDiffRaster
pDiffLayer.Name = "Diff_IDW_DGM25-DGM10"
pMap.AddLayer pDiffLayer
-----
' Reklassifizieren des Ergebnisses: alle Werte größer oder kleiner +-1
' werden auf NoData gesetzt

' Erstellen eines Raster-Descriptor und Zuordnung des passenden Feldes als Ausgangswert für die
' Klassifikation
Set pGeoDs = pDiffLayer.Raster
Dim pRD As IRasterDescriptor
Set pRD = New RasterDescriptor
pRD.Create pGeoDs, New QueryFilter, "Value"
Set pGeoDs = pRD

'Einrichten eines Spatial-Operators (Spatial-Analyst:Reclassify)
Dim pReclassOp As IReclassOp
Set pReclassOp = New RasterReclassOp

' Durchführen der Reklassifizierung
Dim pRemap As IRemap
Dim pSRemap As INumberRemap
Set pSRemap = New NumberRemap
pSRemap.MapRangeToNoData -1000, -1
pSRemap.MapRange -0.9999999, 1, 1
pSRemap.MapRangeToNoData 1, 1000
Set pRemap = pSRemap

' Perform Spatial operation
Dim RecRaster As IRaster
Set RecRaster = pReclassOp.ReclassByRemap(pGeoDs, pRemap, False)

' Add it into ArcMap
Dim pRecRLayer As IRasterLayer
Set pRecRLayer = New RasterLayer
pRecRLayer.CreateFromRaster RecRaster
pMap.AddLayer pRecRLayer
-----
' Vorbereitung zur 2.Iteration: Aufbauend auf dem Ergebnis der ersten Klassifikation
' wird nun mit der Höheninformation der zweiten Datenpyramide ein neues 3D-Shape errechnet.
'
' Übergabe der Rasterdaten an ein Pointshapefile
' Erstellung FeatureClassDescriptor unter Verwendung eines value field
Set pGeoDs = pRecRLayer.Raster
Set pRDescr = New RasterDescriptor
sFieldName = "Value"
pRDescr.Create pGeoDs, Nothing, sFieldName

' Erstellung eines sog. conversion operator (3D-Analyst: convert raster to feature)
Set pConversionOp = New RasterConversionOp

```

```
' Durchführung der conversion to feature
sFilename = "Basis_zu_DGM_20-10.shp"
Set pFClass = pConversionOp.RasterDataToPointFeatureData(pRDescr, pFeatureWorkspace,
sFilename)
```

```
' Das Shapefile wird der Map zugefügt
Set pFLayer = New FeatureLayer
Set pFLayer.FeatureClass = pFClass
pFLayer.Name = "Basis_zu_DGM_20-10"
pMap.AddLayer pFLayer
sFilename = "Basis_zu_DGM_20-10_3d.shp"
```

```
-----
' Aufruf des Moduls "create_shape3d
Set pFClassneu = create_shape3d.createShape3d(sPath, sFilename, esriGeometryPoint)
```

```
' Aufruf des Moduls "Raster_to_shape_3d
Set pFClass3D = Raster_to_shape3d.ExtractValueTOPointFeatureClass(pDGM10, pFClassneu,
pFClass, "Grid_Code")
```

```
' Das Shapefile wird der Map zugefügt
Set pFLayer = New FeatureLayer
Set pFLayer.FeatureClass = pFClass3D
pFLayer.Name = "Basis_zu_DGM_20-10_3d"
pMap.AddLayer pFLayer
```

```
-----
'2.Iteration: Eine IDW-Oberfläche wird interpoliert
'Initialisierung eines Interpolations-Operators (3D-Analyst:Interpolation Inverse Distance to Power)
Set pIntOp = New RasterInterpolationOp
Set pRadius = New RasterRadius
pRadius.SetVariable 2
Set pEnv = pIntOp
```

```
' Durchführung der Interpolation
pEnv.SetCellSize esriRasterEnvValue, sDGMCellsize
pFDescr.Create pFLayer.FeatureClass, Nothing, "Shape"
```

```
Set pIDWRaster = pIntOp.IDW(pFDescr, 1, pRadius)
```

```
' Das Raster wird der Map zugefügt
Set pIDWRLayer = New RasterLayer
```

```
pIDWRLayer.CreateFromRaster pIDWRaster
pIDWRLayer.Name = "IDW_of_DGM20-10"
pMap.AddLayer pIDWRLayer
```

```
-----
' Die dritte Datenpyramidenebene [DGM5_NbrMin_of_XYL1035_211_z.grd] wird von der IDW-
Oberfläche
```

```
' abgezogen
```

```
' Erstellung eines mathoperator (Spatial-Analyst: rastercalculator)
Set pMathOp = New RasterMathOps
```

```
' Durchführung der Spatial operation: Ergebnis ist ein neues Raster
Set pDiffRaster = pMathOp.Minus(pIDWRLayer.Raster, pDGM5Layer.Raster)
Set pDiffLayer = New RasterLayer
```

```
pDiffLayer.CreateFromRaster pDiffRaster
pDiffLayer.Name = "Diff_IDW_DGM20-10-DGM5"
pMap.AddLayer pDiffLayer
```

```

-----
' Reklassifizieren des Ergebnisses: alle Werte größer oder kleiner +-1
' werden auf NoData gesetzt

' Erstellen eines Raster-Discriptor und Zuordnung des passenden Feldes als Ausgangswert für die
' Klassifikation
Set pGeoDs = pDiffLayer.Raster
Set pRD = New RasterDescriptor
pRD.Create pGeoDs, New QueryFilter, "Value"
Set pGeoDs = pRD

'Einrichten eines Spatial-Operators (Spatial-Analyst:Reclassify)
Set pReclassOp = New RasterReclassOp

' Durchführen der Reklassifizierung
Set pSRemap = New NumberRemap
pSRemap.MapRangeToNoData -1000, -1
pSRemap.MapRange -0.9999999, 1, 1
pSRemap.MapRangeToNoData 1, 1000
Set pRemap = pSRemap

' Perform Spatial operation
Set RecRaster = pReclassOp.ReclassByRemap(pGeoDs, pRemap, False)

' Add it into ArcMap
Set pRecRLayer = New RasterLayer
pRecRLayer.CreateFromRaster RecRaster
pMap.AddLayer pRecRLayer
-----
' Vorbereitung zur 3. Iteration: Aufbauend auf dem Ergebnis der zweiten Klassifikation
' wird nun mit der Höheninformation der dritten Datenpyramide ein neues 3D-Shape errechnet.
-----
' Übergabe der Rasterdaten an ein Pointshapefile
' Erstellung FeatureClassDescriptor unter Verwendung eines value field
Set pGeoDs = pRecRLayer.Raster
Set pRDescr = New RasterDescriptor
sFieldName = "Value"
pRDescr.Create pGeoDs, Nothing, sFieldName

' Erstellung eines sog. conversion operator (3D-Analyst: convert raster to feature)
Set pConversionOp = New RasterConversionOp

' Durchführung der conversion to feature
sFilename = "Basis_zu_DGM_20-10-5.shp"
Set pFClass = pConversionOp.RasterDataToPointFeatureData(pRDescr, pFeatureWorkspace,
sFilename)

' Das Shapefile wird der Map zugefügt
Set pFLayer = New FeatureLayer
Set pFLayer.FeatureClass = pFClass
pFLayer.Name = "Basis_zu_DGM_20-10-5"
' pMap.AddLayer pFLayer
sFilename = "Basis_zu_DGM_20-10-5_3d.shp"
-----
' Aufruf des Moduls "create_shape3d
Set pFClassneu = create_shape3d.createShape3d(sPath, sFilename, esriGeometryPoint)

' Aufruf des Moduls "Raster_to_shape_3d
Set pFClass3D = Raster_to_shape3d.ExtractValueTOPointFeatureClass(pDGM5, pFClassneu,
pFClass, "Grid_Code")

```

```
' Das Shapefile wird der Map zugefügt
Set pFLayer = New FeatureLayer
Set pFLayer.FeatureClass = pFClass3D
pFLayer.Name = "Basis_zu_DGM_20-10-5_3d"
pMap.AddLayer pFLayer
```

```
-----
'3.Iteration: Eine IDW-Oberfläche wird interpoliert
'Initialisierung eines Interpolations-Operators (3D-Analyst:Interpolation Inverse Distance to Power)
Set pIntOp = New RasterInterpolationOp
Set pRadius = New RasterRadius
pRadius.SetVariable 2
Set pEnv = pIntOp
```

```
' Durchführung der Interpolation
pEnv.SetCellSize esriRasterEnvValue, sDGMCellsize
pFDescr.Create pFLayer.FeatureClass, Nothing, "Shape"
```

```
Set pIDWRaster = pIntOp.IDW(pFDescr, 2, pRadius) 'hier wird zum ersten mal mit einem
Powerparameter von 2 gerechnet
```

```
' Das Raster wird der Map zugefügt
Set pIDWRLayer = New RasterLayer
```

```
pIDWRLayer.CreateFromRaster pIDWRaster
pIDWRLayer.Name = "IDW_of_DGM25"
pMap.AddLayer pIDWRLayer
```

```
-----
' Die vierte Datenpyramidenebene [DGM1_NbrMin_of_XYL1035_211_z.grd] wird von der IDW-
Oberfläche
```

```
' abgezogen
' Erstellung eines mathoperator (Spatial-Analyst: rastercalculator)
Set pMathOp = New RasterMathOps
```

```
' Durchführung der Spatial operation: Ergebnis ist ein neues Raster
Set pDiffRaster = pMathOp.Minus(pIDWRLayer.Raster, pDGM1Layer.Raster)
Set pDiffLayer = New RasterLayer
```

```
pDiffLayer.CreateFromRaster pDiffRaster
pDiffLayer.Name = "Diff_IDW_DGM20-10-5"
pMap.AddLayer pDiffLayer
```

```
-----
' Reklassifizieren des Ergebnisses: alle Werte größer oder kleiner +-1
' werden auf NoData gesetzt
```

```
' Erstellen eines Raster-Descriptor und Zuordnung des passenden Feldes als Ausgangswert für die
' Klassifikation
Set pGeoDs = pDiffLayer.Raster
Set pRD = New RasterDescriptor
pRD.Create pGeoDs, New QueryFilter, "Value"
Set pGeoDs = pRD
```

```
'Einrichten eines Spatial-Operators (Spatial-Analyst:Reclassify)
Set pReclassOp = New RasterReclassOp
```

```
' Durchführen der Reklassifizierung
Set pSRemap = New NumberRemap
pSRemap.MapRangeToNoData -1000, -0.5
pSRemap.MapRange -0.4999999, 0.5, 1
pSRemap.MapRangeToNoData 0.5000001, 1000
Set pRemap = pSRemap
```

```

' Perform Spatial operation
Set RecRaster = pReclassOp.ReclassByRemap(pGeoDs, pRemap, False)

' Add it into ArcMap
Set pRecRLayer = New RasterLayer
pRecRLayer.CreateFromRaster RecRaster
pMap.AddLayer pRecRLayer
-----
' Vorbereitung zur 4. Iteration: Aufbauend auf dem Ergebnis der dritten Klassifikation
' wird nun mit der Höheninformation der vierten Datene pyramide ein neues 3D-Shape errechnet.
-----
' Übergabe der Rasterdaten an ein Pointshapefile
' Erstellung FeatureClassDescriptor unter Verwendung eines value field
Set pGeoDs = pRecRLayer.Raster
Set pRDescr = New RasterDescriptor
sFieldName = "Value"
pRDescr.Create pGeoDs, Nothing, sFieldName

' Erstellung eines sog. conversion operator (3D-Analyst: convert raster to feature)
Set pConversionOp = New RasterConversionOp

' Durchführung der conversion to feature
sFilename = "Basis_zu_DGM_20-10-5-1.shp"
Set pFClass = pConversionOp.RasterDataToPointFeatureData(pRDescr, pFeatureWorkspace,
sFilename)

' Das Shapefile wird der Map zugefügt
Set pFLayer = New FeatureLayer
Set pFLayer.FeatureClass = pFClass
' pFLayer.Name = "Basis_zu_DGM_20-10-5-1"
pMap.AddLayer pFLayer
sFilename = "Basis_zu_DGM_20-10-5-1_3d.shp"
-----
' Aufruf des Moduls "create_shape3d"
Set pFClassneu = create_shape3d.createShape3d(sPath, sFilename, esriGeometryPoint)

' Aufruf des Moduls "Raster_to_shape_3d"
Set pFClass3D = Raster_to_shape3d.ExtractValueTOPointFeatureClass(pDGM1, pFClassneu,
pFClass, "Grid_Code")

' Das Shapefile wird der Map zugefügt
Set pFLayer = New FeatureLayer
Set pFLayer.FeatureClass = pFClass3D
pFLayer.Name = "Basis_zu_DGM_20-10-5-1_3d"
pMap.AddLayer pFLayer
-----
' 4. Iteration: Eine IDW-Oberfläche wird interpoliert
' Initialisierung eines Interpolations-Operators (3D-Analyst: Interpolation Inverse Distance to Power)
Set pIntOp = New RasterInterpolationOp
Set pRadius = New RasterRadius
pRadius.SetVariable 2
Set pEnv = pIntOp

' Durchführung der Interpolation
pEnv.SetCellSize esriRasterEnvValue, 0.05
pFDescr.Create pFLayer.FeatureClass, Nothing, "Shape"

Set pIDWRaster = pIntOp.IDW(pFDescr, 2, pRadius) 'hier wird zum ersten mal mit einem
Powerparameter von 2 gerechnet

```

```
' Das Raster wird der Map zugefügt
Set pIDWRLayer = New RasterLayer
```

```
pIDWRLayer.CreateFromRaster pIDWRaster
pIDWRLayer.Name = "IDW(bereinigtes DHM)"
pMap.AddLayer pIDWRLayer
```

```
End Sub
```

Die folgende Funktion konfiguriert ein 3D-Shapefile, das von der Hauptrechenroutine mit Daten beschickt wird.

```
Public Function createShape3d(sPath As String, sFilename As String, _
geomType As esriCore.esriGeometryType) As esriCore.IFeatureClass
```

```
On Error GoTo EH
Set createShape3d = Nothing
If sPath = "" Then Exit Function
```

```
' Set output workspace
'Dim pFeat As IFeature
Dim pFeatureWS As IFeatureWorkspace
Dim pWSF As IWorkspaceFactory
Set pWSF = New ShapefileWorkspaceFactory
Set pFeatureWS = pWSF.OpenFromFile(sPath, 0)
```

```
' set simple fields collection
Dim pFields As IFields
Dim pFieldsEdit As IFieldsEdit
Set pFields = New esriCore.Fields
Set pFieldsEdit = pFields
```

```
Dim pField As IField
Dim pFieldEdit As IFieldEdit
```

```
'Make shape field
Set pField = New esriCore.Field
Set pFieldEdit = pField
pFieldEdit.Name = "shape"
pFieldEdit.Type = esriFieldTypeGeometry
```

```
Dim pGeomDef As IGeometryDef
Dim pGeomDefEdit As IGeometryDefEdit
Set pGeomDef = New GeometryDef
```

```
Set pGeomDefEdit = pGeomDef
With pGeomDefEdit
    .GeometryType = geomType
    .HasZ = True
    .HasM = True
    Set .SpatialReference = New UnknownCoordinateSystem
End With
```

```
Set pFieldEdit.GeometryDef = pGeomDef
pFieldsEdit.AddField pField
```

```

' Create the shapefile
Set createShape3d = pFeatureWS.CreateFeatureClass(sFilename, pFields, Nothing, Nothing,
esriFTSimple, "Shape", "")
Exit Function
EH:
MsgBox Err.Description, vbInformation, "create new Shapefile"
End Function

```

Die folgende Funktion interpoliert die Pointfeatures in ein gleichmäßiges Raster mit festgelegter Zellgröße:

```

Public Function ExtractValueTOPointFeatureClass(pInRaster As IRaster, pNewFeatureClass As
IFeatureClass, pOldFeatureClass As IFeatureClass, sFieldName As String)
' pInRaster: input raster
' pNewFeatureClass: output point feature class
' pOldFeatureClass: input point feature class
' sFieldName: name of the field that stores the values
On Error GoTo ERH
Dim pZAware As IZAware

' Define field name
Dim pFld As IFieldEdit
Set pFld = New Field
pFld.Name = "z" & sFieldName

' Define field type
Dim pProp As IRasterProps
Set pProp = pInRaster
If pProp.PixelType = PT_CHAR Or pProp.PixelType = PT_UCHAR Then
pFld.Type = esriFieldTypeString
pFld.Length = 20
pFld.Required = 0
Elseif pProp.PixelType = PT_FLOAT Or pProp.PixelType = PT_DOUBLE Or pProp.PixelType
Then
pFld.Type = esriFieldTypeDouble
pFld.Length = 24
pFld.Required = 8
Else ' for integer case
pFld.Type = esriFieldTypeInteger
pFld.Length = 24
pFld.Required = 0
End If
' Add field
pNewFeatureClass.AddField pFld

' Get field index
Dim FieldIndex As Integer
FieldIndex = pOldFeatureClass.FindField(sFieldName)
If FieldIndex < 0 Then Exit Function

' Create a raster layer and QI for IIdentify interface
Dim pRLayer As IRasterLayer
Set pRLayer = New RasterLayer
pRLayer.CreateFromRaster pInRaster
Dim pIdentify As IIdentify
Set pIdentify = pRLayer

```

```

Dim pIDArray As IArray
Dim pRIDObj As IRasterIdentifyObj
Dim i As Long
Dim pPoint As IPoint
Dim pClone As IClone
Dim pFeature As IFeature
Dim pNewFeature As IFeature
Dim pNewPoint As IPoint

Set pNewPoint = New Point
' Loop through each point in the feature class and obtain value of the
' raster on that point
Dim NumOfRow As Integer
NumOfRow = pOldFeatureClass.FeatureCount(Nothing)
' MsgBox NumOfRow
Dim NewFeatureCount As Long
For i = 0 To NumOfRow - 1
    ' Get point
    Set pFeature = pOldFeatureClass.GetFeature(i)
    Set pPoint = pFeature.Shape
    pNewPoint.X = pPoint.X
    pNewPoint.Y = pPoint.Y
    ' Point wird 3D-fähig gemacht
    Set pZAware = pNewPoint
    pZAware.ZAware = True
    'Set pZAware = pPoint
    'pZAware.ZAware = True
    ' Get RasterIdentifyObject on that point
    Set pIDArray = pIdentify.Identify(pNewPoint)

    If Not pIDArray Is Nothing Then
        Set pRIDObj = pIDArray.Element(0)
        ' Get the value of the RasterIdentifyObject and add it to the field
        If pProp.PixelType = PT_CHAR Or pProp.PixelType = PT_UCHAR Then
            pFeature.Value(FieldIndex) = pRIDObj.Name
        ElseIf pProp.PixelType = PT_FLOAT Or pProp.PixelType = PT_DOUBLE Or pProp.PixelType
Then
            If pRIDObj.Name <> "NoData" Then
                pFeature.Value(FieldIndex) = CDbl(pRIDObj.Name)
            End If
        Else ' for integer case
            If pRIDObj.Name <> "NoData" Then
                pFeature.Value(FieldIndex) = CLng(pRIDObj.Name)
            End If
        End If
        pNewPoint.Z = pFeature.Value(FieldIndex)
        Set pNewFeature = pNewFeatureClass.CreateFeature ' ein neues Feature wird geschrieben
        Set pNewFeature.Shape = pNewPoint

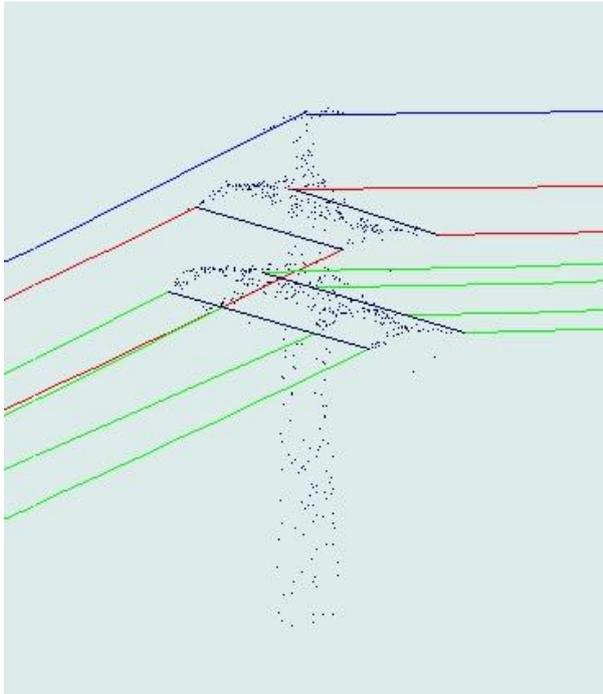
        pNewFeature.Value(FieldIndex) = pFeature.Value(FieldIndex) 'die Höhenwerte werden
zusätzlich in die Tabelle geschrieben
        pNewFeature.Store
    End If
Next i
Set ExtractValueTOPointFeatureClass = pNewFeatureClass

Exit Function
ERH:
MsgBox Err.Description
End Function

```

Anhang D: VBA-Code zur Interpolation der Seile

Zur Berechnung der Seile aus den Punktwolken, die beim Filterprozess als leitungsrelevante Punkte identifiziert wurden, wurde innerhalb der CAD-Software Bentley Microstation eine VBA- Routine entwickelt, die die Interpolation eines Polynoms über die Leitungspunkte ermöglicht. Zu diesem Zweck wird mit Hilfe eines Buffers um die potenziellen Leitungen herum die Punktwolke für jeweils ein Seil eines Feldes selektiert. In einem ersten Rechenschritt wird durch diese Punktwolke eine ausgleichende Gerade berechnet. Im zweiten Ansatz wird die Höhe der Stützpunkte und der Abstand der Stützpunkte auf der ausgleichenden Geraden zur Berechnung eines Polynoms verwendet.



Option Explicit

```
Private Sub ILocateCommandEvents_Dynamics(point As Point3d, ByVal View As View, _  
    ByVal DrawMode As MsdDrawingMode)  
End Sub
```

```
Public Sub getElementsFromFenceOrSelectionSet()
```

```
    Dim oFence As Fence  
    Dim oEIEnum As ElementEnumerator  
    Dim oEI As Element  
    Dim pkt(100000) As Point3d  
    Dim pkti(100000) As Point3d  
    Dim pktori(100000) As Point3d  
    Dim pktS As Point3d  
    Dim Pktanfang As Point3d  
    Dim Pktvert(100000) As Point3d  
    Dim d As Double  
    Dim ds(100000) As Double
```

```
    Dim a As Double  
    Dim b As Double
```

```
    Dim SumX As Double
```

```
Dim SumY As Double
Dim Suma1 As Double
Dim Suma2 As Double
```

```
Dim l As Long
```

```
Dim m As Double
Dim n As Long
Dim o As Double
Dim p As Double
Dim q As Double
Dim r As Double
Dim s As Double
Dim t As Double
Dim u As Double
Dim v As Double
```

```
Dim m_oVL As VertexList
Dim m_vertexList() As Point3d
```

```
Set oFence = ActiveDesignFile.Fence
If oFence.IsDefined = True Then
    Set oEIEnum = oFence.GetContents
Else
    Set oEIEnum = ActiveModelReference.GetSelectedElements
End If
```

```
oEIEnum.Reset
```

'Bevölkerung des Fence mit der Punktwolke, die die Leitung repräsentieren

```
Do While oEIEnum.MoveNext
    Set oEI = oEIEnum.Current
    If oEI.IsVertexList Then
        With oEI.AsVertexList
            l = l + 1

            Set m_oVL = oEIEnum.Current
            m_vertexList = m_oVL.GetVertices

            pkt(l) = m_vertexList(1)
            SumX = SumX + pkt(l).X
            SumY = SumY + pkt(l).Y
        End With
    End If
Loop
```

'Sortierroutine: Bubblesort

```

Dim i As Long
Dim j As Long
Dim hilfspkt As Point3d
For i = 1 To 2 Step -1
  For j = 1 To (i - 1)
    If pkt(j).Y > pkt(j + 1).Y Then
      hilfspkt = pkt(j)
      pkt(j) = pkt(j + 1)
      pkt(j + 1) = hilfspkt
    End If
  Next j
Next i

```

If I > 1 Then

'Bildung des Schwerpunktes der Punktwolke

```

pktS.X = SumX / I
pktS.Y = SumY / I

```

```

For n = 1 To I
  pkti(n).X = pktS.X - pkt(n).X
  pkti(n).Y = pktS.Y - pkt(n).Y
Next n

```

```

For n = 1 To I
  Suma1 = Suma1 + (pkti(n).X * pkti(n).Y)
  Suma2 = Suma2 + (pkti(n).X * pkti(n).X)
Next n

```

'Berechnung der Geradenparameter

```

a = Suma1 / Suma2
b = pktS.Y / (pktS.X * a)

```

'Berechnung des Startpunktes der ausgleichenden Gerade

```

d = Sqr((pktS.X - pkt(1).X) ^ 2 + (pktS.Y - pkt(1).Y) ^ 2)
Pktanfang.X = pktS.X - Cos(Atn(a)) * d
Pktanfang.Y = pktS.Y - Sin(Atn(a)) * d
Pktanfang.Z = pkt(1).Z
ds(1) = d

```

'Berechnung der Ordinaten der ausgleichenden Kurve

```

For n = 2 To I
  ds(n) = Sqr((Pktanfang.X - pkt(n).X) ^ 2 + (Pktanfang.Y - pkt(n).Y) ^ 2)
  Pktvert(n).X = Pktanfang.X + Cos(Atn(a)) * ds(n)
  Pktvert(n).Y = Pktanfang.Y + Sin(Atn(a)) * ds(n)
Next n

```

'Polynomiale Regression zur Bestimmung der Seilhöhen

'Ableitung nach der Methode der kleinsten Quadrate
'Parameterbestimmung aus den Normalgleichungen

```

For n = 1 To I
  s = s + ds(n) ^ 4
  m = m + ds(n) ^ 3
  p = p + ds(n) ^ 2
  o = o + ds(n) ^ 2
  q = q + ds(n)
  t = t + ds(n) ^ 2 * pkt(n).Z
  u = u + ds(n) * pkt(n).Z
  v = v + pkt(n).Z
Next n

```

'Berechnung der Inversen Matrix InvA
'Bestimmung der Minori

```

Dim m11 As Double
Dim m12 As Double
Dim m13 As Double
Dim m21 As Double
Dim m22 As Double
Dim m23 As Double
Dim m31 As Double
Dim m32 As Double
Dim m33 As Double

```

$$A = \begin{pmatrix} s & m & p \\ m & o & q \\ p & q & n \end{pmatrix}$$

```

Dim t As Double
Dim u As Double
Dim v As Double

```

$$b = \begin{pmatrix} t \\ u \\ v \end{pmatrix}$$

```

n = n - 1
m11 = (o * n - q * q)
m12 = (m * n - p * q)
m13 = (m * q - p * o)
m21 = (m * n - q * p)
m22 = (s * n - p * p)
m23 = (s * q - p * m)
m31 = (m * q - o * p)
m32 = (s * q - m * p)
m33 = (s * o - m * m)

```

'Bestimmung der Kofaktoren

```

Dim c11 As Double
Dim c12 As Double
Dim c13 As Double
Dim c21 As Double
Dim c22 As Double
Dim c23 As Double
Dim c31 As Double
Dim c32 As Double
Dim c33 As Double

```

$$c11 = (-1)^{(1+1)} * m11$$

```

c12 = (-1) ^ (1 + 2) * m12
c13 = (-1) ^ (1 + 3) * m13
c21 = (-1) ^ (2 + 1) * m21
c22 = (-1) ^ (2 + 2) * m22
c23 = (-1) ^ (2 + 3) * m23
c31 = (-1) ^ (3 + 1) * m31
c32 = (-1) ^ (3 + 2) * m32
c33 = (-1) ^ (3 + 3) * m33

```

Berechnung der Determinanten

```

Dim DetA1 As Double
Dim DetA2 As Double
Dim DetA3 As Double

```

```

DetA1 = s * (-1) ^ (1 + 1) * (o * n - q * q) + m * (-1) ^ (1 + 2) * (m * n - p * q) + p * (-1) ^ (1 + 3) * (m * q - p * o)
DetA2 = m * (-1) ^ (2 + 1) * (m * n - q * p) + o * (-1) ^ (2 + 2) * (s * n - p * p) + q * (-1) ^ (2 + 3) * (s * q - p * m)
DetA3 = p * (-1) ^ (3 + 1) * (m * q - o * p) + q * (-1) ^ (3 + 2) * (s * q - m * p) + n * (-1) ^ (3 + 3) * (s * o - m * m)

```

x=InvA*b

```

Dim a0 As Double
Dim a1 As Double
Dim a2 As Double

```

```

a2 = (c11 * t + c21 * u + c31 * v) / DetA1
a1 = (c12 * t + c22 * u + c32 * v) / DetA1
a0 = (c13 * t + c23 * u + c33 * v) / DetA1

```

Einfügen der Koeffizienten in die Gleichung und Ausgabe als Raumkurve

```

CadInputQueue.SendCommand ("place curve space")

```

```

Dim vil(10000) As Double
Dim vih(10000) As Double
Dim SumVil As Double
Dim SumVih As Double

```

```

For n = 2 To l - 1
    Pktvert(n).Z = a0 + a1 * ds(n) + a2 * ds(n) ^ 2
    vil(n) = Sqr((pkt(n).X - Pktvert(n).X) ^ 2 + (pkt(n).Y - Pktvert(n).Y) ^ 2)
    SumVil = SumVil + vil(n) ^ 2
    vih(n) = a0 + a1 * ds(n) + a2 * ds(n) ^ 2 - pkt(n).Z
    SumVih = SumVih + vih(n) ^ 2
    CadInputQueue.SendDataPoint Pktvert(n)
Next n

```

```

CadInputQueue.SendReset

```

```

Dim Filename As String

Filename = "f:\Leitungsreport.txt"
Open Filename For Output As #1
Print #1, "Nr           X           Y           Z           vi(Lage)
vi(Höhe)"

For n = 2 To l - 1
Print #1, (n - 1), Pktvert(n).X, Pktvert(n).Y, Pktvert(n).Z, vil(n), vih(n)
Next n
Print #1, ""
Print #1, "a=", a
Print #1, "b=", b
Print #1, ""
Print #1, "a0=", a0
Print #1, "a1=", a1
Print #1, "a2=", a2
Print #1, ""
Print #1, "Sqr[vv](Lage)/(n-2): ", Sqr(SumVil / (n - 2))
Print #1, "Sqr[vv](Höhe)/(n-3): ", Sqr(SumVih / (n - 3))
Close #1
End If

CommandState.StartDefaultCommand
End Sub

```