

Masterarbeit

Ein Prozess zur Interpolation von Höhenmodellen aus unterschiedlichen Datenquellen

Rafael Bohli

Geographisches Institut der Universität Zürich

Oktober 2010

Betreuung:

Dr. Ruedi Boesch

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Prof. Dr. Robert Weibel

Fakultätsvertretung

Kontaktinformationen

Rafael Bohli
Jean-Hotz-Str. 18
8606 Nänikon
rafi_bohli@hotmail.com

Prof. Dr. Robert Weibel
Universität Zürich
Geographisches Insitut
Abteilung Geographische Informationssysteme
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich

Dr. Ruedi Boesch
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Landressourcenbeurteilung
Mustererkennung & Fotogrammetrie
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen Personen, die zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Besonders möchte ich Dr. Ruedi Boesch danken, der mich während der gesamten Arbeit betreute und mir mit seinem fachlichem und technischem Wissen zur Seite gestanden ist.

Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Dr. Robert Weibel bedanken, für die konstruktiven Besprechungen und die Unterstützung beim Verfassen der Arbeit.

Weiter danke ich dem WSL für die zur Verfügung gestellten Daten.

Ich möchte zudem meinen Eltern danken, welche mich während meines Studiums und meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Zusammenfassung

Sollen für die Interpolation von Höhenmodellen mehrere, heterogene Datenquellen eingesetzt werden, sind besondere Problemstellungen zu beachten. Auf Grund der verschiedenen verwendeten Datenerfassungstechnologien weisen die einzelnen Datensätze unterschiedliche Eigenschaften auf, die zu Unsicherheiten und Fehlern führen. Zudem sind die unterschiedlichen Datenquellen möglicherweise nicht für die beiden Höhenmodelltypen DOM (Digitales Oberflächenmodell) und DTM (Digitales Terrainmodell) gleich gut geeignet. Um durch die Kombination von Datenquellen eine Verbesserung der resultierenden Höhenmodelle zu erhalten, muss bei der Interpolation versucht werden, nur lokal geeignete Datenpunkte zu verwenden. Die Herausforderung besteht dabei zu beurteilen, welche Datenpunkte geeignet sind, um die gesuchte Oberfläche am besten wiederzugeben.

In dieser Arbeit wurde ein Prozess zur Interpolation von Höhenmodellen entwickelt, der diese Problemstellungen berücksichtigt. Vor der Interpolation werden dabei die Datenpunkte nach ihrer Qualität gewichtet, wobei die Qualität beschreiben soll, wie geeignet ein Punkt für die Interpolation der je nach Höhenmodelltyp gesuchten Oberfläche ist. Anhand von zusätzlich verfügbaren Informationen zu den Datenquellen werden die Genauigkeit und Verlässlichkeit der gemessenen Höhenwerte der Datensätze und der einzelnen Datenpunkte bewertet und gewichtet. Mit dieser ersten Gewichtung wird grundlegend festgelegt, wie stark der Einfluss der einzelnen Datenquellen auf die Interpolation und somit auf das resultierende Höhenmodell sein soll. Eine Vorprozessierung untersucht anhand von räumlichen Nachbarschaftsbeziehungen wie nahe ein Datenpunkt bei der gesuchten Oberfläche liegt und gewichtet sie dementsprechend.

Um die durchgeführte Gewichtung der Qualität der Datenpunkte in der Interpolation zu berücksichtigen, wird der IDW-Ansatz (Inverse Distance Weighting) um einen zusätzlichen Gewichtungsfaktor für die Qualität und eine modifizierte Quadrantensuche erweitert. Es wurde zudem ein Ansatz entwickelt, wie die Unsicherheiten der durchgeführten Interpolation anhand von Prüfgrößen geschätzt werden, welche die Eigenschaften der lokal verfügbaren Datenpunkte beschreiben.

Getestet wurde der entwickelte Prozess zuerst an künstlichen Daten, wobei aufgezeigt werden konnte, dass die resultierenden Höhenmodelle deutlich besser sind, als diejenigen die mit dem Standard-IDW interpoliert wurden. Weiter wurden vier Testregionen in der Schweiz untersucht, für welche Höhenmessungen von LIDAR (Light Detection and Ranging) und die mittels der kommerziellen Software NGATE (New Generation Automatic Terrain Extraction) bestimmten Höhenwerte aus Aufnahmen der digitalen Luftbildkamera ADS40 zur Verfügung standen. Es zeigte sich, dass durch den Interpolationsprozess die Vorteile der unterschiedlichen Datenquellen genutzt werden konnten und dadurch die an die resultierenden Höhenmodelle gestellten Anforderungen erfüllt wurden.

Inhalt

1. Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele der Arbeit und Forschungsfragen	
1.3 Aufbau der Arbeit	1
1.4 Erläuterungen und Definitionen zu den verwendeten Begriffen	3
2. Ausgangslage und Problemstellung	5
2.1 Beschreibung der Datengrundlage	5
2.1.1 LIDAR Daten	5
2.1.2 ADS40-Daten	6
2.2 Vorwissen zur Qualität der Punkte	7
2.3 Punktverteilung und -dichte	9
2.4 Vermessene Oberflächen	10
2.5 Validierung	11
2.5.1 Verwendung von künstlichen Daten und Oberflächen	11
2.5.2 Validierung mit terrestrischen Referenzwerten	11
2.6 Zusammenfassung	12
3. Stand der Forschung	13
3.1 Stand der Forschung	13
3.1.1 Klassierung, Gewichtung und Filterung von Punktwolken	13
3.1.2 Interpolation von Höhenmodellen	14
3.1.3 Interpolation heterogener Daten	14
3.1.4 Unsicherheitsmodellierung	15
3.2 Forschungslücken und Bezug zur Arbeit	15
4. Grundlagen des entwickelten Interpolationsprozesses	17
4.1 Konzept des Interpolationsprozesses	17
4.1.1 Vorbereitung und Bewertung der Daten	17
4.1.2 Interpolation	19
4.1.3 Validierung und Bewertung der Höhenmodelle	19
4.2 Wahl der Interpolationsmethode	19
4.2.1 Anforderungen	19
4.2.2 Diskussion der Möglichkeiten	20
4.2.3 Funktionsweise von IDW	21
4.3 Bestimmung der Parameter	21
4.4 Technische Umsetzung	22
5. Methodik	23
5.1 Einbezug von Vorwissen	23
5.1.1 Bewertung der Datensätze	23
5.1.2 Bewertung der Datenpunkte	24
5.2 Vorprozessierung	24
5.2.1 Prinzip der Gewichtung	24
5.2.2 Verwendete Gewichtungsfunktionen	26
5.2.3 Verwendung einer grobrasterigen Waldmaske	27
5.3 Erweiterung des IDW-Ansatzes	29
5.3.1 Berücksichtigung der Qualität der Datenpunkte	29
5.3.2 Zentralpunktproblematik	29

5.3.3	Quadrantensuche	30
5.3.4	Adaptive Parameterwahl	32
5.4	Schätzung der Unsicherheiten des Höhenmodells	33
5.4.1	Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation	33
5.4.2	Auswertung und Zusammenfassung	34
6.	Anwendung an künstlichen Oberflächen	35
6.1	Ziele der Tests	35
6.2	Beschreibung der Testserien	36
6.2.1	Verwendete Oberflächen	36
6.2.2	Eigenschaften der Punktdaten	36
6.2.3	Übersicht über die Testserien	38
6.3	Resultate und Diskussion	39
6.3.1	Validierung	39
6.3.2	Kalibrierung	40
6.3.3	Anwendung der Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation	42
6.4	Fazit für die Anwendung an realen Daten	45
7.	Anwendung an realen Daten	47
7.1	Verwendete Testregionen	47
7.2	Anforderungen an die Höhenmodelle	49
7.3	Anwendung des Interpolationsprozesses	49
7.3.1	Erforderliche Anpassungen	50
7.3.2	Anwendung des globalen Ansatzes	50
7.3.3	Anwendung des lokalen Ansatzes	52
7.3.4	Parametereinstellungen	52
8.	Resultate und Evaluation	55
8.1	Umsetzung des Interpolationsprozesses	55
8.1.1	Technische Umsetzung	55
8.1.2	Anwendbarkeit	56
8.2	Validierung	57
8.2.1	Validierung der Testreihen mit künstlichen Datensätzen	58
8.2.2	Vergleich mit Höhenmodellen aus einzelnen Datensätzen	58
8.2.3	Validierung durch terrestrische Referenzwerte	63
8.3	Schätzung der Unsicherheiten der Höhenmodelle	68
8.3.1	Statistische Untersuchung	68
8.3.2	Visuelle Untersuchung	68
8.4	Fazit	72
9.	Diskussion	75
9.1	Interpolation aus mehreren Datenquellen	75
9.2	Gewichtung der Datensätze und einzelnen Datenpunkten	76
9.3	Interpolation qualitativ unterschiedlicher Daten	78
9.4	Bewertung der Unsicherheiten des Höhenmodells	78
9.5	Fazit	79
10.	Schlussfolgerung und Ausblick	80
10.1	Ergebnisse und Erkenntnisse	80
10.2	Ausblick	80
	Literaturverzeichnis	84
	Anhang	87

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Funktionsweise von LIDAR bei Vegetationsaufnahmen. Nach Lefsky (2002).	6
Abb. 2:	Beispiele für Probleme bei der automatischen Höhenwertgenerierung mittels NGATE	8
Abb. 3:	Punktverteilung und -dichte der LIDAR-Datensätze	9
Abb. 4:	Profil durch einen Waldabschnitt mit den Höhenwerten der drei Datensätzen	10
Abb. 5:	Konzept der Filtermethoden für LIDAR-Daten. Nach Sithole & Vosselmann (2003)	14
Abb. 6:	Allgemeiner Ablauf des Interpolationsprozesses	18
Abb. 7:	Prinzip der Gewichtung	25
Abb. 8:	Übersicht zu den Gewichtungsfunktionen	28
Abb. 9:	Erweiterung der Quadrantensuche durch Berücksichtigung der Qualität	31
Abb. 10:	Optimale Ausrichtung der Achsen der Quadrantensuche	32
Abb. 11:	Beschreibung der Punktverteilung	34
Abb. 12:	Die drei verwendeten künstlichen Oberflächen „Schiefe Ebene“, „Hang“ und „Wald“	37
Abb. 13:	Unterschiedliche Punkteverteilungen der künstlichen Datensätze	37
Abb. 14:	Resultate für die verschiedenen Oberflächen, Datensätze und Paramtereinstellungen der Vorprozessierung und der Interpolation	41
Abb. 15:	Zusammenhang zwischen den Oberflächen und Datengrundlagen und den vier Grössen zur Bewertung der Interpolation.	43
Abb. 16:	Zusammenhang zwischen den Oberflächen und Datengrundlagen und den vier Grössen zur Bewertung der Interpolation.	44
Abb. 17:	Übersicht zu den Testregionen	48
Abb. 18:	Der Interpolationsprozess: Übersicht zur Anwendung des globalen Ansatzes	51
Abb. 19:	Der Interpolationsprozess: Übersicht zur Anwendung des lokalen Ansatzes	53
Abb. 20:	DOM der Testregion Heiden nach dem lokalen Ansatz erstellt.	59
Abb. 21:	Differenzen der DOM des Interpolationsprozesses aus beiden Datenquellen und des ADS40-DOM.	59
Abb. 22:	Kleiner Ausschnitt von ca. 50 x 50 m mit dem RGB und dem FOM-Bild, dem interpolierten DOM und den Differenzen gegenüber dem ADS40-DOM.	59
Abb. 23:	Vergleich zwischen dem DTM der Testregion Heiden	60
Abb. 24:	Vergleich der CHM für die Testregion Fahrwangen	62
Abb. 25:	Kleiner Ausschnitt aus der Testregion Fahrwangen	62
Abb. 26:	Verteilung der Abweichungen der terrestrischen Baummessungen gegenüber verschiedenen DOM	64
Abb. 27:	Verteilung der Abweichungen der vorbereiteten, terrestrischen Baummessungen gegenüber verschiedenen DOM	66

Abb. 28:	Anwendung der vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation für die künstliche Oberfläche Wald	69
Abb. 29:	Vergleich der vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation für die Testregion Heiden	70
Abb. 30:	Vergleich der geschätzten Unsicherheiten mittels dem Produkt aus den vier Prüfgrößen und der Krigingvarianzen	71

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Zusammenstellung der gewählten Gewichte für die verfügbaren Datensätze	24
Tab. 2:	Übersicht zu den künstlichen Datensätzen	38
Tab. 3:	Verschiedene Parametereinstellungen für die Vorprozessierung.	39
Tab. 4:	Einstellungen Interpolation	39
Tab. 5:	Parametereinstellungen der Vorprozessierung für den globalen und lokalen Ansatz.	54
Tab. 6:	Parametereinstellungen der Interpolation für den globalen und lokalen Ansatz.	54
Tab. 7:	Einstellungen der Vorprozessierung für die Validierung mit den terrestrischen Baummessungen	64
Tab. 8:	Einstellungen der Interpolation für die Validierung mit den terrestrischen Baummessungen.	64
Tab. 9:	Validierung der DOM mit den terrestrischen Baummessungen	65
Tab. 10:	Validierung der DTM mit den terrestrischen Baummessungen	67
Tab. 11:	Zusammenhang zwischen den vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation und den Fehlern für künstliche Daten.	68
Tab. 12:	Korrelationskoeffizienten nach Pearson für die vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation	70

Abkürzungen

ADS40	Hochaufgelöste Luftbildkamera von Leica Systems
CGAL	Computational Geometry Algorithm Library
CHM	Canopy Height Model
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DTM	Digitales Terrainmodell
GIS	Geographische Informationssysteme
LFI	Landesforstinventar
LIDAR	Light Detection and Ranging
LWF	Langfristige Waldökosystem-Forschung
LWN	Landwirtschaftliche Nutzflächen
NGATE	New Generation Automatic Terrain Extraction
RMSE	Roote Mean Squared Error
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

1. Einleitung

1.1 Motivation

Wald bedeckt ca. ein Drittel der Fläche der Schweiz und stellt einen wichtigen Lebensraum für Pflanzen und Tiere dar. Weiter liefert der Wald Holz, bietet Schutz vor Naturgefahren und dient als Freizeitraum. Um objektive Informationen über seinen Zustand, seine Funktion und Veränderungen zu sammeln, beschloss der Bund 1981 die Durchführung eines regelmässigen Landesforstinventars (LFI). Durchgeführt wurde dies von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Seit 2009 läuft die kontinuierliche Erhebung zum vierten LFI. Der Aufwand, die gesamte Waldflächen zu untersuchen wäre zu gross, so dass mit Stichproben gearbeitet wird. Es werden Probeflächen untersucht, die in einem regelmässigen Netz angeordnet sind. Die Datenerfassung dieser Probeflächen erfolgt mit detaillierten Feldaufnahmen oder durch Luftbildinterpretation (LFI, 2010).

Digitale Höhenmodelle könnten eine Erweiterung für die Datenerfassung des LFI sein. Sie könnten von potentiellem Nutzen sein für eine grossflächige Aufnahme von Vegetationsmerkmalen, wie Biomasse, Bestandeshöhen und Holzvorrat. Damit die ermittelten Daten eine möglichst hohe Aussagekraft haben, sollten die Höhenmodelle möglichst genau, flächendeckend und aktuell sein. Für die Generierung der Höhenmodelle stehen dem WSL Fernerkundungsdaten von zwei verschiedenen Aufnahmesystemen zur Verfügung. Dies sind einerseits die bereits in DTM- und DOM-Daten klassierten, direkten Höhenmessungen von LIDAR (Light Detection and Ranging) und andererseits die mittels der kommerziellen Software NGATE (New Generation Automatic Terrain Extraction) bestimmten Höhenwerte aus Aufnahmen der digitalen Luftbildkamera ADS40. Aufgrund der verschiedenen Messtechniken der beiden Fernerkundungssysteme weisen die Daten unterschiedliche Vor- und Nachteile auf, die sich auf die Qualität der daraus generierten Höhenmodelle auswirken. Durch eine Kombination der beiden Datenquellen sollen ihre jeweiligen Vorteile genutzt werden, um dadurch bessere Höhenmodelle zu interpolieren.

1.2 Ziele der Arbeit und Forschungsfragen

In dieser Arbeit soll ein Interpolationsprozess entwickelt werden mit welchem aus Daten von unterschiedlichen Quellen Höhenmodelle generiert werden können. Es gilt dabei, die Punktdaten von verschiedenen Datenquellen zusammenzufügen und daraus die bestmögliche Oberfläche zu generieren. Durch die Kombination der verschiedenen Datenquellen sind hohe Punktdichten vorhanden.

Zudem weisen die Datenpunkte durch ihre unterschiedlichen Aufnahmesysteme gewisse Fehler und Unsicherheiten auf. Die Punkte können somit nicht als perfekt angenommen werden, sondern es muss berücksichtigt werden, dass sie fehlerhaft sein können. Die Herausforderung wird deshalb sein, zu untersuchen und zu beurteilen, welche dieser Punkte die gesuchte Oberfläche am besten wiedergeben. Solche Punkte sollen durch eine zusätzliche Gewichtung stärkeren Einfluss in der Interpolation erhalten, während unsichere Punkte schwächer gewichtet oder ganz herausgefiltert werden sollen.

Getestet werden soll der entwickelte Interpolationsprozess an den vom WSL zur Verfügung gestellten Daten, den LIDAR-Messungen und den aus ADS40-Luftbildern mittels NGATE ermittelten Höhenwerten. Der Fokus für die Höhenmodelle liegt dabei auf den Waldflächen. Es sollen DTM und DOM generiert werden, damit aus diesen das CHM (Canopy Height Model) berechnet werden kann. Aus diesem CHM können dann die Vegetationsparameter abgelesen und der Wald kartiert werden.

Anhand dieser Daten soll untersucht werden, was für Probleme bei der Kombination mehrerer Datensätze auftreten, welche für vergleichbare Problemstellungen entwickelte Methoden eingesetzt werden können und was für Anpassungen für unsere konkrete Anwendung notwendig sind. Der angestrebte Interpolationsprozess soll einerseits für diese Aufgabenstellung mit den LIDAR- und ADS40-Daten entwickelt werden, andererseits soll auch der allgemeine Fall untersucht und folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie können unterschiedliche Datenquellen kombiniert werden, um daraus ein Höhenmodell zu interpolieren?
- Was für Probleme treten durch die Kombinationen verschiedener Datensätze auf und welche Methoden bieten sich an, um diese zu lösen?
- Wie kann das Vorwissen zu den einzelnen Datensätzen in einen solchen Interpolationsprozess mit einbezogen werden?
- Welche Möglichkeiten bestehen, um Datenpunkte aufgrund von räumlichen Nachbarschaftsbeziehungen zu bewerten?
- Wie kann die unterschiedliche Qualität von Datenpunkte in der Interpolation berücksichtigt werden?
- Werden die Höhenmodelle durch die Verwendung mehrerer Datenquellen verbessert?
- Wie kann die Unsicherheit des interpolierten Höhenmodells beschrieben werden?

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in vier Hauptteile gegliedert. Im ersten Teil wird die Ausgangslage näher untersucht. Dazu gehört eine Analyse der Datengrundlage und der daraus resultierenden Problemstellungen, sowie ein Überblick zum aktuellen Stand der Forschung in den Bereichen Bewertung und Klassie-

rung von Punktwolken, der Interpolation von Höhenmodellen und von heterogener Daten, sowie der Unsicherheitsmodellierung. Im zweiten Teil wird die methodische Umsetzung des Interpolationsprozesses behandelt. Erst werden die Grundlagen des Interpolationsprozesses vorgestellt. Dabei wird der Aufbau des Prozesses mit seinen Teilschritten präsentiert und die grundlegenden Fragen zur Umsetzung, wie die Wahl der Interpolationsmethode, die Bestimmung der Parameter und die technische Umsetzung diskutiert. Anschliessend wird die Implementierung der einzelnen Schritte des Interpolationsprozesses besprochen und aufgezeigt, welche Methoden dazu eingesetzt werden. Es folgt der dritte, empirische Teil der Arbeit, in dem der entwickelte Interpolationsprozess getestet wird. Dies erfolgt einerseits anhand künstlicher Daten und Oberflächen, andererseits mit den zur Verfügung stehenden LIDAR- und ADS40-Daten. Im vierten und letzten Teil der Arbeit wird eine Auswertung durchgeführt. Dazu gehört die Präsentation der Resultate und der Evaluation des Interpolationsprozesses. Abschliessend werden in der Diskussion die Forschungsfragen beantwortet und so aufgezeigt, was der Gewinn dieser Arbeit ist, wo Probleme auftauchen und somit Verbesserungspotential besteht. Darauf aufbauend wird eine Schlussfolgerung sowie ein Ausblick gegeben.

1.4 Erläuterungen und Definitionen zu den verwendeten Begriffen

Die Arbeit basiert zum grössten Teil auf englischer Literatur und oftmals ist eine ideale Übersetzung einzelner Fachbegriffe nicht möglich. Deshalb werden in dieser Arbeit für eine bessere Verständlichkeit im Bezug zur Literatur ebenfalls die englischen Ausdrücke verwendet. Zudem werden, um Missverständnisse zu vermeiden, an dieser Stelle zentrale Begriffe im Zusammenhang mit ihrer Verwendung innerhalb dieser Arbeit definiert:

DTM, DOM und CHM In der Literatur gibt es unterschiedliche Bezeichnungen für die verschiedenen Höhenmodelltypen. In dieser Arbeit werden die am WSL gebräuchlichen Bezeichnungen verwendet. Das DTM ist das digitale Terrainmodell und beschreibt die Erdoberfläche ohne Vegetation, Gebäude und andere Objekte. DOM steht für digitales Oberflächenmodell und heisst auf Englisch DSM (Digital Surface Model). Es handelt sich hierbei um die höchste gemessene Oberfläche, was in Wäldern den Baumspitzen entspricht. CHM steht für Canopy Height Model. Eine deutsche Übersetzung davon gibt es nicht, deshalb wird hier auch die englische Bezeichnung verwendet. Das CHM ist die Differenz des DOM und des DTM. Es gibt also die Höhe der Objekte auf der Erdoberfläche wieder und wird vor allem in Bezug auf die Volumenmessung der Vegetation eingesetzt. In der Literatur wird teilweise anstatt CHM die Abkürzung nDOM verwendet, die für normalisiertes DOM steht.

LIDAR- und ADS40-Daten Die beiden verwendeten Datenquellen werden in dieser Arbeit kurz nach ihrem Aufnahmesystem benannt. Bei den LIDAR-Daten ist dies naheliegend, da die Höhenwerte direkt mit LIDAR gemessen wurden. Die ADS40-Daten wurden aus Luftbildern der ADS40-Kamera mit der Software NGATE generiert. Um diese Beschreibung abzukürzen, werden sie in dieser Arbeit ADS40-Daten genannt.

Qualität Die Bedeutung von Qualität hängt vom Kontext ab, in dem der Begriff verwendet wird. Im Bezug auf räumliche Daten beschreibt die Qualität die Differenz zwischen der Realität

und deren Repräsentation durch die Daten (Longley et al., 2005). In dieser Arbeit wird von der Qualität der Datenpunkte gesprochen. Hier soll die Qualität die Eignung eines Datenpunktes für die Generierung eines Höhenmodells beschreiben. Sie setzt sich aus zwei Faktoren zusammen. Einerseits soll die Qualität aussagen, wie gut eine Messung war und wie verlässlich dadurch der Höhenwert ist. Andererseits gibt die Qualität an, wie wahrscheinlich ein Punkt auf der gesuchten Oberfläche liegt, was abhängig ist vom zu erstellenden Höhenmodelltyp.

Interpolationsprozess Mit diesem Begriff wird der gesamte Prozess bezeichnet, der aus den getrennten Datensätzen über mehrere Schritte das Höhenmodell interpoliert. Neben der Interpolation gehören so auch die Vorbereitung der Daten und die Vorprozessierung zum Interpolationsprozess. Der genaue Ablauf des Interpolationsprozesses wird in Abschnitt 4.1 aufgezeigt.

Punkte Wenn in dieser Arbeit von Punkten gesprochen wird, sind damit Datenpunkte gemeint, die einen Höhenwert repräsentieren. Ist von anderen Punkten die Rede, werden diese näher umschrieben.

2. Ausgangslage und Problemstellung

2.1 Beschreibung der Datengrundlage

In diesem Kapitel werden die zwei in dieser Arbeit verwendeten Datenquellen, die LIDAR- und die ADS40-Daten, vorgestellt. Da die unterschiedlichen Funktionsweisen der beiden Messtechniken grossen Einfluss auf die Eigenschaften der Datensätze und somit auf die Problemstellung haben, werden diese kurz erklärt. Ebenfalls werden weitere Informationen zu den Aufnahmen gegeben, welche für die spätere Bewertung der Datensätze von Bedeutung sind.

2.1.1 LIDAR Daten

Funktionsweise LIDAR ist ein aktives Fernerkundungssystem, das mittels eines Laserscanners Oberflächen abtastet und direkte Höhenmessungen liefert. Meistens wird das LIDAR von einem Flugzeug aus eingesetzt, aber auch Helikopter oder Satelliten können als Plattform dienen. Mit GPS und einem Navigationssystem wird die genaue Position der Plattform und die Richtung des ausgesendeten Laserimpulses bestimmt. Mittels Laufzeitmessungen des Laserimpulses kann die Distanz bis zum Objekt und somit seine genaue Position direkt bestimmt werden. Ein grosser Vorteil von LIDAR gegenüber optischen Systemen ist, dass er als aktives System von der Beleuchtung unabhängig ist. So ist er bei Tag und Nacht einsetzbar und wird auch nicht durch Schatten beeinflusst. (Baltsavias, 1999)

Eine Besonderheit des LIDAR ist, dass der gesamte Verlauf des reflektierten Signals (engl. full waveform) aufgenommen werden kann. Dadurch können weitere Rückschlüsse auf die Eigenschaften der vermessenen Oberfläche gemacht werden. Besonders interessant ist dieser Signalverlauf bei Vegetationsaufnahmen, da hier das ausgesendete Signal auf verschiedenen Höhen innerhalb der komplexen Struktur reflektiert wird. Es resultiert ein Kurvenverlauf des empfangenen Signals mit mehreren lokalen Maxima (Abb. 1). Je nach LIDAR-System werden daraus unterschiedlich viele dieser Multiplen Returns abgespeichert. Durch diese Messtechnik können direkt Informationen über die vertikale Struktur des Waldes gewonnen werden (Lefsky, 2002). Mit LIDAR kann mit einer solch hohen Genauigkeit und Punktdichte gemessen werden, dass es auch möglich ist einzelne Bäume zu erkennen und ihre Struktur näher zu beschreiben (Morsdorf et al., 2004).

Werden die LIDAR-Daten für die Berechnung von digitalen Höhenmodellen verwendet, ist man nur noch an den Messungen des Bodens und der obersten Vegetationsschicht interessiert. Dafür werden dann meist nur noch das erste und letzte gemessene Signal, die sogenannten First und

Last Returns, bei der Aufnahme abgespeichert (Abb. 1). Die Problematik besteht darin, dass die Messpunkte mittels Filter- und Klassierungsalgorithmen in Boden- und Vegetationspunkte unterschieden werden müssen. (Sithole & Vosselmann, 2003)

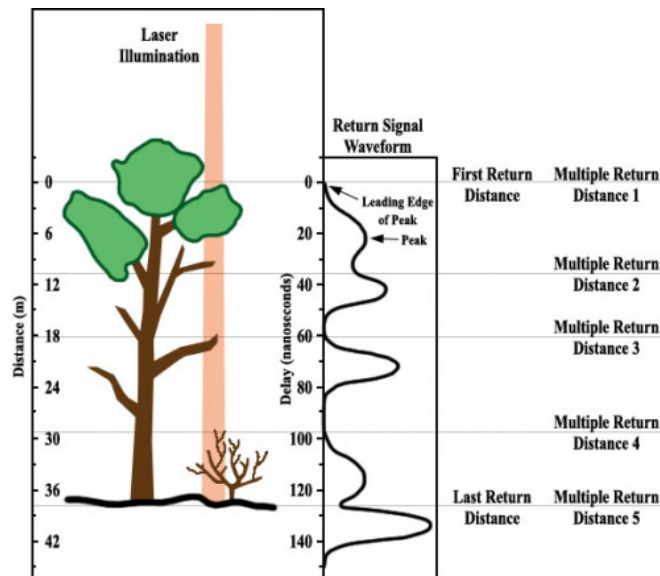


Abbildung 1: Funktionsweise von LIDAR bei Vegetationsaufnahmen. Der komplexe Verlauf des empfangenen Signals wird analysiert und daraus einzelne Punkte (Returns) definiert. Die meisten Systeme speichern zwei Punkte ab, den First und Last Return. Nach Lefsky (2002).

Informationen zu den Aufnahmen Im Rahmen des Projekts „Landwirtschaftliche Nutzflächen“ (LWN) des schweizerischen Bundesamts für Landestopografie in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Landwirtschaft wurden über mehrere Jahre hinweg grosse Flächen der Schweiz mit LIDAR vermessen. Ziel des Projekts war eine genauere Bestimmung der landwirtschaftlichen Nutzflächen. Mittels der LIDAR-Aufnahmen sollten DTM und DOM erstellt werden, um damit die Waldränder klarer definieren zu können. (Artuso, 2003)

Für die Aufnahmen und Berechnung der Höhenmodelle wurden verschiedene private Unternehmen beauftragt. Die Befliegungen wurden etappenweise zwischen 2000 und 2005 durchgeführt. Erste Verifikationen der Messungen und der produzierten Höhenmodelle zeigten Probleme, die bei der Filterung und Klassierung der Rohdaten, wegen fehlerhafter Kalibrierung des LIDAR oder wegen Löchern in Daten entstanden (Artuso, 2003). Deshalb wurden weitere Aufnahmen von bereits vermessenen Flächen durchgeführt und die Datensätze mit den neueren Messungen erweitert. Dadurch sind die zur Verfügung stehenden Datensätze eine Mischung aus verschiedenen Messreihen, die in unterschiedlichen Jahren, teilweise auch zu anderen Jahreszeiten und anderen Aufnahmebedingungen erhoben wurden. Diese Umstände müssen bei der Verwendung dieser Daten berücksichtigt werden.

2.1.2 ADS40-Daten

Funktionsweise Aus den hochauflösten Aufnahmen der digitalen Luftbildkamera ADS40 können mit NGATE, einem Softwareprodukt der BAE Systems, Höheninformationen des Geländes gewonnen werden. NGATE verwendet dafür sich überlappende Aufnahmen und ermittelt basierend auf dem Prinzip der Stereoskopie die Geländehöhen (Zhang et al., 2006). Die grosse

Problematik dieses Prozesses ist das sogenannte Matching der Luftbilder. Darunter versteht man das Zuordnen der möglichst exakt gleichen Position auf den stereoskopischen Luftbildpaaren. Je besser diese Korrelation der Bildpixel gelingt, desto zuverlässiger ist die daraus ermittelte Höheninformation (DeVenecia et al., 2007). Dennoch hat auch NGATE gewisse Schwierigkeiten und kann nicht immer gute Resultate liefern. Gründe für solche Probleme können bspw. sein:

- Die Oberfläche verfügt über eine zu schwache oder sich wiederholende Textur.
- Wegen der Perspektive sind nicht alle Flächen in beiden Bildern sichtbar, v.a. bei stark strukturierten Oberflächen und grösseren Objekten, wie Gebäuden und Bäumen. Dabei spricht man von einem Parallax-Fehler.
- Undeutliche oder mehrdeutige Oberflächen, wie beim Blätterdach eines Waldes.
- Wolken verhindern die Sicht und stören so das automatische Matching.

Dies sind nur ein paar Beispiele solcher Probleme, die im Hinblick auf die Verwendung dieser Daten für bewaldete Gebiete von Bedeutung sind. Für weitere, detailliertere Informationen zu NGATE siehe Zhang et al. (2006) oder DeVenecia et al. (2007).

Informationen zur Aufnahme Die Aufnahmen mit der ADS40-Luftbildkamera wurden von der Swisstopo durchgeführt. Sie werden in einem regelmässigen Rhythmus für die verschiedenen Regionen der Schweiz aufgenommen und dienen hauptsächlich der Aktualisierung der Landeskarten (swisstopo, 2010). Daher wurde darauf geachtet, dass die Aufnahmen bei möglichst geringer Bewölkung gemacht wurden. Somit sind diese Luftbilder ideal geeignet, um aus ihnen mit NGATE die Höheninformationen zu ermitteln. Für die verwendeten Testregionen stammen die Luftbilder aus den Jahren 2006 und 2008. Die ADS40-Daten sind somit aktueller als die verfügbaren LIDAR-Daten.

Von den ADS40-Daten liegt somit bereits ein schweizweites Höhenmodell vor, das grösstenteils von guter Qualität ist. Wegen den oben genannten Problemen beim Matching-Prozess treten jedoch Fehler in den Daten auf. Zudem ist eine Vermessung des Bodens bei Waldflächen nicht möglich. Daher ist eine Kombination mit den LIDAR-Daten sinnvoll.

2.2 Vorwissen zur Qualität der Punkte

LIDAR-Daten Zu den LIDAR-Daten sind lediglich die Aufnahmedaten bekannt und ob mehrere Befliegungen durchgeführt wurden. Zu anderen Umständen und zur Genauigkeit der durchgeführten Vermessung ist nichts bekannt. Ebenso fehlen Informationen zur erfolgten Vorprozessierung und zur Klassierung in DTM und DOM. Für diese Arbeit liegen die Daten als x,y,z-Tripel vor, ohne jegliche Zusatzinformation. Es wäre möglich während der durchgeführten Vermessung genauere Informationen über die Qualität der einzelnen Punkte zu sammeln (Schaer et al., 2009). Oder es könnte anhand der Intensität und des Verlaufs eines empfangenen Signals das Rückstreuverhalten der vermessenen Oberfläche näher beschrieben werden und so Rückschlüsse auf deren Beschaffenheit und Struktur gemacht werden (Lefsky, 2002). Bei den hier verfügbaren LIDAR-Daten für das Projekt LWN wurden aber lediglich die Laufzeitmessungen aufgenommen. Es ist

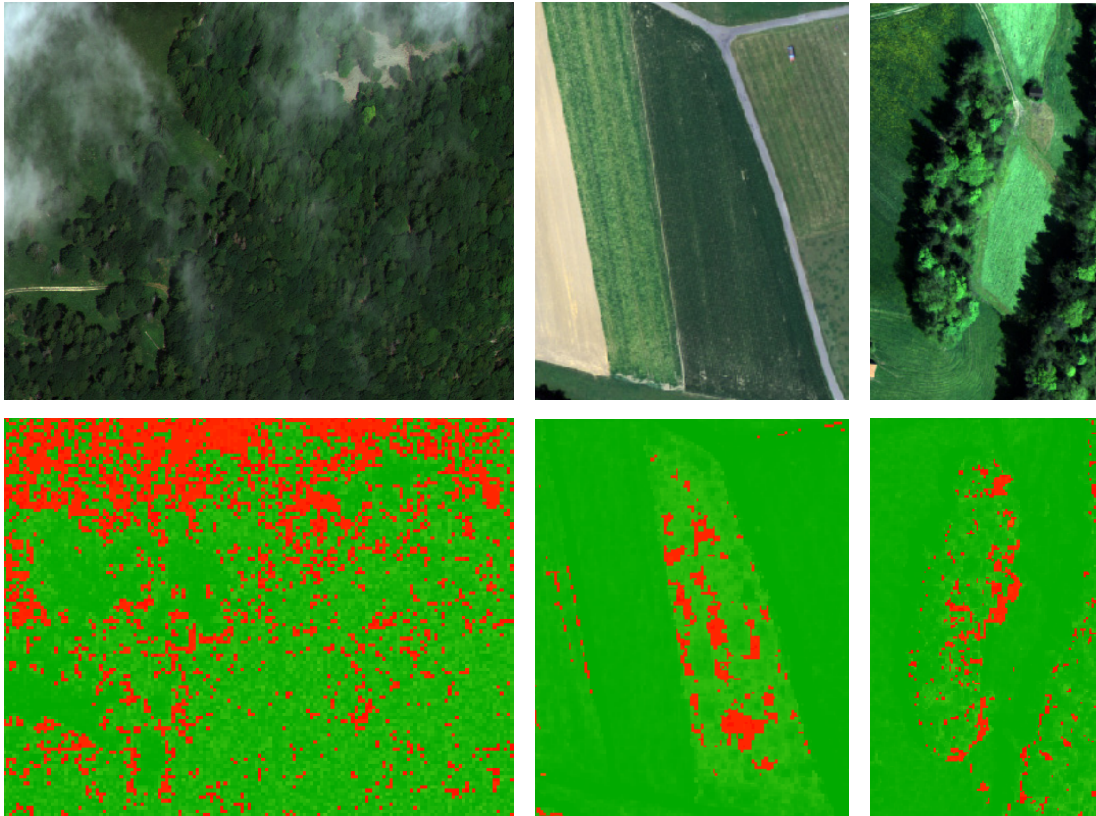


Abbildung 2: Beispiele für Probleme bei der automatischen Höhenwertgenerierung mittels NGATE und die dazu gehörigen FOM-Werte. Grün bedeutet eine erfolgreiche Messung, während bei roten Flächen Probleme beim Matching-Prozess bestanden, beispielsweise wegen Wolken (links), fehlenden oder zu regelmäßigen Oberflächenstrukturen (Mitte) oder verdecktem Sichtfeld bei Waldrändern (rechts).

somit nicht möglich die Punkte anhand dieses Vorwissens weiter zu unterscheiden. Erst über geometrische Nachbarschaftsbeziehungen werden die Punkte später genauer untersucht und bewertet.

ADS-40 Daten Zusätzlich zu den ermittelten Höhenwerten liefert NGATE für jeden Punkt den sogenannten Figures of Merit (FOM). Dieser FOM ist ein numerischer Wert zwischen 0 und 99, der anzeigt, ob die durchgeführte automatische Höhenbestimmung erfolgreich war. Wenn der FOM-Wert unter 33 liegt, bedeutet dies, dass die automatische Korrelation beim Matching-Prozess nicht ausreichend war und der Höhenwert über eine andere Methode geschätzt wurde. Solche Werte werden für den in dieser Arbeit entwickelten Interpolationsprozess nicht verwendet, da diese unsicheren und möglicherweise fehlerhaften Bereiche in den ADS40-Daten durch die LIDAR-Punkte ergänzt werden sollen. Sind die FOM-Werte über 33, war der Matching-Prozess erfolgreich und die Höhe des FOM-Wertes zeigt noch zusätzlich an, wie gut die Korrelation war. Das bedeutet, dass die ADS40-Punkte anhand der FOM-Werte einerseits gefiltert werden können und andererseits auch eine erste Beurteilung der Punktqualität vorgenommen werden kann. In Abbildung 2 sind Beispiele für Situationen bei denen die automatische Höhenmessung nicht erfolgreich war und deshalb die durch die schlechten, auf der Abbildung rot dargestellten FOM-Werte gekennzeichnet wurden. Somit lassen sich die meisten fehlerhaften Stellen in den ADS40-Daten finden. Doch wurden auch in den Daten größere Flächen gefunden, bei denen trotz teilweise guten FOM-Werten die Höhenmessungen falsch sind. Dies kann auftreten wenn Wolken den

automatischen Matching-Prozess stören. Dabei wird fälschlicherweise die Wolkenoberfläche untersucht und es entstehen grobe Fehler. Es ist also erforderlich trotz den verfügbaren FOM-Werten die Höhenwerte der ADS40-Daten kritisch zu untersuchen und solche Fehler zu lokalisieren.

2.3 Punktverteilung und -dichte

LIDAR-Daten Die Verteilung und Dichte der LIDAR-Messpunkte variiert stark über den Testregionen und hängt von diversen Faktoren ab. LIDAR-Systeme verwenden unterschiedliche Arten von Scanner, die eine Oberfläche in einem charakteristischen Muster abtasten, das je nach Fluggeschwindigkeit und –bewegung variiert (Su und Bork, 2006). Auf ebenen Flächen, wie Wiesen, ist dieses regelmässige Muster zu erkennen. Durch die Struktur der Oberfläche wird dieses Muster gestört und es bilden sich Cluster und Löcher. Besonders deutlich sind diese Phänomene bei Waldflächen zu erkennen. Hier kommt zusätzlich dazu, dass einzelne Lasersignale mehrere Punktmessungen, First und Last Return, liefern können. Dadurch wird die Bildung von Clustern verstärkt. Durch die bereits durchgeführte Klassierung in Boden- und Vegetationspunkte unterscheiden sich die Punktverteilung der DTM und DOM Datensätze in Waldgebieten sehr stark. Die DOM-Daten enthalten immer noch alle Punkte und haben damit diese unregelmässige und geclusterte Verteilung. Die DTM-Daten dagegen weisen grosse Lücken auf an Stellen, an denen keine Lasersignale bis auf den Boden durchgedrungen sind. Zudem wurden bei der Klassierung Messpunkte auf den Gebäuden aus den DTM-Daten herausgefiltert. Dadurch entstehen zusätzlich Löcher (Abb. 3).

Um ein Gebiet vollständig abzudecken und möglichst keine Lücken zu haben, überlappen sich die Flugstreifen. So werden Flächen doppelt vermessen und weisen so ein grössere Punktdichte auf. Zudem sind gewisse Testregionen mehrfach vermessen worden, wodurch die Punktdichte weiter erhöht wurde.

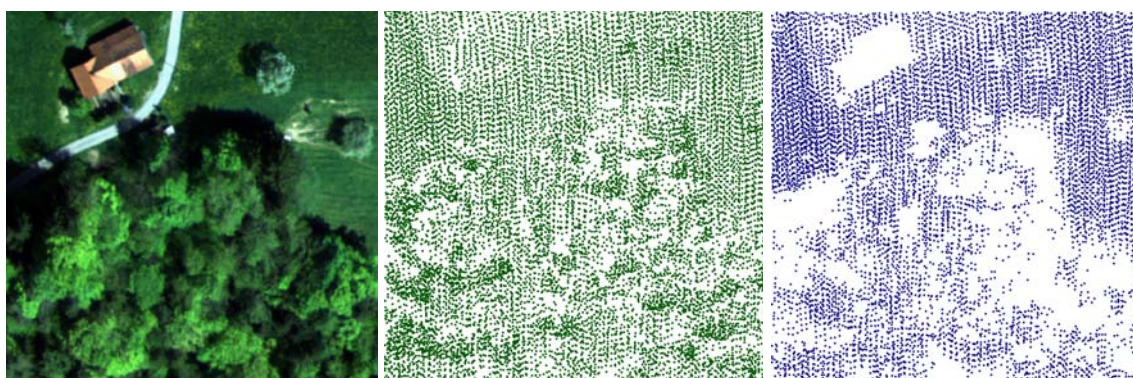


Abbildung 3: Punktverteilung und -dichte der beiden LIDAR-Datensätze DOM (Mitte) und DTM (rechts). Auf ebenen Flächen ist das charakteristische Muster des Laserscanners zu erkennen. Bei Wäldern dagegen ist die Verteilung unregelmässiger. Die DOM-Daten weisen Cluster auf, während die DTM-Daten teils grosse Lücken haben.

ADS40-Daten Der Prozess der automatischen Höhenwertbestimmung durch NGATE führt das Matching der Luftbilder für jedes Pixel durch (DeVenecia et al., 2007). Somit können sehr hochaufgelöste Höhendaten berechnet werden, doch ist das Matching für einzelne Pixel nicht immer erfolgreich. Die in dieser Arbeit verwendeten Höhendaten haben eine Auflösung von 1 m. Die ADS40-Luftbilder weisen im Allgemeinen eine Auflösung von 25 cm auf, einzig in den Ber-

gen liegt die Auflösung bei 50 cm. Dadurch stehen für jeden zu ermittelnden Höhepunkt mehrere Pixel zu Verfügung, was eine bessere Korrelation beim Matchingprozess und somit verlässlichere Höhenwerte zur Folge hat. NGATE liefert die ermittelten Daten bereits als ein Höhenmodellraster. Dieses Raster wird für den Interpolationsprozess wieder in Punktdaten zurückverwandelt. Die Anordnung der Punkte ist dadurch regelmässig und es liegt für die gesamte Fläche eine Punktdichte von genau 1 Punkt pro m^2 vor.

2.4 Vermessene Oberflächen

Durch die unterschiedlichen Aufnahmesysteme wird die Oberfläche unterschiedlich vermessen. Während LIDAR die Vegetation mit seinen Laserimpulsen penetrieren kann und so Messungen in der gesamten Struktur eines Waldes macht, bilden die Höhenwerte die mit NGATE generiert wurden nur die Oberfläche ab, die auf den ADS40 Luftbildern abgebildet ist. Dies bedeutet, dass in Wäldern nur bei grossen Lichtungen der Boden vermessen wird, ansonsten das oberste Blätterdach wiedergegeben wird.

Zudem wurden die Messungen mit beiden Systemen in unterschiedlichen Jahren vorgenommen, wodurch mit Veränderungen der Oberfläche, vor allem bei Wäldern, zu rechnen ist. Weiter wurden die LIDAR-Befliegungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten und damit bei verschiedenen Vegetationsständen durchgeführt. Die Penetrationsrate von LIDAR, und der damit verbundene Anteil an Bodenpunkten für die DTM-Generierung, ist bei Laubwäldern stark vom Blätterstand abhängig (Hodgson et al., 2005).

Daraus resultiert, dass die Messpunkte der verschiedenen Datensätze unterschiedliche Oberflächen resp. Strukturen abbilden (Abb. 4). Durch das Zusammenfügen der Datensätze erhält man eine Punktwolke aus der bei Wäldern keine eindeutige Oberfläche erkennbar wird. Ebene Flä-

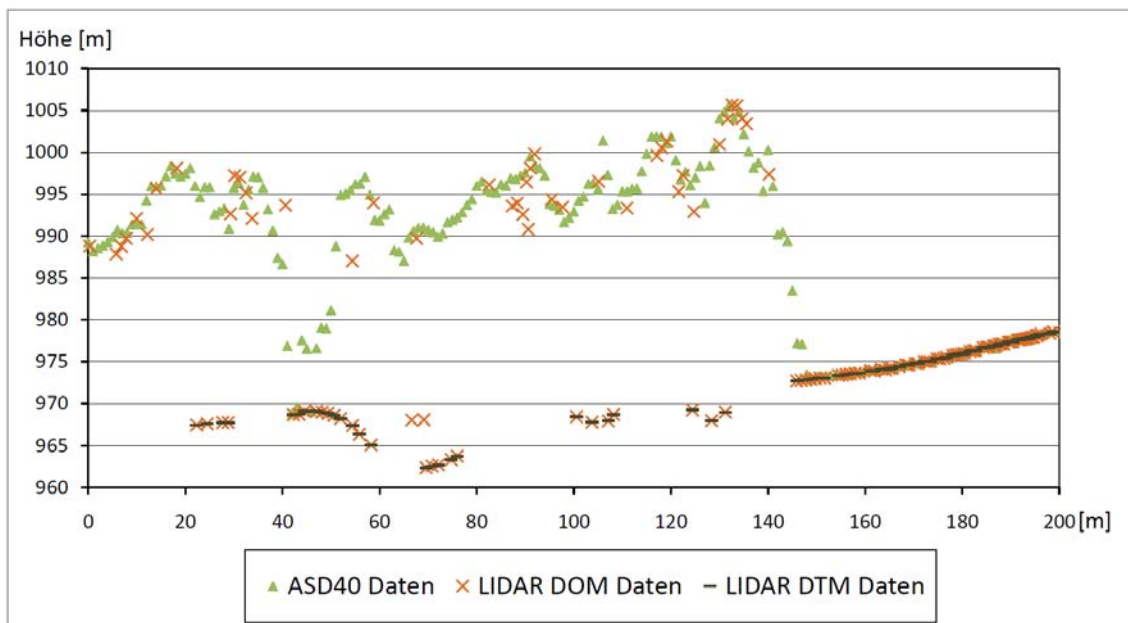


Abbildung 4: Profil durch einen Waldabschnitt mit den Höhenwerten der drei Datensätzen. Die ADS40-Daten geben die höchste Oberfläche des Waldes wieder, während die LIDAR DTM Daten den Boden abbilden. Die LIDAR DOM Daten haben sowohl Messpunkte der Baumspitzen, als auch des Bodens.

chen, wie Wiesen und Äcker haben dagegen eine einheitliche Oberfläche und zeigen für alle Datensätze meist keine grossen Differenzen. Die Aufgabe ist es, mit dieser verfügbaren Punktwolke die je nach Höhenmodelltyp gesuchte Oberfläche zu modellieren.

2.5 Validierung

Die Genauigkeit eines Höhenmodells zu messen ist problematisch, da für die Validierung ein Vergleich zwischen der interpolierten Oberfläche und einer genaueren Oberfläche benötigt wird (Heritage et. al., 2009). In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze, wie Höhenmodelle validiert werden können. Falls vorhanden werden punktuelle Referenzwerte verwendet, welche beispielsweise im Feld vermessen wurden (Hodgson & Breshanan, 2004). Wenn keine zusätzlichen Referenzdaten verfügbar sind, können aus den Datensätzen ein gewisser Anteil an Punkten entnommen werden. Diese Punkte werden dann nicht für die Interpolation verwendet, sondern dienen der Validierung des interpolierten Höhenmodells (Tomczak, 1998; Lloyd & Atkinson 2002). Dabei stellt sich die Frage, welche Punkte für die Validierung aussortiert werden sollen, was bei der Anwendung mit mehreren Datensätzen zusätzlich problematisch ist. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von künstlichen Daten. Der Vorteil gegenüber den realen Daten ist, dass die genauen Oberflächen bekannt sind, da sie einer gewählten mathematischen Funktion folgen, und somit eine Validierung für jede Rasterzelle möglich ist. Jedoch entsprechen diese Daten nur bedingt den realen Gegebenheiten und die Resultate der Validierung müssen daher kritisch diskutiert werden (Zimmermann et al., 1999).

In dieser Arbeit werden zwei Validierungsformen angewendet. Einerseits werden Testserien mit künstlichen Daten durchgeführt (Kapitel 6) und andererseits werden terrestrisch vermessene Referenzwerte eingesetzt (Abschnitt 8.2.3).

2.5.1 Verwendung von künstlichen Daten und Oberflächen

Die Verwendung von künstlichen Daten bringt den Vorteil mit sich, dass die resultierenden Höhenmodelle an jeder Stelle validiert werden können. So kann systematisch der Einfluss von verschiedenen Eigenschaften der Daten auf die Genauigkeit der Interpolation untersucht werden (Zimmermann et al., 1999). Dadurch können verlässliche Aussagen über die Funktion der untersuchten Interpolationsmethode in Bezug auf diese künstlichen Daten gemacht werden.

Es besteht jedoch die Gefahr, dass durch die künstlichen Daten unfaire Vor- oder Nachteile für die untersuchte Methode entstehen und dadurch die Resultate der Validierung verfälscht werden (Zimmermann et al., 1999). Deshalb ist bei der Generierung der künstlichen Daten darauf zu achten, dass die erstellten Oberflächen und Punktdatensätze nicht spezifisch auf die zu untersuchende Methode angepasst sind, sondern eine möglichst neutrale Situation darstellen. So sollte es möglich sein, die gewonnenen Erkenntnisse auf die Anwendung an realen Daten übertragen zu können.

2.5.2 Validierung mit terrestrischen Referenzwerten

Für zwei der untersuchten Testregionen (Abschnitt 7.1) stehen Höhenmessungen von einzelnen Bäumen zur Verfügung. Für das Projekt „Langfristige Waldökosystem-Forschung“ (LWF) des WSL werden in der Schweiz auf 18 sogenannten LWF-Flächen Langzeitbeobachtungen durchgeführt. Im Rahmen dieser Beobachtungen wurden auch die Bäume vermessen. Dabei wurde mit

einem GPS die Position eines Baumes bestimmt und mit einem Theodoliten wurde die Höhe des Baumfusses und der Baumspitze gemessen. (WSL, 2010)

Diese Referenzwerte können für die Validierung der DOM und DTM eingesetzt werden. Jedoch sind die LWF-Flächen nur zwischen 1 bis 2 ha gross und bieten daher nur Referenzwerte für einen kleinen Bereich der untersuchten Testregionen, die gesamthaft eine Fläche von 25 ha haben.

2.6 Zusammenfassung

Die beiden Messsysteme LIDAR und NGATE sind von ihrer Funktion her sehr unterschiedlich, liefern aber vergleichbar genaue Höhenwerte. Jedoch haben beide Systeme ihre charakteristischen Stärken und Schwächen. Die LIDAR-Daten sind in vieler Hinsicht heterogener. Ihre Punktverteilung und -dichte variiert stark. Die Messungen wurden in verschiedenen Jahren durchgeführt, wodurch leicht veränderte Oberflächen vermessen wurden, vor allem in Gebieten mit Vegetation. Dafür ist nur LIDAR in der Lage auch den Boden unter einem Wald zu messen, was für eine DTM-Generierung notwendig ist.

Die Daten der ADS40 sind dagegen wesentlich homogener. Die automatische Generierung der Höhendaten durch NGATE liefert eine regelmässige Punktverteilung. Wenn die automatische Generierung nicht erfolgreich war, wird dies durch entsprechende Werte für die FOM gekennzeichnet. Dadurch erhält man Hinweise, welche Datenpunkte von NGATE als verlässlich erachtet werden und welche nicht.

Werden die Datensätze kombiniert, erhält man eine Punktwolke, aus der die gesuchte Oberfläche interpoliert werden soll. Es muss deshalb vor der Interpolation eine Gewichtung der einzelnen Datenpunkte durchgeführt werden, die aussagt, wie gut ein Punkt für die Oberfläche des jeweiligen Höhenmodells geeignet ist.

Für die Validierung stehen nur für zwei kleine Flächen punktuelle Referenzdaten von Baummessungen zur Verfügung. Deshalb wird der entwickelte Interpolationsprozess zuerst an künstlichen Oberflächen getestet.

3. Stand der Forschung

Nachdem die Ausgangslage analysiert wurde, sollen nun Möglichkeiten aus der Forschung diskutiert werden, die für vergleichbare Problemstellungen entwickelt wurden. Dabei soll einerseits aufgezeigt werden, welche Methoden für den angestrebten Interpolationsprozess verwendet werden können und andererseits soll deutlich gemacht werden, welche Forschungslücken noch bestehen, die diese Arbeit schliessen soll.

3.1 Stand der Forschung

Das Problem der Interpolation von Höhenmodellen aus einer Kombination von verschiedenen hochaufgelösten Höhendaten unterschiedlicher Messsysteme wurde bisher in dieser Form in der Forschung noch nicht untersucht. Jedoch wurden zu den einzelnen Teilschritten dieses Interpolationsprozesses verschiedenste Probleme betrachtet und Methoden dafür entwickelt. Die Forschungsfelder, die einen Bezug zum entwickelten Interpolationsprozess haben, sind die Klassierung, Gewichtung und Filterung von Punktdaten, die Interpolation von Höhenmodellen, die Interpolation heterogener Daten, sowie die Unsicherheitsmodellierung. Im Folgenden wird der Forschungsstand für diese Themen besprochen.

3.1.1 Klassierung, Gewichtung und Filterung von Punktwolken

Das Problem der Klassierung, Gewichtung und Filterung von Punktwolken, um sie für die Interpolation einer Oberfläche vorzubereiten, wurde vor allem im Bezug auf LIDAR-Daten ausführlich untersucht. Der Fokus dabei liegt darauf, die gemessenen Punkte in Vegetations- und Bodpunkte zu klassieren und so die Grundlage für die Interpolation von DTM und DOM zu schaffen. Sithole & Vosselmann (2003) stellen in ihrer Studie eine Übersicht über die verschiedenen Filterverfahren und deren Funktion zusammen. Bei diesen Filterverfahren werden die Nachbarschaftsbeziehungen der Punkte untersucht, um die für die DTM Generierung unerwünschten Vegetationspunkte herauszufiltern. Dabei gibt es eine grosse Auswahl an verschiedenen Methoden, die für den Interpolationsprozess verwendet werden könnten. Eine besonders interessante Methode im Hinblick auf den gesuchten Interpolationsprozess ist die robuste Interpolation, die Kraus und Pfeifer (1998) entwickelten. Diese Methode vom Typ „Surface based“ (Abb. 5) kombiniert die Klassierung und Gewichtung der Punkte mit einer linearen Interpolation, wobei der Schwerpunkt auf der Klassierung der LIDAR-Punkte und der Interpolation eines DTM für Waldflächen liegt. So baut der in dieser Arbeit entwickelte Interpolationsprozess in vieler Hinsicht auf dem Ansatz dieser Robusten Interpolation auf. Deren genaue Funktion und die vorgenommenen Anpassungen für den Interpolationsprozess werden später im Kapitel Methodik besprochen.

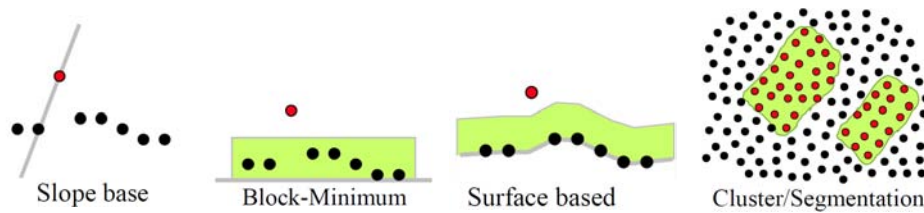


Abbildung 5: Konzept der Filtermethoden für LIDAR-Daten. Anhand der Beziehung zu seinen benachbarten Punkten wird ein Punkt als Boden- oder Vegetationspunkt klassiert. Nach Sithole & Vosselmann (2003)

3.1.2 Interpolation von Höhenmodellen

Digitale Höhenmodelle können als eine spezielle Form der interpolierten, kontinuierlichen Oberflächen angesehen werden. Je nach Datengrundlagen und Eigenschaften des Untersuchungsgebietes eignen sich einzelne Interpolationsmethoden besser als andere (Burrough & McDonnell, 2005). In diversen Studien wurden deterministische Interpolationsmethoden, wie IDW, Natural Neighbour oder Splines, mit den geostatistischen Methoden des Kriging oder TIN-basierten Ansätzen im Bezug auf die Interpolation von Höhenmodellen verglichen, wobei sich gewisse Methoden als geeigneter herauskristallisierten. In den Studien von Zimmermann et. al. (1999), Lloyd & Atkinson (2002) oder Gonçalves (2006) wird eine Form des Kriging als der geeignetste Ansatz bewertet. Dagegen schneiden in anderen Studien andere Methoden besser ab. So ist dies bei Batters & Coops (2009) der Natural Neighbour-Ansatz, bei Heritage et al. (2009) eine TIN-basierte Methode oder bei Su & Bork (2006) der IDW-Ansatz. All diese Studien beschäftigten sich mit der Verarbeitung von hochaufgelösten LIDAR-Daten und sind von der Datengrundlage her vergleichbar mit der hier untersuchten Anwendung. Es gilt aber zu beachten, dass meist nur die Generierung von DTM untersucht wurde, deren Datengrundlage und die Eigenschaften der zu interpolierenden Oberfläche stark von denen eines DOM unterscheiden (vgl. Abschnitt 2.4). Wenn die Generierung von DOM untersucht wurde, wie bei Smith et al. (2003) oder Zinger et al. (2002), wurde dies im Bezug auf urbane Gebiete getan. Um eine solch abrupte Oberflächenstruktur möglichst gut erhalten zu können, muss der Interpolationsalgorithmus sehr lokal angewendet werden (Smith et al. 2003) und Interpolation sollte eine möglichst geringe Glättung der Oberfläche zur Folge haben (Zinger et al., 2002).

Dieser Überblick zum Forschungsstand soll aufzeigen, dass keine Methode als das universell geeignete Interpolationsverfahren für die generierung von Höhenmodellen angesehen werden kann (Heritage et al., 2009).

3.1.3 Interpolation heterogener Daten

Nachdem nun aufgezeigt wurde, welche Methoden für die Interpolation von Höhenmodellen eingesetzt werden können, sollen nun Methoden und Erweiterungen vorgestellt werden, die für Daten mit heterogenen Eigenschaften entwickelt wurden.

Besonders häufig wurde die heterogene Punktverteilung untersucht. So gibt es verschiedene Ansätze, wie die Interpolation auf unregelmäßige, geclusterte Punktverteilungen angepasst werden kann. So gibt es Möglichkeiten neben der Distanz auch die Richtung zu einem Punkt zu berücksichtigen. Shepard (1968) entwickelte einen Ansatz bei dem anhand der Richtung beurteilt wird, ob ein für die Interpolation verwendeter Datenpunkt im Schatten von anderen Datenpunkten liegt und dadurch schwächer gewichtet werden sollte. Tomczak (1998) erweiterte den IDW-Ansatz um

Anisotropie in den Datenpunkten zu berücksichtigen, wie sie für Niederschlagsmessungen vorkommen kann, da diese von der vorherrschenden Windrichtung und der Topographie abhängig sein können.

Um die Übergewichtung von Clustern zu verringern, entwickelten Falke & Husar (1998) das DeCluster-Verfahren. Bei diesem Verfahren wird in den Punktdaten nach Clustern gesucht und deren Punkte werden schwächer gewichtet. Lu & Wong (2008) entwickelten eine Methode, wie anhand der lokalen Punktdichte die Parameter der Interpolation adaptiv angepasst werden. Eine weitere Möglichkeit, wie unregelmässige Punktverteilungen berücksichtigt werden können, ist die auch in dieser Arbeit verwendete Quadrantensuche (Isaaks & Srivastava, 1989).

Explizit mit der Interpolation von qualitativ unterschiedlichen Daten hat sich Rühaak (2006) befasst. Er erweiterte den IDW-Ansatz für die Erstellung eines 3-dimensionalen Temperaturfeldes aus Messungen von Bohrlöchern. Diese Messungen wurden mittels unterschiedlichen Messinstrumenten durchgeführt und sind dadurch qualitativ unterschiedlich einzustufen. Dafür wurde ein Faktor in die IDW-Interpolation eingebaut, der die Qualität der Messpunkte berücksichtigt. Im Unterschied zur hier entwickelten Anwendung, konnte Rühaak (2006) die Qualität der Punkte alleine anhand ihrer Messungsart beurteilen und brauchte keinerlei weiteren Methode dafür.

3.1.4 Unsicherheitsmodellierung

Bei der Verwendung von unsicheren, räumlichen Informationen, wie interpolierten Höhenmodellen, müssen die auftretenden Unsicherheiten berücksichtigt und deren Behandlung bedacht werden (Fisher, 1999). Deshalb wurden für die Interpolation Methoden zur Unsicherheitsmodellierung entwickelt. Kriging liefert mit der Kriging-Varianz bereits ein Mass für die Unsicherheit der geschätzten Werte (Burrough & McDonnell, 2005). Für deterministische Interpolationsmethoden wurden ebenfalls Ansätze entwickelt, wie die Unsicherheit bewertet werden kann. Ein Ansatz ist die Methode Jackknife, mit der ein Konfidenzintervall berechnet wird, an dem die Unsicherheiten für die interpolierten Werte abgelesen werden können (Tomczak, 1998; Smith et al., 2005). Dabei wird untersucht, wie das Resultat der Interpolation variiert, wenn nacheinander einzelne Datenpunkte weggelassen werden. Das heisst, Jackknifing ist ein sehr zeitaufwändiger Prozess, bei dem jede Rasterzelle mehrfach interpoliert werden muss. Daher scheint diese Lösung nicht ideal zu sein für die Anwendung an grossen Datensätzen.

3.2 Forschungslücken und Bezug zur Arbeit

Bisher wurde kein geeigneter Interpolationsprozess für die Generierung von Höhenmodellen aus mehreren Datenquellen entwickelt, der für die in dieser Arbeit untersuchte Problemstellung angewendet werden kann. Deshalb wird in dieser Arbeit ein solcher Interpolationsprozess entwickelt. Die zu behandelnden Problemstellungen für die Teilschritte des Prozesses wurden in der Forschung meist ausführlich untersucht und so ist die Auswahl an möglichen Methoden, die für einen solchen Interpolationsprozess eingesetzt werden können, gross. Es werden geeignete Methoden ausgewählt und für die Anwendung in dem mehrstufigen Interpolationsprozess angepasst.

Bei den Filteralgorithmen für LIDAR-Daten (vgl. Abschnitt 3.1.1) werden die einzelnen Datenpunkte nicht unterschieden. Bei der in dieser Arbeit untersuchten Anwendung stammen die Punkte von verschiedenen Datenquellen und sind von unterschiedlicher Qualität. Deshalb soll es

möglich sein, die Datenpunkte in der zu entwickelnden Methode unterschiedlich zu behandeln.

Für die Interpolation von qualitativ unterschiedlichen Punkten hat Rühaak (2006) bereits eine Methode entwickelt, die als Grundlage verwendet werden kann. Es wird zudem untersucht, welche weiteren Anpassungen für heterogene Daten für die in dieser Arbeit untersuchten Anwendung sinnvoll sind und wie bei diesen Erweiterungen die Qualität der Datenpunkte berücksichtigt werden kann. Da die Unsicherheitsmodellierung mit der Jackknife-Methode sehr zeitaufwändig ist, soll ein anderer Ansatz getestet werden, wie die Unsicherheit der Interpolation effizienter beschrieben werden kann. Dies soll erreicht werden, indem bereits während der Interpolation des Höhenmodells die Informationen zur Beschreibung der Unsicherheit erfasst werden und somit nachträgliche Methode, wie Jackknife, notwendig ist.

4. Grundlagen des entwickelten Interpolationsprozesses

4.1 Konzept des Interpolationsprozesses

Der entwickelte Interpolationsprozess umfasst drei Hauptteile (Abb. 6). Zuerst wird eine Vorbereitung und Bewertung der Daten durchgeführt. Nach diesem Schritt liegen die Datenpunkte mit einer zusätzlichen Qualitätsgewichtung vor und es folgt die Interpolation der Höhenmodelle. Im letzten Teil wird die Validierung der Resultate vorgenommen.

Die Anwendung dieses Interpolationsprozesses erfordert, dass die einzelnen Schritte auf die verfügbaren Datenquellen und an die Anforderungen an das resultierende Höhenmodell angepasst werden. Für die in dieser Arbeit untersuchte Anwendung an den ADS40- und LIDAR-Daten wird der genaue Ablauf des Interpolationsprozesses in Abschnitt 7.3 besprochen.

4.1.1 Vorbereitung und Bewertung der Daten

Das Ziel dieses ersten Teils des Interpolationsprozesses ist es die Input-Datensätze und deren einzelnen Datenpunkte zu untersuchen, um eine Bewertung ihrer Qualität vorzunehmen. Die Qualität eines Datenpunktes soll einerseits beschreiben wie gut die Messung des Höhenwertes durchgeführt werden konnte. Andererseits soll die Qualität angeben, wie wahrscheinlich ein Punkt auf der je nach Höhenmodell gesuchten Oberfläche liegt (vgl. Abschnitt 1.4). Daraus wird ein Gewicht für jeden einzelnen Punkt abgeleitet. Die gewichteten Punkte werden dann bei der Interpolation weiter verwendet. Die zentralen Fragen sind, welche Informationen und messbaren Grössen man für eine Beurteilung der Qualität der Punkte herbeiziehen kann und wie daraus Gewichte abgeleitet werden können.

Die Beurteilung der Genauigkeit der Höhenmessung erfolgt durch den Einbezug von Vorwissen. Dabei sollen alle Informationen zum Aufnahmesystem, den Aufnahmeumständen, den durchgeführten Messungen und der möglicherweise vorgenommenen Vorprozessierung gesammelt werden. Als erstes können anhand dieser Informationen die verschiedenen Datensätze verglichen und eine erste Gewichtung durchgeführt werden. Dieser erste Gewichtungsfaktor gilt für den gesamten Datensatz und wird so jedem Punkt in gleicher Weise angehängt.

Anschliessend werden, falls die nötigen Informationen vorhanden sind, die einzelnen Punkte der Datensätze beurteilt. Dadurch setzt sich das Gewicht eines Punktes nach dem Einbezug des Vorwissens aus dem Gewichtungsfaktor des Datensatzes und dem individuellen Gewichtungsfaktor zusammen. Die Schwierigkeit bei der Bewertung der Punkte ist es, die gegebenen Informationen

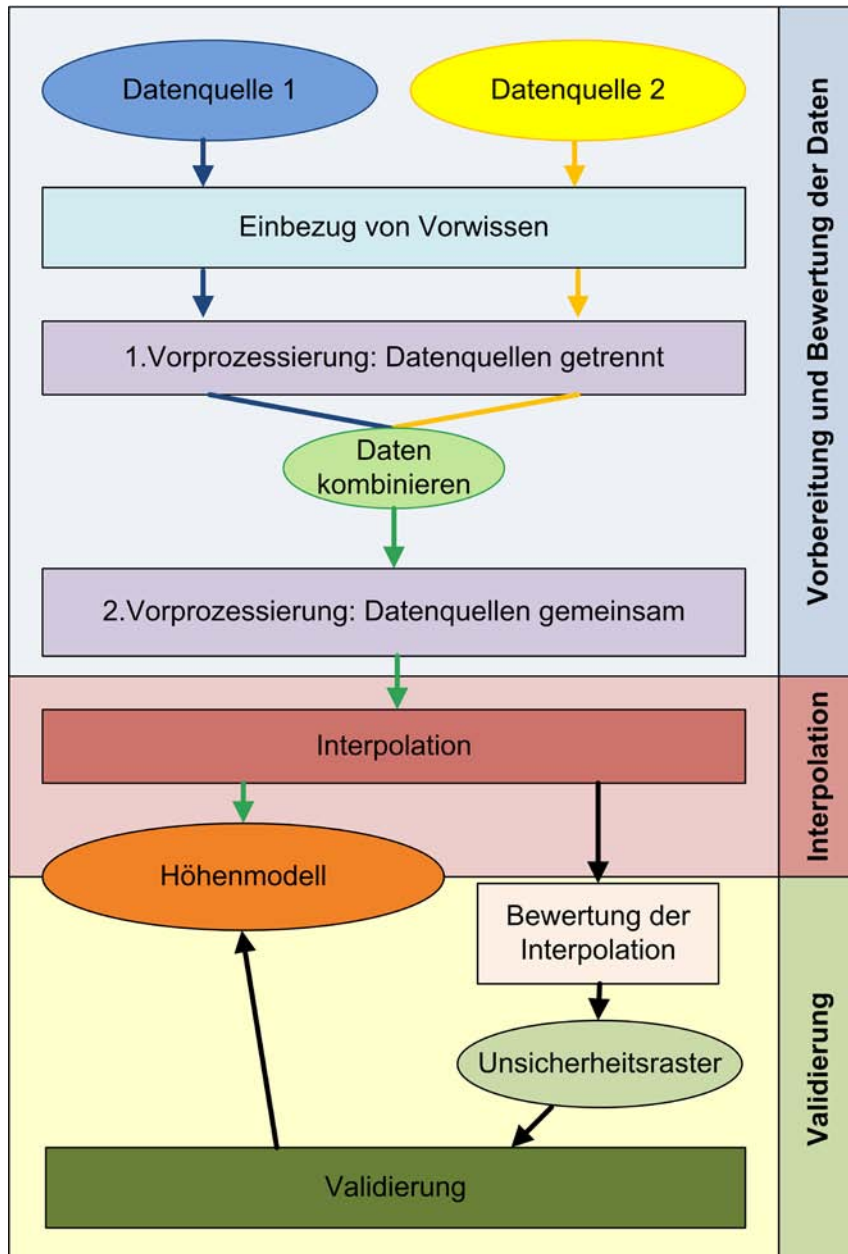


Abbildung 6: Allgemeiner Ablauf des Interpolationsprozesses

in Gewichtungsfaktoren umzuwandeln. Denn es gibt keine etablierten statistischen Methoden für die Berechnung solcher Gewichte (Rühaak, 2006). Deshalb braucht es eine Entscheidung des Anwenders wie die Datensätze gewichtet werden.

Nachdem die bisherige Gewichtung auf zusätzlichen Informationen zu den Datensätzen und der Beurteilung durch den Anwender beruhte, werden bei der Vorprozessierung die räumliche Verteilung und die Nachbarschaftsbeziehungen der Datenpunkte untersucht. Die dafür eingesetzte Methode soll die Wahrscheinlichkeit beurteilen, mit der ein Punkt auf der je nach Höhenmodelltyp gesuchten Oberfläche liegt und daraus einen Gewichtungsfaktor bestimmen. Die Vorprozessierung kann getrennt nach Datensatz oder nach dem Zusammenfügen der Daten durchgeführt werden. Dies muss bei der vorliegenden Anwendung anhand der Datengrundlage beurteilt werden.

4.1.2 Interpolation

Durch die Vorbereitung der Daten stehen der Interpolation nun nach ihrer Qualität gewichtete Datenpunkte zur Verfügung. Die Aufgabe besteht nun darin diese Qualität in die Interpolation einzubeziehen, so dass das Höhenmodell möglichst genau die gesuchte Oberfläche wiedergibt. Es muss also ein Weg gefunden werden, wie diese Qualität als zusätzlicher Faktor in den Interpolationsalgorithmus mit einbezogen werden kann. Zudem muss die Interpolation möglichst gut auf die Eigenschaften der Daten, wie beispielsweise die unregelmässige Punktverteilung und –dichte der LIDAR-Daten, angepasst werden. Um diese Anforderungen zu erfüllen ist die Wahl der Interpolationsmethode von zentraler Bedeutung. Diese wird ausführlich in Abschnitt 4.2 besprochen.

4.1.3 Validierung und Bewertung der Höhenmodelle

Die Schwierigkeiten, die bei der Validierung von realen Daten bestehen und welche Methoden in dieser Arbeit angewendet werden, wurden bereits in Abschnitt 2.5 besprochen. Es wurde dort gezeigt, dass die aus realen Daten interpolierten Höhenmodelle nur mittels weniger Referenzpunkte validiert werden können. Die meisten Bereiche der Höhenmodelle können somit nicht direkt validiert werden und es kann so nicht beurteilt werden, wie genau die interpolierten Werte sind. Es soll deshalb ein alternativer Weg gesucht werden, mit dem für jede Rasterzelle des Höhenmodells eine Information über deren Unsicherheit angegeben wird. Dadurch soll dem Anwender gezeigt werden, wo das Höhenmodell aufgrund der Interpolationsmethode wahrscheinlich verlässliche Werte hat und wo bei der Interpolation Probleme auftraten und die Werte unsicherer sind. In der Analyse des Forschungsstandes wurde aufgezeigt, welche Möglichkeiten zur Unsicherheitsmodellierung der bei der Interpolation angewendet werden können (vgl. Abschnitt 3.1.4). In dieser Arbeit soll ein anderer Ansatz untersucht werden. Er basiert auf der Idee, dass die Genauigkeit der interpolierten Werte von den Eigenschaften der dafür verwendeten Datenpunkte abhängig ist. Deshalb soll anhand beschreibender Prüfgrössen dieser Eigenschaften eine Aussage über die wahrscheinlichen Unsicherheiten der Interpolation gemacht werden können. Es werden dafür während der Interpolation Informationen über die lokal verfügbaren Datenpunkte gesammelt und daraus die beschreibenden Prüfgrössen berechnet, mit denen die Unsicherheit der Interpolation bewertet wird. Daraus kann ein sogenanntes Unsicherheitsraster erstellt werden, das für die Validierung eingesetzt werden kann. Wie die genaue Umsetzung vorgenommen wird und welche Eigenschaften der Datenpunkte untersucht werden, wird in Abschnitt 5.4 ausführlich besprochen.

4.2 Wahl der Interpolationsmethode

Das zentrale Element des entwickelten Interpolationsprozesses ist die verwendete Interpolationsmethode. Wie bei der Diskussion des Forschungsstandes aufgezeigt, bieten sich verschiedene Methoden für die Interpolation von Höhenmodellen an. In dieser Arbeit wird der IDW-Ansatz als Basis für die Interpolation gewählt.

4.2.1 Anforderungen

Die Anforderungen an die Interpolationsmethode werden durch die bereits vorgestellten Eigenschaften der Daten (vgl. Abschnitt 2.1) und diejenigen des resultierenden Höhenmodells bestimmt. Durch die Kombination der Datensätze steht eine hohe Punktdichte zur Verfügung, die

für die grössten Teile der untersuchten Gebiete höher ist als 1 Punkt/m². Durch diese hohe Punktdichte werden verschiedene Anforderungen bestimmt. So kann die Interpolationsmethode nicht exakt sein, d.h. die interpolierte Oberfläche kann nicht durch jeden Datenpunkt gehen, da in vielen Rasterzellen der Oberfläche mehrere Datenpunkte liegen. Durch die hohe Anzahl an Datenpunkte gilt es aber auch die Effizienz der Interpolationsmethode zu beachten. Jedoch treten auch die Bereiche auf, wo die Punktdichte tiefer ist und Lücken in den Daten bestehen, was vor allem in den DTM-Daten für Waldgebiete vorkommt. Das bedeutet, der Interpolationsalgorithmus muss seine Funktion auf diese variierende Punktdichte anpassen können.

Dazu kommt die unregelmässige Struktur der vermessenen Oberfläche, insbesondere der Wälder bei einem DOM. Daher sollte die Interpolationsmethode lokal arbeiten, also nur wenige Datenpunkte aus der näheren Umgebung in die Interpolation einbeziehen, so dass ein nicht zu starker Glättungseffekt erzielt wird (Smith et al., 2005). Zudem ist die Methode dadurch effizienter und kann die lokal starke Variabilität der Oberfläche besser beschreiben. Diese komplexe Struktur der Wälder muss aber nicht zwingend erhalten bleiben. Die generierten Höhenmodelle dienen vorwiegend der Bestimmung der Waldgrenze und der Schätzung der Biomasse. Eine leichte Glättung der Oberfläche ist für diese Anwendungsbereiche nicht gravierend. Falls die exakte Struktur der Wälder erhalten werden sollte, so dass Informationen zu einzelnen Bäumen ableitbar wären, müssten andere Ansätze, als in dieser Arbeit verwendet, gewählt werden.

Weiter soll der zu entwickelnde Prozess die Qualität der Punkte berücksichtigen können. Dies bedingt, dass die verwendete Interpolationsmethode erweiterbar sein muss, um zusätzliche Gewichte pro Datenpunkt berücksichtigen zu können.

Zusammengefasst muss die Interpolationsmethode lokal, inexakt, effizient und möglichst einfach erweiterbar sein.

4.2.2 Diskussion der Möglichkeiten

Zur Interpolation von Höhenmodellen aus Punktdaten stehen mehrere Methoden zur Auswahl. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen deterministischen und stochastischen Interpolationsmethoden. Die deterministischen Methoden verwenden eine festgelegte Funktion für die Interpolation und erhalten bei gegebenem Input dadurch immer dieselben Resultate. Typische Vertreter sind neben Inverse Distance Weighting (IDW) die Natural Neighbour Interpolation (Watson, 1999), verschiedene Formen der TIN-basierten Interpolation (Isaaks & Srivastava, 1989) oder Spline-Funktionen (Burrough & McDonnell, 2005). Stochastische Verfahren sehen die interpolierten Werte nicht als klar bestimmt, sondern als eine Möglichkeit der Realisation einer Verteilungsfunktion (Burrough & McDonnell, 2005). Ihr wichtigster Vertreter ist Kriging, von dem es verschiedene Formen gibt, die auf einem ähnlichen Prinzip basieren. Erst werden die Daten untersucht um die Struktur darin zu erkennen. Dafür wird ein empirisches Variogramm erstellt, das die räumliche Autokorrelation zeigt. Es wird danach eine mathematische Funktion an dieses Variogramm angepasst, die anschliessend verwendet wird, um Gewichte für die Punkte anhand der beschriebenen räumlichen Autokorrelation zu bestimmen (Lu & Wong, 2008). Ein Vorteil des Kriging gegenüber den deterministischen Methoden ist, dass mittels der bestimmten Krigingvarianz bereits ein Konfidenzintervall berechnet wird, das Auskunft über die wahrscheinliche Unsicherheit der interpolierten Werte gibt (vgl. Abschnitt 4.1.3).

Es wird hier jedoch keine stochastische Methode gewählt, da bei hohen Punktdichten ihre Re-

sultate vergleichbar sind mit denen der einfacheren, deterministischen Interpolationsmethoden. (Burrough & McDonnell, 2005; Lloyd & Atkinson, 2002). Der Gewinn durch die statistische Analyse der Ausgangsdaten, die mit einem zusätzlichen grossen Aufwand verknüpft ist, geht dadurch verloren. Deshalb wird eine deterministische Methode für diese Anwendung bevorzugt. Grundsätzlich könnten verschiedene Methoden verwendet werden. Der IDW-Ansatz wurde ausgewählt, weil er sehr einfach aufgebaut ist und leicht für spezielle Anwendungen erweitert werden kann (Bartier & Keller, 1996; Tomczak, 1998; Rühaak, 2006).

4.2.3 Funktionsweise von IDW

IDW ist eine populäre Interpolationsmethode, da sie einfach anzuwenden ist und einen schnellen visuellen Überblick von Daten ermöglicht (Burrough & McDonnell, 2005). IDW basiert auf der Annahme, dass die Ähnlichkeit der Attributwerte zweier Punkte invers von der Distanz zwischen den Punkten abhängig ist. Der Einfluss der Datenpunkte auf die Interpolation ist somit direkt durch die Distanz bestimmt. Zur Schätzung eines Wertes $Z_{x,y}$ wird ein gewichteter Mittelwert berechnet, wobei sich die Gewichtung eines Datenpunktes Z_i durch die inverse Distanz D_i und einen zusätzlichen Exponenten, den Distanzgewichtungsfaktor dp , ergibt (Shepard, 1968). Dieser gewichtete Mittelwert wird nur aus einer gewissen Anzahl n von Datenpunkten in der lokalen Nachbarschaft berechnet. Es kann entweder eine konstante Grösse für n gewählt werden, dann werden die n -nächsten Nachbarpunkte für die Interpolation verwendet oder es können alle Punkte innerhalb eines festgelegten Suchradius verwendet werden (Renka, 1988). Die Formel für IDW nach Shepard (1968) lautet:

$$Z_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{D_i^{dp}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^{dp}}}$$

$Z_{x,y}$ = Geschätzter Höhenwert an der Stelle x,y
 Z_i = Höhenwert eines verwendeten Datenpunktes
 n = Anzahl verwendeter, benachbarter Datenpunkte
 D_i = Distanz zwischen $Z_{x,y}$ und Z_i
 dp = Distanzgewichtungsfaktor

IDW ist eine exakte Interpolationsmethode. Wenn ein Datenpunkt auf dem zu interpolierenden Punkt liegt, wird der Höhenwert dieses Datenpunktes direkt übernommen. Die lokalen Maxima und Minima liegen bei der interpolierten Oberfläche deshalb immer bei Datenpunkten (Burrough & McDonnell, 2005). In den Anforderungen an die Interpolationsmethode (vgl. Abschnitt 4.2.1) wurde festgelegt, dass die Interpolation inexakt sein soll. Deshalb wird dafür am IDW-Ansatz eine Anpassung vorgenommen die in Abschnitt 5.3.2 erläutert wird.

4.3 Bestimmung der Parameter

Eine Schwäche des IDW gegenüber dem Kriging ist, dass die einzelnen Parameter der Interpolation nicht empirisch aus den Daten bestimmt werden können und für die ganze Fläche konstant gehalten werden (Lu & Wong, 2008). Die Problematik bei der Einstellung der Parameter für die Anwendung an realen Daten ist, dass keine systematische Validierung mittels Referenzdaten durchgeführt werden kann (vgl. Abschnitt 2.5). Dadurch kann nicht festgestellt werden, welche

Parametereinstellungen optimal sind. Auch Ansätze wie Simulated Annealing, die zur Optimierung einer Funktion durch die optimale Bestimmung der Parameter dienen, können dadurch nicht eingesetzt werden (Davis, 1987; Weise, 2009).

Deshalb müssen die Parameter manuell eingestellt werden. Die Bandbreite der meisten Parameter kann jedoch stark eingegrenzt werden, durch die Eigenschaften der Datensätze und der vermessenen Oberfläche. Um die Beziehung zwischen den Parametern und den Eigenschaften der Datensätze und der Oberflächenstruktur zu untersuchen, werden die Tests mit künstlichen Daten durchgeführt (Abschnitt 6.3.2).

4.4 Technische Umsetzung

Für das Programmieren des Interpolationsalgorithmus und die statistische und visuelle Auswertung der Resultate wurden verschiedene technische Mittel eingesetzt, die in diesem Abschnitt kurz präsentiert werden.

C++ Der gesamte Interpolationsprozess wurde in der objektorientierten Programmiersprache C++ geschrieben. C++ wurde gewählt, da es als eine maschinennahe und effiziente Programmiersprache gilt. Ein weiteres Argument war die verwendete geometrische Bibliothek CGAL, die ebenfalls auf C++ basiert.

CGAL Diese Abkürzung steht für Computational Geometry Algorithms Library und es handelt sich dabei um eine Sammlung von geometrischen Algorithmen, die frei verfügbar sind als C++ Bibliothek. Das Ziel der Entwickler von CGAL ist der einfache Zugang zu effizienten und verlässlichen geometrischen Algorithmen (CGAL, 2010). Sämtliche geometrischen Berechnungen innerhalb des für den Interpolationsprozess geschriebenen Programmcode basieren auf den Algorithmen von CGAL.

R Hierbei handelt es sich sowohl um eine Programmiersprache, als auch um eine frei verfügbare Statistik-Software (R-Project, 2010). R wurde eingesetzt, um die Resultate statistisch auszuwerten und zu validieren. Dabei wurde die derzeit aktuellste Version 2.11.0 von R verwendet.

Quantum GIS Quantum GIS (QGIS) ist ein benutzerfreundliches Open Source Geographisches Informationssystem (GIS) welches auf Linux, Unix, Mac OSX, und Windows läuft. QGIS unterstützt Vektor-, Raster-, und Datenbankformate (QGIS, 2010). Es wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Visualisierung der Resultate verwendet. Zudem diente die in QGIS implementierte IDW-Interpolation zur Verifikation der Funktion der in dieser Arbeit programmierten IDW-Methode.

5. Methodik

In diesem Kapitel soll die Implementation des Interpolationsprozesses genauer betrachtet werden. Es wird erklärt, was die Ziele der einzelnen Schritte sind und welche Methoden dafür eingesetzt werden.

5.1 Einbezug von Vorwissen

In diesem ersten Schritt soll die Qualität der Datenpunkte aufgrund des Vorwissens, also den zusätzlichen Informationen zu den Datensätzen und den einzelnen Datenpunkten, bewertet werden. Diese Bewertung findet zuerst für die gesamten Datensätze statt und anschliessend für jeden Datenpunkt einzeln, falls dafür Informationen vorhanden sind. Das endgültige Gewicht der Datenpunkte setzt sich aus der Datensatz- und der Punktbewertung zusammen. Punkte, die als zu schlecht bewertet werden, können nach bereits diesem ersten Schritt entfernt werden.

5.1.1 Bewertung der Datensätze

Um die Datensätze zu bewerten werden Informationen zu der Aufnahmetechnik, den verwendeten Systemen und der daraus resultierenden Genauigkeit verwendet. Mit dieser Gewichtung können aber nicht nur die technischen Aspekte der Datensätze bewertet werden, sondern auch andere Argumente können dafür sprechen, dass ein Datensatz gegenüber den anderen bevorzugt werden soll.

Bei der in dieser Arbeit behandelten Anwendung mit den LIDAR und ADS40-Daten ist eine Unterscheidung anhand der technischen Informationen schwierig. Es gibt jedoch Argumente, die für eine stärkere Gewichtung der ADS40-Daten sprechen:

- die schweizweiten Aufnahmen wurden in einem wesentlich kleineren Zeitraum gemacht als die LIDAR-Messungen und sind zudem aktueller.
- alle Datensätze wurden mit dem gleichen Softwareprodukt (NGATE) erstellt. Für die LIDAR-Messungen wurden dagegen verschiedene Firmen beauftragt.

Für die Anwendung wie sie durch das WSL vorgesehen ist, sind dies wichtige Faktoren, die für die ADS40-Daten sprechen. Denn wichtige Anforderung an die Höhenmodelle sind, dass sie aktuell sind und für die gesamte Schweiz von vergleichbarer Qualität sein sollten. Somit sollen die ADS40-Daten durch eine stärkere Gewichtung gegenüber den LIDAR-Daten bevorzugt werden. Diese Unterscheidung soll bei diesem ersten Schritt des Interpolationsprozesses nicht zu stark ausfallen. Es besteht bei der Vorprozessierung nochmals die Möglichkeit die Datensätze unter-

schiedlich zu bevorzugen. Es wird eine Gewichtung von 1 für die ADS40- und 0.8 für die LIDAR-Datensätze gewählt. Die Begründung für die Wahl dieser beiden Werte wird am Ende des Abschnitts 5.1.2 gegeben.

5.1.2 Bewertung der Datenpunkte

Sind noch Informationen zu den einzelnen Punkten verfügbar, werden diese nun analysiert, um daraus eine Bewertung der Punktqualität durchzuführen. Bei den LIDAR-Punkten gibt es keine zusätzliche Information, obwohl es durchaus möglich wäre anhand der Aufnahmeumstände, dem empfangenen Signal, der vorgenommenen Vorprozessierung und Klassierung und Boden- und Vegetationspunkte Informationen zu sammeln, die für eine Bewertung verwendet werden könnten. Doch da solche Informationen fehlen können die LIDAR-Punkte nicht weiter bewertet werden und gehen nur mit der Datensatzgewichtung in die Vorprozessierung.

Bei den ADS40-Daten wird mit den FOM (vgl. Abschnitt 2.2) ein Qualitätsmass mitgeliefert. Nun gilt es diese FOM-Werte in eine Gewichtung umzuwandeln. Die FOM-Werte liegen zwischen 0 und 99. Punkte mit FOM-Werten unter 33, bei denen die automatische Korrelation bei Matching-Prozess nicht erfolgreich war, werden nicht mehr verwendet, denn schliesslich ist es das Ziel diese schlechten Punkte durch den anderen Datensatz zu ergänzen. Höhere FOM-Werte gelten als gut, wobei die Höhe der FOM-Werte aussagt, wie gut die automatische Korrelation funktionierte und wie verlässliche die ermittelten Höhenwerte dadurch sind. Diese Datenpunkte werden verwendet und erhalten ein Gewicht im Verhältnis zu ihrem FOM-Wert zwischen 0.6 und 1.

Da der ADS40-Datensatz mit einem Gewichtungsfaktor von 1 bewertet wurde (Abschnitt 5.1.1), liegen somit die Gewichtungsfaktoren der ADS40-Punkte im Intervall von 0.6 bis 1.0. Die nicht einzeln bewerteten LIDAR-Punkte liegen mit dem Faktor von 0.8 exakt in der Mitte dieses Intervalls (Tab. 1).

Datensatz	Bewertung Datensatz	Bewertung Punkte	Gesamte Bewertung
ADS40	1	0.6 - 1	0.6 - 1
LIDAR	0.8	-	0.8

Tabelle 1: Zusammenstellung der gewählten Gewichte für die verfügbaren Datensätze

5.2 Vorprozessierung

Mit der Vorprozessierung geht es darum die Punkte mittels Nachbarschaftsbeziehungen zu untersuchen und dadurch zu bewerten. Die zentrale Frage ist dabei, wie nahe ein Punkt der gesuchten Oberfläche des Höhenmodells ist. Zuerst wird das Prinzip dieser Gewichtung erklärt und danach werden mehr Details zu den verwendeten Gewichtungsfunktionen gegeben.

5.2.1 Prinzip der Gewichtung

Die Problematik der Datensätze ist, dass man eine einfache Punkteverteilung in 2-Dimensionen hat, sondern die Punkte auch vertikal übereinander liegen können. Man hat somit eine 3-dimensionale Punktwolke durch die eine Oberfläche gelegt werden soll. Mit solchen Problemen hat man sich bereits intensiv im Bereich des LIDAR befasst. Es wurden verschiedenste Methoden entwickelt, wie die Punkte klassiert, gefiltert und gewichtet werden können, bis schlussendlich nur noch

die Punkte übrig bleiben, welche die gesuchte Oberfläche am ehesten repräsentieren (bspw. Kraus & Pfeifer, 1998; Vosselman et al., 2000; Briese et al., 2002).

Kraus & Pfeifer (1998) entwickelten ein Verfahren das als Robuste Interpolation bezeichnet wird. Für den in dieser Arbeit entwickelten Interpolationsprozess bildet es die Grundlage für die Vorprozessierung, weshalb es nun kurz vorgestellt wird. Dieses Verfahren dient dazu aus unklassierten LIDAR-Punkten die Vegetationspunkte herauszufiltern, um schlussendlich ein DTM zu erhalten. Es basiert auf einem iterativen Prozess, bei dem für jeden Schritt neu eine Oberfläche mittels linearer Prädiktion approximiert wird. Diese Oberfläche verläuft in den ersten Schritten zwischen den Vegetations- und den Bodenpunkten hindurch. Durch eine Gewichtungsfunktion (vgl. Abschnitt 5.2.2) werden die Punkte über der Kurve als Vegetation klassiert und herausgefiltert. Punkte unter der Kurve werden dagegen stärker gewichtet. Dadurch nähert sich die Oberfläche mit jedem iterativen Schritt näher dem tatsächlichen Boden und so der gesuchten Oberfläche an. (Kraus & Pfeifer, 1998)

Der zu entwickelnde Interpolationsprozess wird ein ähnliches Prinzip für die Gewichtung verwenden. Es basiert ebenfalls aus einem iterativen Prozess, bei dem aber nicht eine Oberfläche approximiert wird, sondern jeder Datenpunkt einzeln durch seine Nachbarn geschätzt wird. Der Ansatz, bei dem man einen Punkt weglässt und seinen Wert durch die übrigen Punkte schätzt, wird ebenfalls bei der Cross-Validation angewendet (Tomczak, 1998). Für die Schätzung der Punktwerte wird dieselbe Interpolationsmethode verwendet wie später bei der Generierung der Höhenmodelle. Jedoch sollte hier nur mit einem sehr kleinen Suchradius gearbeitet werden, da diese Nachbarschaftsbeziehungen nur lokal aussagekräftig sind. Empfohlen wird ein maximaler Suchradius von 3 Metern. Sollten innerhalb dieses Suchradius keine benachbarten Punkte gefunden werden, so kann keine Aussage über die Lage Punktes im Bezug zu seiner Umgebung gemacht werden und es wird ihm kein zusätzlichen Gewichtungsfaktor durch die Vorprozessierung angehängt. Für alle anderen Punkte wird der Höhenwert anhand der benachbarten Punkte interpoliert. Als Grundlage für die Bewertung der Punkte wird dann die Differenz zwischen dem gemessenen

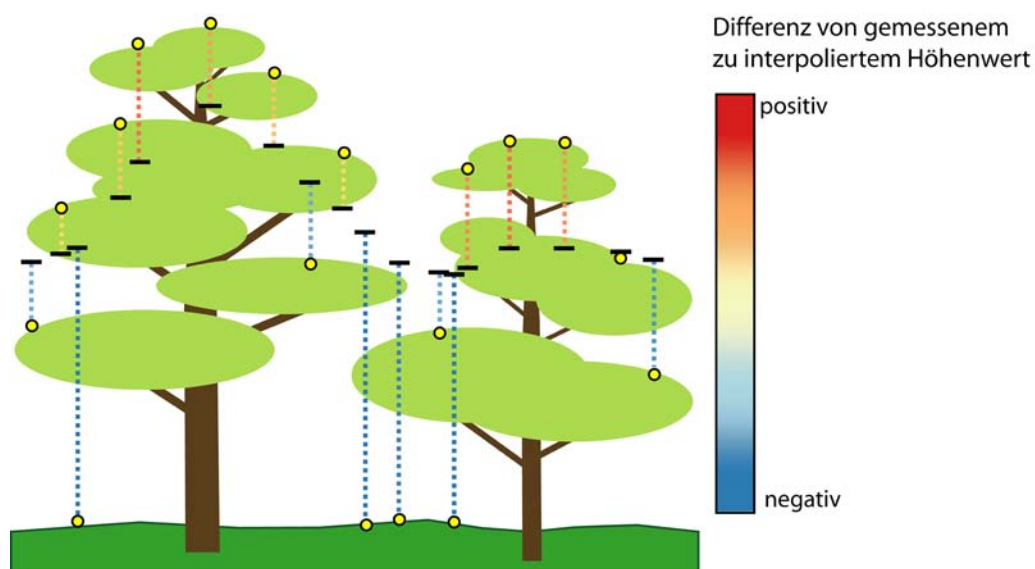


Abbildung 7: Prinzip der Gewichtung. Die Differenz zwischen den Datenpunkten (gelb) und den interpolierten Höhen (schwarze Striche) wird mittels einer Gewichtungsfunktion in einen Qualitätswert umgerechnet.

und dem interpolierten Höhenwert berechnet (Abb. 7). Mittels einer Gewichtungsfunktion wird anhand dieser Differenz den Datenpunkten ein Gewichtungsfaktor zugewiesen.

Diese Vorprozessierung kann an einzelnen Datensätzen oder den bereits kombinierten Punktdaten durchgeführt werden. Es besteht weiter noch die Möglichkeit die Punkte eines Datensatzes in Abhängigkeit eines anderen, als besser eingestuftem Datensatzes zu bewerten. Diese Variante kann eingesetzt werden, wenn ein Datensatz bevorzugt werden soll, weil seine Höhenwerte als besser angesehen werden. Dies hat zur Folge, dass dieser bevorzugte Datensatz nur durch geeignete Höhenwerte des anderen Datensatzes ergänzt wird. Der schlechtere Datensatz wird in diesem Fall nur im Bezug zum besseren Datensatz bewertet. Dazu werden die Punkte des schlechteren Datensatzes einzeln durchgegangen und die Interpolation des Höhenwertes erfolgt nur durch die Punkte des besseren Datensatzes. In diesem Fall wird von einer abhängigen Vorprozessierung gesprochen. Sinnvoll ist diese Variante, wenn ein Datensatz vorliegt der im Allgemeinen die gesuchte Oberfläche bereits gut wiedergibt, jedoch Lücken in den Daten hat, die durch den anderen Datensatz ergänzt werden sollen. Es erfordert jedoch Vorwissen zu den Datensätzen mit dem begründet werden kann, weshalb der eine Datensatz dem anderen vorgezogen wird. Weist dieser bevorzugte Datensatz aber Fehler auf, werden diese nicht durch den anderen Datensatz korrigiert, sondern bleiben erhalten.

5.2.2 Verwendete Gewichtungsfunktionen

Wie besprochen werden die Punkte anhand der Differenz (*diff*) des gemessenen und des interpolierten Höhenwerts bewertet. Die Gewichte werden anhand einer Funktion berechnet. Kraus & Pfeifer (1998) verwendeten dazu die folgende Formel:

$$q = \begin{cases} 1 & \text{wenn } diff \leq shift \\ \frac{1}{1 + (a(diff - shift)^b)} & \text{wenn } shift < diff \leq shift + range \\ 0 & \text{wenn } shift + range < diff \end{cases}$$

Diese Funktion arbeitet mit einer Fallunterscheidung und hat dafür die zwei Parameter *shift* und *range* eingeführt. Punkte mit einer Differenz die kleiner ist als der *shift*-Wert, also unterhalb des interpolierten Wertes liegen, erhalten ein Gewicht von 1. Der *range*-Wert gibt an wie viel die Differenz grösser als der *shift*-Wert sein darf. Differenzen die höher sind, erhalten den Wert 0 und werden dadurch herausgefiltert. Nur im Bereich zwischen diesen zwei Parametern werden für die Punkte Gewichte berechnet. Mit den weiteren beiden Parametern *a* und *b* wird die Steilheit der Kurve eingestellt. Kraus & Pfeifer (1998) verwenden dafür die Werte 1 und 4. Wie in der Abbildung 8 zu sehen, ist diese Kurve sehr steil und hat somit einen stark filternden Charakter. Für unsere Anwendung wird die Gewichtungsfunktion leicht angepasst, so dass sie ein wenig abgerundet und abgeflacht wird. Denn bei dieser Anwendung soll mehr eine Bewertung der Punkte und nicht eine Filterung vorgenommen werden. Die angepasste Formel enthält einen weiteren Gewichtsparameter *c* und lautet:

$$q = \begin{cases} 1 & \text{wenn } diff \leq shift \\ \frac{1}{1 + (a \frac{(diff - shift)^b}{range^c})} & \text{wenn } shift < diff \leq shift + range \\ 0 & \text{wenn } shift + range < diff \end{cases}$$

Wie erwähnt wurde die Gewichtungsfunktion von Pfeifer & Kraus (1998) für die Generierung von DTM in Waldregionen entwickelt. Für den hier entwickelte Interpolationsprozess soll aber die Berechnung von DOM möglich sein. Dafür wird die vorgestellte Gewichtungskurve einfach umgedreht. Wenn diese Gewichtung nun für Wälder angewendet wird, hat dies zur Folge, dass neben Bodenpunkten auch die Punkte innerhalb der vertikalen Struktur herausgefiltert werden. Dadurch verliert man die wertvollen Informationen, die LIDAR über die vertikale Struktur der Wälder liefern kann und bildet schlicht die Oberfläche des Waldes, also das Blätterdach ab, so wie dies auch die ADS40-Daten machen. Nur noch grössere Lichtungen bleiben erhalten. Da die Anwendung der generierten DTM und DOM die Bestimmung der Waldgrenzen und -volumen ist, ist dieser Ansatz aber vertretbar.

Ein weiterer Fall der berücksichtigt werden muss, sind die flachen Ebenen, wie Wiesen und Äcker. Hier sollte im Normalfall die Streuung der Punkte nur gering sein. Dennoch kann es zu Abweichungen zwischen den Datensätzen kommen. Würde eine der beiden einseitigen Gewichtungsfunktionen verwendet, würden diese kleinen Abweichungen stärker hervorgehoben und so bspw. kleine Objekte oder Fehlmessungen, die nicht auf der gesuchten Oberfläche liegen, dadurch verstärkt dargestellt werden. Und es würden Differenzen zwischen den beiden Höhenmodellen DTM und DOM entstehen bei Flächen, die für beide Modelle gleich sein sollten. Deshalb wird noch eine weitere Gewichtungsfunktion eingeführt, die für solche ebenen Flächen bei der Vorprozessierung für beide Höhenmodelle eingesetzt werden soll. Mit dieser beidseitigen Gewichtungsfunktion sollen vorwiegend Ausreisser eliminiert werden und die Oberfläche von kleinen und für die Anwendung uninteressanten Objekten befreit werden. Diese Gewichtungsfunktion wird neutrale Gewichtung genannt und lautet wie folgt:

$$q = \begin{cases} \frac{1}{1 + a \left(\frac{|diff|^b}{range^c} \right)} & \text{wenn } -range < diff < range \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

5.2.3 Verwendung einer grobrasterigen Waldmaske

Die Verwendung der grobrasterigen Waldmaske ist eine optionale Erweiterung für den Interpolationsprozess. In dieser Arbeit soll untersucht werden, was der Gewinn einer solchen Waldmaske ist, wobei deren Generierung im Hintergrund steht.

Wie erläutert sollen Waldflächen und ebene Flächen unterschiedlich vorprozessiert werden, um so die Differenzen zwischen den DTM und den DOM auf Waldflächen zu reduzieren. Diese ebenen Flächen werden zusammengefasst als „Nichtwald“ bezeichnet. Unter „Wald“ werden sämt-

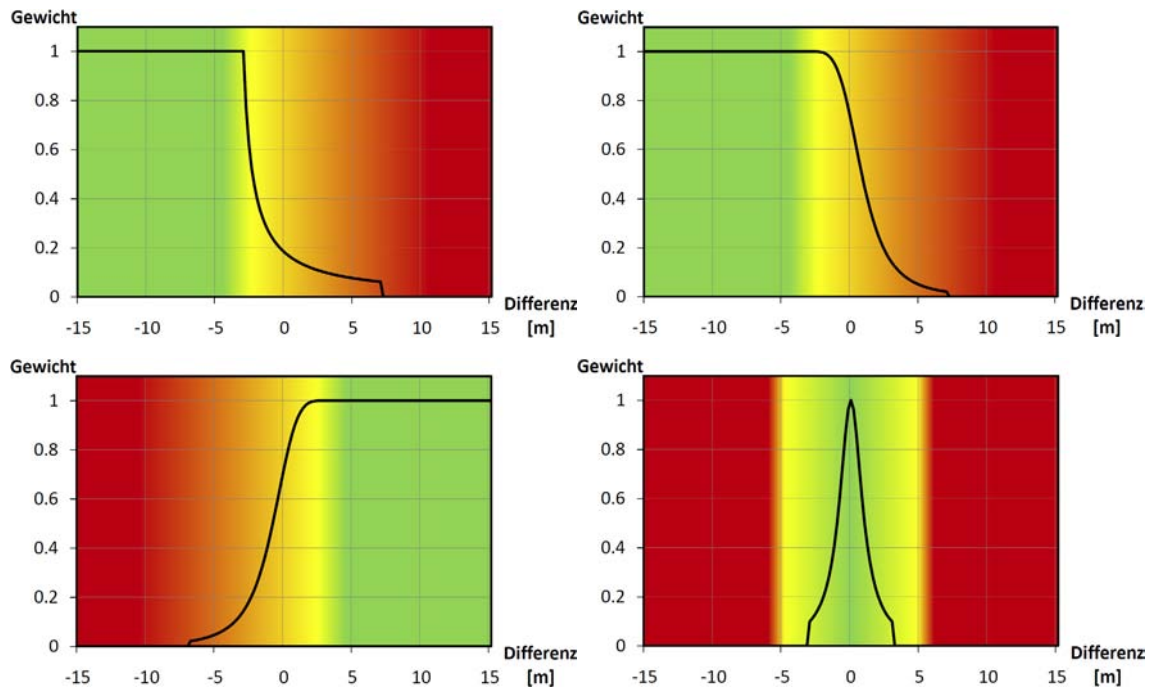


Abbildung 8: Übersicht zu den Gewichtungsfunktionen: Die Funktion nach Kraus & Pfeifer (1998) (oben links), sowie die drei verwendeten Funktionen zur Bodengewichtung (oben rechts), Vegetationsgewichtung (unten links) und der neutralen Gewichtung (unten rechts).

liche Flächen verstanden, auf denen sich genug grosse Objekte befinden. Dies trifft auf Bäume, aber auch auf andere Objekte wie Gebäude zu. Um die Unterscheidung von Wald und Nichtwald vorzunehmen wird eine Waldmaske benötigt. Diese Waldmaske stellt aber nur eine Schätzung der tatsächlichen Waldfläche dar und beinhaltet wie erwähnt auch andere Flächen, wie Gebäude oder einzelne Bäume. Es wird von einer grobrasterigen Waldmaske gesprochen, da sie eine Auflösung von 10 x 10 m hat. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, mit welchen man eine solche Maske erzeugen kann. Die hier vorgeschlagene Methode basiert auf den bereits vorhandenen LIDAR-Daten. So werden keine weiteren Daten benötigt. Es gäbe sicherlich bessere Möglichkeiten, um eine genauere Maske zu generieren. Jedoch soll in dieser Arbeit vorrangig untersucht werden, ob der Einsatz einer solchen grobrasterigen Waldmaske überhaupt sinnvoll ist und ob es sich daher lohnen würde, mehr Aufwand in die Entwicklung einer besseren Methode zur Generierung der Waldmaske zu stecken.

Für die Testregionen hat die hier verwendete Methode grösstenteils funktioniert. Jedoch musste dafür eine visuelle Überprüfung anhand der Luftbilder durchgeführt werden, um die Parameter jeweils individuell und Zeit aufwändig für die einzelnen Regionen einzustellen. Teilweise waren auch manuelle Anpassungen notwendig, da die Waldmaske auf den älteren LIDAR-Daten beruht, aber der Waldstand zum Zeitpunkt der ADS40 Luftbildern abgebildet werden soll. Die entstehenden, kleinen Unterschiede in den Waldgrenzen mussten daher manuell korrigiert werden.

Der Ansatz zur automatischen Generierung der grobrasterigen Waldmaske basiert auf einer Methode von Sithole & Vosselmann (2000) für das Herausfiltern von Vegetationspunkten aus LIDAR-Daten. Die Methode untersucht die Steigung zwischen benachbarten Punkten. Übersteigt diese einen kritischen Grenzwert werden die Punkte als Boden- resp. Vegetationspunkt klassiert.

Dieser Grenzwert wird durch eine Filterfunktion berechnet. Für die genaue Bestimmung dieser Filterungsfunktion sollten Trainingsdatensätze eingesetzt werden (Sithole & Vosselmann, 2000).

Für die Generierung der Waldmaske werden nur die LIDAR DOM-Daten verwendet. Diese sollten in den Wäldern solche kritischen Steigungen aufweisen. Für die Untersuchung werden die Datenpunkte innerhalb eines Rasters von 10 x 10 m betrachtet. Werden innerhalb einer solchen Rasterzelle eine gewisse Anzahl von diesen kritischen Steigungen gefunden, wird sie als Wald klassiert. Das Kriterium und die Anzahl solcher kritischer Steigungen, die für die Klassierung als Wald vorhanden sein müssen, wurden für die Testregionen von Hand eingestellt, bis die resultierende Waldmaske genügend genau war. Diese Überprüfung wurde anhand der ADS40-Luftbilder visuell durchgeführt.

5.3 Erweiterung des IDW-Ansatzes

5.3.1 Berücksichtigung der Qualität der Datenpunkte

Als erster Schritt muss die Formel des IDW um einen Gewichtungsfaktor erweitert werden, der die Qualität der Punkte repräsentiert. Wie bei Rühaak (2006) wird einfach ein weiterer Parameter Q in die Formel eingefügt. Dieser Parameter Q erhält zusätzlich einen Exponenten qp , den Qualitätsgewichtungsfaktor, analog zur Distanz D und dem Distanzgewichtungsfaktor dp . Dadurch soll eine Feinabstimmung der beiden Parameter Distanz und Qualität möglich sein.

$$Z_{x,y} = \frac{\sum_{i=1}^n Z * \frac{Q_i^{qp}}{D_i^{dp}}}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i^{qp}}{D_i^{dp}}}$$

5.3.2 Zentralpunktproblematik

Wie in der Anforderung an die Interpolationsmethode erwähnt (Abschnitt 4.2.1), kann die Interpolation nicht exakt sein, da in jeder Rasterzelle meist mehrere Punkte liegen und diese qualitativ unterschiedlich sind. Jedoch muss der Fall berücksichtigt werden, wenn ein Datenpunkt genau auf einem zu interpolierenden Punkt liegt. Solch ein Datenpunkt gilt im Standard-IDW als perfekt für die Schätzung des Rasterwertes und wird sogleich übernommen. Da nun die Qualität der Punkte berücksichtigt wird, muss nun eine Fallunterscheidung vorgenommen werden. Weist der Punkt eine genügend gute Qualität auf, kann sein Höhenwert ebenfalls direkt übernommen werden. Falls die Qualität als zu schlecht beurteilt wird, erhält der Punkt eine künstliche Distanz zum Zentrum. Diese Distanz hat keine Richtung, was für die Quadrantensuche von Bedeutung ist. Dieser Fall wird in diesem Zusammenhang noch ausführlicher besprochen (vgl. Abschnitt 5.3.3).

Da mit mehreren Datensätzen gearbeitet wird, kann es zum Spezialfall kommen, dass mehrere Punkte direkt auf dem zu interpolierenden Punkt liegen. In diesem Fall würde ebenfalls zuerst überprüft, ob die Punkte einen genügend hohen Qualitätswert haben. Ist dies nur bei einem der Punkte der Fall, wird sein Höhenwert übernommen. Trifft dies für keinen Punkt ein, würden alle betroffenen Punkte mit einer künstlichen Distanz versehen. Sollten aber immer noch mehrere

Punkte über eine genügend gute Qualität verfügen, wird die Rasterzelle nur aus diesen Punkten interpoliert. Die Distanz wird dabei weggelassen und nur noch die Qualität fließt in die Berechnung ein.

5.3.3 Quadrantensuche

Auf den ersten Blick scheinen Clustereffekte bei einer solch hohen Punktdichte und der regelmäßigen Verteilung der ADS40-Punkte einen vernachlässigbaren Einfluss auf die resultierenden Höhenmodelle zu haben. Doch gibt es in den Daten Fälle, bei denen dieser Effekt plötzlich doch stärker auftritt. Bei der Untersuchung der Datensätze wurde bereits auf die ungleichmäßige Verteilung der LIDAR-Punkte hingewiesen. So treten in den Daten Anhäufungen von Punkten auf, wegen der Überlappung der Flugstreifen oder weil wegen mangelnder Qualität der ersten Messungen weitere Befliegungen durchgeführt wurden. Durch solche Cluster könnten dann die bevorzugten, qualitativ besseren ADS40-Punkte überdeckt werden.

Einen weiteren wichtigen Fall gilt es bei der Interpolation eines DTM in Waldgebiete zu beachten. Hier ist man praktisch nur auf die Messungen des LIDAR angewiesen. An besonders dichten Stellen der Vegetation wird der Boden auch nicht vom LIDAR getroffen. Dadurch entstehen Lücken und somit eine ungleichmäßige Verteilung der Punkte.

Deshalb wird in den Interpolationsprozess eine Declusteringmethode eingebaut. Denn eine Schwäche von IDW gegenüber geostatistischen Interpolationsmethoden ist, dass die Punktverteilung und somit auch Clustereffekte nicht untersucht und berücksichtigt werden. Beim Ordinary Kriging werden solche Effekte mittels der linkshändigen Kovarianzmatrix erkannt. (Isaaks & Sivastrava, 1989)

Um den Effekt von Clustern zu reduzieren, wurden verschiedene Methoden entwickelt. So gibt es Methoden, die aufgrund der Fläche des umgebenden Voronoi-Diagramms (Isaaks & Sivastrava, 1989), der lokalen Punktdichte (Isaaks & Sivastrava, 1989) oder Nachbarschaftsbeziehungen (Falke & Husar, 1998) die einzelnen Datenpunkte unterschiedlich stark gewichten. Der Einfluss von Punkten innerhalb von Clustern wird dadurch reduziert. Für den hier entwickelten Prozess sind diese Ansätze nicht ideal, da bereits die Qualität durch eine direkte Gewichtung der Punkte berücksichtigt wird. Qualitativ gute Punkte innerhalb eines Clusters von qualitativ schlechten Punkten würden durch eine solche Methode abgeschwächt. Beim zu entwickelnden Prozess sollen daher nicht alle Punkte eines Clusters abgeschwächt werden, sondern nur die qualitativ besten Punkte eines Clusters bei der Interpolation verwendet werden.

Die Quadrantensuche ist eine Suchfunktion mit der Clustereffekte reduziert werden, indem rund um den zu interpolierenden Punkt aus allen Richtungen nur eine bestimmte Anzahl Punkte verwendet werden. Isaaks & Sivastrava (1989) zeigten, dass durch die Anwendung einer Quadrantensuche die sich Resultate des IDW-Ansatzes gegenüber derjenigen von Kriging stark verbessern, so dass die Unterschiede zwischen diesen zwei Interpolationsmethoden deutlich geringer werden. Rühaak (2006) wendete ebenfalls eine Quadrantensuche für seine qualitätsgewichtende IDW-Interpolation an. Jedoch gibt es zwei Kritikpunkte an dieser Methode, die im Folgenden diskutiert werden.

Wahl der Punkte Die Wahl der Punkte, die für jeden Quadranten für die Interpolation verwendet werden, sollte bei einem Prozess, bei dem die Punkte unterschiedliche Gewichtungen ha

ben, nicht nur von der Distanz abhängig sein. Deshalb wird die Quadrantensuche erweitert, so dass auch die Qualität der Punkte mit berücksichtigt wird. Es wird für alle Punkte der Quadranten ein Gewicht berechnet, zusammengesetzt aus der Distanz zum Zentrum d und der Qualitätsbewertung q , das als qualitative Distanz QD bezeichnet wird:

$$QD = \frac{q^a}{d^b}$$

Mit den Parametern a und b kann das Verhältnis zwischen der Distanz und der Qualität eingestellt werden. Pro Quadrant werden nun nur noch eine gewisse Anzahl der Punkte gewählt mit der besten, sprich kürzesten qualitativen Distanz (Abb. 9).

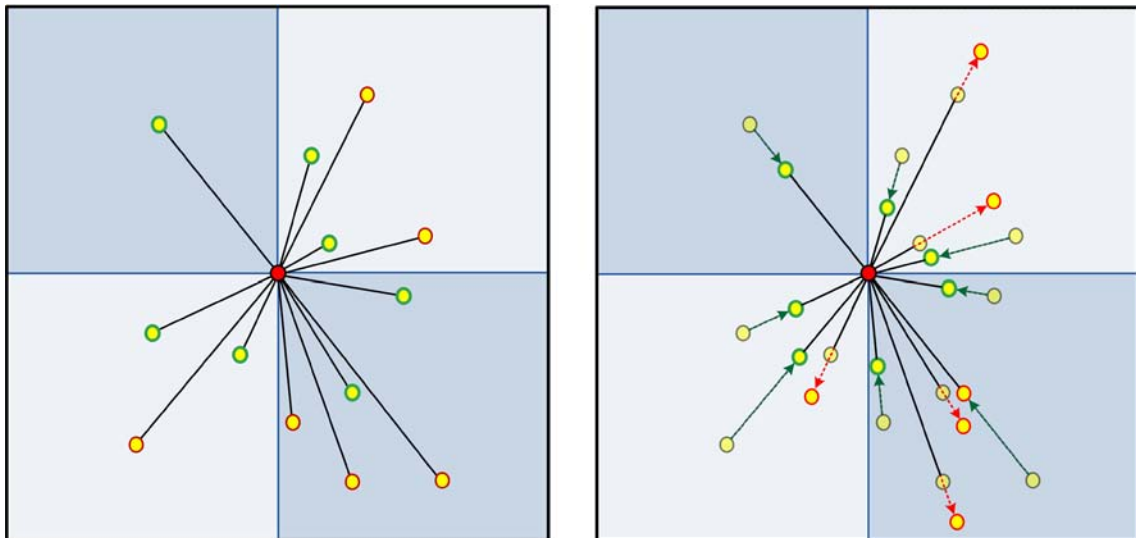


Abbildung 9: Erweiterung der Quadrantensuche durch Berücksichtigung der Qualität. Links: Die Standard-Quadrantensuche, bei der die jeweils nächsten zwei Punkte (grün) pro Quadrant ausgewählt werden, während die restlichen Punkte (rot) nicht für die Interpolation verwendet werden. Rechts: Durch die Berechnung der qualitativen Distanz rücken gute Punkte näher zum Zentrum (grüne Pfeile), während sich schlechte Punkte entfernen (rote Pfeile).

Ausrichtung der Achsen Die Achsen zwischen den Quadranten sind fix und nicht auf die Verteilung der Punkte ausgerichtet. Eine Anpassung der Achsen für jeden zu interpolierenden Punkt scheint ein zu grosser rechnerischer Aufwand im Verhältnis zur zu erwartenden Verbesserung der Interpolation. Deswegen wird auch hier darauf verzichtet. Wenn jedoch für einen Teil der Punkte die Verteilung eine gewisse Regelmässigkeit aufweist, wie dies bei den ADS40-Daten der Fall ist, sollten die Achsen optimal für diese Verteilung ausgerichtet sein. Die restlichen unregelmässigen LIDAR-Punkte werden dafür nicht beachtet. Die Ausrichtung der Achsen hängt davon ab, an welcher Stelle innerhalb der Verteilung der ADS40-Punkte jeweils das Zentrum der zu interpolierenden Rasterzellen liegen soll. Da die Distanz zwischen den ADS40-Punkten von einem Meter gleich der Auflösung des zu interpolierenden Höhenmodells ist, liegt immer derselbe Fall vor. Es können drei Fälle auftreten, die in Abb. 10 aufgezeigt werden. Die Achsen zwischen den Quadranten sollen jeweils so gelegt werden, dass in den Quadranten möglichst die gleiche Anzahl Punkte liegt und somit alle Quadranten in etwa den gleich starken Einfluss auf die Interpolation haben. Welcher Fall vorliegt, muss vor der Interpolation geprüft werden. Bei der in dieser Arbeit untersuchten Anwendung liegen jeweils die ADS40-Punkte und die Rasterzellenzentren aufeinander und so muss immer die Nullpunktproblematik berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt

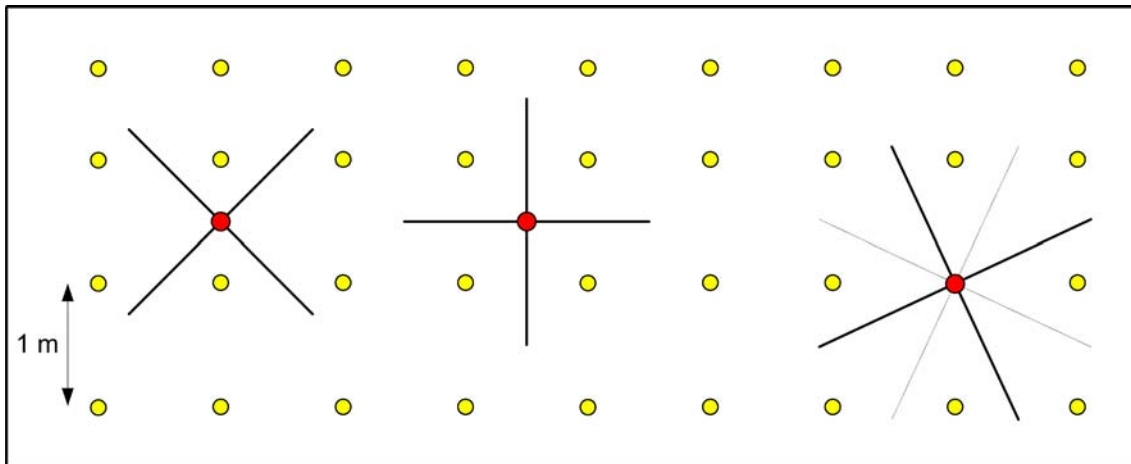


Abbildung 10: Optimale Ausrichtung der Achsen der Quadrantensuche für die drei möglichen Lagen des Zentrums der zu interpolierenden Zelle (roter Punkt) innerhalb der Verteilung der ADS40-Punkten (gelbe Punkte). Für den dritten Fall (rechts) können die Achsen auf zwei Arten gelegt werden.

5.3.2). In diesem Fall wird entweder direkt der Höhenwert des Datenpunktes übernommen, dann wäre keine Quadrantensuche mehr nötig, oder der Punkt erhält eine künstliche, richtungsneutrale Distanz, so dass er zu keinem Quadranten gezählt werden kann. In diesem Fall wird die Quadrantensuche normal durchgeführt und dieser richtungsneutrale Punkt wird anschliessend zu den ausgewählten Punkten hinzugefügt.

5.3.4 Adaptive Parameterwahl

Eine grosse Schwäche des IDW ist die Wahl der Parameter, da diese vor der Interpolation a priori gesetzt werden und nicht empirisch bestimmt werden. Zudem werden sie über die gesamte Fläche konstant gehalten und passen sich nicht an die lokalen Gegebenheiten an.

Einen Lösungsansatz präsentieren Lu & Wong (2008), die eine adaptive Wahl des Distanzgewichtungsfaktors einführten. Anhand der vorhandenen Punktdichte wurde der Distanzgewichtungsfaktor angepasst. Dadurch wird der Einfluss der Distanz je nach Situation variiert. Dadurch können in Clustern die relativ einheitlichen Distanzen stärker gewichtet werden, um so den kleinen Distanzdifferenzen mehr Einfluss zu geben. Dagegen werden in Flächen mit spärlicher und unregelmässiger Punktverteilung mittels kleinen Distanzgewichtungsfaktors die bereits grossen Distanzunterschiede nicht zusätzlich verstärkt.

Mit diesem Ansatz konnten Lu & Wong (2008) eine deutliche Verbesserung der Resultate gegenüber dem Standard-IDW aufzeigen, jedoch wird auch der Berechnungsaufwand deutlich höher, da für jede Rasterzelle die umgebende Punkteverteilung untersucht werden muss. Für unsere Anwendung ist dieser Ansatz somit nur bedingt geeignet und muss angepasst werden. Aufgrund der meist hohen Punktdichte und der bereits implementierten Quadrantensuche zur Reduktion des Clustereffekts scheint der Gewinn durch eine adaptive Anpassung der Parameter für jede Rasterzelle nicht im Verhältnis zum zusätzlichen Aufwand zu stehen. Deshalb wird ein grösserer Massstab für die adaptive Anpassung gewählt. Die grössten Unterschiede in den Daten finden sich zwischen Wald und Nichtwaldflächen, insbesondere bei den DTM-Daten. Bei solchen Flächen ist die Punktdichte tiefer und die Verteilung unregelmässig. Deshalb wird in Waldflächen, die durch die grobrasterige Waldmaske abgegrenzt sind, mit anderen Parametern interpoliert. Vor allem muss ein grösserer Suchradius verwendet werden.

5.4 Schätzung der Unsicherheiten des Höhenmodells

Der in dieser Arbeit untersuchte Ansatz beruht auf der Annahme, dass die Unsicherheit eines interpolierten Wertes von den Eigenschaften der lokal verfügbaren Datenpunkte abhängig ist. Deshalb werden während der Interpolation die Eigenschaften der verfügbaren Datenpunkte durch vier Prüfgrößen beschrieben. Mit diesen vier Prüfgrößen soll die wahrscheinliche Unsicherheit des interpolierten Höhenmodells geschätzt werden.

5.4.1 Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation

Die vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation sollen unabhängig voneinander, einzelne Eigenschaften der verfügbaren Datenpunkten beschreiben. Dadurch soll es möglich sein bei der Validierung den Einfluss der einzelnen Eigenschaften auf die Unsicherheiten zu untersuchen (vgl. Abschnitt 8.3). Aufgrund der dadurch gewonnenen Erkenntnisse sollen die vier Prüfgrößen zu einem Wert für die Beschreibung Unsicherheit kombiniert werden.

Lokale Punktdichte Grundvoraussetzung für die Interpolation ist eine ausreichende Anzahl Punkte in der näheren Umgebung der zu berechnenden Rasterzelle. Um die Beschreibung der Punktdichte unabhängig vom verwendeten Suchradius zu halten, wird die Punktdichte für den Standardradius von 2 m berechnet.

Lokale Punktverteilung Neben der Anzahl der Punkte ist auch ihre Verteilung um das Zentrum der Rasterzelle von Bedeutung. Es wird dabei nur die 2-dimensionale Verteilung (x,y) ohne die Höhenwerte der Punkte untersucht. Dafür wird eine Delaunay-Triangulation angewendet, die sich eignet um Probleme mit Nearest Neighbour oder Clustern zu untersuchen (Erickson, 2002).

Der Ansatz basiert auf der Annahme, dass je ähnlicher die Dreiecksflächen der Triangulation sind, desto besser und gleichmässiger ist eine Verteilung. Dafür wird die Varianz der Dreiecksflächen berechnet (Abb. 11).

Jedoch wird noch nicht beachtet, wo in dieser Verteilung das Zentrum liegt. Denn eine Verteilung kann noch so gleichmässig sein, solange sie nicht um das Zentrum herum liegt, ist sie für die Interpolation nicht als gut zu bewerten. Es muss also die Verteilung innerhalb eines Gebiets um das Zentrum herum untersucht werden. Dazu werden Hilfspunkte in die Triangulation eingefügt, die dieses Gebiet abgrenzen. Gleichmässige, aber nicht ums Zentrum liegende Verteilungen erhalten dadurch Ausreisser, die sich in der Varianz der Flächen stark auswirken.

Die letzte Frage, die sich noch stellt ist, wo diese Hilfspunkte platziert werden. Werden sie in einem fixen Abstand um das Zentrum platziert, hätte das den Vorteil, dass für alle Rasterzellen dasselbe Gebiet untersucht würde. Jedoch würden gute Verteilungen, die nahe ums Zentrum liegen dadurch schlechter bewertet, obwohl sie für die Interpolation sehr gut geeignet sind. Deshalb wird der Abstand der Hilfspunkte abhängig von der gegebenen Verteilung gewählt. Es wird der Punkt gesucht mit dem grössten Abstand zum Zentrum. Im selben Abstand werden nun gleichmässig noch drei Hilfspunkte ums Zentrum herum gesetzt (Abb. 11).

Qualität der Punkte Um die Qualität der Punkteverteilung zu bewerten, wird der Median der Qualitätsgewichtungen der für die Interpolation verwendeten Punkte berechnet. Der Median wird verwendet, da er gegenüber dem Mittelwert resistenter gegenüber Ausreissern ist (Voss et al.,

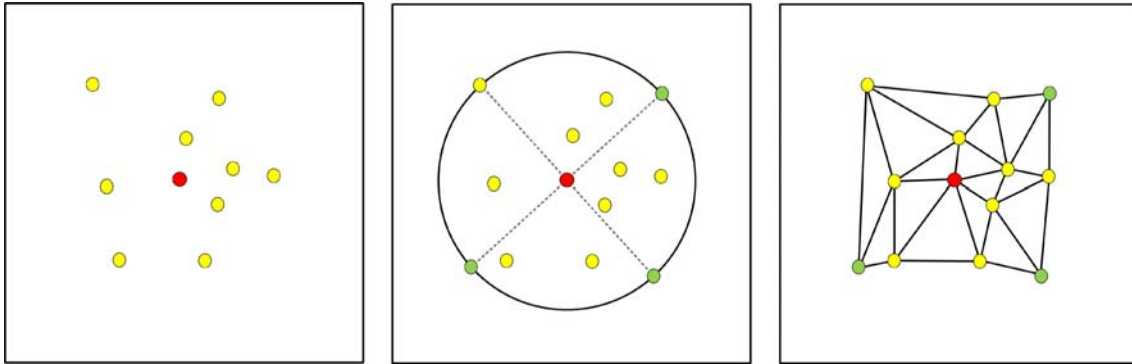


Abbildung 11: Beschreibung der lokalen Punktverteilung. Damit die Verteilung im Bezug zum Zentrum (rot) untersucht wird, werden Hilfspunkt (grün) gesetzt. Als Grösse zur Beschreibung der Regelmässigkeit der Verteilung wird die Varianz der Dreiecksflächen der Triangulation berechnet.

2004). Anhand der Qualität der zur Verfügung stehenden Datenpunkten soll einerseits erkennbar sein, wie gut die Datengrundlage ist und andererseits, ob durch die Vorprozessierung Probleme erkannt wurden und daher die Qualität schlechter beurteilt wurde.

Höhenverteilung Hier soll die Verteilung der Höhenmessungen der Punkte beschrieben werden. Dabei wird wie bei der planimetrischen Punktverteilung das Triangulationsnetz verwendet, um die Höhendifferenz benachbarter Punkte gemessen. Schlussendlich wird davon der Median der Höhendifferenzen berechnet. Da nur die Differenzen zwischen benachbarten Punkten verwendet werden und nicht aller Punkte innerhalb des Suchradius, können auch Flächen mit einer gewissen Steigung gute Werte haben. Dagegen sollten komplexe und unregelmässig strukturierte Oberflächen, sowie Flächen bei denen sich die verschiedenen Datensätze unterscheiden, schlechter beurteilt werden.

5.4.2 Auswertung und Zusammenfassung

Eine statistische Auswertung des Zusammenhangs der vier beschriebenen Prüfgrössen und der Genauigkeit des Höhenmodells ist nur möglich, wenn eine exakte Validierung vorgenommen werden kann, wie dies bei der Anwendung an künstlichen Daten der Fall ist. Es soll der Einfluss jeder einzelnen Prüfgrössen auf die Genauigkeit der Interpolation mittels einer Multiplen Regression untersucht werden. Ziel ist es herauszufinden, wie stark das Ergebnis der Interpolation von den einzelnen Prüfgrössen abhängt.

Diese Auswertung soll aber auch als Hilfsmittel für die Parametereinstellung dienen. So kann die Auswirkung der unterschiedlichen Parametereinstellungen auf den Zusammenhang der vier Prüfgrössen und die Genauigkeit der Interpolation untersucht werden. So dass beispielsweise, die Hypothese von Lu & Wong (2008) untersucht werden kann, die behaupten, dass bei einer hohen Punktdichte und gleichmässigen Punkteverteilung ein hoher Distanzgewichtungsfaktor gewählt werden soll, während bei wenigen und unregelmässig verteilten Punkten ein tieferer Wert für die Distanzgewichtung gesetzt werden soll.

6. Anwendung an künstlichen Oberflächen

Die Verwendung von künstlichen Daten bietet die Möglichkeit die Funktion des Interpolationsprozesses zu testen und einen Vergleich mit anderen Interpolationsmethoden vorzunehmen. Der grosse Vorteil der künstlichen Daten ist, dass eine Validierung der Resultate für jede Position auf der Oberfläche möglich ist. So kann systematisch der Einfluss verschiedener Eigenschaften der Daten und der Oberflächen auf die Interpolationsgenauigkeit untersucht werden (Zimmermann et al., 1999). Dafür können die verschiedenen Eigenschaften der Datensätze und die Einstellungen für die Parameter des Interpolationsprozesses systematisch variiert und die Resultate statistisch ausgewertet werden. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Generierung der Daten unabhängig ist zur untersuchenden Methode und keine verfälschten Resultate entstehen (Zimmermann et al., 1999). Bevor in der Folge erläutert wird, welche Datensätze verwendet wurden und wie diese erzeugt wurden, sollen die Ziele dieser Testläufe genau definiert werden.

6.1 Ziele der Tests

Mit der Anwendung an künstlichen Daten werden verschiedene Ziele verfolgt. Als erstes soll eine Validierung der resultierenden Höhenmodelle für verschiedenen Oberflächen und Datengrundlagen durchgeführt werden. Damit soll geprüft werden, ob der Interpolationsprozess die gewünschten Resultate liefert und wie sich die Struktur der Oberfläche und die Qualität der Datengrundlage auf diesen auswirkt. Zum Vergleich werden die Oberflächen ebenfalls mit dem Standard-IDW interpoliert, um so den Gewinn durch die Vorprozessierung und die qualitätsgewichtende Interpolation aufzuzeigen.

Weiter soll eine Kalibrierung des Interpolationsprozesses vorgenommen werden. Da mit den künstlichen Daten jede einzelne Rasterzelle validiert werden kann, wäre es prinzipiell möglich durch heuristische Optimierungsverfahren, wie Systematic Annealing, genetische oder evolutionäre Algorithmen (Davis, 1987; Weise, 2009) die Parameter optimal zu kalibrieren. Jedoch macht dieser Aufwand für diese künstlichen Oberflächen keinen Sinn, da eine exakte Übertragung der Parameter auf die Anwendung an realen Daten nicht möglich ist. Es sollen einzelne Fragestellungen untersucht werden, die Aufschluss geben sollen, wie der Interpolationsprozess auf die unterschiedlichen Ausgangsdaten und Parametereinstellungen reagiert. Damit sollen Erkenntnisse gewonnen werden, wie in Bezug auf die realen Daten und Oberflächen die Parameter eingestellt werden sollten.

Zuletzt werden auch die im Abschnitt 5.4 vorgestellten Prüfgrössen zur Beurteilung der Interpolation angewendet. Dabei soll der Zusammenhang dieser Prüfgrössen zur Oberflächenstruktur, der Datengrundlage und der durchgeführten Vorprozessierung untersucht werden. Weiter soll

geprüft werden, ob anhand dieser Prüfgrößen Aussagen über die Einstellung der einzelnen Parameter gemacht werden können.

Zusammenfassend sollen mit der Anwendung an künstlichen Daten folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Ist eine Verbesserung der Resultate durch die Vorprozessierung und die qualitätsgewichtende Interpolation gegenüber dem Standard IDW festzustellen?
- Welche Erkenntnisse können über die Kalibrierung der Vorprozessierung und der Interpolation in Bezug auf die Eigenschaften der vorhandenen Daten und die Oberflächenstruktur gemacht werden?
- Welche Aussagen können anhand der in Abschnitt 4.4 vorgestellten Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation über die Oberfläche, die Datenausgangslage und die durchgeführte Vorprozessierung gemacht werden?

6.2 Beschreibung der Testserien

Mit den Testserien werden bestimmte Eigenschaften der vermessenen Oberflächen und der zur Verfügung stehenden Daten simuliert, um deren Einfluss auf die Genauigkeit des Interpolationsprozesses zu untersuchen. Die Punktdaten werden dabei so generiert, als ob sie von unterschiedlichen Datenquellen stammen und daher unterschiedliche Eigenschaften besitzen.

6.2.1 Verwendete Oberflächen

Für die Testserien werden drei verschiedene Oberflächen verwendet (Abb. 12). Diese Oberflächen basieren auf mathematischen Funktionen, die im Anhang näher beschrieben sind. Es wird eine zunehmende Komplexität der Struktur simuliert. Von der einfachen schiefen Ebene über einen Hang mit gewellter Oberfläche bis hin zu einer Anordnung von Kegeln, die ein wenig der Struktur eines Waldes nachempfunden ist. Anhand dieser drei Oberflächen soll die Funktion des Interpolationsprozesses für unterschiedlich stark strukturierte Oberflächen untersucht werden. Die „Schiefe Ebene“ als einfachstes Beispiel soll dazu dienen die grundlegende Funktion des Interpolationsprozesses zu untersuchen ohne eine zu starke Beeinflussung durch die Oberflächenstruktur. Die beiden anderen Oberflächen sollen spezifische Aspekte der realen Anwendung simulieren. Mit der Oberfläche „Hang“ soll der Fall eines DTM simuliert werden. Dabei treten nur positive Fehler auf, wie sie vorkommen wenn Bäume oder Büsche vermessen werden. Mittels der bodengewichtenden Vorprozessierung soll deren Einfluss reduziert werden und die darunter liegende Oberfläche interpoliert werden. Die komplexeste Oberfläche ist der Situation nachempfunden, wie sie in einem Wald auftritt nachempfunden. Die Fehler sind alle negativ und entsprechen Messpunkten, die innerhalb der Struktur eines Waldes oder auf dem Boden liegen. Durch die vegetationsgewichtende Vorprozessierung soll das DSM interpoliert werden.

6.2.2 Eigenschaften der Punktdaten

Die wichtigsten Eigenschaften der Punktdaten für die Resultate des Interpolationsprozesses sind die Verteilung, die Dichte und die Qualität der Punkte. Um den Einfluss dieser drei Eigenschaf-

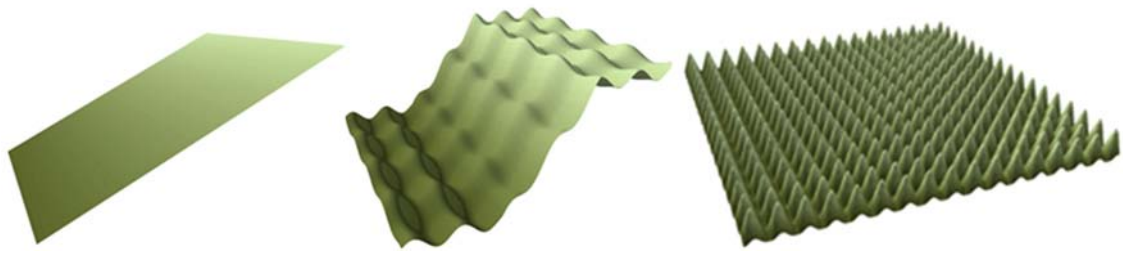


Abbildung 12: Die drei verwendeten künstlichen Oberflächen „Schiefe Ebene“, „Hang“ und „Wald“

ten zu untersuchen wurden verschiedene Datensätze generiert. Diese Datensätze setzen sich aus mehreren kleineren Punktdaten zusammen, die verschiedene Aufnahmesensoren simulieren sollen und sich somit in ihren Eigenschaften unterscheiden. Für die Punkteverteilung wurden drei verschiedene Typen verwendet (Abb. 13). Die regelmässige Verteilung entspricht den Daten der ADS40, während die Random- und die Cluster-Verteilung mehr den Daten eines LIDAR entsprechen.

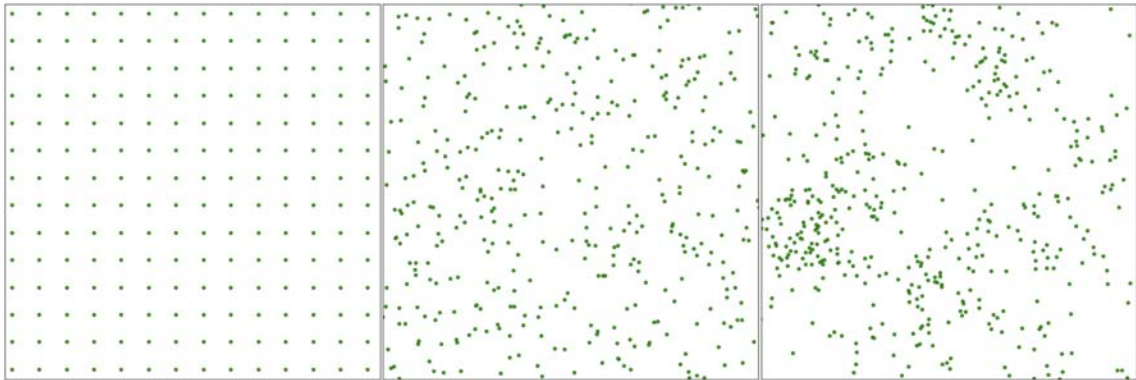


Abbildung 13: Unterschiedliche Punkteverteilungen der künstlichen Datensätze. Die regelmässige Verteilung entspricht den ADS40-Daten, während die Random- und Cluster-Verteilung mehr den LIDAR-Daten nachempfunden sind.

Die unterschiedliche Qualität der Punkte wird dadurch simuliert, dass den generierten Punkten anhand einer Gauß'schen Normalverteilung Fehler zugeordnet werden. Dabei wird als qualitätsbestimmende Grösse für die Teildatensätze die verwendete Standardabweichung für die Normalverteilung angegeben. Je höher die Standardabweichung ist, desto höher sind die Fehler und desto schlechter die Qualität eines Datensatzes. Um die Funktion des Interpolationsprozesses speziell für die beiden Höhenmodelle DTM und DOM zu untersuchen, können die Fehler auch nur positiv resp. nur negativ sein (vgl. Abschnitt 6.2.1). Dadurch kann eine einseitige Gewichtung bei der Vorprozessierung verwendet werden. Es werden zwei Datensätze zusammengestellt, die sich beispielhaft in ihrer Punkteverteilung, –dichte und Qualität unterscheiden. Diese werden zusätzlich noch jeweils mit beidseitigen Fehlern oder nur einseitigen Fehlern generiert, so dass schliesslich vier verschiedene Datensätze an den Oberflächen getestet werden können. Eine Übersicht zu den erstellten Datensätzen und deren Eigenschaften findet man in Tabelle 2.

Der Datensatz DS1 hat eine tiefere Punktdichte und eine schlechtere Punkteverteilung als DS2. Zudem weisen alle Punkte gewisse Fehler auf, jedoch sind keine extremen Ausreisser vorhanden. Diese finden sich dagegen beim DS2. Hier liegt eine höhere Punktdichte und bessere Punkteverteilung vor.

lung vor. Die Hälfte der Punkte haben geringe Fehler und ein weiteres Drittel hat gar keine Fehler. Jedoch haben die restlichen Punkte hohe Fehler und sollen so Ausreisser simulieren, wie sie bspw. auftreten wenn ein einzelner Baum auf einer Wiese steht. Diese einzelnen Fehler sind zufallsverteilt und treten so eher einzeln auf, während beim DS1 die schlechtesten Punkte in Clustern auftreten.

Name	Punktdichte	Verteilung	Qualität	Fehler
DS1	1.0 Pkt/m ²	1/4 Random 3/4 Cluster	1/4 mit Stdabw. = 1	einseitig
			1/4 mit Stdabw. = 2	beidseitig
			1/4 mit Stdabw. = 3	
			1/4 mit Stdabw. = 5	
DS2	1.5 Pkt/m ²	1/6 Regular 4/6 Random 1/6 Cluster	2/6 mit Stdabw. = 0	einseitig
			1/6 mit Stdabw. = 1	beidseitig
			1/6 mit Stdabw. = 2	
			1/6 mit Stdabw. = 3	
			1/6 mit Stdabw. = 8	

Tabelle 2: Übersicht zu den künstlichen Datensätzen, die sich aus mehreren Teildatensätzen mit unterschiedlichen Eigenschaften zusammensetzen. Dadurch werden verschiedene Datenquellen simuliert.

6.2.3 Übersicht über die Testserien

Es werden drei Oberflächen mit zwei verschiedenen Datensätzen und zwei Formen von Fehlern untersucht. Dies macht insgesamt zwölf mögliche Konstellationen. Jede davon wird mit drei Einstellungen der Parameter für die Vorprozessierung (Tab. 3) und vier Einstellungen der Interpolation (Tab. 4) getestet. Bei der Vorprozessierung muss der Shift-Parameter noch an die auftretenden Fehler und die dadurch verwendete Gewichtungsfunktion angepasst werden. Wird die neutrale Gewichtung verwendet, beträgt er immer null. Wird aber eine einseitige Gewichtungsfunktion verwendet, ist er je nachdem +/- 1. Die übrigen Parameter sind unabhängig von der verwendeten Gewichtungsfunktion. Zusätzlich wird für jede Konstellation eine Oberfläche mit einem IDW mit Quadrantensuche, aber ohne Vorprozessierung und somit Berücksichtigung der Qualität interpoliert. Dies ergibt insgesamt 156 Resultate, die miteinander verglichen werden, um den Einfluss der Oberfläche und Datengrundlage auf die verschiedenen Parametereinstellungen zu untersuchen.

Zusätzlich werden jeweils die vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation berechnet. Es sollen so die zwei Einsatzmöglichkeiten dieser Prüfgrößen untersucht werden. Also ob es mit ihnen möglich ist, die Qualität eines Höhenmodells zu beurteilen und damit auch, ob sie Rückschluss geben über die lokalen Bedingungen der Interpolation und so zur adaptiven Wahl der Interpolationsparameter dienen könnten.

Name	Vorprozessierung								
	Iter	DG	QG	Rad	Rg.	Sh	a	b	c
V1	3	1	1	3	6	0	1	1	1
V2	3	2	2	3	6	+/-1 / 0	1	2	1
V3	3	2	2	3	4	+/-1 / 0	3	2	1

Tabelle 3: Verschiedene Parametereinstellungen für die Vorprozessierung. (Iter = Iterationen, DG = Distanzgewichtungsfaktor, QG = Qualitätsgewichtungsfaktor, Rad = Suchradius, RG = Range, Sh = Shift, a,b,c = Parameter der Gewichtungsfunktion)

Name	Interpolation			
	DG	QG	Rad	PpS
IDW	2	-	5	2
I1	1	1	5	2
I2	2	1	5	2
I3	1	2	5	2
I4	2	2	5	2

Tabelle 4: Einstellungen Interpolation (PpS = Punkte pro Sektor)

6.3 Resultate und Diskussion

Die meisten Resultate dieser Testserien werden bereits an dieser Stelle diskutiert, da ihre Ergebnisse die durchgeführten Testserien an den realen Daten beeinflussen. Dabei sollen die in den Zielen definierten Fragen beantwortet werden (siehe Abschnitt). Zuerst werden die resultierenden Oberflächen für die verschiedenen Parametereinstellungen validiert und miteinander verglichen, um so die Funktion des Interpolationsprozesses in Abhängigkeit der Oberfläche und der Datengrundlage zu untersuchen (vgl. Abschnitt 6.3.1). Im zweiten Teil wird die Kalibrierung diskutiert (vgl. Abschnitt 6.3.2). Dabei wird untersucht wie die Parameter für die verschiedenen Oberflächen und Datengrundlagen gewählt werden sollten. Im letzten Teil wird der Zusammenhang zwischen den berechneten Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation und der Oberflächenstruktur, den Dateneigenschaften sowie den gemessenen Fehlern analysiert, um so die Einsatzmöglichkeiten dieser Prüfgrößen zu testen (vgl. Abschnitt 6.3.3).

6.3.1 Validierung

Um die Randeffekte der Testflächen nicht mit einzubeziehen, werden nur die Rasterzellen mit einem Abstand von mindestens 10 m vom Rand validiert. Dies sind 32'400 Höhenwerte, die anhand der künstlichen Oberfläche validiert werden können. Als statistisches Mass wird der RMSE bestimmt. In den drei Diagrammen von Abbildung 14, für je eine Oberfläche, sind die Resultate aufgeteilt nach Datensatz, Fehlerart und den Parametereinstellungen der Vorprozessierung und der Interpolation abgebildet. Es zeigen sich verschiedene Trends in den Resultaten, die nun diskutiert werden.

Als erste und wichtigste Erkenntnis kann gezeigt werden, dass die Resultate des vorgeschlagenen Interpolationsprozesses deutlich besser sind als diejenigen des Standard-IDW. Die Voraussetzung ist jedoch, dass Fehler, wie sie in den künstlichen Daten simuliert werden, in den Daten vorliegen

und dass auch das Vorwissen zu der Fehlerart, ob beidseitig oder einseitig, vorhanden ist. Für die Anwendung an den realen Daten sind diese beiden Voraussetzungen erfüllt. Damit kann bestätigt werden, dass durch die Vorprozessierung und die qualitätsgewichtende Interpolation bessere Resultate erzielt werden können, als mit einem Standard-IDW. Es gilt jedoch auch zu beachten, dass bei der komplexen Oberfläche „Wald“ mit einer starken Vorprozessierung (V3) und einer stärkeren Gewichtung der Qualität in der Interpolation (I3) die Resultate schlechter werden als beim Standard-IDW. Die richtige Einstellung der Parameter ist daher wichtig, damit die Resultate des Interpolationsprozesses auch tatsächlich besser werden als bei dem Standard-IDW.

6.3.2 Kalibrierung

Mit der Kalibrierung sollen der Zusammenhang zwischen Oberfläche und Datengrundlage und den eingestellten Parametern, ebenfalls ersichtlich aus Abbildung 14, untersucht werden. Bei der „Schiefen Ebene“ sind kaum Unterschiede durch die unterschiedlichen Einstellungen der Vorprozessierung und der Interpolation auszumachen. Aufgrund der Einfachheit der Oberfläche werden schon mit einer schwachen Gewichtung die groben Fehler herausgefiltert und die Oberfläche dadurch geglättet. Daher ist das Resultat deutlich besser als beim Standard-IDW, wo diese Ausreisser zu lokalen Fehlern führen. Der Datensatz DS2 bringt die besseren Resultate, was zeigt, dass der Interpolationsprozess besser mit einzelnen starken Ausreißern zurecht kommt, als mit den mittelstarken, aber geclusterten Fehlern des DS2. Vor allem wenn die Fehler nur positiv sind, treten stärkere Fehler durch diese Cluster auf.

Die Oberfläche „Hang“ zeigt schon deutlichere Streuungen der Resultate. Wenn die Fehler beidseitig vorliegen, variieren die Resultate kaum durch die Parametereinstellungen. Der RMSE liegt dabei sogar leicht tiefer als bei der „Schiefen Ebene“, was daran liegt, dass die leicht gewellten, aber dennoch relativ flachen Flächen unter- und oberhalb des Hanges sehr gut interpoliert werden konnten. Die Fehler treten vor allem beim Beginn und dem Ende der Steigung auf. Sind die Fehler jedoch nur einseitig zeigt sich der Einfluss der Parametereinstellungen deutlich. Je stärker die Vorprozessierung, desto besser werden die Resultate, wobei zwischen den besten Resultaten des V2 und des V3 kaum noch Unterschiede feststellbar sind. Die Einstellung der Interpolationsparameter zeigt hier ebenfalls interessante Effekte. Zeigen bei den schwächeren Vorprozessierungen V1 und V2 die stärkere Gewichtung des Qualitätsfaktors von I3 die deutlich besten Resultate, sind dies bei der starken Vorprozessierung V3 die beiden ausgeglichenen Gewichtungen der Interpolationen I1 und I4, welche die besten Resultate liefern.

Schlussendlich reagieren bei der Oberfläche „Wald“ die Resultate wiederum stark auf die unterschiedliche Art der Fehler. Bei beidseitigen Fehlern variieren die Resultate wiederum nur gering bei unterschiedlichen Einstellungen. Lediglich bei dem Datensatz DS2 und der Vorprozessierung V3 sind kleinere Unterschiede bei der Interpolation zu erkennen. Jedoch sind hier die Resultate des DS1 leicht besser als beim DS2. Bei einseitigen Fehlern ist der DS2 dagegen wieder besser. Jedoch zeigen sich hier sehr starke Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Vorprozessierungs- und Interpolationseinstellungen. Die besten Resultate zeigen hier die Vorprozessierung V2 mit einer stärkeren Gewichtung der Distanz in der Interpolation I2.

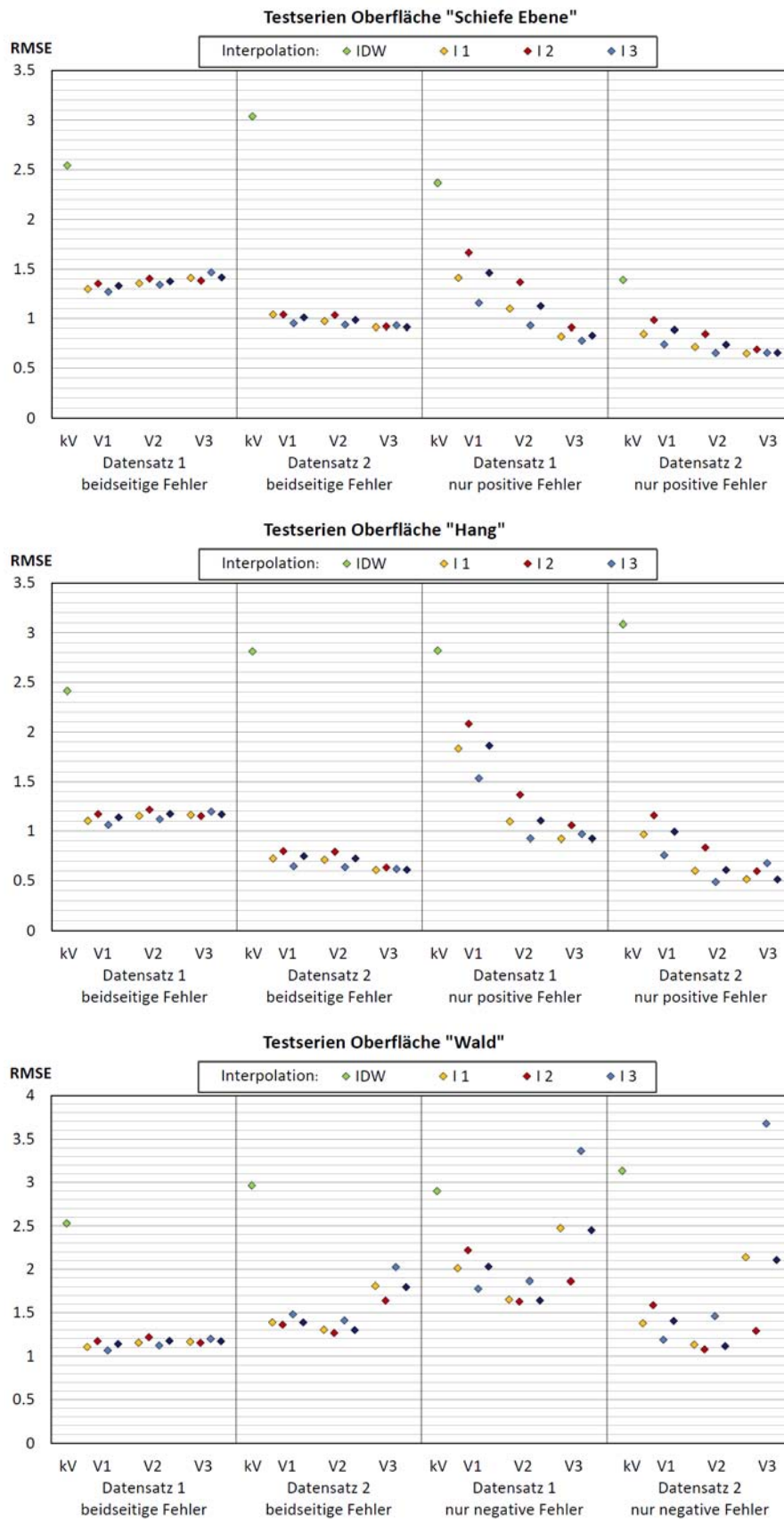


Abbildung 14: Resultate für die verschiedenen Oberflächen, Datensätze und Paramtereinstellungen der Vorprozessierung und der Interpolation

6.3.3 Anwendung der Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation

Die Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation wurden für alle Oberflächen und Datensätze jeweils nach der abgeschlossenen Vorprozessierung berechnet. Dadurch wurden bei der Vorprozessierung bereits eine gewisse Anzahl Punkte herausgefiltert. Die so noch vorhandenen Punkte bilden die Grundlage für die Interpolation. Die Prüfgrößen wurden, wie bei der Validierung, nur für die Rasterzellen mit einem Abstand von min. 10 m vom Rand berechnet. Um die Resultate zusammenzufassen werden jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung betrachtet. Zuerst werden die Prüfgrößen und ihr Zusammenhang zu den Oberflächen und Datengrundlagen untersucht. Im zweiten Teil werden dann die bei der Validierung ermittelten Fehler hinzugezogen. Damit soll zuerst überprüft werden, ob anhand der Prüfgrößen eine optimalere Bestimmung der Interpolationsparameter möglich ist. Ob die Prüfgrößen auch für die Bewertung der Unsicherheit der Höhenmodelle eingesetzt werden können, wird erst in der abschliessenden Evaluation diskutiert, weil diese Ergebnisse keinen Einfluss auf die Anwendung an realen Daten haben.

Einfluss der Oberfläche und der Datengrundlage Zuerst werden die Prüfgrößen nur für die Vorprozessierungseinstellung VP2 ausgewertet (Abb. 15). Dadurch soll der Einfluss der unterschiedlichen Vorprozessierungen konstant gehalten werden und nur der Zusammenhang der unterschiedlichen Oberflächen und Datengrundlagen einerseits und den Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation andererseits untersucht werden.

Die *lokale Punktdichte* hängt direkt von der Anzahl verfügbarer Punkten ab. Deshalb sind die Werte des Datensatzes DS2 höher. Zudem zeigt sich, dass durch die einseitigen Fehler bei beiden Datensätzen deutlich höhere Punktdichten vorliegen. Dies bedeutet, dass bei der Vorprozessierung weniger Punkte herausgefiltert wurden. Die neutrale Gewichtungsfunktion scheint demnach stärker zu filtern als die beiden einseitigen Gewichtungsfunktionen. Die *lokale Punktverteilung* zeigt einen starken Zusammenhang zur Punktdichte. Je mehr Punkte vorhanden sind, desto kleiner werden die Flächen der Triangulationsdreiecke und somit sind die Varianzen auch geringer. Die lokalen Punktdichten sind im Durchschnitt zu hoch, um wirklich Aussagen über die Verteilung machen zu können. Zudem ist bei einer derart hohen Punktdichte deren Verteilung auch nicht mehr von grosser Bedeutung.

Der *Median der Höhendifferenzen* sind für die „Schiefe Ebene“ und den „Hang“ von vergleichbarer Grössenordnung. Die „Schiefe Ebene“ hat über die ganze Fläche ausgeglichene Werte, während beim „Hang“ im Bereich der starken Steigung sehr hohe und bei den ebenen Flächen sehr tiefe Werte gemessen werden. Der „Wald“ zeigt durch seine komplexe Oberfläche die höchsten Werte. Lokal kann mit den Höhendifferenzen somit die Oberflächenstruktur ziemlich gut erklärt werden.

Der *Median der Qualität der Punkte* soll vorwiegend Rückschlüsse auf die durchgeführte Vorprozessierung ermöglichen. Es zeigt sich, dass bei der „Schiefen Ebene“ sehr hohe Werte gemessen wurden. Durch die Vorprozessierung konnten die guten Punkte erkannt und stark gewichtet werden. Dies jeweils noch leicht besser bei den einseitigen Fehlern. Stärker sind die Unterschiede zwischen den beiden Fehlertypen bei den anderen Oberflächen. Hier sind die Werte für die einseitigen Fehler aber deutlich tiefer. Dies deutet darauf hin, dass bei der Vorprozessierung die gesuchte Oberfläche nicht gleich gut gefunden werden konnte und so auch eigentlich gute Punkte nur eine mittelmässige Gewichtung erhalten. Die grosse Problematik sind die abrupten Steigungsänderungen, wie sie beim „Hang“ und den einzelnen Kegeln des „Waldes“ auftreten. Interpolierte

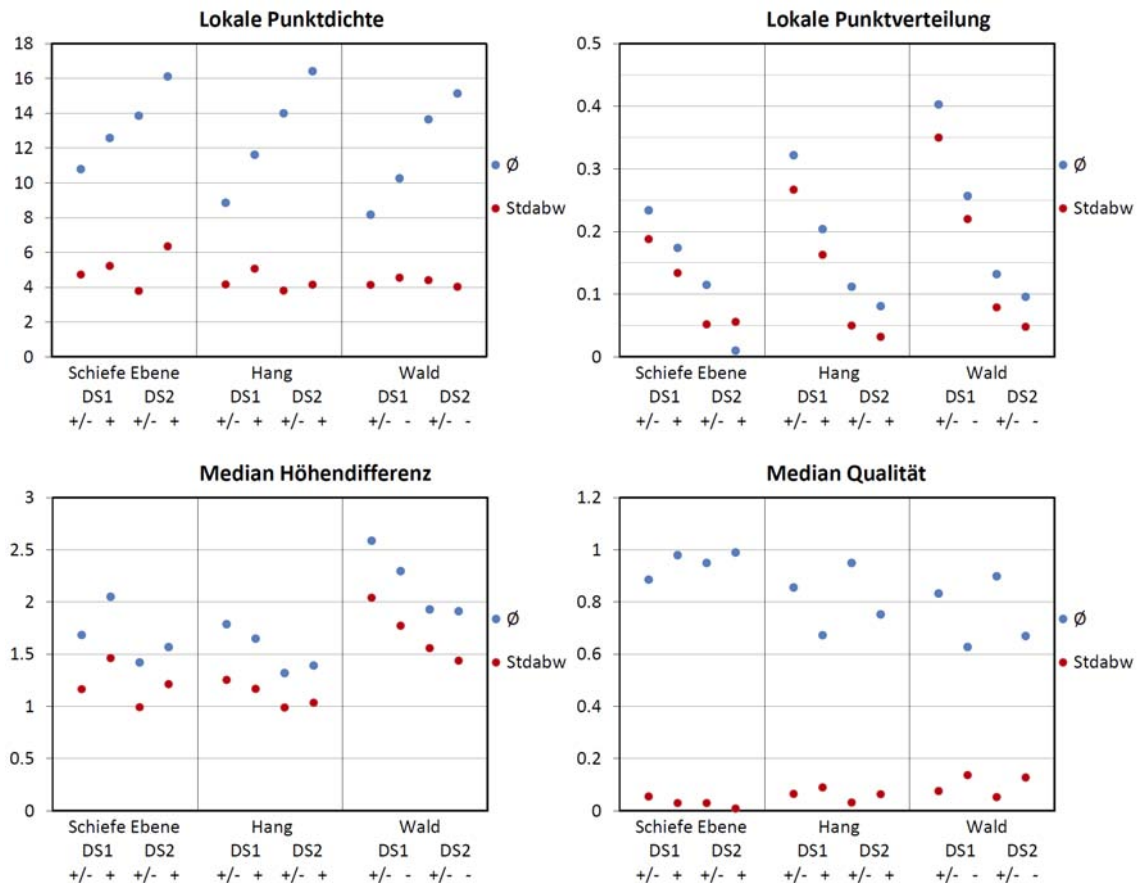


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen den Oberflächen und Datengrundlagen und den vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation.

Oberflächen neigen dazu solche Stellen abzurunden und so zu über- resp. unterschätzen. Bei der Vorprozessierung werden dadurch die eigentlich guten Datenpunkte schlecht interpoliert und erhalten so grössere Differenzen zwischen gemessenem und interpoliertem Wert, die bei der Vorprozessierung für die Gewichtung verwendet werden. Bei einer neutralen Gewichtung werden beidseitig kleine Differenzen noch gut bewertet, während die beiden einseitigen Gewichtungen konsequenter Differenzen auf der falschen Seiten schlecht bewerten (vgl. Abschnitt 5.2.2). Dadurch sind die Mediane der Qualität für die einseitigen Fehler tiefer bei den Oberflächen „Hang“ und „Wald“.

In der bisherigen Untersuchung wurde jeweils stets dieselbe Einstellung für die Vorprozessierung verwendet. Nun werden diese Einstellungen variiert und im Gegenzug wird aber nur die Oberfläche Wald verwendet (Abb. 16). Der Wald wurde ausgesucht, da hier die Resultate der bisherigen Untersuchung die grössten Unterschiede zeigten. An dieser komplex strukturierten Oberfläche soll der Einfluss der Stärke der Vorprozessierung auf die vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation analysiert werden. Auch hier ist wiederum ein starker Zusammenhang zwischen der lokalen Punktdichte und der Punktverteilung zu erkennen. Je stärker die Gewichtung in der Vorprozessierung ist, desto mehr Punkte werden herausgefiltert und desto schlechter wird auch die Punktverteilung. Mit der stärksten Vorprozessierung V3 ist die lokale Punktdichte schon sehr tief und mit der angegebenen Standardabweichung ist zu erkennen, dass für einige Rasterzellen nur noch einzelne Punkte in unmittelbarer Nähe liegen. Mit zunehmender Punktdichte werden die Höhendifferenzen logischerweise stets kleiner, da zwischen diesen Prüfgrößen bei einer stark

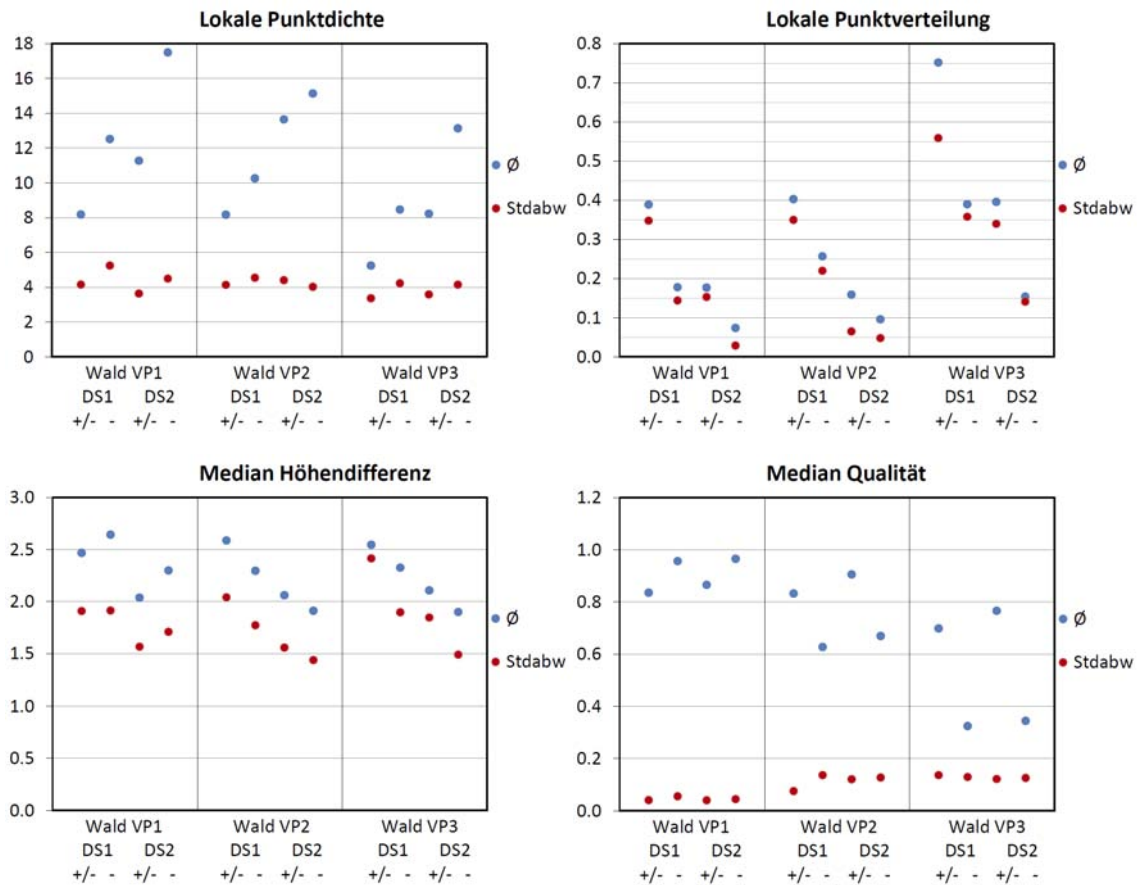


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen den Oberflächen und Datengrundlagen und den vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation.

strukturierten Oberfläche in einem engen Zusammenhang stehen. Der Median der Qualität der Punkte reagiert am auffälligsten auf die unterschiedlichen Vorprozessierungen. Je stärker die Vorprozessierung desto tiefer die bewertete Qualität der Punkte. Bei den beiden stärkeren Vorprozessierungen sind zudem sehr grosse Unterschiede zwischen der einseitigen und der beidseitigen Gewichtungsfunktion zu erkennen. Bei einer einseitigen Gewichtung sind die Mediane der Qualität deutlich tiefer. Welchen Einfluss dies auf die Parameterwahl der Interpolation hat, wird im folgenden Abschnitt untersucht.

Anwendung für die Kalibrierung In diesem Abschnitt werden die erkannten Zusammenhänge der Prüfgrößen zu Bewertung der Interpolation mit den in der Validierung ermittelten Fehlern verglichen. Es soll damit untersucht werden, ob die Aussagen, welche durch die Prüfgrößen über die Oberfläche und Datengrundlage gemacht werden können, für die Kalibrierung verwendet werden können. Das Ziel wäre es, dass auch bei den realen Daten diese Prüfgrößen gemessen werden könnten und daraus die Parameterwahl erfolgen könnte. Es werden nur noch die zwei Oberflächen „Hang“ und „Wald“ betrachtet, sowie die einseitigen Fehler, da diese Ausgangslage der realen Anwendung am ehesten entspricht.

Bei der Kalibrierung wurden verschiedene Erkenntnisse gemacht, die nun versucht werden durch die Prüfgrößen zu erklären. So hat sich bei dem Hang herausgestellt, dass die besten Resultate entweder mittels der stärksten Vorprozessierung VP3 und den ausgeglichenen Interpolationen I1 und I4 oder der mittleren Vorprozessierung VP2 und einer stärkeren Qualitätsgewichtung in der

Interpolation I3 erzielt wurden. Eine stärkere Vorprozessierung wirkt sich auf die Anzahl verfügbarer Punkte aus und führt zu einer tieferen lokalen Punktdichte, einer schlechteren Verteilung und auch zu einer tieferen durchschnittlichen Qualität der Punkte. Es kann deshalb vermutet werden, dass die noch vorhandenen Punkte alle für die Interpolation geeignet sind und die Gewichtung der Qualität deshalb nicht mehr stärker sein soll als diejenige der Distanz. Bei einer mittleren Vorprozessierung sind mehr Punkte für die Interpolation verfügbar und dadurch soll die Distanz gegenüber der Qualität schwächer gewichtet werden. Das könnte für die Anwendung an realen Daten bedeuten, dass bei der DTM-Generierung eine Untersuchung der lokalen Punktdichte und des Medians der Qualität zu einer adaptiven Anpassung der Gewichtungsfaktoren für die Distanz und die Qualität genutzt werden könnte.

Bei der Oberfläche „Wald“ hat sich gezeigt, dass sich eine zu starke Vorprozessierung negativ auswirkt, weshalb sich die Vorprozessierung VP3 nicht eignet. Bei den anderen beiden Vorprozessierungen ist ein ähnlicher Effekt wie beim „Hang“ zu erkennen. Bei einer schwächeren Vorprozessierung VP1, die sich in einer höheren Punktdichte und einem höheren Median der Qualität zeigt, ist eine stärkere Qualitätsgewichtung bei der Interpolation I3 besser. Im Unterschied zum „Hang“ ist hier bei der stärkeren Vorprozessierung VP2 nicht die ausgeglichene Interpolation, sondern die stärkere Gewichtung der Distanz von I2 besser geeignet. Dies kann an der stark strukturierten Oberfläche liegen, bei der wegen den lokalen und abrupten Änderungen die Distanz wichtiger ist als die Qualität.

6.4 Fazit für die Anwendung an realen Daten

Mit der Validierung wurde aufgezeigt, dass mit dem entwickelten Interpolationsprozess bessere Resultate erzielt werden als mit einem einfachen IDW und es sich deshalb für die Anwendung an realen Daten eignet. Weiter wurde in der Kalibrierung festgestellt, dass bei stark strukturierten Oberflächen die Vorprozessierung nicht zu stark gewählt werden darf. Im Allgemeinen eignet sich die Vorprozessierungseinstellung VP2 gut, deren Resultate bei allen Oberflächen und Datensätzen zu den Besten gehören und auch durch die Wahl der Interpolationsparameter nicht zu stark variieren. Die Wahl der Interpolationsparameter sollte vor allem anhand der Oberflächenstruktur getroffen werden. Die ausgeglichenen Ansätze I1 und I4 liefern in etwa gleich gute Resultate. Zwar liefern sie jeweils nicht die besten Resultate, jedoch sind sie eine sichere Wahl, da sie auch nie deutlich schlechter sind als die ungleich stark gewichtenden Ansätze I2 und I3. Für die stark strukturierte Oberfläche „Wald“ liefert eine stärkere Gewichtung der Distanz leicht bessere Resultate, während diese bei der ebeneren Oberfläche Hang durch eine stärkere Gewichtung der Qualität erreicht werden.

Bei der Untersuchung der Prüfgrößen zur Beurteilung der Interpolation konnte erkannt werden, dass die Punktverteilung direkt von der Punktdichte abhängt. Bei den hohen vorliegenden Punktdichten variiert die Verteilung nur gering und ist daher kaum für eine zusätzliche Nutzung sinnvoll. Vor allem, da bereits mit der implementierten Quadrantensuche die Punktverteilung in der Interpolation berücksichtigt wird. Die Verteilung der Höhendifferenzen ist direkt von der Oberflächenstruktur abhängig und kann genutzt werden, um diese zu beschreiben und lokal zu erkennen. Damit könnte sie helfen die Parameter auf die Oberflächenstruktur einzustellen. Die lokale Punktdichte und der Median der Qualität der Punkte könnten eingesetzt werden, um die beiden Interpolationsparameter Distanz- und Qualitätsgewichtungsfaktor aufeinander abzustim-

men. Bei einer hohen Punktdichte und hohen Qualitätswerten empfiehlt sich eine stärkere Qualitätsgewichtung, während bei tieferen Werten der beiden Prüfgrößen die Distanz stärker gewichtet werden sollte.

Anhand dieser Erkenntnisse wird im folgenden Kapitel die Anwendung des entwickelten Interpolationsprozesses an der realen Daten durchgeführt. Die genaue Umsetzung wird in diesem Zusammenhang detailliert erläutert.

7. Anwendung an realen Daten

Nachdem nun die Testreihen an den künstlichen Datensätzen durchgeführt wurden und Erkenntnisse über die Funktion und Kalibrierung des Interpolationsprozesses gesammelt wurden, sollen diese an den realen Daten umgesetzt werden. Zuerst werden die verwendeten Testregionen vorgestellt. Anschliessend wird die genaue Anwendung vorgestellt. Da zu den Datensätzen zusätzliches Vorwissen verfügbar ist und an die resultierenden Höhenmodelle bestimmte Anforderungen gestellt werden, muss der Interpolationsprozess an diese spezifischen Umstände angepasst werden.

7.1 Verwendete Testregionen

Die Auswahl der Testregionen basiert einerseits auf der Verfügbarkeit der Daten, ihrer Eigenschaften und den lokalen Gegebenheiten. Es wurde versucht unterschiedliche Fälle beispielhaft zu repräsentieren und daran die Funktion des entwickelten Prozesses zu testen. Die Testflächen haben eine Ausdehnung von 250'000 m². Im Folgenden werden die vier Testregionen mit den verfügbaren Daten dazu vorgestellt und ihre Besonderheiten erläutert. Die Testregionen sind nach den am nächsten liegenden Ortschaften benannt. In Klammern sind dazu die Erkennungsnummer der WSL und die Schweizer Landeskoordinaten angegeben. Orthophotos der Testregionen sind in der Abbildung 17 zu sehen.

Isonne TI (CINr 155764, CH-Koordinaten: 632250-632750 / 127250-127750)

In diesem Rotbuchenwald im Tessin befindet sich eine Forschungsfläche des WSL. Diese Flächen werden regelmässig untersucht und die Vegetationsmerkmale gemessen. So stehen Daten von terrestrischen Höhenmessungen der Bäume zur Verfügung. Der Wald liegt an einem Hang mit durchschnittlich 58 % Hangneigung. Diese Testregion wurde einerseits gewählt wegen der zusätzlichen Daten der terrestrischen Messungen zur Validierung und andererseits weil die Aufnahmen von LIDAR und ADS40 nur ein Jahr auseinander liegen. Die Befliegungen mit LIDAR wurden im Februar und März 2005 gemacht und ein Jahr später wurden die Luftbilder mit der ADS40 aufgenommen. In diesem Zeitraum sollten nur geringe Unterschiede in der Vegetation und somit in der vermessenen Oberfläche auftreten.

Bettlachstock SO (CINr 32768, CH-Koordinaten: 598250-598750 / 230250-230750)

Hier befindet sich die Testfläche in einem typischen gemischten Laubwald des schweizerischen Mittellandes. Die Testfläche liegt auf ca. 1149 m.ü.M. an einem Hang mit einer durchschnittlichen Steigung von 66 %. Auch hier befindet sich eine LWF-Forschungsfläche, womit man über die Daten der terrestrischen Referenzmessungen für eine Validierung verfügt. Die Besonderheit der

Daten ist im Luftbild zu erkennen. Wegen der leichten Bewölkung im nordwestlichen Teil hatte NGATE Schwierigkeiten mit der Höhenwertberechnung und es treten Fehler auf. Es resultieren markante Unterschiede von bis zu 124 Metern zwischen den LIDAR und den ADS40-Daten für diesen Bereich. Für diese Fälle wurde der Plausibilitätstest eingeführt, der nach solch markanten Differenzen zwischen den Datensätzen sucht und diese kartiert, so dass sie speziell behandelt werden können.

Heiden AR (CINr 11560, CH-Koordinaten: 757250-757750 / 257750-258250)

Da die ersten beiden Testregionen fast ausschliesslich aus Wald bestehen, wurden die beiden anderen Regionen so gewählt, dass auch andere landschaftliche Aspekte untersucht werden können. Die Testregion bei Heiden AR wurde wegen der inhomogenen Waldstruktur gewählt. Der Mischwald enthält viele Waldränder, eine grosse Lichtung und einzelne Waldinseln. Entlang der Waldränder, wo die Höhenmessungen mit NGATE häufig schlecht sind (vgl. Abschnitt 2.2), soll

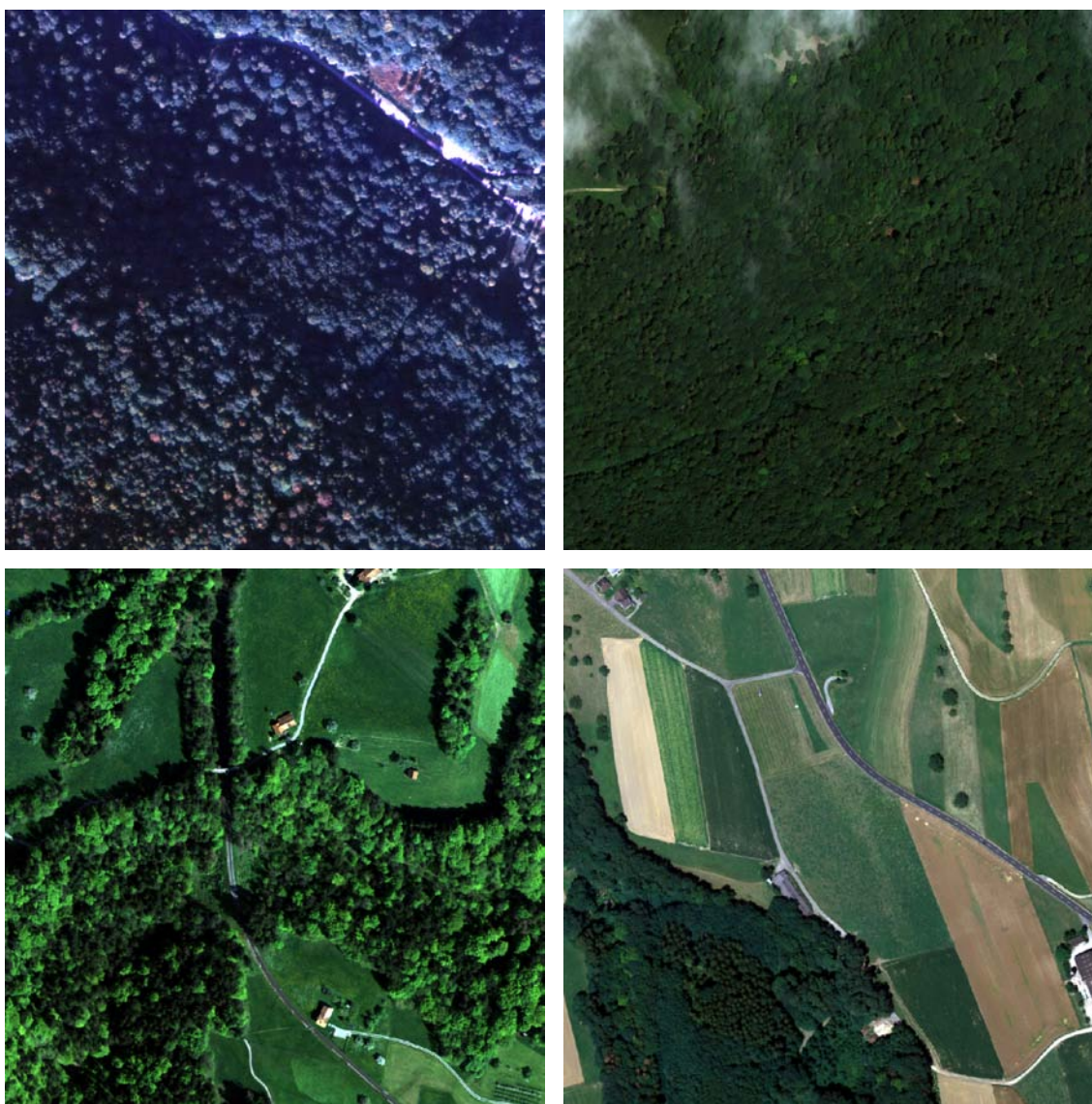


Abbildung 17: Übersicht zu den Testregionen. Oben: Die zwei Testregionen Isonne (links) und Bettlachstock (rechts) mit LWF-Forschungsflächen. Unten: Wald mit komplexer Struktur bei Heiden (links) und Wald neben landwirtschaftlichen Flächen bei Fahrwangen (rechts).

insbesondere der Gewinn des Interpolationsprozesses durch die Verwendung beider Datenquellen für das DOM untersucht werden.

Die Hangneigung der Wiesenflächen ist gering ($< 20\%$), jedoch befindet sich im Wald ein kleines Bachtobel und eine Eisenbahnlinie führt leicht vertieft von Süden nach Norden durch die Testfläche. Diese Elemente stellen eine Herausforderung für die Generierung des DTM dar. Hier soll die Funktion des Interpolationsprozesses für solche Strukturen getestet werden.

Fahrwangen AG (CINr 27051, CH-Koordinaten: 661250-661750 / 237750-238250)

Um die Funktion des Interpolationsprozesses auch für ebene Flächen zu untersuchen, wurde diese Testregion bei Fahrwangen ausgesucht. Hier befindet sich ein kleiner Mischwald und grosse landwirtschaftliche Flächen. NGATE hat beim Matching-Prozess Schwierigkeiten mit der regelmässigen, linearen Struktur einzelner Äcker, wodurch flächenhafte Unsicherheiten in den ADS40-Daten vorhanden sind. Das Ziel ist es mit dieser Testregion zu zeigen, dass solche Fehler und Unsicherheiten durch die Kombination der Datensätze reduziert werden können. Für solche ebenen und vegetationsarmen Flächen spielt es auch nur eine geringe Rolle, dass die LIDAR-Daten bereits 2001 und 2003 aufgenommen wurden, während das ADS40-Luftbild erst 2006 gemacht wurde.

7.2 Anforderungen an die Höhenmodelle

Die Anforderungen an das resultierende Höhenmodell, basieren auf der Analyse der verfügbaren Datenquellen (Kapitel 2), werden aber schlussendlich durch den Anwender bestimmt. Bei der in dieser Arbeit untersuchten Anwendung für die ADS40- und LIDAR-Daten wurden die Anforderung von der WSL gestellt. Diese bilden die Grundlage für die Bewertung der Datensätze und ihre Verwendung innerhalb des Interpolationsprozesses.

Im Allgemeinen sollen die ADS40-Daten die Grundlage für die Höhenmodelle bilden und die LIDAR-Daten dienen zur Ergänzung und zur Reparatur der fehlerhaften Flächen. Dies gilt für die Nichtwald-Flächen sowie die Waldoberfläche des DOM. Da der Waldboden nur mit den LIDAR-Daten vermessen wurde, werden für diese Flächen die LIDAR-Daten bevorzugt.

Es gilt also die Datensätze für beide Höhenmodelle DOM bzw. DTM und die Geländetypen Wald bzw. Nichtwald unterschiedlich zu behandeln.

7.3 Anwendung des Interpolationsprozesses

Im methodischen Teil dieser Arbeit wurde der Aufbau des Interpolationsprozesses vorgestellt und die Methoden der einzelnen Teilschritte erläutert. Nun gilt es den Interpolationsprozess für die Anwendung an den verfügbaren Daten anzupassen. Denn die einzelnen Teilschritte erfordern gewisse Entscheidungen des Anwenders und die Einstellung der Parameter muss vorgenommen werden. Der erste Schritt „Einbezug des Vorwissens“, mit dem die Messgenauigkeit der Datenpunkte bewertet wurde, wurde bereits in Abschnitt 5.1 beschrieben und wird für alle Einstellungen konstant gehalten. So müssen noch die Vorprozessierung und die Interpolation eingestellt werden. Um diese Einstellung vorzunehmen, benötigt es Vorwissen zu den Daten (vgl. Kapitel 2) und den Testregionen (vgl. Abschnitt 7.1) Aber vor allem gilt es die an die resultierenden Höhenmodelle gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 7.2) zu berücksichtigen.

7.3.1 Erforderliche Anpassungen

Um die vom Anwender gewünschten Resultate zu erzielen, werden verschiedene Anpassungen an der Anwendung und der Verwendung der Datenquellen notwendig. Hier werden nun die zwei notwendigen Anpassungen vorgestellt, deren Umsetzung in den folgenden Kapiteln besprochen wird.

Plausibilitätstest Da in den Datensätzen Fehler auftreten können, ist es notwendig vor der Anwendung die Daten nach solchen Fehlern abzusuchen. Die LIDAR-Daten gelten dabei als verlässlich, da sie für die Anwendungen des LNF bereits verifiziert wurden (Artuso, 2003). Bei den ADS40-Daten können dagegen solche Fehler, wie in der Testregion Bettlachstock, auftreten. Um diese ausfindig zu machen wird ein Plausibilitätstest angewendet. Er basiert darauf, dass die bereits vorliegenden Höhenmodelle aus den einzelnen Datenquellen miteinander verglichen werden und auf auffällige Abweichungen untersucht werden. Dabei wird das DOM aus den ADS40-Daten mit dem DTM aus den LIDAR-Daten verglichen. Liegt das DOM deutlich tiefer als das DTM muss die Situation genauer untersucht werden und kann dann entsprechend als fehlerhaft markiert werden. Diese fehlerhaften Flächen können mittels einer Fehlermaske in die Vorprozessierung mit einbezogen werden. Im Bezug auf diese Anwendung bedeutet diese, dass wenn die ADS40-Daten fehlerhaft sind, für diese Fehlerflächen die LIDAR-Daten zu bevorzugen sind.

Globale vs. Lokale Anwendung Grundsätzlich gilt es für jede Testregion ein DTM und ein DOM zu generieren, aus denen schlussendlich ein CHM berechnet werden kann. Zudem sollen zwei unterschiedliche Anwendungsformen getestet werden. Das WSL will die Interpolation von Höhenmodellen grossflächig anwenden können und daher wird ein möglichst automatisiertes Verfahren verlangt. Konkret bedeutet dies, dass auf die Generierung der grobrasterigen Waldmaske verzichtet wird, da diese eine visuelle Überprüfung und manuelle Bearbeitung benötigt. Somit ist es bei der Vorprozessierung und der Interpolation nicht möglich zwischen Wald und Nichtwald zu unterscheiden und es werden nur noch die Einstellungen für die beiden Höhenmodelle unterschieden. Einzig der Fall, dass durch den Plausibilitätstest festgestellt wird, dass ein Datensatz für gewisse Flächen grosse Fehler aufweist, wird für beide Höhenmodeltypen speziell behandelt. In der untersuchten Testregion Bettlachstock tritt dieser Fall auf, weil die ADS40-Daten wegen der Bewölkung fehlerhaft sind. Deshalb wird bei den Einstellungen auch der Fall von Fehlern bei den ADS40-Daten behandelt.

Der zweite Ansatz entspricht der lokalen und spezialisierten Anwendung. Dabei soll der Interpolationsprozess möglichst gut auf die einzelnen Testregionen eingestellt werden. Dafür darf auch mehr Aufwand betrieben werden. Somit wird hier die grobrasterige Waldmaske eingesetzt und die Methoden können adaptiv auf Wald und Nichtwald eingestellt werden. Daraus folgt, dass bei der Vorprozessierung die drei Fälle Nichtwald, Wald-DOM und Wald-DTM behandelt werden. Anhand dieser zwei unterschiedlichen Ansätze soll auch aufgezeigt werden, was der Gewinn durch diese aufwändigere, lokale Einstellung und die grobrasterige Waldmaske gegenüber dem globalen Ansatz ist. Es wird nun die Anwendung der beiden Ansätze für die beiden Höhenmodelltypen aufgezeigt.

7.3.2 Anwendung des globalen Ansatzes

Bei diesem Ansatz werden für die Vorprozessierung nur die beiden Höhenmodelltypen DTM und

DOM unterschieden, da keine grobrasterige Waldmaske eingesetzt wird. Für Wald und Nichtwald werden somit die gleichen Einstellungen verwendet. Das heisst, es ist nicht möglich die Vorprozessierung bei Nichtwaldflächen auf dieselbe Weise für beide Höhenmodellen vorzunehmen. Dies führt dazu, dass sich das DTM und DOM auch bei diesen Flächen unterscheiden können. Für die Interpolation des DTM ist es dadurch nicht möglich die Parameter adaptiv auf die geringere Punktdichte in den Waldflächen einzustellen. Als Alternative zur grobrasterigen Waldmaske könnte deshalb ein Punktdichteraster berechnet werden, an dem die Parameter, insbesondere der Suchradius, angepasst werden könnten. Dies würde die Effizienz des Algorithmus erhöhen, hätte aber keinen Einfluss auf das Resultat, da durch die eingesetzte Quadrantensuche nur eine begrenzte Anzahl Nachbarpunkte in die Interpolation einbezogen wird. Für die Anwendung an den kleinen Testregionen wird deshalb auf den Einsatz eines Punktdichterasters verzichtet.

Der Ablauf des globalen Ansatzes ist in der Abbildung 18 aufgezeigt. Innerhalb der Vorbereitung der Daten müssen lediglich den Datenpunkten die durch den Einbezug des Vorwissens bestimmten Gewichtungsfaktoren angehängt werden und der Plausibilitätstest durchgeführt werden. Falls

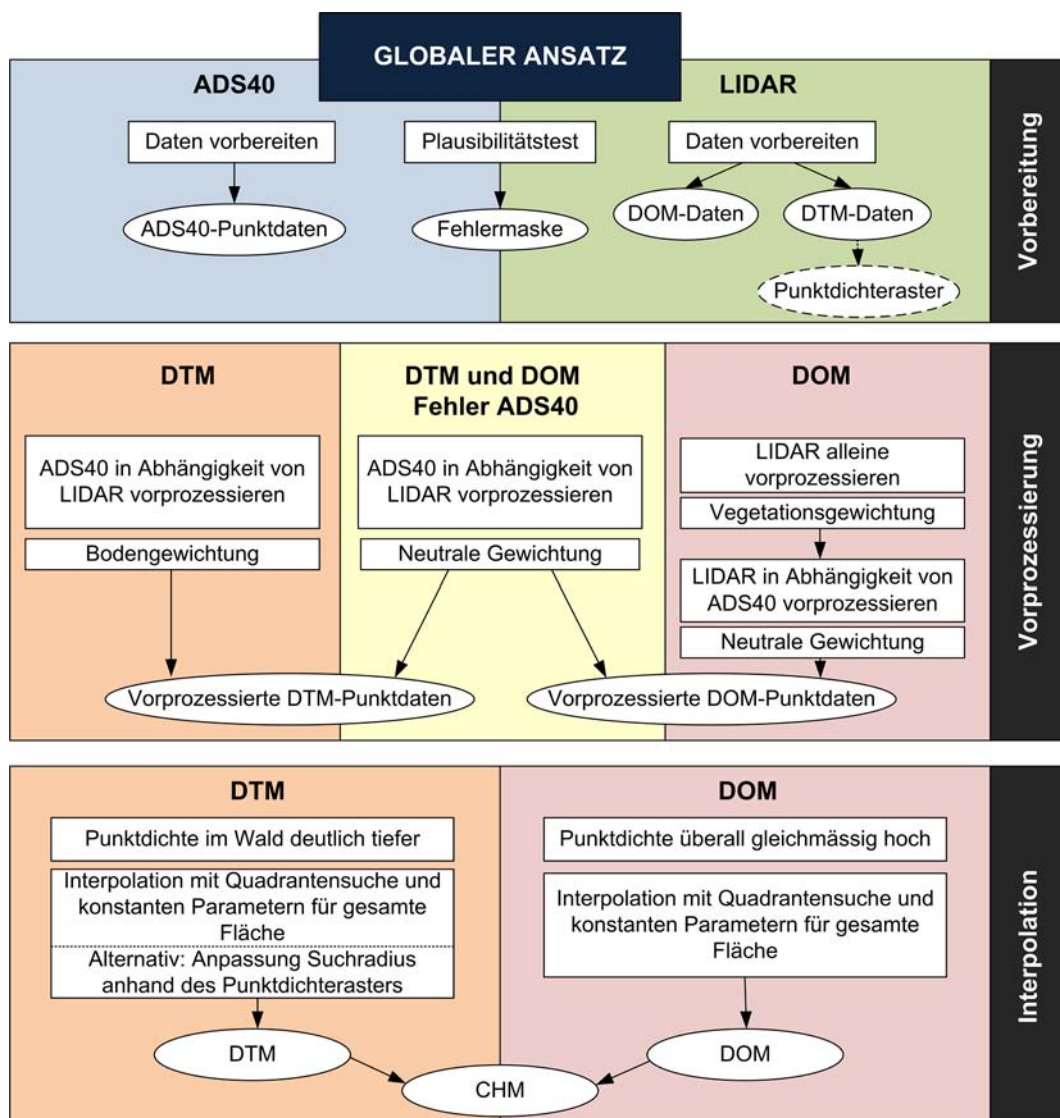


Abbildung 18: Der Interpolationsprozess: Übersicht zur Anwendung des globalen Ansatzes

ein Punktdichteraster verwendet werden soll, wird dies anhand der LIDAR-DTM-Daten erstellt. Bei der Vorprozessierung für das DTM werden die ADS40-Daten in Abhängigkeit der LIDAR-Daten vorprozessiert mit einer Bodengewichtung. Das führt dazu, dass bei Waldflächen die ADS40-Punkte herausgefiltert werden. Bei der Vorprozessierung für ein DOM werden zuerst die LIDAR-DOM-Daten, die bei Wäldern ebenfalls Bodenpunkte und Punkte innerhalb der Struktur des Waldes enthalten, mit einer Vegetationsgewichtung vorbereitet. Dadurch bleiben nur noch die Punkte übrig, welche die oberste Oberfläche des Waldes beschreiben. Anschliessend werden diese Punkte in Abhängigkeit der ADS40-Daten mit einer neutralen Gewichtung nochmals vorprozessiert. Damit sollen die ADS40-Daten ergänzt werden und vor allem die Löcher, die durch schlechte FOM-Werte entstanden sind, ausgefüllt werden. Falls Fehler in den ADS40-Daten erkannt werden, wie dies bei der Testregion Bettlachstock der Fall ist, werden bei diesen Flächen für beide Höhenmodelltypen die ADS40-Punkte in Abhängigkeit der LIDAR-Daten vorprozessiert.

Die Interpolation kann für das DOM für die ganze Fläche mit konstanten Parametern durchgeführt werden, da es keine grösseren Unterschiede in der Punkteverteilung und -dichte gibt. Beim DTM ist die Punktdichte in Wäldern deutlich tiefer und es treten Lücken auf. Es benötigt deshalb einen grösseren Suchradius. Wird ein Punktdichteraster eingesetzt, können der Suchradius und möglicherweise auch andere Parameter adaptiv eingestellt werden. Ansonsten muss der grosse Suchradius auch für die Nichtwaldflächen, trotz der dort hohen Punktdichte, eingesetzt werden.

7.3.3 Anwendung des lokalen Ansatzes

Sinn dieses lokalen Ansatzes ist es, den Einsatz einer grobrasterigen Waldmaske zu testen. Da die Generierung einer solchen Waldmaske anhand der LIDAR-Daten nicht fehlerfrei funktioniert, sind eine visuelle Überprüfung und eine manuelle Bearbeitung notwendig. Falls die Resultate mit einer Waldmaske bedeutend besser sind als diejenigen des globalen Ansatzes, sollte versucht werden die Generierung der grobrasterigen Waldmaske zu verbessern und zu automatisieren, so dass sie auch für die grossflächige Anwendung einsetzbar wird. Die Vorbereitung der Daten bleibt gleich wie beim globalen Ansatz, nur wird eben diese Waldmaske an Stelle des Punktdichterasters generiert (Abb. 19). Zusammen mit der Fehlermaske des Plausibilitätstests wird daraus die Vorprozessierungsmaske erstellt. Damit lassen sich Wald, Nichtwald und Fehlerflächen unterscheiden. Die Fehlerflächen der ADS40-Daten und die Waldflächen für die beiden Höhenmodelle werden wie beim globalen Ansatz bearbeitet. Neu sind aber die Nichtwaldflächen, die für beide Höhenmodelle gleich vorprozessiert werden. Dazu werden beiden Datensätze kombiniert und ohne Abhängigkeiten mit einer neutralen Gewichtung vorprozessiert. Dadurch werden diese Flächen in beiden Höhenmodellen gleich sein und das daraus berechnete CHM sollte für diese Flächen keine Höhenwerte haben.

Bei der Interpolation besteht der einzige Unterschied zwischen dem lokalen und globalen Ansatz darin, dass die Interpolationsparameter für das DTM nicht mehr anhand des Punktdichterasters, sondern der grobrasterigen Waldmaske angepasst werden.

7.3.4 Parametereinstellungen

Die Einstellung der Parameter für die Vorprozessierung und für die Interpolation beruht zum Teil auf den Erfahrungen, die mit den Testserien mit den künstlichen Datensätzen gemacht wurden (vgl. Abschnitt 6.3.2). Jedoch können diese Einstellungen nicht direkt übernommen werden,

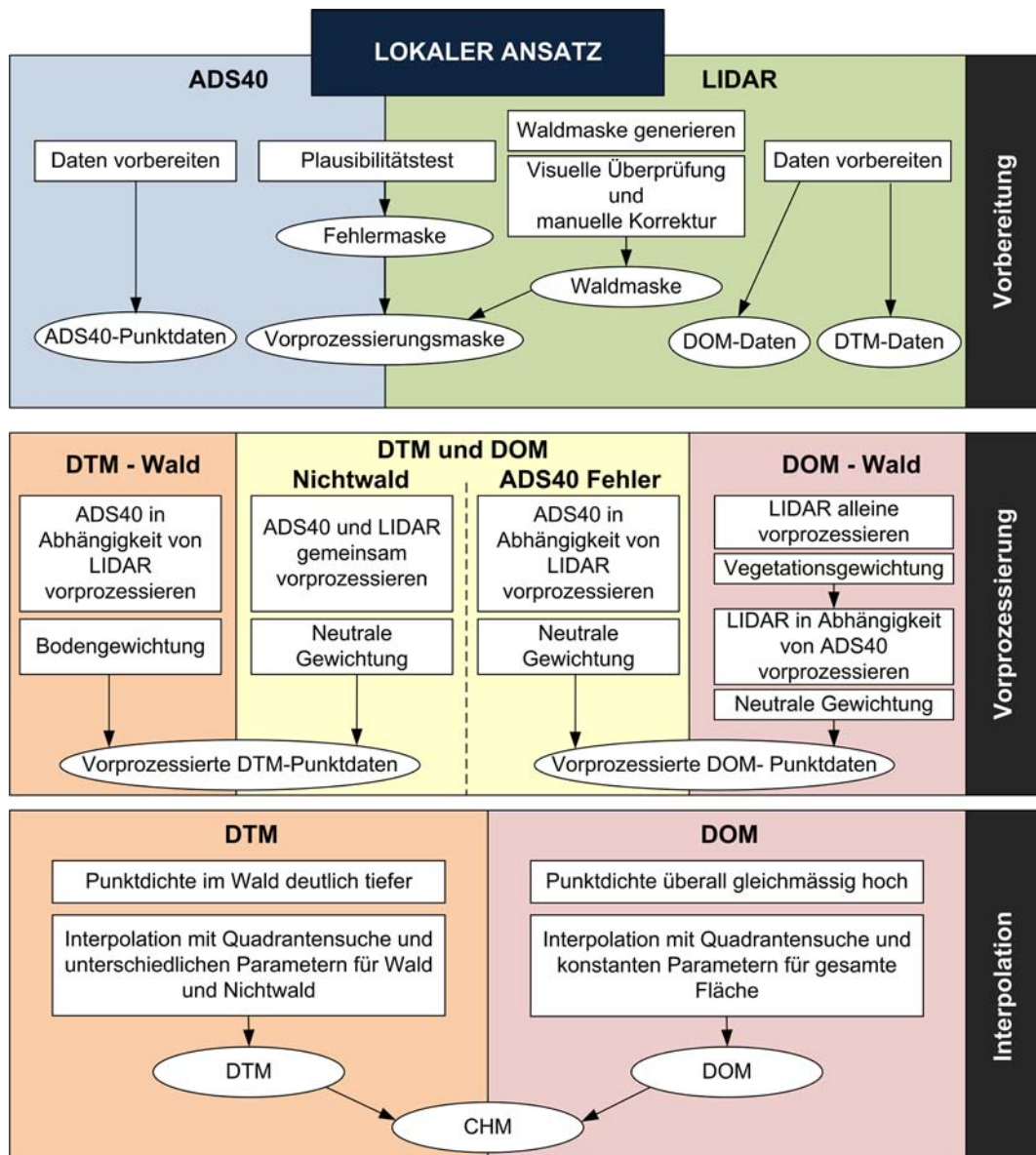


Abbildung 19: Der Interpolationsprozess: Übersicht zur Anwendung des lokalen Ansatzes

sondern es braucht eine explizite Anpassung an diese anderen Datengrundlagen und Oberflächeneigenschaften. Um verschiedene Parametereinstellungen und deren Einfluss auf das Resultat zu untersuchen, werden Mittel zur Validierung benötigt. Da diese nur bedingt vorliegen ist eine optimale Bestimmung der Parameter schwierig. Um diese dennoch möglichst gut durchzuführen wurden die für zwei Testregionen zur Verfügung stehenden terrestrisch gemessenen Referenzdaten verwendet. Für die verschiedenen resultierenden Höhenmodelle wurden der RMSE, sowie die auftretenden maximalen und minimalen Fehler verglichen. Ausführlicher wird diese Auswertung bei der Validierung im Abschnitt 8.2 besprochen. Diese Referenzdaten sind jedoch nur für zwei kleine Flächen verfügbar und jeweils nur für Waldflächen. Nichtwaldflächen und die Waldränder können daher so nicht beurteilt werden. Deshalb wurden die verschiedenen resultierenden Höhenmodelle auch visuell miteinander verglichen und auch gegenüber den Höhenmodellen betrachtet, die nur aus einzelnen Datenquellen generiert wurden. Dadurch wurden schliesslich die Parametereinstellungen festgelegt, deren Resultate die Anforderungen am besten erfüllten. Diese

Parametereinstellungen wurden für alle Testregionen angewendet, um so wieder dem vom WSL erwünschten globalen anwendbaren Ansatz zu folgen und zu zeigen, dass dieselben Einstellungen auf verschiedene Testregionen anwendbar sind. Die verwendeten Parameter sind in den Tabellen 5 und 6 aufgelistet.

Ansatz	Höhenmodell	Fläche	Vorprozessierung								
			Iter	DG	QG	Rad	Rg	Sh	a	b	c
global	DOM ¹	Alles	3	2	2	3	6	1	1	2	1
			3	2	2	3	6	0	3	2	1
	DTM	Alles	3	2	2	3	6	-1	1	2	1
lokal	DOM ¹	Wald	3	2	2	3	6	1	1	2	1
			3	2	2	3	6	0	3	2	1
	DTM	Wald	3	2	2	3	6	1	1	2	1
	beide	Nichtwald	3	2	2	3	6	0	3	2	1
beide	beide	Fehler	3	2	2	3	6	0	3	2	1

¹ Bei den DOM werden zwei Vorprozessierungen durchgeführt. Erst eine Vegetationsgewichtung der LIDAR-Daten und anschliessend eine neutrale Gewichtung beider Datensätze.

Tabelle 5: Parametereinstellungen der Vorprozessierung für den globalen und lokalen Ansatz. Iter = Iterationen, DG = Distanzgewichtungsfaktor, QG = Qualitätsgewichtungsfaktor, Rad = Suchradius, RG = Range, Sh = Shift, a,b,c = Parameter der Gewichtungsfunktion

Ansatz	Höhenmodell	Fläche	Interpolation			
			DG	QG	Rad	PpS
global	DOM	Alles	2	2	12	2
	DTM	Alles	2	2	12	2
lokal	DOM	Wald	2	2	3	2
	DTM	Wald	2	2	12	2
	beide	Nichtwald	2	2	3	2
beide	beide	Fehler	2	2	3	2

Tabelle 6: Parametereinstellungen der Interpolation für den globalen und lokalen Ansatz. (PpS = Punkte pro Sektor)

8. Resultate und Evaluation

Die Präsentation der Resultate und die Evaluation des Interpolationsprozesses werden beide in diesem Kapitel vereint. Auf ein separates Kapitel für die Resultate wurde verzichtet, da durch die visuelle Präsentation der resultierenden 3D-Oberflächen mittels einzelner Bilder könnten kaum Details und Besonderheiten festgestellt werden. Dies würde eine interaktive Betrachtung mittels GIS-Programmen erfordern. Deshalb werden die Resultate in die Evaluation integriert, wo anhand von Vergleichen mit anderen Höhenmodellen und zusätzlichen quantitativen Auswertungen die Eigenschaften der interpolierten Höhenmodelle besser aufgezeigt werden können.

Mit einer ausführlichen Evaluation sollen qualitativ und quantitativ verschiedene Aspekte des entwickelten Interpolationsprozesses untersucht und beurteilt werden. Dies wird jeweils an dazu passenden Beispielen der Resultate der verschiedenen Testregionen durchgeführt. Als erstes wird Funktion und die Anwendbarkeit des Interpolationsprozesses untersucht (Abschnitt 8.1). Dabei soll die technische Umsetzung und die Korrektheit der berechneten Resultate diskutiert werden, sowie auch die notwendigen Mittel und Vorbereitungen kritisch beurteilt werden. Zur Beurteilung der Resultate wird eine ausführliche Validierung durchgeführt (Abschnitt 8.2). Da es wegen mangelnder Referenzdaten schwierig ist, interpolierte Höhenmodelle mit der Realität zu vergleichen und zu validieren, werden verschiedene andere Ansätze gewählt, um so dennoch eine möglichst umfassende Beurteilung durchführen zu können. In Abschnitt 8.3 wird die Bewertung der Unsicherheiten durch die vier Prüfgrößen untersucht. Zum Abschluss des Kapitels wird ein Fazit der Anwendung des entwickelten Interpolationsprozesses an realen Daten gezogen.

8.1 Umsetzung des Interpolationsprozesses

8.1.1 Technische Umsetzung

Verifikation Mit einer Verifikation soll überprüft werden, wie genau und korrekt die theoretischen Ideen und die entwickelte Methodik in Computercode und mathematische Formalismen übersetzt wurden (Rykiel, 1996). Dies bedeutet, dass das entwickelte Programm auf technische und auch logische Fehler untersucht werden soll. Die Verifikation ist daher sehr wichtig und muss sorgfältig ausgeführt werden. Denn die einwandfreie Funktion des Interpolationsprozesses und die Korrektheit der Resultate bilden die Grundlage dafür, dass überhaupt eine sinnvolle Auswertung durchgeführt werden kann. Deswegen wurden während der Implementierung laufend Kontrollen durchgeführt und die Funktion der einzelnen implementierten Methoden anhand von repräsentativen Beispielen verifiziert. Dabei wurde auch darauf geachtet, dass möglicherweise auftretende Spezialfälle ebenfalls berücksichtigt und korrekt behandelt werden. Zur Verifikation wurden ent-

weder manuell berechnete Stichprobenwerte oder die Resultate anderer Programme verwendet. So konnte beispielsweise die Funktionsweise des implementierten IDW für Testdatensätze mit den Resultaten von QGIS verglichen werden. Wobei angemerkt werden muss, dass bei Programmen wie QGIS die genaue Funktion der Interpolationsmethoden nicht dokumentiert ist und einzelne Parameter nicht vom Nutzer gewählt werden können. So konnte keine perfekte Übereinstimmung der interpolierten Oberflächen erreicht werden. Jedoch sind die Abweichungen so gering, dass die Korrektheit der implementierten IDW-Interpolation bestätigt werden konnte.

Effizienz Bei den zu verarbeitenden Datenmengen und dem produktiven Einsatz in der Praxis ist die Effizienz eines Programms für eine benutzerfreundliche Anwendung von grosser Bedeutung. Für ein effizienteres Datenmanagement wurde mit sogenannten Buckets gearbeitet. Dabei werden die Daten beim Einlesen anhand eines groben Quadratgitters in adressierte Container gefüllt. So können die zeitaufwendigen Suchfunktionen nur innerhalb einer begrenzten Zahl von umliegenden Buckets und deren Datenpunkte durchgeführt werden. Für die kleinen Testregionen reichte dieser Ansatz aus, um die benötigte Rechenzeit massiv zu verkürzen. Sollten grössere Flächen interpoliert werden und die zu bearbeitenden Datenmengen würden die Kapazität des Arbeitsspeichers übersteigen, müssten andere Ansätze gewählt werden. Eine Möglichkeit wäre das Streaming, wie es Isenburg (2006) anwendet.

Neben dem Datenmanagement sind die geometrischen Funktionen und deren Berechnung ebenfalls ausschlaggebend für die Effizienz. Diese wurden wenn immer möglich durch Methoden von CGAL ausgeführt. Diese Methoden wurden von Experten unter dem Anspruch an Exaktheit und Effizienz entwickelt (CGAL, 2010).

Nutzung und Weiterentwicklung Als letzter Punkt der technischen Umsetzung soll kurz auf die technischen Anforderungen an die Nutzung des Programms und die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung eingegangen werden. Da für die Programmierung des Verfahrens ausschliesslich Open Source Software verwendet wurde, können die erstellten Codes nachvollzogen werden und beliebig verändert werden. Somit ist die Möglichkeit der Weiterentwicklung des Interpolationsprozesses gegeben. Zudem sind für die Anwendung des Verfahrens keine zusätzlichen, kostenpflichtigen Programme notwendig.

8.1.2 Anwendbarkeit

Nachdem nun die technischen Aspekte diskutiert wurden, soll das Augenmerk auf die Anwendbarkeit durch die Benutzer gelenkt werden. Dabei soll aufgezeigt werden, welche Kenntnisse der Benutzer haben muss, um den Interpolationsprozess bestmöglich einsetzen zu können. Es soll gezeigt werden, welche Vorbereitungen, Überprüfungen und Eingaben durch den Nutzer gemacht werden müssen und welche Probleme dabei auftreten können.

Vorbereitung der Daten Das Programm kann nur die Punktdaten aus ASCII-Textfiles einlesen. Deshalb ist es notwendig die verschiedenen Datenformate in ein solches lesbares Format zu bringen. Für die LIDAR-Daten ist dies ein übliches Format und braucht somit meist keine Vorarbeit. Die ADS40-Daten sind dagegen in einem Rasterformat verfügbar. Deshalb wurde ein kleines Programm zur Konvertierung geschrieben, wodurch auch diese Umwandlung einfach und ohne Programmierkenntnisse durchgeführt werden kann.

Überprüfung und Anpassung der Waldmaske Wie schon im Abschnitt 5.2.3 erwähnt, ist die Generierung einer grobrasterigen Waldmaske anhand der LIDAR-DOM-Daten mit einigen Problemen verbunden. Daher ist eine visuelle Überprüfung der Qualität der Waldmaske durch den Benutzer notwendig und es müssen möglicherweise Anpassungen an den einstellbaren Parameter oder manuelle Korrekturen direkt an der Rasterdatei vorgenommen werden. Dies erfordert vom Benutzer Kenntnisse über die Funktionsweise der Methode zur Waldmaskengenerierung und der einzugebenden Parameter. Zudem muss er manuelle Anpassungen an der Waldmasken-Datei vornehmen können. Diese Voraussetzung ist keineswegs optimal und eine Verbesserung dieser Umstände wäre für eine bessere Benutzerfreundlichkeit wünschenswert. Jedoch wurde in dieser Arbeit nur der Nutzen einer Waldmaske getestet im Wissen, dass es bessere Möglichkeiten dafür geben würde, diese jedoch mit mehr Aufwand verbunden sind und möglicherweise auch zusätzliche Daten erforderlich wären.

Auswahl der Parameter Die Parameter für die einzelnen Teilschritte sollten auf die zur Verfügung stehende Datengrundlage und die zu untersuchende Oberfläche angepasst werden. In dieser Arbeit wurden mit den Testserien an künstlichen Daten gewisse Erkenntnisse gemacht, wie die Parameter für verschiedene Daten und Oberflächen gewählt werden sollten. Doch dies sind nur vorgeschlagene Leitwerte. Für eine spezifische Anwendung bedarf es daher Kenntnisse zu den Eigenschaften der Daten und Oberflächen, um die Bestimmung der Parameter durchzuführen. Die Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation könnten helfen, die Eigenschaften der Oberflächen und Daten zu beschreiben und daraus die Parameter zu bestimmen (vgl. Abschnitt 6.3.3). Jedoch benötigt dies weitere Kenntnisse des Anwenders über die Bedeutung der verschiedenen Prüfgrößen und deren Zusammenhang zu den einzelnen Parametern des Interpolationsprozesses.

Wünschenswert wäre ein automatisiertes Verfahren, das anhand von messbaren Größen der Daten und Oberflächen die optimalen Parameter bestimmt. Da jedoch keine aussagekräftige Validierung der resultierenden Höhenmodelle möglich ist, kann kaum beurteilt werden, welche Einstellungen optimal sind.

8.2 Validierung

Gemäss Rykiel (1996) soll die Validierung überprüfen, ob ein aufgestelltes Model oder in diesem Fall ein entwickeltes Verfahren die definierten Anforderungen für eine bestimmte Anwendung erfüllt. Weiter sagt Rykiel (1996), dass es für eine Validierung keine standardisierten Kriterien gibt, die erfüllt werden müssen und somit nicht immer dieselben Testverfahren anzuwenden sind. Die Kriterien müssen selbst anhand der Anforderungen definiert werden und mit geeigneten Methoden überprüft werden. Falls zusätzliche Referenzdaten vorhanden sind, sollten diese für einen Vergleich mit den interpolierten Werten genutzt werden.

Da die Validierung durch Referenzdaten nur bedingt möglich ist (Abschnitt 2.5.2), wird zusätzlich versucht mit anderen Mitteln eine ausführliche und aussagekräftige Validierung durchzuführen. Dazu wird zuerst die Funktion des Interpolationsprozesses an den künstlichen Datensätzen validiert (Abschnitt 8.2.1). Anschliessend werden die Resultate der Anwendung an den realen Daten mit anderen Höhenmodellen verglichen, die nur auf einer Datenquelle basieren, um so den Gewinn durch die Kombination mehrerer Datensätze zu untersuchen (Abschnitt 8.2.2). Zum Schluss wird die Validierung anhand der terrestrischen Baummessungen durchgeführt (Abschnitt 8.2.3).

8.2.1 Validierung der Testreihen mit künstlichen Datensätzen

In Kapitel 6 wurden die Testserien mit künstlichen Datensätzen beschrieben und ihre Resultate besprochen und ebenfalls ausgewertet. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass der Interpolationsprozess die Resultate gegenüber dem Standard-IDW deutlich verbessert. Voraussetzung ist ein gewisses Vorwissen über die Qualität der Daten und über die Art der Abweichung, also ob nur positive bzw. negative Fehler auftreten oder ob beide Fälle eintreffen. Der Interpolationsprozess ist daher grundsätzlich für die Anwendung an solch künstlich generierten, fehlerhaften Daten geeignet. Nun gilt es auch die Anwendung an realen Daten zu untersuchen und bestmöglich zu validieren.

8.2.2 Vergleich mit Höhenmodellen aus einzelnen Datensätzen

Die Besonderheit des entwickelten Interpolationsprozesses ist die Kombination mehrerer Datensätze. Daher bietet es sich an, die Resultate mit Höhenmodellen zu vergleichen, die nur aus einzelnen Datensätzen generiert wurden. Es soll dabei untersucht werden, wo Unterschiede zwischen den Höhenmodellen bestehen, was die Ursachen dafür sind und welche Lösung den Anforderungen besser entspricht. Es werden nacheinander die drei generierten Höhenmodelltypen DOM, DTM und CHM besprochen.

DOM Für das DOM wurde in den Anforderungen festgelegt, dass als Grundlage die ADS40-Daten verwendet werden sollen und die LIDAR-Daten nur der Ergänzung und der Reparatur der fehlerhaften Flächen dienen. Daher werden die Resultate im Vergleich zum DOM nur aus den ADS40-Daten präsentiert. In Abbildung 20 ist das DOM für die Testregion Heiden zu sehen, das nach dem lokalen Ansatz erstellt wurde. Das Model zeigt keine auffälligen Fehler oder unnatürliche Oberflächenverläufe. Beim visuellen Vergleich mit dem DOM der ADS40-Daten können Unterschiede der beiden Modelle bemerkt werden. Um diese Unterschiede besser sichtbar zu machen, wurde die Differenz der beiden DOM berechnet (Abb. 21). Flächen bei denen das resultierende DOM des Interpolationsprozesses grösser ist als das ADS40-DOM sind rot, wo es kleiner ist blau dargestellt. Die weissen Flächen haben eine maximale Abweichung von +/- 0.5 m. Daneben ist das FOM-Raster abgebildet und es ist eine klare Übereinstimmung der schlechten, rot dargestellten FOM-Flächen mit den Differenzen der DOM zu erkennen. Dies war auch zu erwarten, da es das Ziel der DOM-Generierung war, die Flächen mit schlechten FOM-Werten durch die LIDAR-Daten zu reparieren. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die Waldränder meist steiler werden. Die Bäume am Waldrand werden gegenüber dem ADS40-DOM meist erhöht und es folgt eine abruptere Kante zur leicht vertieften Wiese, was der Realität eines Waldrandes besser entspricht (Abb. 22). Die grösseren Wiesenflächen, auf denen die FOM-Werte grössten Teils gut sind, werden durch den Interpolationsprozess kaum verändert und es zeigen sich nur geringe Differenzen gegenüber dem ADS40-DOM.

DTM Da die DTM bei Waldflächen praktisch nur aus den LIDAR-Daten interpoliert werden können, kann hier der Interpolationsprozess auch nur eine Datenquelle verwenden. Lediglich bei den Nichtwaldflächen kommen auch beim DTM beide Datenquellen zum Einsatz. Dennoch soll hier ein Vergleich zwischen dem interpolierten DTM und dem DTM nur aus LIDAR-Daten, das von der WSL verwendet wird und mittels der in ArcGIS implementierten IDW-Interpolation erstellt wurde, angestellt werden. Bei den Waldflächen kann die Funktion der Interpolationsme-

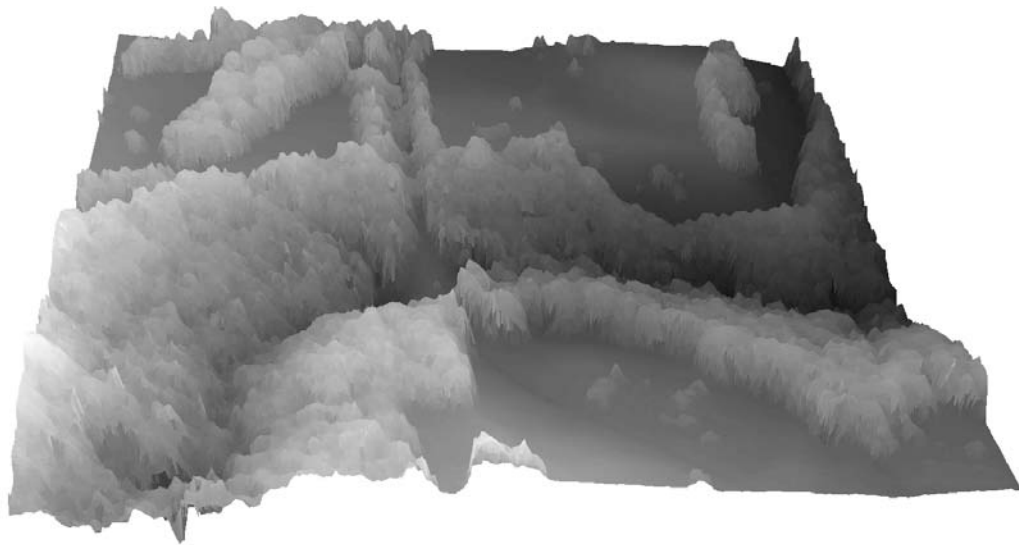


Abbildung 20: DOM der Testregion Heiden nach dem lokalen Ansatz erstellt.

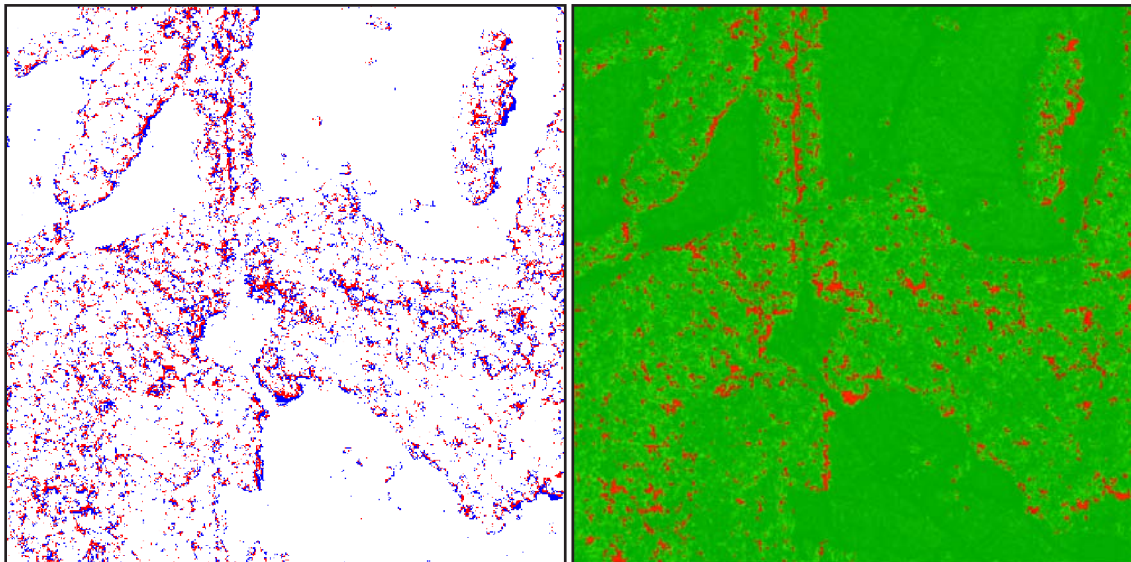


Abbildung 21: Differenzen der DOM des Interpolationsprozesses aus beiden Datenquellen und des ADS40-DOM (links). Daneben die FOM-Werte der ADS40-Daten (rechts). Es ist eine deutliche Übereinstimmung der schlechten FOM (rot) mit den den Differenzen (blau und rot) zu erkennen.

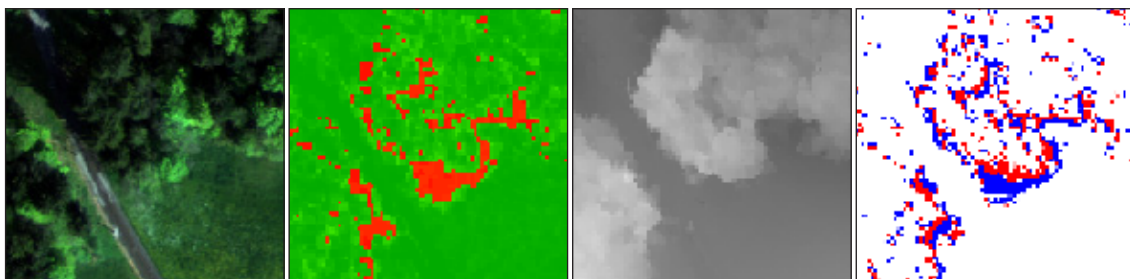


Abbildung 22: Kleiner Ausschnitt von ca. 50 x 50 m mit dem RGB und dem FOM-Bild (links) und dem interpolierten DOM und den Differenzen gegenüber dem ADS40-DOM (rechts). Die Differenzen zeigen, wie der Waldrand steiler wurde, indem die Wiese gegenüber dem ADS40-DOM tiefer (blau) und die Bäume höher (rot) dargestellt werden.

thode untersucht werden und mit dem Resultat der Interpolation von ArcGIS verglichen werden, da hier beide DTM praktisch nur aus LIDAR-Punkten interpoliert wurden. Dagegen kann bei den Nichtwaldflächen der Unterschied zwischen nur LIDAR-Daten und der Kombination beider Datenquellen untersucht werden. Wiederum wird dieser Vergleich anhand der Testregion Heiden aufgezeigt, da diese Fläche eine unregelmässig strukturierte Oberfläche unter dem Wald hat und ebenfalls grössere Wiesenflächen besitzt. Damit sind beide beschriebenen Untersuchungen hier möglich.

Beim visuellen Vergleich beider Modelle sind die Unterschiede kaum zu erkennen, deshalb wurde ein Differenzraster berechnet (Abb. 23). Rote Fläche zeigen wo das LIDAR-DTM höher ist als das interpolierte DTM. Der umgekehrte Fall ist blau dargestellt. Die Differenzen finden sich entlang der Bachtäler und der vertieften Bahnlinie. Diese Flächen liegen im Wald und haben deshalb eine tiefere Punktdichte. Hier zeigen sich die unterschiedlichen Anwendungen des IDW-Ansatzes.

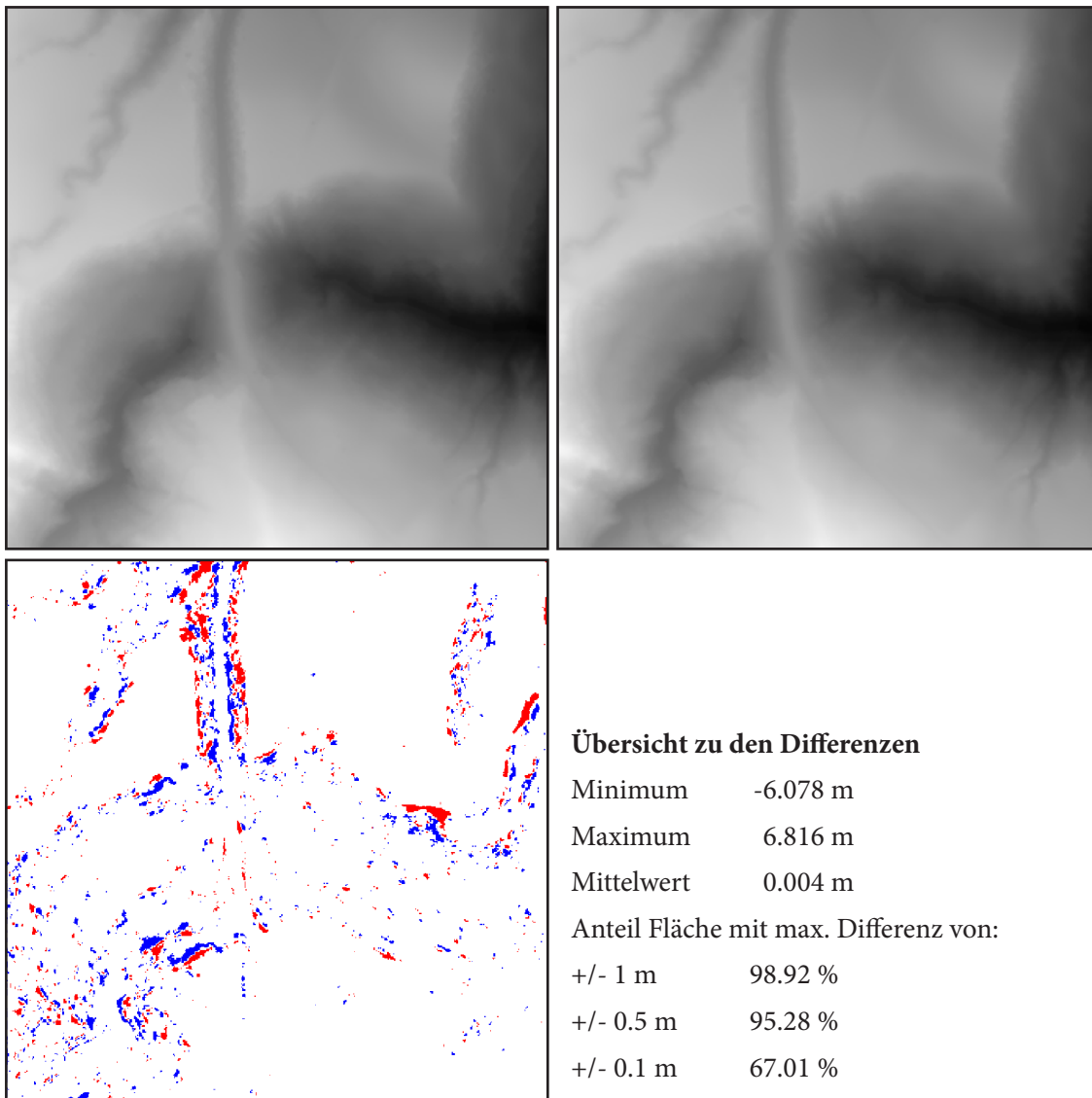


Abbildung 23: Vergleich zwischen dem DTM der Testregion Heiden interpoliert aus beiden Datenquellen (oben links) und nur aus den LIDAR-Daten mittels ArcGIS (oben rechts). Die Differenzen (rot=negativ, blau=positiv) zwischen beiden Modellen treten vorwiegend bei den Waldflächen auf.

Da die genaue Funktion des in ArcGIS implementierten IDW-Ansatzes nicht bekannt ist, kann nicht beurteilt werden, welche Resultate besser sind. Jedoch sind im Allgemeinen die Unterschiede meist sehr gering. Die Flächen deren Differenzen kleiner als 0.5 m sind machen 95.28 % der Fläche aus und sind in Abbildung 23 weiss dargestellt. Dies betrifft vor allem die Wiesenflächen, wo für den Interpolationsprozesses auch die ADS40-Daten verwendet wurden. Man kann also für diese Testregion keinen Gewinn durch den Interpolationsprozess mit beiden Datenquellen feststellen. In Waldflächen kommen die zusätzlichen ADS40-Daten gar nicht zum Einsatz und bei Wiesenflächen sind ebenfalls kaum Unterschiede zum LIDAR-DTM zu erkennen. Jedoch wurden die Wiesenflächen von zwei Fernerkundungssystemen unabhängig voneinander vermessen und es können grobe Fehler somit ausgeschlossen werden. Die Verlässlichkeit der Resultate ist dadurch gestiegen.

CHM Nachdem die resultierenden Höhenmodelle DOM und DTM präsentiert wurden, folgt nun das daraus berechnete CHM. Je besser die einzelnen Höhenmodelle erstellt werden konnten, desto aussagekräftiger wird dadurch das CHM. Es soll besonders untersucht werden, wie sich das Verwenden beider Datenquellen für beide Höhenmodelle DOM und DTM auf das daraus resultierende CHM auswirkt. Dazu wird ein Vergleich mit einem CHM angestellt, das aus einem DOM nur aus ADS40-Daten und einem DTM nur aus LIDAR-Daten berechnet wurde. Weiter sollen die Resultate des universellen und des lokalen Ansatzes für die beiden Modelle miteinander verglichen werden. Damit soll besonders der Einsatz der grobrasterigen Waldmaske beurteilt werden. Besonders geeignet für diese Untersuchung ist die Testregion bei Fahrwangen. Dort hat man neben dem Wald grosse Wiesen- und Ackerflächen, auf denen aufgrund der gleichmässigen Struktur kleinere Fehler in den ADS40-Daten auftreten, die mit den FOM-Werten dokumentiert sind. Bei solchen Flächen sollte der Vorteil des Einsatzes mehrerer Datensätze sichtbar werden, da diese Fehler in den ADS40-Daten durch die LIDAR-Daten korrigiert werden sollten. In Abbildung 24 sind die drei CHM zum Vergleich abgebildet. Im CHM aus den Höhenmodellen aus jeweils nur einer Datenquelle sind innerhalb der Nichtwaldflächen deutliche Strukturen von Äckern, Wiesen und Strassen zu erkennen. Das heisst, dass sich bei diesen Flächen das DTM und DOM unterscheiden. Diese Differenz sind jedoch meist in einem vertretbaren Bereich von +/- 1 m und daher nicht gravierend. Dennoch konnten solche feinen Strukturen durch den Einsatz des Interpolationsprozesses mit beiden Datenquellen eliminiert werden. Die Abweichungen sind meist nur noch im Bereich von Zentimetern. Aber solche feine Strukturen sind für die Verwendung eines CHM nicht sehr problematisch. Dagegen sind auftretende grössere Abweichungen besonders zu beachten. Ein gutes Beispiel dafür findet sich bei einem Acker innerhalb dieser Testregion Fahrwangen, das nun genauer betrachtet wird. In Abbildung 25 ist dieser Ausschnitt aus den drei CHM vergrössert dargestellt und dazu wurden noch das RGB und das FOM-Bild hinzugefügt. Damit kann man die Problematik besser erkennen. Die regelmässige Struktur, im RGB-Bild zu sehen, führt zu schlechter Korrelation im Matching-Prozess von NGATE und so zu schlechten FOM-Werten. Dadurch entstehen Fehler im ADS40-DOM die im Bereich von bis zu +/- 10 m liegen. Im CHM aus den Höhenmodellen einzelner Datenquellen bleiben diese Fehler enthalten. Bei dem globalen Ansatz des Interpolationsprozesses werden die Fehler reduziert. Besonders die negativen Fehler werden besser korrigiert, da beim globalen Ansatz für das DOM mit einer Vegetationsgewichtung gearbeitet wird. Dadurch werden die zu tief liegenden ADS40-Daten durch die LIDAR-Daten nach oben korrigiert. Beim lokalen Ansatz, der diese Nichtwaldfläche für beide Höhenmodelle mit einer neutralen Gewichtung vorprozessiert, verschwinden die Fehler komplett. Die fehler-

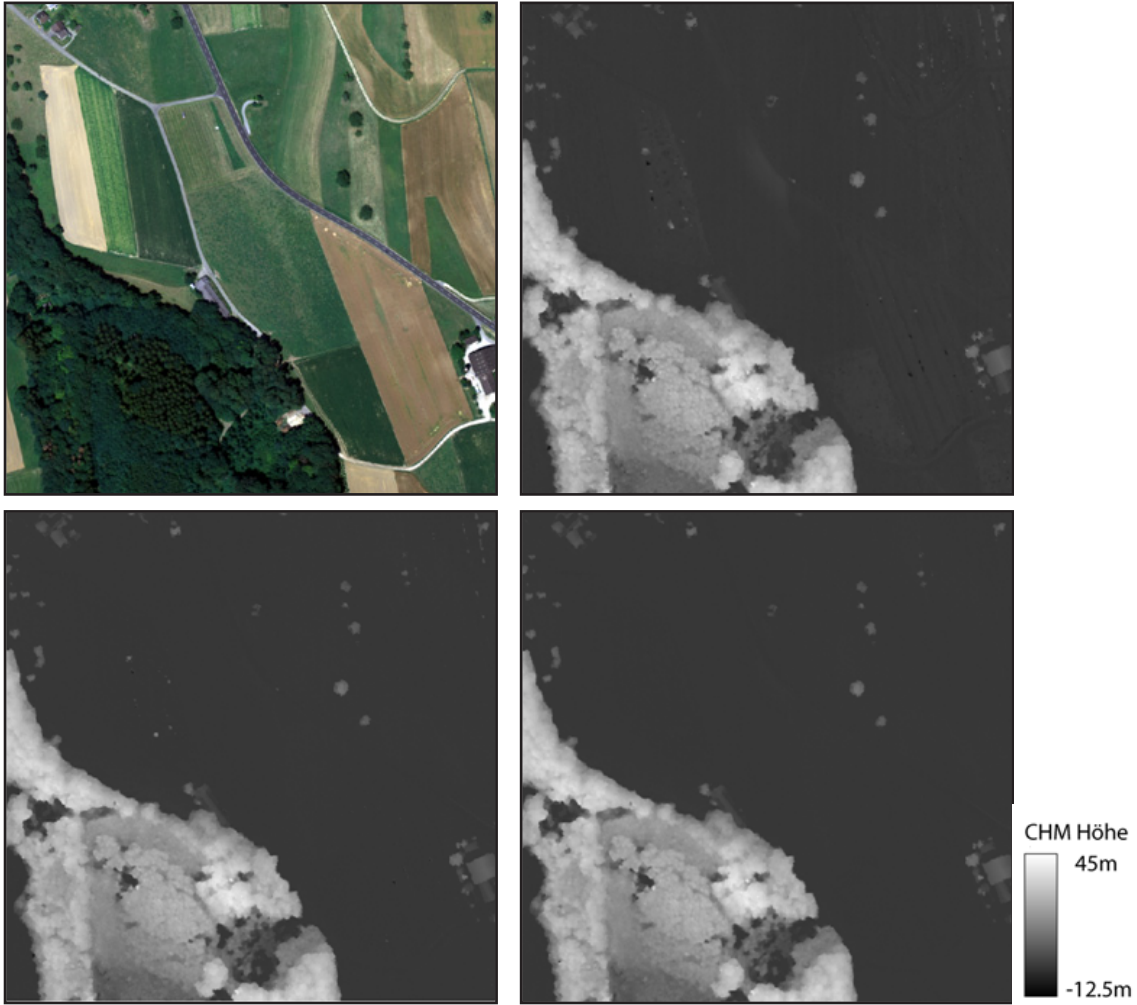


Abbildung 24: Vergleich der CHM für die Testregion Fahrwangen berechnet aus dem ADS40-DOM und einem LIDAR-DTM (oben rechts), den Höhenmodellen des Interpolationsprozesses mit dem globalen Ansatz (unten links) und dem lokalen Ansatz (unten rechts).

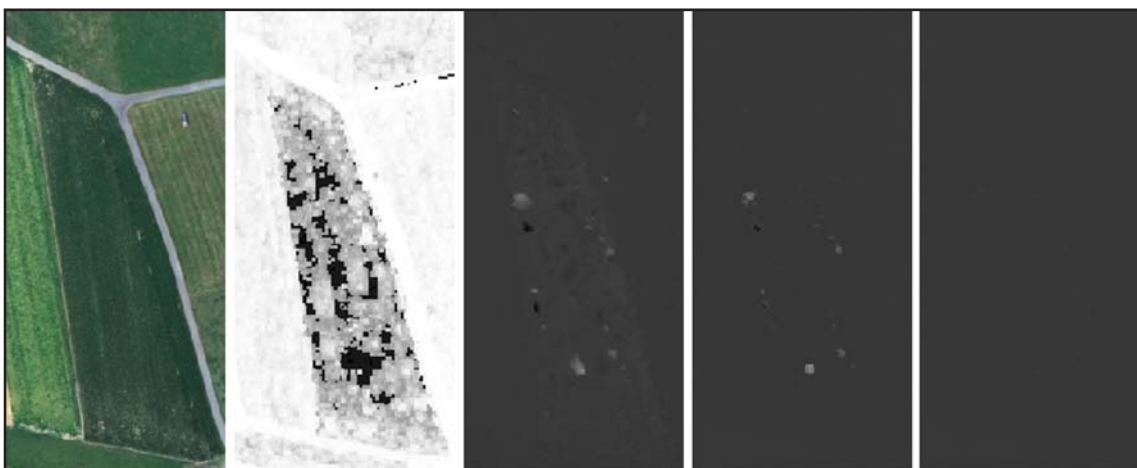


Abbildung 25: Kleiner Ausschnitt aus der Testregion Fahrwangen zeigt einen Acker mit problematischen FOM-Werten. In den drei CHM daneben können diese Fehler unterschiedlich gut noch erkannt werden. Beim lokalen Ansatz des Interpolationsprozesses (rechts) finden sich gar keine Abweichungen von DOM und DTM mehr.

haften Vertiefungen und Erhebungen auf dem Acker sind weder im DOM noch DTM enthalten.

8.2.3 Validierung durch terrestrische Referenzwerte

In den beiden Testregionen Bettlachstock und Isonne liegen jeweils LWF-Flächen. Für diese Flächen wurden die Bäume vor Ort mit GPS kartiert und mittels Theodolit die Höhen des Baumfusses und der Baumspitze bestimmt (vgl. Abschnitt 2.5.2). Diese zwei Punkte dienen als Referenzwerte für das DTM resp. DOM. Jedoch ist auch bei diesen Referenzpunkten mit Fehlern durch die Aufnahme zu rechnen. Zudem stammen diese Messungen nicht aus demselben Jahr wie die ADS40-Luftbilder, so dass auch dadurch Unterschiede auftreten können. Dabei gilt es weniger das Vegetationswachstum zu berücksichtigen, welches bei hohen Bäumen nur gering ist, sondern es könnten in der Zwischenzeit Bäume gefällt worden sein. So ist vorab eine Untersuchung notwendig, welche Referenzpunkte für eine Validierung verwendet werden können. Die Baumfusspunkte können grundsätzlich alle verwendet werden, da sie sicher auf dem Boden liegen und ihre terrestrische Messung genauer vorgenommen werden kann. Dagegen müssen die Baumspitzen mit mehr Vorsicht behandelt werden, da nicht alle Baumspitzen auch wirklich zur Waldoberfläche gehören, weil sie nicht hoch genug sind. Und zudem ist die Höhenmessung eines Baumes vom Boden aus schwierig, da die Baumspitze besonders bei Laubbäumen nur schwer bestimmbar ist.

Vorbereitung Baumdaten Die Vorbereitung der Daten wird am Beispiel der Testregion Bettlachstock aufgezeigt. Zuerst wurden die Höhen aller vermessenen Bäume mit dem ADS40-DOM verglichen (Abb. 26). Es zeigt sich eine beidseitige Verteilung von Abweichungen, bei der die meisten Werte in einem Bereich von 0 m bis 5 m um den Nullpunkt liegen. Dies bedeutet, die Baummessungen sind ein wenig höher, als sie durch das ADS40-DOM geschätzt werden. Höher im positiven Bereich gibt es auch noch einige Ausreisser, bei denen das DOM deutlich tiefer liegt als die Baummessung. Dies kann sein, weil der Baum in der Zwischenzeit gefällt wurde oder aber es liegt ein Fehler beim DOM oder aber dem Referenzwert vor. Diese Abweichungen werden vorerst in den Daten belassen, da untersucht werden soll, wie gut die LIDAR-Daten diese Bäume vermessen haben und wie sich dies auf die Kombination der Datenquellen auswirkt.

Im negativen Bereich, also wo die Baummessungen tiefer liegen als das DOM, gibt es mehr grosse Abweichungen als im positiven Bereich. Dies wird vermutlich an den kleinen Bäumen liegen, die nicht bis zur Oberfläche des Waldes reichen. Deshalb wird der Zusammenhang zwischen den Baumhöhen und den gemessenen Fehler mit einer linearen Regression untersucht. Für beide Testregionen zeigt sich ein starker Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmass R^2 von 0.608 (Bettlachstock) resp. 0.76 (Isonne). Deshalb wurden getestet, wie sich dieser Zusammenhang verändert, wenn die kleinen Bäume weggelassen werden. Es zeigt sich, dass wenn nur noch Bäume mit einer Höhe über 15 m betrachtet werden, der Zusammenhang deutlich geringer ist (Bettlachstock: $R^2 = 0.002$, Isonne: $R = 0.28$). Ebenfalls verschwinden alle stark negativen Fehler, während die positiven Ausreisser erhalten bleiben (siehe Abb. 26). Der Mittelwert der Fehler verschiebt sich dadurch deutlicher in den positiven Bereich.

Als nächster Schritt wird ein DOM aus den LIDAR-Daten hinzugezogen. Es wurde mit dem Interpolationsprozess erstellt, so dass es mit einer Vegetationsgewichtung vorprozessiert wurde, um so die Bodenpunkte zu eliminieren. Es zeigt sich, dass mit dem interpolierten LIDAR-DOM schlechtere Resultate erzielt werden als mit dem ADS40-DOM. Die gemessenen Fehler der beiden DOM zeigen jedoch keinen Zusammenhang und betreffen somit nicht dieselben Bäume ($R^2 = 0.04$). Bei

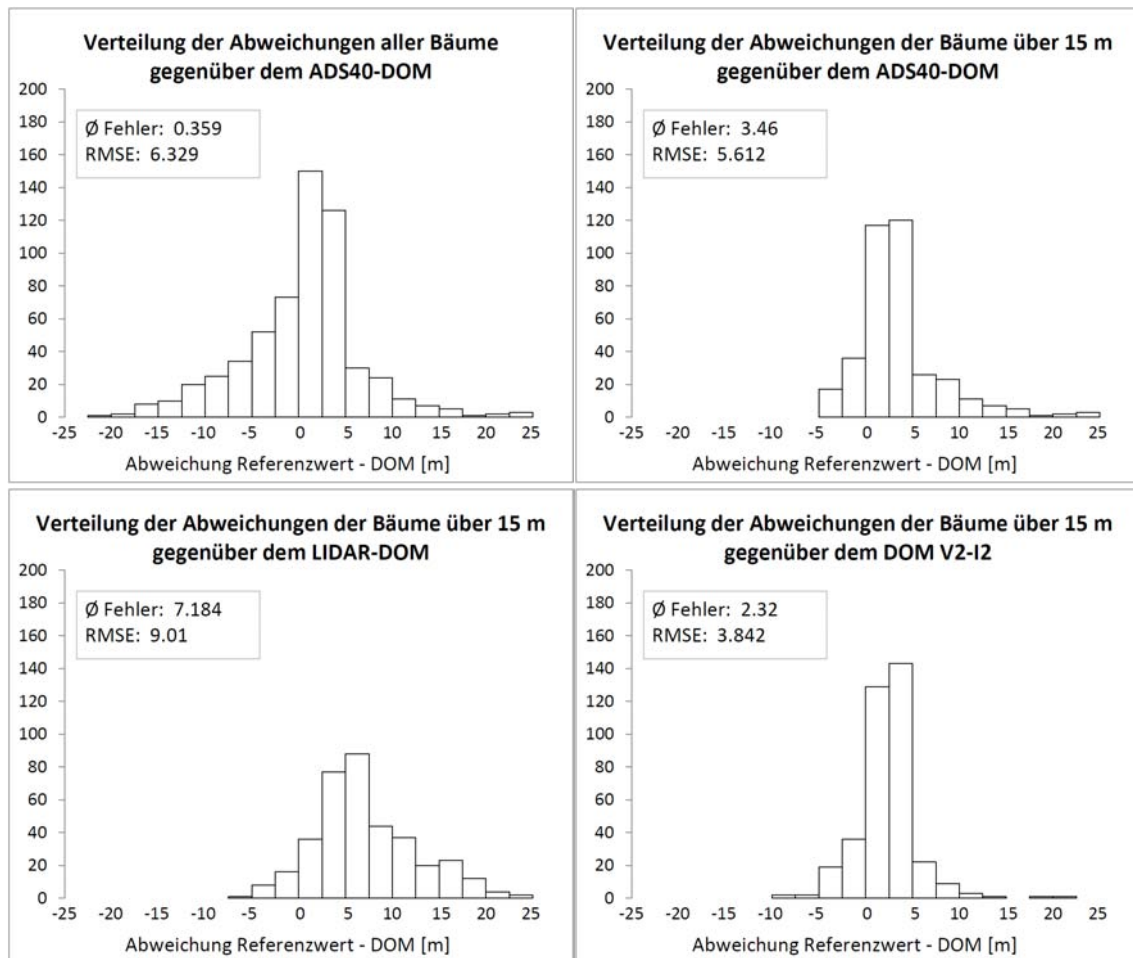


Abbildung 26: Verteilung der Abweichungen der terrestrischen Baummessungen gegenüber verschiedenen DOM der Testregion Bettlachstock

einem ersten kombinierten DOM mit den Einstellungen V2 und I2, deren Bedeutung im nächsten Abschnitt erläutert werden, resultieren schon bessere Werte und es sind nur noch 6 Baumwerte mit einer Abweichung von mehr als 10 m zu finden. Diese Baummessungen können durch keine der beiden Datenquellen erklärt werden und werden deshalb ebenfalls gelöscht. Für den Bettlachstock bleiben so noch 361 Baumwerte für die Validierung übrig. An den Baumdaten von Isonne wurde dieselbe Vorbereitung durchgeführt und es bleiben dort noch 314 Referenzwerte übrig.

Validierung DOM Im Rahmen der Validierung mit den terrestrischen Referenzwerten soll ebenfalls die Kalibrierung der Vorprozessierung und der Interpolation durchgeführt werden. Mit den künstlichen Datensätzen wurden bereits einige Erkenntnisse über den Zusammenhang der Oberfläche und Datengrundlage zu den Parametereinstellungen gemacht (vgl. Abschnitt 6.3.2). Nun gilt es zu überprüfen, wie sich die Anwendung an realen Daten im Vergleich dazu verhält und ob die gemachten Erkenntnisse bestätigt werden können. Es werden verschiedene Parametereinstellungen für die Vorprozessierung (Tab. 7) und die Interpolation (Tab. 8) angewendet und deren Resultate verglichen. Es werden drei Parametereinstellungen für die Vorprozessierung und vier für die Interpolation untersucht. Es sind dieselben Einstellung, die auch bei den künstlichen Datensätzen angewendet wurden und in diesem Zusammenhang bereits beschrieben wurden. Es wurde jeweils der universelle Ansatz verwendet und so die gesamte Testregion mit den selben Einstellungen interpoliert.

Name	Vorprozessierung DOM								
	Iter	DG	QG	Rad	Rg	Sh	a	b	c
V1	3	1	1	3	6	0	1	1	1
V2	3	2	2	3	4	1	1	2	1
V3	3	2	2	3	4	1	3	2	1

Tabelle 7: Einstellungen der Vorprozessierung für die Validierung mit den terrestrischen Baummessungen

Name	Interpolation DOM			
	DG	QG	Rad	PpS
I1	1	1	5	2
I2	2	1	5	2
I3	1	2	5	2
I4	2	2	5	2

Tabelle 8: Einstellungen der Interpolation für die Validierung mit den terrestrischen Baummessungen.

Für alle interpolierten Höhenmodelle wurde die maximale und minimale Abweichung zu den Referenzwerten sowie der RMSE berechnet. Diese Werte sind in der Tabelle 9 aufgelistet. Bei Iso-ne sind praktisch keine Unterschiede zwischen den DOM des Interpolationsprozesses und dem ADS40-DOM festzustellen. Der Grund dafür ist die hohe Qualität der ADS40-Daten für die untersuchten Referenzpunkte, die sich in hohen FOM-Werten zeigt. Lediglich 3 der untersuchten 314 Bäume liegen in einer Rasterzelle mit einem FOM-Wert der tiefer als 80 ist. Bei solch hoher Qualität der ADS40-Daten haben die LIDAR-Daten keinen Einfluss auf die Interpolation. Lediglich die interpolierten Werte für die drei Bäume mit den tieferen FOM-Werten verändern sich, was an den sehr geringen Unterschieden des RMSE zu erkennen ist.

Anders sieht die Situation beim Bettlachstock aus. Hier liegen 62 Bäume bei FOM-Werten unter 33, d.h. wo die ADS40-Daten nicht verwendet werden. Lediglich 79 der Bäume liegen bei FOM-Werten, die über 80 liegen und somit nur von den ADS40-Daten bestimmt werden. Dadurch ist hier deutlicher der Einfluss der beiden Datenquellen ersichtlich bei der Anwendung des entwickelten Interpolationsprozesses. Es ist eine Verbesserung gegenüber den beiden DOM aus den einzelnen Datenquellen feststellbar. Der RMSE wird durch die Anwendung beider Datenquellen reduziert. Dies liegt besonders daran, dass die hohen positiven Ausreisser besser erklärt werden konnten. Dafür aber werden stärkere negative Abweichungen gemessen. Die Resultate des Interpolationsprozesses für die verschiedenen Parametereinstellungen variieren nur gering. Es zeigen sich leichte Trends, die für die Vorprozessierungen V2 und V3 und der Interpolationen I2 und I4 sprechen. Diese Trends sind vergleichbar mit den Erkenntnissen, die bei der Anwendung an den künstlichen Daten gemacht wurden.

Um einen bessere Übersicht zu den Unterschieden der verschiedenen DOM zu erhalten, werden die Verteilungen der Abweichungen für die beiden DOM aus einzelnen Datenquellen mit einem DOM des Interpolationsprozesses (DOM_V3_I4) verglichen (Abb. 27). Das LIDAR-DOM weist teilweise sehr hohe positive Abweichungen auf. Das DOM liegt dementsprechend oftmals zu tief, was daran liegen könnte, dass die Messpunkte des Bodens und innerhalb der Struktur des Waldes einen noch zu starken Einfluss auf die Interpolation des DOM hatten. Das ADS40-DOM hat den grössten Teil der Abweichungen in einem akzeptablen Bereich von 0 – 5 m. Es gibt jedoch immer

Validierung DOM für die Testregionen Bettlachstock und Isone						
Anzahl Referenzpunkte: Bettlachstock: 361 Isone: 314						
Höhenmodell	Bettlachstock			Isone		
	Min.	Max.	RMSE	Min.	Max.	RMSE
ADS40-DOM	-4.78	24.64	5.203	-6.83	5.32	1.689
LIDAR-DOM	-5.25	24.73	8.918	-1.51	9.7	3.412
DOM_V1_I1	-8.06	9.44	3.441	-6.83	5.32	1.696
DOM_V1_I2	-8.25	9.6	3.406	-6.83	5.32	1.694
DOM_V1_I3	-8.06	9.38	3.463	-6.83	5.32	1.696
DOM_V1_I4	-8.25	9.57	3.404	-6.83	5.32	1.698
DOM_V2_I1	-8.06	9.32	3.415	-6.83	5.32	1.696
DOM_V2_I2	-8.25	9.5	3.395	-6.83	5.32	1.694
DOM_V2_I3	-8.06	9.32	3.428	-6.83	5.32	1.696
DOM_V2_I4	-8.25	9.18	3.373	-6.83	5.32	1.694
DOM_V3_I1	-8.25	9.18	3.383	-6.83	5.32	1.696
DOM_V3_I2	-8.25	9.18	3.373	-6.83	5.32	1.694
DOM_V3_I3	-8.06	9.32	3.416	-6.83	5.32	1.696
DOM_V3_I4	-8.25	9.18	3.354	-6.83	5.32	1.694

Tabelle 9: Validierung der DOM mit den terrestrischen Baummessungen

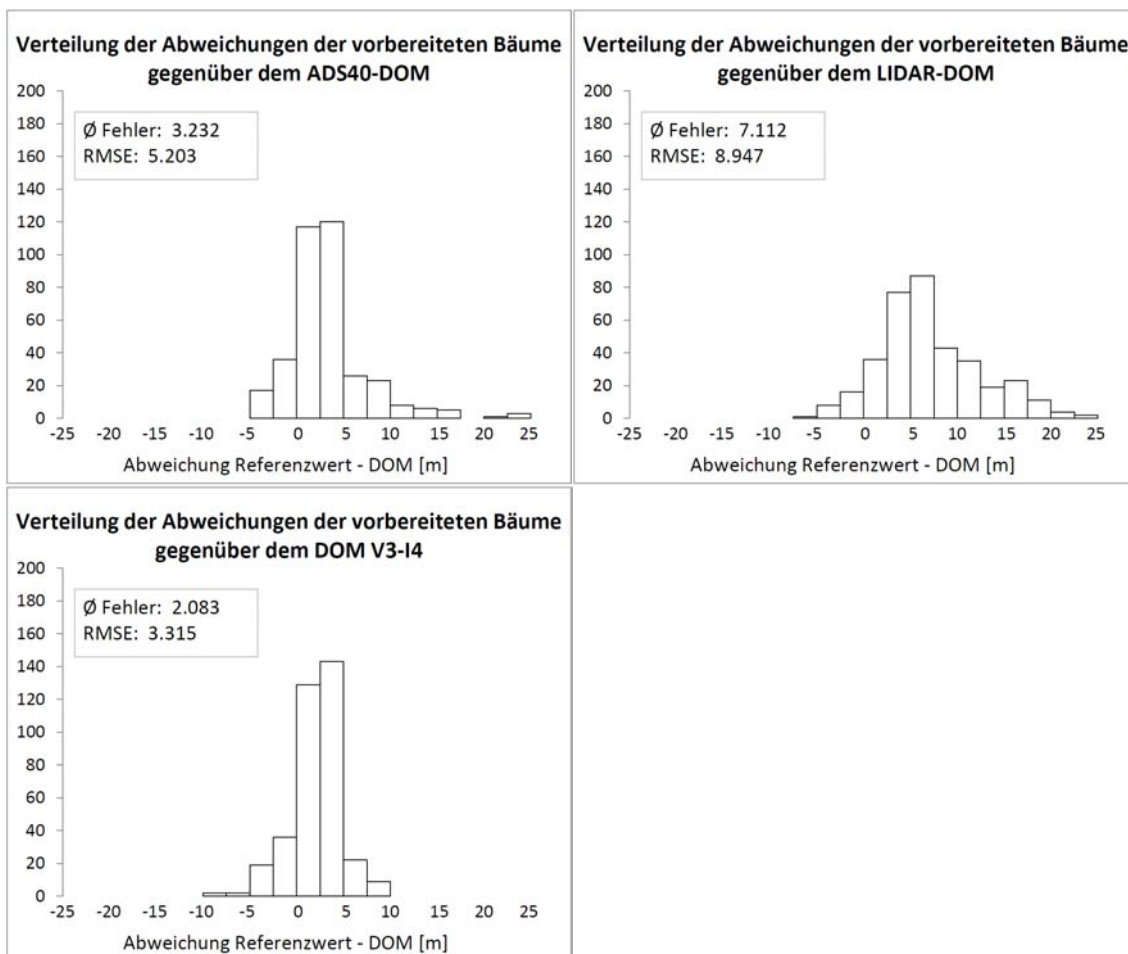


Abbildung 27: Verteilung der Abweichungen der vorbereiteten, terrestrischen Baummessungen gegenüber verschiedenen DOM der Testregion Bettlachstock

noch einige sehr hohe positive Ausreisser, die im DOM der kombinierten Daten nicht mehr zu finden sind. Diese Ausreisser liegen meist bei schlechten FOM-Werten und werden deshalb besser durch die LIDAR-Daten erklärt. Jedoch ist es durchwegs auch möglich, dass diese Bäume gefällt wurden und deshalb die Abweichungen in den ADS40-Daten bestehen. Dies ist jedoch für die Validierung des Interpolationsprozesses nicht von Bedeutung, da gezeigt werden konnte, dass durch die Kombination beider Datensätze die Referenzdaten deutlich besser geschätzt werden konnten.

Validierung DTM Da alle verfügbaren Referenzpunkte innerhalb des Waldes liegen, haben die ADS40-Daten keinen Einfluss auf das interpolierte DTM. Für diese Flächen werden ausschliesslich die LIDAR DTM-Daten verwendet. Deshalb kann hier nicht der gesamte Interpolationsprozess für mehrere Datenquellen, mit dem Einbezug des Vorwissens und der Vorprozessierung, validiert werden, sondern lediglich die Interpolation der LIDAR DTM-Daten. Es soll so die Kalibrierung der Interpolation für das DTM vorgenommen werden und untersucht werden, wie sich die Resultate von einem DTM unterscheiden, dass mit dem IDW-Ansatz in ArcGIS generiert wurde. Es werden für beide Testregionen die sechs Parametereinstellungen für die Interpolation getestet. Da nur ein Datensatz verwendet wird und keine Vorprozessierung notwendig ist, wird in der Interpolation auch die Qualität der Datenpunkte nicht berücksichtigt. Es wird somit der Standard-IDW mit der Quadrantensuche angewandt. Dafür wird der Distanzgewichtungsfaktor variiert und ebenfalls die Anzahl Punkte, die pro Quadrant für die Interpolation verwendet werden. Die Einstellungen dieser beiden Parameter sind direkt in der Tabelle 10 mit den entsprechenden Resultaten aufgelistet. Grundsätzlich werden mit allen DTM die Referenzwerte von Isonne besser geschätzt als beim Bettlachstock. Die Oberflächen scheinen jedoch sehr ähnlich zu sein. Beides sind Flächen mit einer mittleren Steigung von ca. 30 %, die in den DTM keine starken Strukturen zeigen. Jedoch ist die Punktdichte für Isonne deutlich höher als beim Bettlachstock.

Es zeigt sich, dass die Interpolation mit ArcGIS deutlich geringere minimale und maximale Abweichungen liefert. Sein RMSE ist für Isonne tiefer als bei den anderen DTM, dafür beim Bettlachstock ein wenig höher. Die Unterschiede bei den verschiedenen Parametereinstellungen des Interpolationsprozesses sind nur gering und es lassen sich kaum Aussagen über die optimalen Einstellungen machen.

Validierung DTM für die Testregionen Bettlachstock und Isonne							
Anzahl Referenzpunkte: Bettlachstock: 584 Isonne: 1105							
Höhenmodell		Bettlachstock			Isonne		
DG	PpS	Min.	Max.	RMSE	Min.	Max.	RMSE
ArcGIS		-0.3	3.47	2.466	-0.08	1.74	0.617
1	1	-0.78	4.86	2.417	-0.17	2.52	1.083
2	1	-0.78	4.86	2.416	-0.17	2.52	1.082
1	2	-0.74	4.88	2.405	-0.06	2.55	1.003
2	2	-0.72	4.88	2.401	-0.05	2.55	1.004
1	3	-0.96	4.3	2.4	-0.18	2.56	1.068
2	3	-0.38	4.25	2.395	-0.12	2.54	1.069

Tabelle 10: Validierung der DTM mit den terrestrischen Baummessungen

8.3 Schätzung der Unsicherheiten der Höhenmodelle

Im Abschnitt 5.4 wurden die vier verschiedenen Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation vorgestellt, anhand derer die Eigenschaften einer Punktmenge beschrieben werden können. Im Rahmen der Anwendung an künstlichen Daten in Abschnitt 6.3.3 wurde bereits der Zusammenhang der vier Prüfgrößen und der Oberflächenstruktur und Datengrundlage untersucht, um festzustellen, ob sie für die Kalibrierung eingesetzt werden könnten. Nun soll analysiert werden, ob diese Prüfgrößen auch einen Zusammenhang mit den auftretenden Fehlern in einem Höhenmodell haben. Denn die durch diese Prüfgrößen beschriebenen Eigenschaften sollen Auskunft geben, wie gut die Grundlagen für die Interpolation eines Höhenwertes sind. Es wird von der Hypothese ausgegangen, dass je besser diese Grundlagen sind, desto besser und verlässlicher auch der interpolierte Höhenwert sein wird. Nun soll untersucht werden, wie die einzelnen Prüfgrößen im Bezug zu den tatsächlich gemessenen Fehlern stehen und ob somit durch diese Prüfgrößen die Fehler und Unsicherheiten eines Höhenmodells beschrieben werden können.

8.3.1 Statistische Untersuchung

Für die statistische Untersuchung werden die Resultate der Testserien an den künstlichen Datensätzen verwendet. Für die generierten Punktdatensätze und Oberflächen, sowie die unterschiedliche Einstellung der Vorprozessierung werden jeweils die vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation berechnet. Anschliessend werden die Resultate der Validierung beigezogen und es wird der Zusammenhang zwischen den Prüfgrößen und den gemessenen Fehlern untersucht.

Mittels einer Multiplen Regression wurde untersucht, ob die Prüfgrößen die auftretenden Fehler erklären können. Jedoch zeigte sich für alle Oberflächen, Datengrundlagen und unterschiedlichen Einstellungen der Parameter ein nur sehr geringes bis mässiges Bestimmtheitsmass R^2 von maximal 0.404 (Tab. 11). Leichte Unterschiede sind erkennbar für die Oberfläche, bei der mit zunehmender Struktur das Bestimmtheitsmass leicht steigt. Ebenfalls zeigen alle einzelnen Prüfgrößen nur einen sehr kleinen Zusammenhang zu den auftretenden Fehlern. Es scheint also nicht sinnvoll, mit diesem Ansatz und den berechneten Prüfgrößen die Unsicherheiten der Höhenmodelle der künstlichen Daten zu schätzen.

Oberfläche	Datensatz Fehlerart	Parameter	Einfache, lineare Regression [R^2]				Multiple Regression [R^2]
			PD	PV	MQ	MH	
Hang	DS1, +	V2 I2	0	0	0.001	0.03	0.003
Hang	DS2, +	V2 I2	0.001	0	0.002	0.001	0.002
Wald	DS1, -	V2 I2	0.012	0.038	0.263	0.003	0.281
Wald	DS2, -	V2 I2	0.021	0.068	0.39	0.005	0.404

Tabelle 11: Zusammenhang zwischen den vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation und den Fehlern für künstliche Daten.

8.3.2 Visuelle Untersuchung

Bei den Resultaten der künstlichen Daten konnte kein statistischer Zusammenhang zwischen den auftretenden Fehlern und den Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation festgestellt werden. Daher stellt sich die Frage, ob der Ansatz mit den Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation

grundsätzlich nicht funktionieren kann, ob die Prüfgrößen möglicherweise schlecht gewählt sind oder ob es an den künstlich generierten Datensätzen liegen könnte, dass kein Zusammenhang besteht. Um diese Fragen zu beantworten wird in Abbildung 28 ein visueller Vergleich der einzelnen Prüfgrößen und der Fehler vorgenommen. In einem ersten Schritt wird dies für die künstliche Oberfläche „Wald“ getan mit den Einstellungen die zum stärksten R^2 von 0.404 geführt haben (vgl. Tab. 11).

Die Fehler liegen vorwiegend auf den Kegeln, da dort das interpolierte Höhenmodell die spitze Struktur abrundet. Zudem treten Fehler bei den schmalen Abständen zwischen den Kegeln auf. Dort ist das Höhenmodell tendenziell zu hoch geschätzt. Dadurch entsteht eine rasterartige Anordnung der Fehler, die bei einem Zusammenhang mit den Prüfgrößen auch in deren Verteilung sichtbar sein sollte. Die lokale Punktdichte und die davon stark abhängige Punkteverteilung zeigen kein solches Muster, sondern variieren wegen der durch die künstlichen Datensätze gegebene Punktdichte. Da die lokale Punktdichte meist hoch ist (bei 99 % der Rasterzellen mehr als 4 Punkte näher als 2 m), hat weder die Punktdichte noch die Punkteverteilung einen Einfluss auf die Fehler.

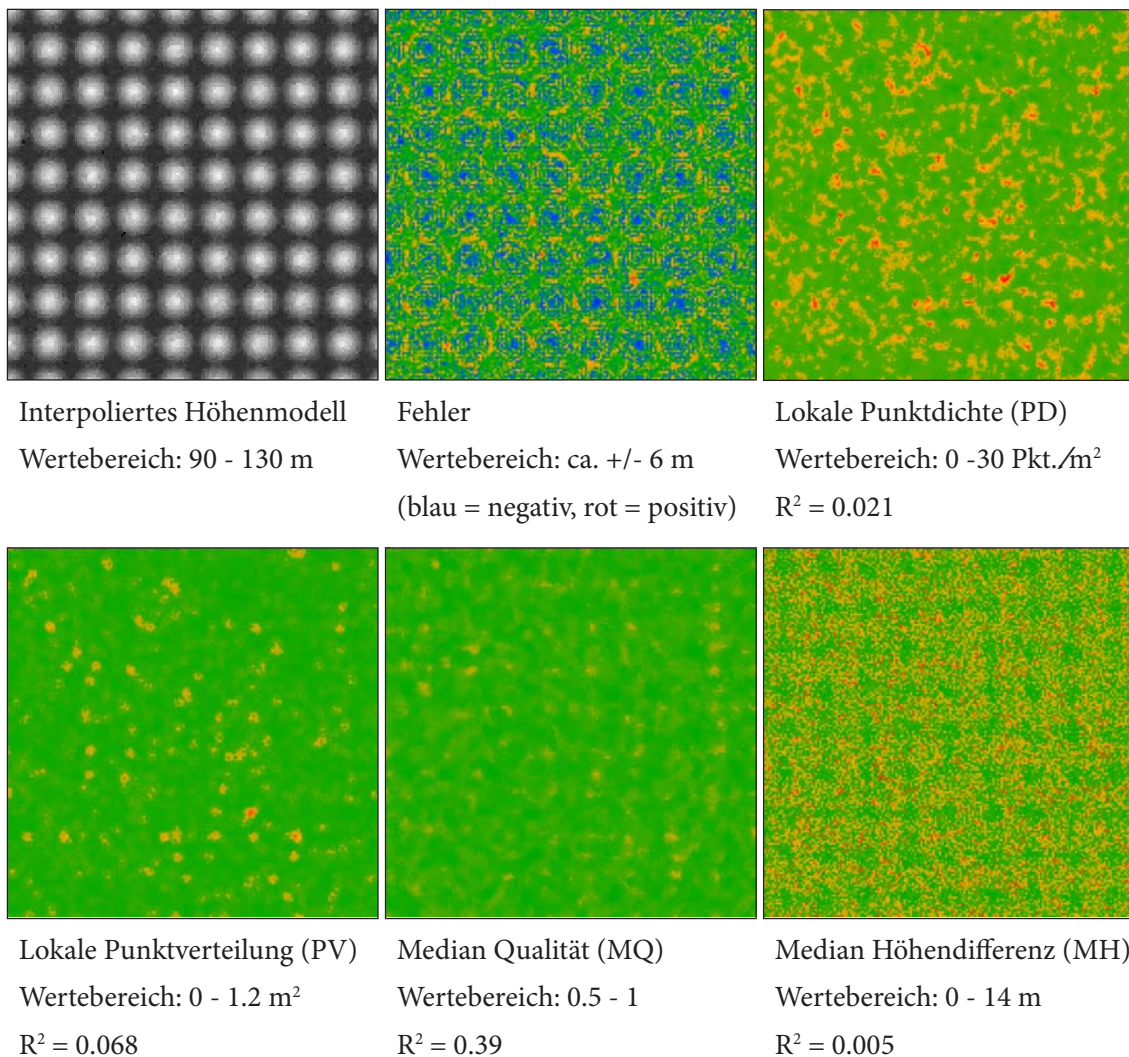


Abbildung 28: Anwendung der vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation für die künstliche Oberfläche Wald. Die Farbskala wurde linear auf den jeweiligen Wertebereich der Größen angepasst.

Der Median der Qualität der Punkte ist grundsätzlich hoch und variiert nur zwischen 0.5 und 1. Ein leichter Trend ist ersichtlich, dass die tieferen Werte auf den Spitzen der Kegel zu finden sind und so zu einem leicht höheren Zusammenhang zu den Fehlern von $R^2 = 0.39$ führen. Der Median der Höhendifferenzen zeigt am stärksten der vier Prüfgrößen das Rastermuster der Kegelanordnung. Jedoch besteht dennoch nur ein sehr geringer Zusammenhang zu den gemessenen Fehlern.

Bei den realen Daten ist nur die visuelle Untersuchung möglich, da keine Validierung der Oberflächen des Höhenmodells möglich ist. So kann nur abgeschätzt werden, in welchem Zusammenhang die vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation zu den Unsicherheiten des DOM stehen. Untersucht wird dies an der Testregion Heiden. In der Abbildung 29 sind die vier Prüfgrößen abgebildet im Vergleich zum RGB-Bild und den FOM-Werten. Bei allen vier Prüfgrößen ist eine Übereinstimmung mit den Waldflächen zu erkennen. Die Nichtwaldflächen sind grösstenteils sehr einheitlich und würden dadurch von allen vier Prüfgrößen als sichere Höhenwerte klassiert werden. Die Punktdichte ist grundsätzlich im Wald tiefer als beim Nichtwald, da hier mehr der LIDAR-Datenpunkte durch die Vorprozessierung herausgefiltert wurden. Bei Stellen wo der Wald sehr dicht ist und seine Oberfläche von den LIDAR-Pulsen nicht durchdrungen werden konnte, ist die Punktdichte dagegen höher, da sowohl LIDAR und ADS40-Punkte die Oberfläche des DOM wiedergeben. Weiter ist ein Zusammenhang zu den schlechten FOM-Werten ersichtlich, da bei diesen Stellen die ADS40-Daten nicht verwendet werden. Die Punktverteilung ist direkt von der lokalen Punktdichte abhängig und zeigt nur die Stellen mit besonders tiefen Punktdichten an. Beim Median der Qualität zeichnet sich ebenfalls die Waldfläche ab. Jedoch ist hier nicht ein so

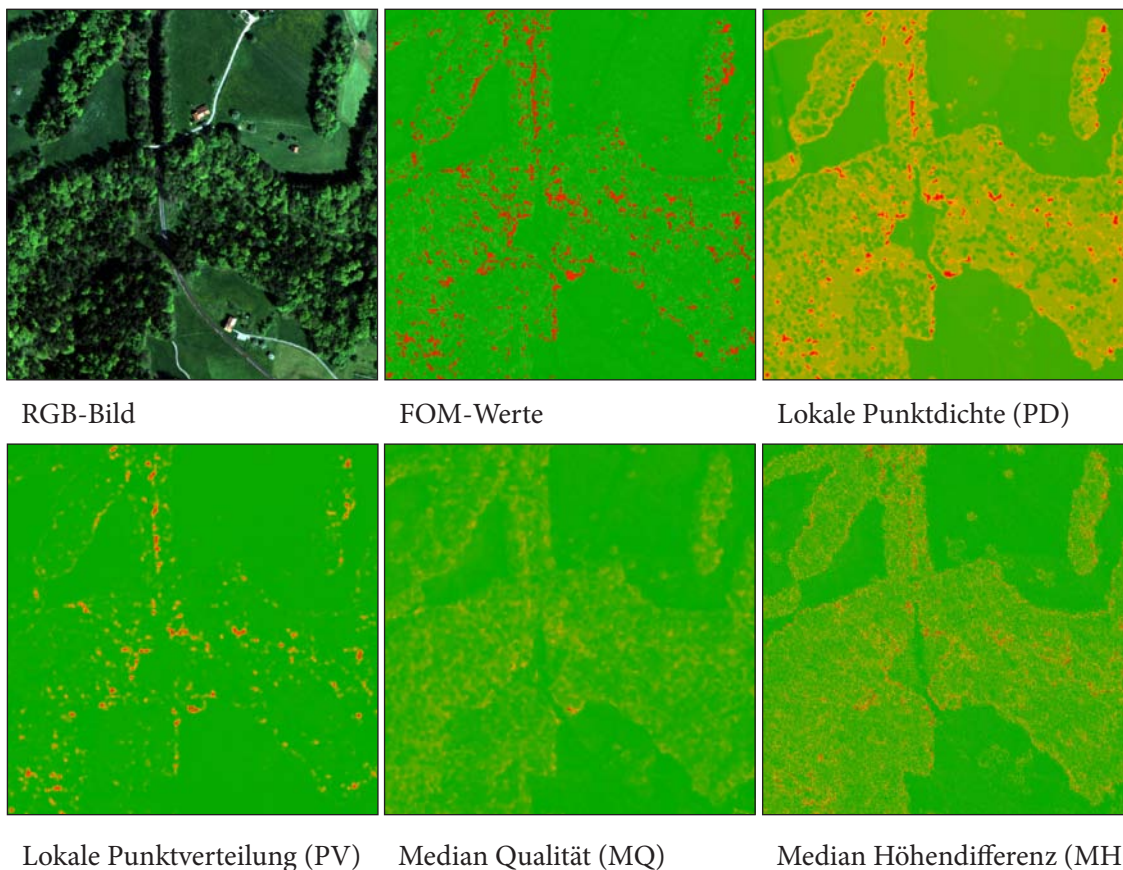


Abbildung 29: Vergleich der vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation für die Testregion Heiden. Die Farbskala wurde linear auf den jeweiligen Wertebereich der Größen angepasst.

starker Zusammenhang zu den schlechten FOM-Werten zu erkennen, wie bei der Punktdichte. So ist beispielsweise die im Schatten liegende Eisenbahnstrecke im nördlichen Teil, die in den FOM-Werten deutlich als Linie zu sehen ist, praktisch nicht zu erkennen beim Median der Qualität. Dies ist durchaus wünschenswert, denn die Bewertung der Unsicherheit des Höhenmodells sollte nicht ausschliesslich durch die FOM-Werte bestimmt werden. Der Median der Höhendifferenz zeichnet die Waldränder auf und variiert innerhalb des Waldes lokal sehr stark. Er zeigt somit die Stellen der abrupten Höhenänderungen auf, die bei einer Interpolation problematisch sind und zu Fehlern führen.

Die einzelnen Prüfgrößen wurden auf 0 - 1 normiert und multipliziert, so dass man nur noch einen Wert erhält, der die Unsicherheit der Interpolation beschreiben soll. Da anhand einer visuellen Untersuchung nicht festgestellt werden konnte, welche Prüfgrößen die Unsicherheit am besten schätzen, wurden sie alle als gleichwertig angenommen und fließen alle gleich stark in das Produkt der Prüfgrößen ein. Die resultierenden Werte sind in Abbildung 30 aufgezeigt. Zum Vergleich sind daneben die Krigingvarianzen abgebildet, die bei der Interpolation mit dem Ordinary Kriging geschätzt wurden. Die Interpolation mit Ordinary Kriging wurde an den Datenpunkten durchgeführt, die nach Vorprozessierung mit der Einstellung V2 noch vorhanden waren. Somit wurden beide Ansätze zur Unsicherheitsmodellierung an den gleichen Datenpunkten vorgenommen. Es zeigt sich, eine starke Übereinstimmung der beiden geschätzten Unsicherheiten.

Die Krigingvarianz reagiert stark auf die Punktdichte und weist auf Löcher in der Verteilung der Datenpunkte hin (Babak & Deutsch, 2009). Damit hat die Krigingvarianz einen engen Zusammenhang zur lokalen Punktdichte, welche ebenfalls bei dem entwickeltem Ansatz die modellierte Unsicherheit stark beeinflusst. Wie in Abschnitt 6.3.3 erkannt, besteht zwischen der lokalen Punktdichte und den übrigen drei Prüfgrößen ein Zusammenhang. Deshalb wurden die linearen Zusammenhänge zwischen den Prüfgrößen mittels einer Pearson-Korrelation überprüft (Voss

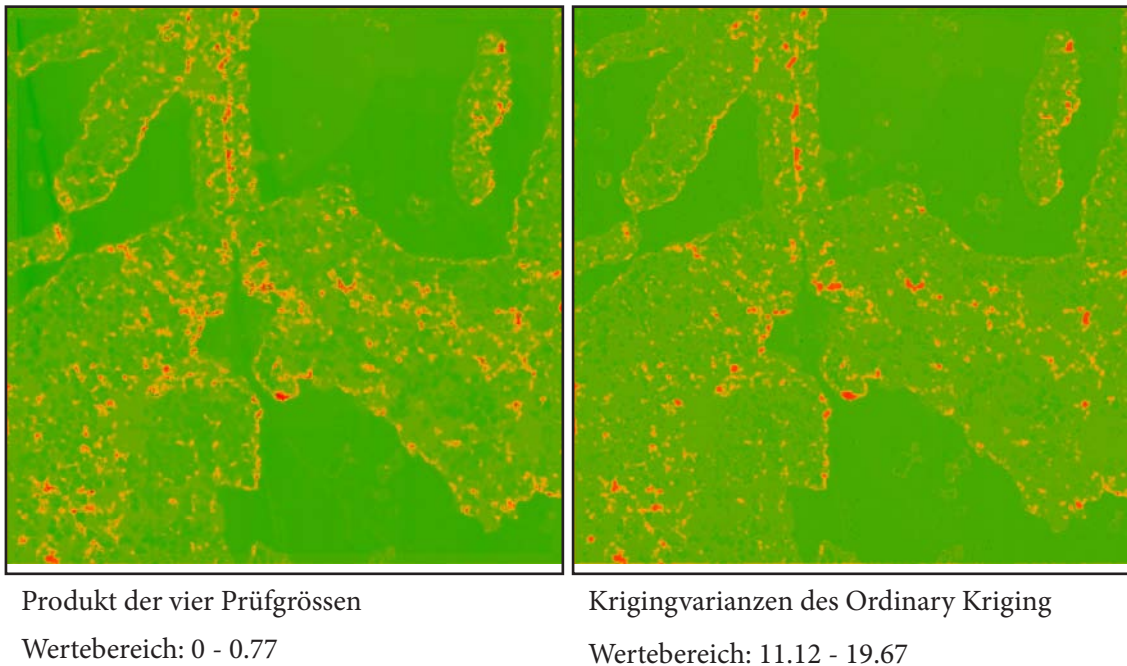


Abbildung 30: Vergleich der kartierten Unsicherheiten mittels dem Produkt aus den vier Prüfgrößen (links) und der Krigingvarianzen einer Interpolation mit Ordinary Kriging (rechts).

et al.,2004). Die resultierenden Korrelationskoeffizienten in Tabelle 12 zeigen, dass zwischen allen Prüfgrößen ein mässiger bis mittlerer Zusammenhang besteht. Die lokale Punktdichte weist dabei die stärksten Zusammenhänge zu den übrigen drei Prüfgrößen auf und besitzt daher den grössten Einfluss auf die mittels dem Produkt der vier Prüfgrößen geschätzte Unsicherheit.

	PD	PV	MQ	MH
PD	1			
PV	-0.307	1		
MQ	0.523	-0.324	1	
MH	-0.386	0.271	-0.348	1

Tabelle 12: Korrelationskoeffizienten nach Pearson für die vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation

8.4 Fazit

Die nur geringen statistischen Zusammenhänge zwischen den vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation und den Fehlern für die künstlichen Datensätze können verschiedene Ursachen haben, weshalb die schlechten resultierenden Zusammenhänge kritisch betrachtet werden müssen. Durch die vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation sollten die Oberfläche, die Datengrundlage und die durchgeführte Vorprozessierung beschrieben werden, die zusammen die Fehler der Interpolation erklären sollten. Jedoch weisen die künstlichen Oberflächen und Datenpunkte keine Zusammenhänge auf, wie sie bei realen Daten zu finden sind. Denn bei deren Herstellung wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Faktoren der Daten unabhängig voneinander sind. Das heisst, dass zwischen der Oberfläche, der Punktverteilung und den Fehlern der Punkte kein Zusammenhang besteht. Dies trifft bei den realen Daten nicht zu. Hier ist es vorwiegend die Oberflächenstruktur, welche die Punktdichte und die Qualität der Datenpunkte beeinflusst, was bei dem visuellen Vergleich in Abbildung 29 ersichtlich wird.

Weiter ist die künstliche Oberfläche zu regelmässig strukturiert, so dass der Vergleich zu anderen Oberflächen gar nicht möglich ist. Wenn also beispielsweise eine Testfläche zur Hälfte aus einer Ebene und zur anderen Hälfte aus dem künstlichen Wald bestünde, würden die Veränderungen der vier Prüfgrößen besser sichtbar und es wäre vermutlich auch ein besserer Zusammenhang zu den Fehlern messbar. So aber ist die Struktur über die gesamte Oberfläche regelmässig und die Variation der Fehler darauf ist abhängig von der Vermessung durch die künstlichen Datensätze. Da diese Messpunkte willkürlich verteilt sind, treten die Fehler ebenfalls unabhängig von der Oberflächenstruktur auf.

Mit den realen Daten ist eine deutlichere Variation der vier Prüfgrößen über der abwechslungsreichen Oberfläche der Testregion Heiden ersichtlich. Alle unterscheiden sich stark für die Wald- und die Nichtwaldflächen. Zudem sind weitere Zusammenhänge zu den FOM-Werten und zur Struktur des Waldes auszumachen. Die Frage stellt sich, inwiefern die vier Prüfgrößen die Unsicherheiten der Interpolation dieser realen Daten beschreiben. Wird ein DOM von Waldflächen interpoliert ist es sehr wahrscheinlich, dass die Unsicherheiten vorwiegend bei den abrupten Höhenänderungen entlang des Waldrandes und bei Lichtungen liegen. Und weiter sagt die lokale

Punktdichte auch etwas aus über die Durchlässigkeit des Waldes für LIDAR-Impulse. Es kann angenommen werden, dass je mehr Punkte nach der Vorprozessierung noch die Waldoberfläche wiedergeben, desto dichter ist sie und desto besser wird sie im DOM abgebildet. Ist sie dagegen durchlässiger, ist es für ein DOM schwieriger die abzubildende Oberfläche zu bestimmen.

Der Vergleich der Unsicherheiten, ermittelt durch das Produkt der vier Prüfgrößen, und der Krigingvarianzen des Ordinary Kriging, zeigt eine starke Ähnlichkeit für die geschätzten Unsicherheiten. Dies liegt vorwiegend daran, dass beide Unsicherheitsschätzungen stark auf die lokale Punktdichte reagieren. Dieser Vergleich zeigt auf, dass der entwickelte Ansatz zur Schätzung der Unsicherheit der Höhenmodelle anhand der Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation durchaus Potential hat.

9. Diskussion

Nachdem der Interpolationsprozess entwickelt, empirisch getestet und evaluiert wurde, folgt nun in der Diskussion die Beantwortung der Forschungsfragen die in Abschnitt 1.2 gestellt wurden. Dabei soll nochmals ein kritischer Rückblick auf die einzelnen Teile der Arbeit getätigt werden, um so die Erkenntnisse und Probleme aufzuzeigen.

9.1 Interpolation aus mehreren Datenquellen

Wie können unterschiedliche Datenquellen kombiniert werden, um daraus ein Höhenmodell zu interpolieren?

Die verschiedenen Datenquellen besitzen unterschiedliche Eigenschaften, die sich auf ihre Datenpunkte und damit auf die Oberfläche, die sie wiedergeben auswirken. So sind die Datensätze möglicherweise nicht für die Interpolation beider Höhenmodelltypen DOM und DTM gleich gut geeignet. Es ist daher nicht sinnvoll die Punktdatensätze einfach zu kombinieren und daraus direkt die Höhenmodelle zu interpolieren. Es erfordert eine Vorbereitung und Vorprozessierung der Daten, bei der die Punkte nach ihrer Messgenauigkeit und ihrer Eignung für die gewünschten Höhenmodelle gewichtet werden. Diese beiden Kriterien werden zusammengefasst und es wird von der „Qualität eines Punktes“ gesprochen. Diese Qualität eines Punktes kann dann als Gewichtungsfaktor in der Interpolation berücksichtigt werden.

Eine Möglichkeit, wie diese Idee umgesetzt werden kann, ist der in dieser Arbeit entwickelte Interpolationsprozess. Sein Aufbau mit den einzelnen Teilschritten der Vorbereitung und Vorprozessierung der Daten und der Interpolation des Höhenmodells ist im Abschnitt 4.1 beschrieben.

Was für Probleme treten durch die Kombination verschiedener Datensätze auf und welche Methoden bieten sich an, um diese zu lösen?

Durch die zwei sehr unterschiedlichen Fernerkundungstechnologien, die für die Ermittlung der Höhenwerte eingesetzt wurden, besitzen die Datenpunkte verschiedene Eigenschaften und repräsentieren nicht immer dieselben Oberflächen. Es treten vor allem bei Wäldern starke Abweichungen zwischen den Punkten der beiden Datenquellen auf. Der LIDAR ist in der Lage auch dichtere Wälder mit seinen Laserimpulsen zu penetrieren und so Messungen innerhalb der Struktur des Waldes und vom Boden zu liefern. Im Gegensatz dazu geben die ADS40-Daten die auf den Luftbildern sichtbare Waldoberfläche wieder.

Weiter unterscheidet sich die Punktverteilung der beiden Datensätze. Die ADS40-Daten sind regelmässig in einem Gitter angeordnet, während die Verteilung der LIDAR-Punkte abhängig von der Struktur der vermessenen Oberfläche stark variieren. Durch die Kombination beider Datenquellen liegt für die Interpolation eine hohe Punktdichte vor, die meist deutlich höher ist als 1 Punkt pro m^2 . Da die resultierenden Höhenmodelle eine Auflösung von ebenfalls $1 m^2$ haben, liegen innerhalb jeder zu interpolierenden Rasterzelle mehrere Punkte. Die Hauptaufgabe des Interpolationsprozesses ist es deshalb aus diesen Punkten nur diejenigen zu verwenden, welche die gesuchte Oberfläche am besten repräsentieren.

Eine weitere Problematik bei der Verwendung mehrerer Datensätze ist der zeitliche Abstand zwischen den Aufnahmen. Wenn dieser, wie in der hier untersuchten Anwendung, mehrere Jahre beträgt, ist mit Veränderungen der Oberfläche, insbesondere bei Waldflächen und Einzelbäumen, zu rechnen. Deshalb ist es wichtig vorgängig genau festzulegen, welcher Zeitstand im Höhenmodell abgebildet werden soll und die Datensätze dementsprechend zu gewichten.

Bei der Umsetzung gilt es die Daten zu untersuchen und anhand der Angaben zur Aufnahmetechnik, dem Datum und anderen verfügbaren Informationen zu gewichten. In einem weiteren Schritt sollen die Punktwolken analysiert werden, um die Punkte zu ermitteln welche die gesuchte Oberfläche am besten wiedergeben. Um diese Problemstellung zu lösen, könnten auch andere Methoden für die Klassierung von LIDAR-Daten in Boden- und Vegetationspunkte angewendet werden. Diese Methoden basieren drauf, dass die Punkteverteilungen auf räumliche Nachbarschaftsbeziehungen untersucht werden, mit denen die Boden- und Vegetationspunkte unterschieden werden können (Sithole & Vosselmann, 2003). Für die Anwendung einer solchen Methode innerhalb des Interpolationsprozesses müssen Anpassungen vorgenommen werden, da die hier verwendeten Punkte bereits durch das Vorwissen zu den Datensätzen eine unterschiedliche Gewichtung haben, die berücksichtigt werden muss.

9.2 Gewichtung der Datensätze und einzelnen Datenpunkten

Wie kann das Vorwissen zu den einzelnen Datensätzen in den Interpolationsprozess mit einbezogen werden?

Das Vorwissen zu den Datenquellen und ihren einzelnen Punkten sollte gleich zu Beginn des Interpolationsprozesses für eine Gewichtung der Qualität der Datenpunkte verwendet werden. Mit dieser ersten Gewichtung werden schon grundlegende Entscheidungen getroffen, wie stark die verschiedenen Datenquellen in das resultierende Höhenmodell einfließen sollen. Die Herausforderung ist es, die zur Verfügung stehenden Informationen in Gewichte umzuwandeln. Denn zu den unterschiedlichen Datenquellen sind nicht dieselben zusätzlichen Informationen vorhanden, so dass ein Vergleich der Datenquellen schwierig ist. Deshalb benötigt es die Entscheidung des Anwenders, wie er die Bewertung der Datensätze vornimmt. Doch wie sich diese Bewertung in den quantitativen Gewichten widerspiegeln soll ist schwierig zu bestimmen, denn es fehlt an dem Wissen, wie sich die anfängliche Gewichtung auf das endgültige Resultat auswirkt.

Auch in dieser Arbeit wurde diese Gewichtung nicht weiter untersucht. Bei der Anwendung des Interpolationsprozesses für die verfügbaren Daten wurde die Gewichtung anhand des Vorwissens

durch eine subjektive Bewertung vorgenommen. Bei der Auswertung der resultierenden Höhenmodelle konnte jedoch festgestellt werden, dass durch diese Gewichtung die Anforderungen an die Höhenmodelle erfüllt werden konnten (vgl. Abschnitt 7.2). So zeigte es sich sowohl beim visuellen Vergleich der DOM (vgl. Abschnitt 8.2.2), als auch bei der Validierung mit den terrestrischen Referenzwerten (vgl. Abschnitt 8.2.3), dass die LIDAR-Daten nur bei Flächen mit schlechten ADS40-Daten Einfluss auf das resultierende Höhenmodell haben. Im Gegensatz dazu kamen die ADS40-Daten bei den DTM nur für die Nichtwaldflächen zum Einsatz, während der Boden der Waldflächen durch die LIDAR-Daten modelliert wurde (vgl. Abschnitt 8.2.2). Deswegen wurden an der festgelegten Gewichtung der Datensätze keine Änderungen vorgenommen.

Welche Möglichkeiten bestehen, um Punkte aufgrund von räumlichen Nachbarschaftsbeziehungen zu bewerten?

Die Bewertung von Punkten anhand von räumlichen Nachbarschaftsbeziehungen ist eine Fragestellung mit der sich unter anderem die Forschung im Bereich der Klassierung und Filterung von LIDAR-Daten ausführlich beschäftigt. So gibt es verschiedene Ansätze, wie die räumlichen Zusammenhänge zwischen den Punkten untersucht werden können und wie daraus Aussagen über die Lage des Punktes gemacht werden können (Sithole & Vosselmann, 2003).

Für den entwickelten Interpolationsprozess wurde als Grundlage die Methode der robusten Interpolation von Kraus & Pfeifer (1998) gewählt und für die spezifische Anwendung angepasst. Diese angepasste Methode basiert auf dem Prinzip der Cross-Validation (Tomczak, 1998), bei dem durch die einzelnen Datenpunkte iteriert wird und jeweils der Höhenwert eines Datenpunktes durch die umliegenden Punkte interpoliert wird. Die Differenz die zwischen dem wirklichen und geschätzten Höhenwert gemessen wird, dient zur Bestimmung eines Gewichtungsfaktors für den Datenpunkt. Dazu können drei verschiedene Gewichtungsfunktionen angewendet werden, die dazu dienen aus der Punktwolke die höchste, tiefste oder eine ausgeglichene mittlere Oberfläche zu erhalten. Weiter besteht die Möglichkeit einen Datensatz nur in Abhängigkeit eines anderen, besseren Datensatzes zu bewerten. Dadurch wird der bessere Datensatz lediglich durch den schlechteren Datensatz ergänzt. So kann auch bei dieser Vorprozessierung nochmals stark Einfluss auf das Verhältnis der Datenquellen genommen werden. Die Flexibilität der entwickelten Vorprozessierung ist somit gross und es bietet sich die Möglichkeit die Methode auf die zur Verfügung stehenden Datenquellen und das gewünschte Höhenmodell anzupassen, wie dies für die Anwendung an den ADS40 und LIDAR-Daten getan wurde.

Die Anwendung dieser Methode der Vorprozessierung hat sich für die durchgeführten Tests bewährt. So zeigte sich bei der Validierung der Resultate an künstlichen Daten, dass durch die Vorprozessierung eine deutliche Verbesserung gegenüber dem normalen IDW erreicht wird. Bei den realen Daten konnten die erhaltenen Resultate zumindest visuell validiert werden und die Funktion der Vorprozessierung konnte als gut eingestuft werden.

Eine Problematik dieser Methode ist jedoch die Einstellung der Parameter. Im Rahmen der Kalibrierung an den künstlichen und realen Datensätzen konnten Erkenntnisse gewonnen werden und somit Empfehlungen für die Einstellungen gemacht werden. Jedoch fehlt eine empirische Bestimmung der Parameter, was eine typische Schwäche der deterministischen Interpolationsmethoden gegenüber Kriging ist (Burrough & McDonnell, 2005). Ebenfalls werden die Parameter über die

gesamte Oberfläche konstant gehalten, ausser beim lokalen Ansatz, wo sich die Parametereinstellungen und die verwendeten Gewichtungsfunktionen unterscheiden zwischen Wald- und Nichtwaldflächen. Eine Erweiterungsmöglichkeit wäre daher die adaptive Wahl einzelner Parameter auf Grund der lokalen Gegebenheiten, wie sie Lu & Wong (2008) für den Distanzgewichtungsfaktor eingeführt haben. Dazu könnten die Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation eingesetzt werden, die Eigenschaften der Oberflächenstruktur und Datengrundlage lokal beschreiben.

9.3 Interpolation qualitativ unterschiedlicher Daten

Wie kann die unterschiedliche Qualität von Punkten in der Interpolation berücksichtigt werden?

Für die Interpolation von qualitativ unterschiedlichen Daten wurde der IDW-Ansatz um einen einfachen Faktor erweitert, wie dies auch Rühaak (2006) getan hat. Jedoch wurde noch ein zusätzlicher Exponent angefügt, vergleichbar mit dem Distanzgewichtungsfaktors bei IDW. Dies ermöglicht, dass bei der Kalibrierung der Einfluss der Distanz und der Qualität besser aufeinander abgestimmt werden kann (vgl. Abschnitt 5.3.1).

Durch die Einführung der Qualität der Punkte ist eine Anpassung bei der implementierten Quadrantensuche notwendig. Denn auch da soll nicht nur die Distanz als Kriterium dienen, um die Punkte für die Interpolation zu wählen, sondern auch die Qualität sollte berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 5.3.3).

9.4 Bewertung der Unsicherheiten des Höhenmodells

Wie kann die Unsicherheit des interpolierten Höhenmodells beschrieben werden?

Um bei deterministischen Interpolationsmethoden die Unsicherheiten der Resultate anzugeben, wie dies Kriging automatisch mittels der Krigingvarianz macht, sind zusätzliche Verfahren nötig. Eine Möglichkeit ist das Verfahren Jackknife, wie es Tomczak (1998) anwendet. In dieser Arbeit wurde ein anderer Ansatz untersucht. Dabei sollte die Unsicherheit der Interpolation durch vier Prüfgrößen bestimmt werden, welche die lokalen Bedingungen der Interpolation beschreiben (vgl. Abschnitt 5.4).

Für die Resultate der Anwendung an künstlichen Daten konnten die vier Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation direkt mit den auftretenden Fehler verglichen und statistisch ausgewertet werden. Es zeigte sich jedoch nur ein sehr geringer bis mässiger Zusammenhang zwischen den vier Prüfgrößen und den Fehlern. Dies wird jedoch auch den künstlichen Daten zugeschrieben, da diese in vieler Hinsicht nicht die realen Bedingungen wiedergeben (vgl. Abschnitt 8.3). Eine Anwendung der vier Prüfgrößen an realen Daten zeigt, dass hier eher die Unsicherheiten des Höhenmodells aufgezeigt werden. Die Unsicherheiten betreffen vor allem die Waldflächen, während die Höhenwerte der Nichtwaldflächen als verlässlich bewertet werden. Besonders hervorgehoben werden die Flächen mit schlechten FOM-Werten, Waldränder und Lichtungen. Dies entspricht

den zu erwartenden Unsicherheiten der Interpolation einer solchen realen Oberfläche. Jedoch konnte dies leider nicht durch Referenzdaten validiert werden. Es konnte aber aufgezeigt werden, dass die Unsicherheiten sehr ähnlich geschätzt werden, wie sie durch die Krigingvarianzen bei der Interpolation mit dem Ordinary Kriging angegeben werden (vgl. Abschnitt 8.3.2) .

9.5 Fazit

Werden die Höhenmodelle durch die Verwendung mehrerer Datenquellen verbessert?
--

Das Hauptziel des entwickelten Interpolationsprozesses ist es, durch die Kombination mehrerer Datenquellen bessere und verlässlichere Höhenmodelle zu erstellen. Als Grundvoraussetzung müssen alle verwendeten Datensätze zu einer Verbesserung beitragen können, indem sie für gewisse Flächen bessere Daten liefern als die übrigen verwendeten Datenquellen. Ist diese Voraussetzung erfüllt, liegt es am Interpolationsprozess die Datensätze so zu kombinieren, dass für die Interpolation der Höhenmodelle die jeweils besten lokal zur Verfügung stehenden Punktdaten verwendet werden. Dafür ist eine genaue Analyse der Datengrundlagen und der Anforderungen an das zu erstellende Höhenmodell erforderlich, so dass die Gewichtung der Datensätze und die angewendete Vorprozessierung optimal eingestellt werden können.

Mit den künstlichen Datensätzen wurden Punktdaten erstellt, welche die Problemstellung bei der Verwendung mehrerer Datenquellen simulieren. Es wurde jedoch nicht spezifisch untersucht, wie sich die Resultate ändern, wenn einzelne Teildatensätze hinzugefügt oder weggelassen werden. Durch die Anwendung an den ADS40- und LIDAR-Daten wurde der Interpolationsprozess für eine reale Problemstellung untersucht. Anhand den an die Höhenmodelle gestellten Anforderungen wurden die einzelnen Schritte des Interpolationsprozess eingestellt (vgl. Abschnitt 7.2). Die Resultate, die in Abschnitt 8.2 präsentiert wurden, zeigen, dass die Anforderungen an die resultierenden Höhenmodelle erfüllt wurden. Somit kann für diese Anwendung eine Verbesserung des Höhenmodells durch die Verwendung mehrerer Datensätze festgestellt werden.

10. Schlussfolgerung und Ausblick

10.1 Ergebnisse und Erkenntnisse

Das Ziel dieser Arbeit war es, einen Interpolationsprozess zu entwickeln, der für die Interpolation von Höhenmodellen mehrere Quellen von hochaufgelösten Höhendaten nutzen kann. Im Überblick zum Forschungsstand wurde festgestellt, dass bisher kein geeigneter Prozess dafür entwickelt wurde, jedoch für die einzelnen, anhand der Analyse der Ausgangslage erkannten Problemstellungen teilweise geeignete Methoden existieren. In dieser Arbeit wurden einzelne dieser Methoden ausgewählt, für die spezifische Anwendung erweitert und angepasst und zu einem mehrstufigen Prozess zusammengestellt. Der entwickelte Interpolationsprozess basiert darauf, dass durch die Vorbereitung der Datensätze und eine Vorprozessierung die einzelnen Datenpunkte nach ihrer Qualität gewichtet werden. Diese Qualität wird als zusätzlicher Parameter in der Interpolation mittels einem erweitertem IDW-Ansatz berücksichtigt.

Durch die Gewichtung der Datensätze und die Anwendung der Vorprozessierung kann der Anwender festlegen, in welchem Verhältnis die Datenquellen das resultierende Höhenmodell beeinflussen sollen. Es erfordert gute Kenntnisse zur Funktion des Interpolationsprozesses, um diese Einstellungen vorzunehmen. Jedoch ist der Interpolationsprozess dadurch flexibel und kann für beliebige Datensätze angewendet werden.

Bei der Anwendung an künstlichen Daten konnte aufgezeigt werden, dass durch die Vorprozessierung und die Interpolation mit dem erweiterten IDW deutlich bessere Resultate erzielt werden, als mit dem Standard-IDW. Für die verfügbaren ADS40- und LIDAR-Daten konnten mit dem entwickelten Interpolationsprozess die an das Höhenmodell gestellten Anforderungen erfüllt werden. Das resultierende DOM basiert hauptsächlich auf den ADS40-Daten und wird nur durch die LIDAR-Daten ergänzt. Bei der Generierung des DTM wurden dagegen die LIDAR-Daten bevorzugt und die ADS40-Daten kommen nur bei Nichtwaldflächen zum Einsatz.

10.2 Ausblick

Bei der Entwicklung und der Evaluierung des Verfahrens sind weitere Problemstellungen aufgetaucht und es wurden weiterführende Forschungsfragen aufgeworfen. In diesem abschliessenden Abschnitt werden für diese aufgetretenen Probleme mögliche Ansätze zur Verbesserung aufgezeigt, die in weiterführenden Forschungsarbeiten untersucht werden könnten.

Bewertung der Datensätze anhand von Vorwissen Die Problematik bei diesem Schritt ist die Umwandlung von unterschiedlichen Informationen zu den einzelnen Datensätzen in numerische Gewichte, so dass die Datensätze im gewünschten Verhältnis zueinander in die Interpolation einfließen. Wie Rühaak (2006) feststellte, bestehen keine statistischen Methoden, wie eine solche Gewichtung durchgeführt werden kann. In dieser Arbeit wurden die Gewichtungsfaktoren für die verwendeten Datensätze nach eigenem Ermessen gesetzt und da die erhaltenen Resultate befriedigend waren, wurden sie nicht mehr verändert. Es wurde somit nicht untersucht, wie sich diese Gewichtung auf die nachfolgende Vorprozessierung und das resultierende Höhenmodell auswirkt.

Bestimmung der Parameter Für die Vorprozessierung und die Interpolation ist die Einstellung von diversen Parametern notwendig. Im Rahmen der durchgeführten Kalibrierung für die künstlichen und realen Datensätze konnten gewisse Zusammenhänge zwischen den Parametern und der Struktur der Oberfläche einerseits, sowie den Eigenschaften der verwendeten Daten andererseits erkannt werden. Daraus konnten Empfehlungen gemacht werden, wie die Parameter eingestellt werden sollten. Es müsste jedoch untersucht werden, ob anhand messbarer Eigenschaften der Oberfläche und der Daten die Parameter bestimmt werden könnten. Erste Versuche dazu wurden im Abschnitt 6.3.3 vorgenommen.

Da sich die Eigenschaften der Oberflächen und der Daten räumlich verändern, könnte eine adaptive Wahl der Parameter sinnvoll sein. In der Arbeit wurde der Ansatz der grobrasterigen Waldmaske untersucht, die eine unterschiedliche Vorprozessierung von Wald und Nichtwald ermöglicht. Es konnten gewisse Vorteile für die resultierenden Höhenmodelle aufgezeigt werden (vgl. Abschnitt 8.2.2). Aber die eigentliche Generierung der Waldmaske war problematisch und konnte nicht vollständig automatisiert werden (vgl. Abschnitt 5.2.3). Es müsste so entweder eine Verbesserung der Erstellung einer solchen Waldmaske entwickelt werden oder es könnten andere Ansätze für eine adaptive Anpassung der Parameter untersucht werden, die auf der Beschreibung der lokalen Eigenschaften der Oberfläche und der Datenpunkte beruhen könnten.

Verwendete Methoden Die eingesetzten Methoden für die einzelnen Schritte des Interpolationsprozesses wurden anhand der Anforderungen, die durch die Analyse der Problemstellungen gestellt wurden, ausgewählt. Ihre Eignung wurde jedoch nicht empirisch überprüft und mit anderen Methoden verglichen. Sowohl für die Vorprozessierung, bei der die robuste Interpolation von Kraus & Pfeifer (1998) als Grundlage verwendet wird, als auch für die mit einem erweitertem IDW-Ansatz ausgeführte Interpolation, würden sich auch andere Methoden anbieten.

Bewertung der Interpolation In dieser Arbeit wurde ein Ansatz entwickelt, wie die Unsicherheit des interpolierten Höhenmodells über Prüfgrößen bestimmt werden kann (vgl. Abschnitt 5.4). Für die Anwendung an den realen Daten zeigte sich eine Ähnlichkeit zu den Kriging-Varianzen die bei der Anwendung von Ordinary Kriging erhalten wurden (vgl. Abschnitt 8.3.2). Das Potential dieses Ansatzes konnte somit aufgezeigt werden, jedoch benötigt es weiterer Forschungsarbeiten, um die Aussagekraft der ermittelnden Unsicherheit und den Nutzen dieses Ansatzes ausführlicher zu untersuchen. Die Schwierigkeiten bestanden darin, dass die künstlichen Daten die reale Situation nur ungenügend repräsentierten und so keine ausführliche Validierung des Ansatzes möglich war. Bei den realen Daten konnten wegen fehlender Referenzdaten zur Validierung lediglich visuelle Vergleiche durchgeführt werden (vgl. Abschnitt 2.5.2). Ohne eine aussa-

gekräftige Validierung konnte in dieser Arbeit nicht untersucht werden, wie stark der Einfluss der einzelnen Prüfgrößen zur Bewertung der Interpolation auf die resultierenden Unsicherheiten ist oder ob andere Prüfgrößen möglicherweise besser geeignet wären.

Literaturverzeichnis

- ARTUSO, R., BOVET, S. & STREILEIN, A. (2003): Practical Methods for the Verification of countrywide Terrain and Surface Models. In: IAPRS, Vol. XXXIV, Part 3, WG13.
- BABAK, O. & DEUTSCH, C.V. (2009): Statistical approach to inverse distance interpolation. In: Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Vol. 23, S. 543-553.
- BALTSAVIAS, E. P. (1999): Airborne laser scanning: basic relations and formulas. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, S. 199-214.
- BATER, C.W. & COOPS, N.C. (2009): Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. In: Computers & Geosciences, Vol. 35 (2009), S. 289-300.
- BARTIER, P.M. & KELLER, P. (1996): Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW). In: Computers & Geosciences, Vol.22, S. 795-799.
- BRIESE, CH., PFEIFER, N. & DOMINGER, P. (2002): Applications of the robust interpolation for DTM interpolation. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV / 3A, S. 55 - 61.
- BURROUGH, P. A. & McDONNELL, R. A. (2005): Principles of Geographical Information Systems. New York: Oxford University Press.
- CGAL (2010): Computational Geometry Algorithms Library. <http://www.cgal.org/> (Stand: 1. Februar 2010).
- DAVIS, L. (1987): Genetic Algorithms and Simulated Annealing. London: Pitman.
- DEVENECIA, K., WALKER, S. & ZHANG, B. (2007): New Approaches to Generating and Processing High Resolution Elevation Data with Imagery. In: Photogrammetric Week, Vol. 17 (5), S. 1442-1448.
- ERICKSON, J. (2002): Dense Point Sets Have Sparse Delaunay Triangulations. In: Proceedings of the 13th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, New York.
- FALKE, S.R. & HUSAR, R.B. (1998): Declustering in the spatial interpolation of air quality data. In: Proceedings of Air & Waste Management Association Annual Meeting, San Diego.
- FISHER, P. F. (1999): Models of Uncertainty in Spatial Data. In: Geographical Information Systems, Vol. 1, Principles and Technical Issues. John Wiley & Sons, 2nd Edition, S. 191-205.
- GONCALVES, G. (2006) Analysis of interpolation errors in urban digital surface models created from LIDAR data. In: Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Lissabon, S. 160-168.
- HERITAGE, G.L., MILAN, D.J., LARGE, A.R.G. & FULLER, I.C. (2009): Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. In: Geomorphology, Vol. 112, S. 334-344.

- HODGSON, M.E. & BRESNAHAN, P. (2004): Accuracy of airborne Lidar-derived elevation: Empirical assessment and error budget. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3), S. 331–339.
- HODGSON, M.E., JENSEN, J., RABER, G., TULLIS, G., DAVIS, B.A., THOMPSON, G. & SCHUCKMANN, K. (2005): An Evaluation of Lidar-derived Elevation and Terrain Slope in Leaf-off Conditions. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol.71 (7), S. 817–823.
- ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. (1989): *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- ISENBURG, M., LIU, Y., SHEWCHUCK, J., SNOEYINK, J. & THIRION, T. (2006): Generating Raster DEM from Mass Points Via TIN Streaming. In: *Proceedings of the GIScience'06 Conference*, Münster, S. 186-198.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N. (1998): Determination of terrain models in wooded areas with aerial laser scanner data. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53, S. 193-203.
- LEFSKY, M. A., COHEN, W. B., PARKER, G. G. & HARDING D. J. (2002): Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. In: *BioScience*, Vol. 52 (1), S. 19-30.
- LFI (2010): Schweizerisches Landesforstinventar. <http://www.lfi.ch/> (Stand: 10. August 2010).
- LLOYD, C.D. & ATKINSON, P.M. (2002): Deriving DSMs from Lidar data with kriging. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24 (14), S. 2519-2524.
- LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J & RHIND, D. (1999): *Geographical Information Systems, Vol. 1, Principles and Technical Issues*. New York: John Wiley & Sons, 2nd Edition .
- LU, G.Y. & WONG, D.W. (2008): An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. In: *Computers & Geosciences* 34 (2008), S. 1044-1055.
- MORSORF, F., MEIER, E., KÖTZ, B. ITTEN, K.I., DOBBERTIN, M. & ALLGÖWER, B. (2004): LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. In: *Remote Sensing Environment*, Vol. 92 (3), S. 353-362.
- QGIS (2010): Quantum GIS - Open Source Geographic Information System. <http://www.qgis.org/> (Stand: 1. Februar 2010).
- R-PROJECT (2010): The R Project for Statistical Computing. <http://www.r-project.org> (Stand: 1. Juni 2010).
- RENKA, R.J. (1988): Multivariate interpolation of large sets of scattered data. In: *ACM Transaction on Mathematical Software* 14 (2), S. 139–148.
- RÜHAAK, W. (2006): A Java application for quality weighted 3-d interpolation. In: *Computers & Geosciences* 32 (2006), S. 43-51.
- RYKIEL, E. J. Jr. (1996): Testing ecological models: the meaning of validation. In: *Ecological Modeling*, Nr. 90, S. 229-244.

- SCHAER, P., SKALOUD, J., STEBLER, Y., TOME, P., & STENGELE, R. (2009): Airborne LiDAR: In-flight Accuracy Estimation. In: GPS World, August 2009, S. 37-41.
- SHEPARD, D. (1968): A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. In: Proceedings of the 23rd National Conference ACM, S. 517-523.
- SITHOLE G. & VOSSSELMAN G. (2003): Comparison of filtering algorithms. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, S. 71-78.
- SMITH, S.L, HOLLAND, D.A, and LONGLEY, P.A. (2003): Interpreting Interpolation: The Pattern of Interpolation Errors in Digital Surface Models Derived from Laser Scanning Data. Proceedings of GISRUK 2003.
- SMITH, S.L, HOLLAND, D.A, & LONGLEY, P.A. (2005): Quantifying Interpolation Errors in Urban Airborne Laser Scanning. In: Geographical Analysis, Vol. 37 (2), S. 200-224.
- SU, J. & BORK, E. (2006): Influence of Vegetation, Slope and Lidar Sampling Angle on DEM Accuracy. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72 (11), S. 1265-1274.
- SWISSTOPO (2010): Bundesamt für Landestopografie. <http://www.swisstopo.admin.ch/> (Stand: 10. Oktober 2010).
- TOMCZAK, M. (1998): Spatial interpolation and its uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (IDW)—cross-Validation/Jackknife approach. In: Journal of Geographic Information and Decision Analysis 2 (2), S. 18-33.
- VOSS, W. u.a. (2004): Taschenbuch der Statistik. 2. Auflage, Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig.
- VOSSSELMAN G. (2000): Slope based filtering of laser altimetry data. In: IAPRS, Vol. 33 (3), S. 935-942.
- WATSON, D.F. (1999): The natural neighbor series manuals and source codes. In: Computers & Geosciences, Vol. 25, S. 463-466.
- WEISE, T. (2009): Global Optimization Algorithms – Theory and Application. <http://www.it-weise.de/projects/book.pdf> (Stand: 9. August 2010).
- WSL (2010): Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. <http://www.wsl.ch/> (Stand: 10. Oktober 2010).
- ZHANG, B., MILLER, S., DEVENECIA, K. & WALKER, S. (2006): Automatic terrain extraction using multiple image pair and back matching. In: Proceedings of ASPRS 2006 Annual Conference, Reno, Nevada.
- ZIMMERMANN, D., PAVLIK, C., RUGGLES, A. & ARMSTRONG, M.P. (1999): An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. In: Mathematical Geology, Vol. 31 (4), S. 375-390.
- ZINGER, S., NIKOLOVA, M., ROUX, M. & MAÎTRE, H. (2002): 3D resampling for airborne laser data of urban areas. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, S. 55 -61.

Anhang

Funktionen zur Generierung der künstlichen Oberflächen

Ausdehnung aller Oberflächen: 200 x 200

Oberfläche „Schiefe Ebene“:

$$z = 1.25 * x$$

Oberfläche „Hang“:

$$z = \begin{cases} 100+5*\sin(\frac{x}{5})+3*\cos(\frac{y}{8}) & \text{für } x \leq 66 \\ 100+1.2*(x-66)+5*\sin(\frac{x}{5})+3*\cos(\frac{y}{8}) & \text{für } 66 < x \leq 122 \\ 100+1.2*66+5*\sin(\frac{x}{5})+3*\cos(\frac{y}{8}) & \text{für } x > 122 \end{cases}$$

Oberfläche „Wald“:

Radius der Grundfläche der Kegel: $r = 10$

x_{dez}, y_{dez} = Dezimalstellen von x, y

x_{int}, y_{int} = Ganzzahl (Integer) von x, y ohne Dezimalstellen

$\%$ = Syntax in C++ für den Modulo-Operator

Quadrierte Distanz QD bis zum nächsten Kegelmittelpunkt:

$$QD = (r - (x_{int} \% 2r + x_{dez}))^2 + (r - (y_{int} \% 2r + y_{dez}))^2$$

$$z = \begin{cases} 100 & \text{für } QD > r^2 \\ 100 + (r - \sqrt{QD}) * 3 & \text{für } QD \leq r^2 \end{cases}$$

Persönliche Erklärung:

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Rafael Bohli

Zürich, 31. Oktober 2010