

Universität Hannover

Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen

Diplomarbeit

Filterung von Laser-Scanner-Aufnahmen

bearbeitet von

cand. geod. **Michael Schaeffer**

Oktober 1999

Inhaltsverzeichnis	1
1 EINLEITUNG	3
1.1 Einführung in das Thema	3
1.2 Inhalt dieser Arbeit	4
2 TECHNIK DES LASERSCANNINGS	6
3 AUSGANGSDATEN	11
3.1 Vorstellung des Untersuchungsgebietes	11
3.2 Durchführung der Befliegung	13
3.3 Betrachtung möglicher Fehlerquellen	14
3.3.1 Genauigkeit der Entfernungsmessung	14
3.3.2 Genauigkeit der Positionsbestimmung	15
3.3.3 Genauigkeit der Richtungsbestimmung des Laserstrahls	16
3.3.4 Koordinatentransformation	17
4 ANALYSE DER TOPOSYS-DATEN	19
4.1 Nördliches Kerngebiet	19
4.1.1 Datenlöcher	19
4.1.2 Verteilung der Höhendifferenzen	21
4.2 Südliches Kerngebiet	23
4.2.1 Datenlöcher	23
4.2.2 Verteilung der Höhendifferenzen	26
4.3 Beurteilung der Toposys-Filterung	27
5 KONTROLLE DURCH PHOTOGRAMMETRISCHE MESSUNGEN	29
5.1 Berücksichtigung von Senkungserscheinungen	29
5.2 Genauigkeitsanalyse	30
5.3 Systematische Fehler	32
5.4 Schlußfolgerung	36
6 ENTWICKELTE PROGRAMME	37
6.1 HALCON	37
6.2 Programme	37
6.2.1 Wandeln der Daten in Grauwertbilder	38
6.2.2 Filtern der Daten	39
6.2.3 Füllen der Datenlöcher	42
6.2.4 Wandeln der Grauwertbilder in Daten	44
6.3 Probleme des Algorithmus	44

Inhaltsverzeichnis	2
6.4 Wahl der Parameter	46
7 VERGLEICH DER ERGEBNISSE TOPOSYS - HALCON	48
7.1 Kerngebiete	48
7.1.1 Nördliches Kerngebiet	48
7.1.2 Südliches Kerngebiet	54
7.1.3 Bewertung	60
7.2 Exemplarische Ausschnitte	61
7.2.1 Ausschnitt 1	62
7.2.2 Ausschnitt 2	64
7.2.3 Bewertung	65
8 VERGLEICH DER ERGEBNISSE DTMCOR - HALCON	67
8.1 Vorstellung des DTMCOR - Höhenmodells	67
8.1.1 DTMCOR	67
8.1.2 Höhenmodell	67
8.2 Vergleich DTMCOR - HALCON	69
8.2.1 Nördliches Kerngebiet	69
8.2.2 Südliches Kerngebiet	76
8.2.3 Bewertung	82
9 SCHLUßBETRACHTUNG UND AUSBLICK	84

1 Einleitung

1.1 Einführung in das Thema

Die Bereitstellung von Daten zur Modellierung und Bewertung von Geländeoberflächen einschließlich zahlreicher zusätzlicher Informationen ist von jeher eine wichtige Aufgabe der Geodäsie. Im Zuge der zunehmenden digitalen Verwaltung und Verarbeitung dieser Daten, einhergehend mit der ständigen Weiterentwicklung der Computertechnik, gewinnen digitale Geo-Informationen-Systeme (GIS) mehr und mehr an Bedeutung und finden in einer wachsenden Zahl von Aufgabenbereichen Anwendung. Als Beispiele neben der klassischen Kartierung seien hier einige Bereiche genannt:

- Trassenplanung im Straßenbau
- Küstenüberwachung zur Vorsorge gegen Überschwemmungen
- Überwachung von Waldbeständen
- Stadtmodelle zur Berechnung von Strahlenausbreitung im Mobilfunk
- Gletscherbeobachtung
- Überwachung der Auswirkungen beim Kohleabbau

Aufbau und Aktualisierung solcher Systeme erfordern die Bereitstellung einer großen Menge von aktuellen Daten hoher Auflösung und Qualität. Wünschenswert ist im Interesse des Datenflusses eine automatische und direkte Methode der Punktgewinnung, die die Umwandlung von der analogen in die digitale Form überflüssig macht, indem die Daten bereits digital aufgenommen werden.

Als indirekte Methode für die Erstellung eines GIS-integrierten Digitalen Geländemodells (DGM) steht beispielsweise die analytische Photogrammetrie zur Verfügung, die die Extraktion von Höhendaten aus der Analyse von Stereobildpaaren ermöglicht. Eine automatische Analyse und Überführung in eine digitale Form ist hier jedoch nicht befriedigend möglich. Die klassische terrestrische Geländeaufnahme ist sehr aufwendig und zeitintensiv und erlaubt keine dichte flächendeckende Gewinnung von Meßdaten. Eine Digitalisierung vorhandener Karten umgeht die Neugewinnung von Punktdaten, kann jedoch stets nur so aktuell wie die verwendete Kartenvorlage sein. Ein sehr junges, erst vor wenigen Jahren hinzugekommenes Verfahren ist die direkte Punktgewinnung durch Laserscanning.

Bereits in den 60er Jahren wurden erste Versuche unternommen, die Koordinaten von Bodenpunkten mit einem Lasersystem vom Flugzeug zu erfassen. Das Verfahren wurde weiterentwickelt zu sogenannten Profilen, die entlang der Flugachse Bodenpunkte registrieren und so Stützprofile für ein Modell generieren. Ende der 80er Jahre konnte durch Einsatz von GPS erstmals eine Genauigkeit erreicht werden, die die Verwendung von luftgestützten Laserprofilen für große Flächen sinnvoll machte. Der erforderliche Aufwand bei der Befliegung war jedoch aufgrund der linienhaft verteilten Bodenpunkte sehr hoch. Anfang der 90er Jahre wurden die Profiler dann zunehmend von Scannern abgelöst, deren Sensoren den Boden in Streifen abtasteten, und GPS wurde mit Trägheits-Navigationssystemen (INS) kombiniert, was eine weitere Genauigkeitssteigerung mit sich brachte. Mitte der 90er Jahre wurden schließlich die ersten Firmen gegründet, die die Befliegung mit Scannern und die Auswertung der so gewonnenen Daten anboten [WEHR/LOHR; 1999a].

Gegenwärtig existieren weltweit ca. 35 Unternehmen, die solche Dienste anbieten [BALTSAVIAS; 1999]. Jedoch wendet die Mehrzahl dieser Firmen eigenentwickelte Algorithmen zur Verarbeitung und Filterung der gewonnenen Daten an, deren Funktionsweise nicht offengelegt wird. Dies hat zur Folge, daß Ergebnisse verschiedener Firmen nur schwer zu vergleichen oder zu beurteilen sind. Es erscheint daher notwendig, daß baldmöglichst standardisierte Verfahren als Referenz aufgestellt werden, um die Ergebnisse untereinander vergleichbar und in ihrer Entstehung transparenter zu machen und somit auch eine qualitative Bewertung zu ermöglichen.

1.2 Inhalt dieser Arbeit

In der vorliegenden Ausarbeitung wird ein möglicher Ansatz zur Filterung von Laserscannerdaten entwickelt, wobei mit Mitteln der Bildverarbeitung gearbeitet wird. Nach einer Übersicht über die technischen Aspekte des Laserscannings und der Rohdatengewinnung wird das untersuchte Gebiet vorgestellt. An dem Beispieldatensatz, der von der Firma Toposys für die Deutsche Steinkohle AG (DSK) aufgenommen und ausgewertet wurde, soll die Funktion eines hierfür mit der Programmierumgebung HALCON erstellten Programmes exemplarisch nachvollzogen und überprüft werden. Das Ergebnis dieser Anwendung soll sowohl mit dem der Firma Toposys, als auch

mit dem einer vorangegangenen Diplomarbeit [KOCH; 1999] verglichen werden, welche eine Lösung der gleichen Aufgabe für das gleiche Gebiet mit einem anderen, rein mathematischem Ansatz verfolgt.

2 Technik des Laserscannings

Beim Laserscanning handelt es sich um ein opto-mechanisches, aktives Verfahren der Höhendatengewinnung. Ein Laserstrahl wird von einem zumeist flugzeuggetragenen System zum Boden ausgesendet und der reflektierte Anteil dieses Laserstrahls wird registriert (**Abbildung 2-1**). Dieses Prinzip wird auf verschiedene Arten realisiert. Die beiden hauptsächlich verwendeten Verfahren sind das Puls-Laufzeit-Verfahren und das Phasenvergleichsverfahren.

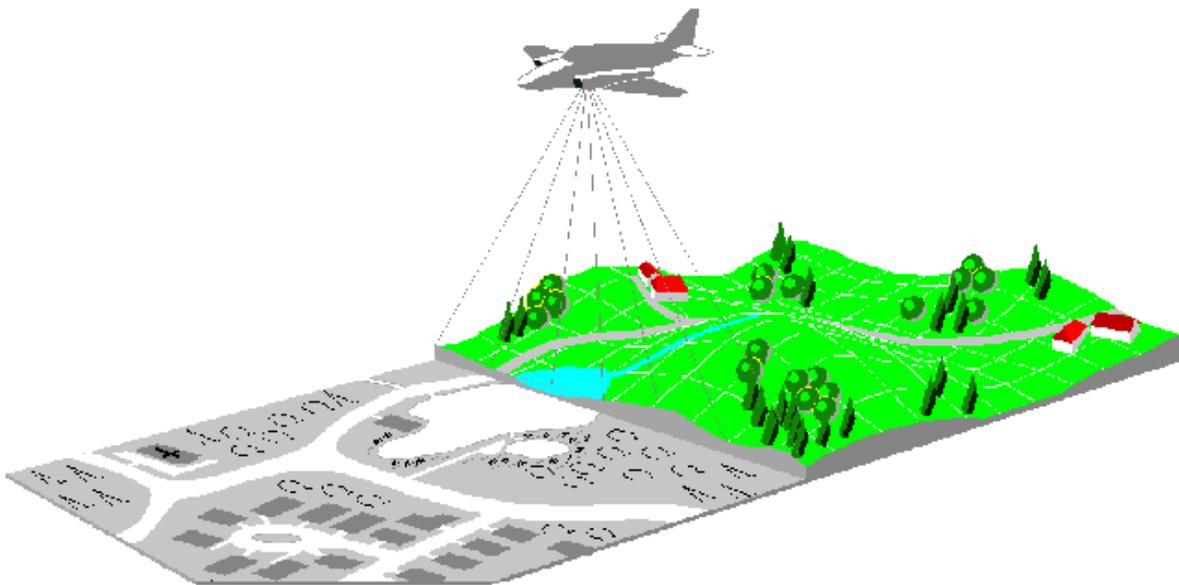


Abbildung 2-1: Prinzip des Laserscanning [Toposys; 1999]

Beim Phasenvergleichsverfahren, das am Institut für Navigation der Universität Stuttgart entwickelt wurde [HUG; 1996], wird ein kontinuierlicher, modulierter Laserstrahl quer zur Flugrichtung verschwenkt. Gemessen wird hier die Phasenverschiebung des reflektierten Strahls gegenüber dem ausgesendeten Strahl.

Die Firma Toposys wendet das momentan am häufigsten verwendete Verfahren der Puls-Laufzeit-Messung an. Der Laser sendet mit einer festen Frequenz Laserpulse aus und registriert die Dauer bis zum Eintreffen des reflektierten Strahls. Aus der Laufzeit des Laserstrahls kann dann die Entfernung des getroffenen Objektes berechnet werden.

Der Aufbau dieses von Toposys benutzten Lasers ist in **Abbildung 2-2** zu sehen. Der Laserstrahl wird durch eine Glasfaser auf einen leicht geneigten Spiegel geleitet, der auf einer rotierenden

Achse befestigt ist. Durch diesen rotierenden Spiegel wird der Laserstrahl auf eine der 128 kreisförmig um die Primärfaser angeordneten Fasern zurückgeworfen. Die anderen Enden dieser Sekundärfasern sind vor einer Austrittsoptik in einer Zeile angeordnet. Erreicht wird hiermit ein Scanwinkel von $\pm 7^\circ$, also ein Öffnungswinkel von 14° . Der reflektierte Laserstrahl trifft durch die Eintrittsoptik auf eine identisch aufgebaute Anordnung von Glasfasern. Er wird zunächst auf die korrespondierende Faser in der Zeile geworfen um dann aus einer der Ringfasern auf den Spiegel geleitet zu werden. Dieser wiederum spiegelt den Strahl auf die Mittelfaser, die den Strahl einem Detektor zuleitet. Eine der Fasern wird als Referenzfaser direkt vom Faserkreis der Sendeanordnung zu dem der Empfangsanordnung geführt.

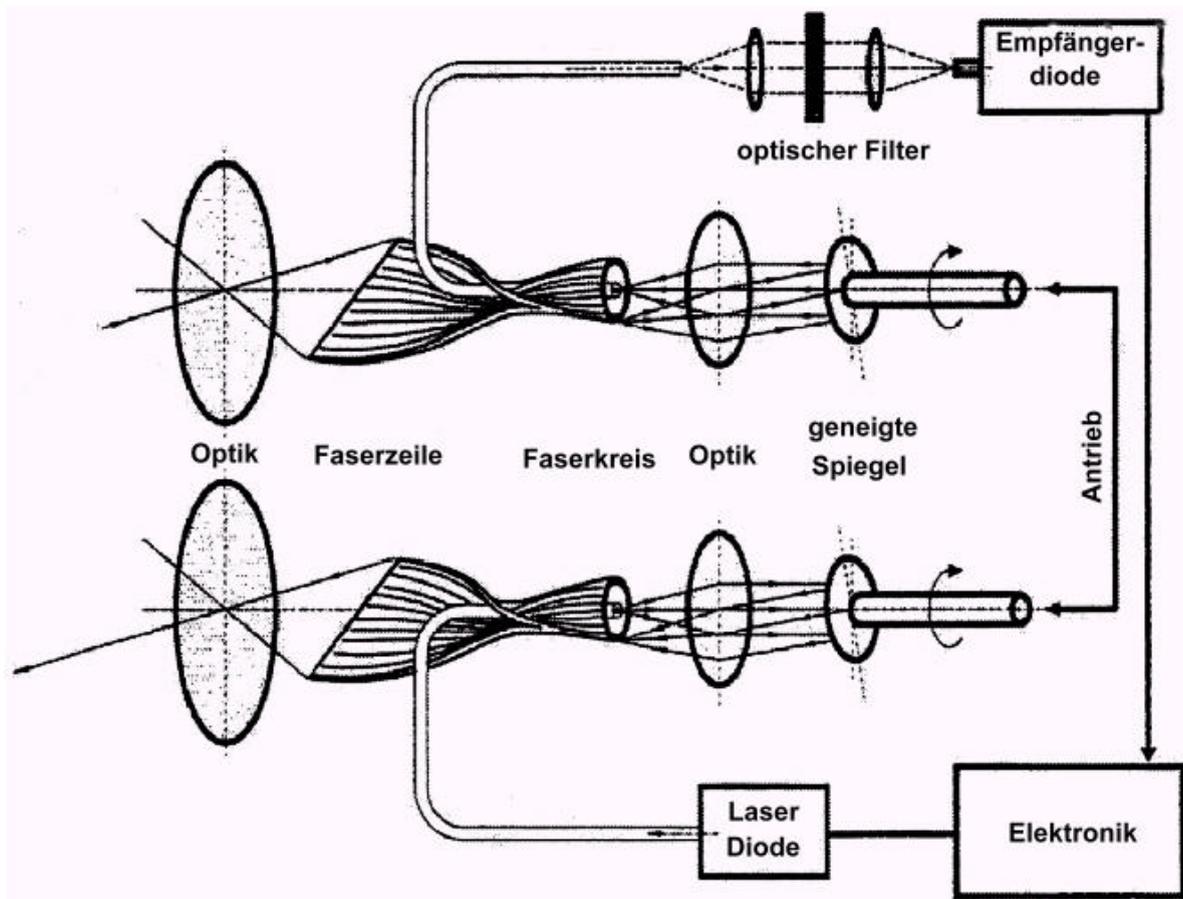


Abbildung 2-2: Funktionsweise des Toposys-Scanners [WEHR/LOHR; 1999]

Durch die Bauweise dieses Lasers werden die zu bewegendenden mechanischen Teile auf den Nutationsspiegel reduziert, was eine sehr hohe Scanrate von bis zu 630 Hz ermöglicht. Bei 127 aufge-

nommenen Punkten pro Scan ergeben sich über 80000 Punkte pro Sekunde. Der Abstand der gescannten Bodenpunkte quer zur Flugrichtung läßt sich nach **Gleichung 2-1** berechnen.

$$dx = h \frac{q}{N-1}$$

Gleichung 2-1: Abstand der gescannten Bodenpunkte quer zur Flugrichtung

Dabei ist N die Nummer der Fasern, h die Flughöhe und q der Scanwinkelbereich in Radiant.

Für eine Flughöhe von 900 m errechnet sich hiernach ein Punktabstand von ca. 1,73 m. Der Abstand der Punkte in Flugrichtung hängt von der Fluggeschwindigkeit v und der Scanfrequenz f ab.

$$dy = \frac{v}{f}$$

Gleichung 2-2: Abstand der gescannten Bodenpunkte in Flugrichtung

Bei einer Fluggeschwindigkeit von 70 m/s und einer Frequenz von 630 Hz bekommt man einen Punktabstand von ca. 11 cm in Flugrichtung. Man erhält also etwa 4 bis 5 Meßwerte pro Quadratmeter, die nach der Geometrie in **Abbildung 2-3** verteilt sind.

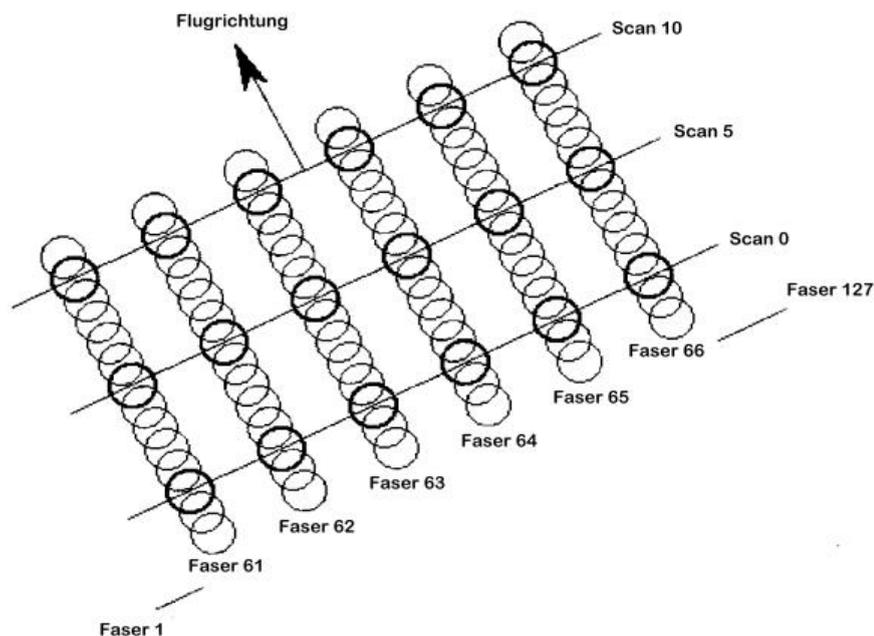


Abbildung 2-3: Geometrie der gescannten Bodenpunkte

Der zum Boden gesendete Laserstrahl ist nicht zu einem möglichst dünnen Strahl fokussiert, sondern als Kegel ausgebildet, der zu einem Bodenpunkt von ca. 30 cm Durchmesser führt. Dies hat den Vorteil, daß mehrere Reflektionen, bspw. an einer Baumkrone, verschiedenen Ästen und am Boden, stattfinden. Man kann nun entscheiden, ob nur die erste Reflektion (First-Pulse-Verfahren), die letzte (Last-Pulse-Verfahren) oder mehrere registriert werden sollen. Für die Gewinnung von Oberflächenpunkten wird das Last-Pulse-Verfahren verwendet, was jedoch nicht ausschließt, daß auch Punkte auf Bäumen und insbesondere auf Häusern aufgenommen werden.

Ein bei der Wahl der Laserquelle zu berücksichtigender Aspekt ist die Wellenlänge des ausgesendeten Lichtes. So gibt es zwar die empfindlichsten Detektoren für eine Wellenlänge zwischen 800 und 1000 nm, weshalb die ersten Systeme auch mit einer Wellenlänge von 900 nm arbeiteten, jedoch liegt hier eine Gefahrenquelle, wenn dieser Strahl das Auge trifft. Der Laserscanner von Toposys arbeitet daher mit einer relativ ungefährlichen Wellenlänge von 1535 nm. Auch die von der Sonne verursachte Hintergrundstrahlung ist bei dieser Wellenlänge sehr gering. Zu berücksichtigen ist aber auch die Reflektivität des Untergrundes. So reflektieren beispielsweise Eis und Schnee die Wellenlänge von 1535 nm sehr schlecht. Generell problematisch ist Wasser, da es hier zur Totalreflektion kommt, d.h. nur Punkte die sich nahezu senkrecht unter der aufnehmenden Plattform befinden und Wellenflanken liefern eine Reflektion in Richtung des Detektors. Ähnliches gilt für feuchte asphaltierte Flächen.

Ein Vorteil des Laserscannings im Verhältnis zur analytischen Photogrammetrie liegt in der Durchdringung von Waldgebieten. So erreichen in Laub- und Nadelwald ca. 20 - 40% aller Messungen den Boden. Diese Zahl steigt auf fast 70% bei blattlosem Laubwald [ACKERMANN; 1999], weshalb der ideale Befliegungszeitraum nach der Schneeschmelze und vor der Belaubung liegt. Dies reicht in den meisten Fällen aus, um ein befriedigendes Geländemodell zu erhalten. Zeitraubende und kostenintensive terrestrische Nachmessungen entfallen somit oder werden zumindest auf ein Minimum reduziert.

Daß es sich beim Laserscanning um ein aktives Meßverfahren handelt, ist ein weiterer Vorteil. Das System verwendet seine eigene Lichtquelle und ist somit unabhängig vom Tageslicht. Prinzipiell kann das ganze Jahr über und sowohl tags wie auch nachts geflogen werden. Auch Schatten

durch tiefstehende Sonne, die in der analytischen Photogrammetrie einen nicht auswertbaren Bereich bewirken, sind beim Laserscanning nicht relevant.

Schließlich sei noch der automatische Datenfluß als Vorteil erwähnt, der Schritte wie Filmentwicklung, Vergrößerung, etc. ausfallen läßt. Dies führt zu einer direkteren und schnelleren Auswertbarkeit. Erforderlich sind dafür aber sehr große Speicher- und Rechenkapazitäten.

Sensortyp	Pulsmoduliertes Laserradar
Reichweite	< 1000 m
Scanprinzip	Faserlinienscanner
Scanfrequenz	630 Hz
Scanwinkel	+/- 7°
Nummer der Pixel pro Scan	127
Meßpunktdichte (durchschnittlich)	4 ... 5 Messungen pro m ²
Streifenbreite (bei 1000 m Flughöhe)	230 m
Genauigkeit einer einzelnen Entfernungsmessung	< 0.2 m
Auflösung der Entfernungsmessung	0.06 m
Laserklassifikation	class 1 nach EN 60825 (eye-safe)

Table 2-1: Parameter des Toposys-Scanners [Toposys; 1999]

3 Ausgangsdaten

3.1 Vorstellung des Untersuchungsgebietes

Als Beispieldatensatz stand eine von der Firma Toposys für die Deutsche Steinkohle AG (DGK) durchgeführte Befliegung zur Verfügung. Die DGK ist aufgrund gesetzlicher Bestimmungen dazu verpflichtet, die Auswirkungen ihres Untertageabbaus auf die Erdoberfläche zu überwachen und zu dokumentieren. Mit steigenden behördlichen Anforderungen nahm auch das Bedürfnis nach genaueren und umfassenderen Informationen zu. Gelöst wurde diese Aufgabe mit Hilfe eines Geo-Informations-Systems, dessen Basis die dreidimensionalen Geländedaten sind.

Das untersuchte Gebiet "Die Haard" liegt im Bundesland Nordrhein-Westfalen einige Kilometer nördlich von Recklinghausen. Im Westen des Gebietes findet sich die Eisenbahnstrecke Haltern - Recklinghausen, im Norden der Wesel-Datteln-Kanal. Das etwa 65 km² große Gebiet ist größtenteils mit dichtem Nadelwald bedeckt. Die Befliegung selbst erstreckte sich über ein Gebiet, das im Mittel ungefähr einen Kilometer über das Untersuchungsgebiet hinausreichte und ca. 100 km² groß war. In diesem Randbereich befinden sich sowohl waldfreie Zonen als auch (am südlichen und westlichen Rand) mehrere Ortschaften, namentlich Oererkenschwick, Sinsen, Lenkerbeck und Hüls. Im nördlichen Randgebiet findet man den Fluß Lippe. Der maximale Höhenunterschied innerhalb dieses Gebietes beträgt ungefähr 120 m. **Abbildung 3-1** zeigt das Scangebiet.

Um die Datenmenge und den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, wurden für die Untersuchungen nur zwei rechteckförmige Ausschnitte des Gesamtgebietes herangezogen, die im folgenden als nördliches bzw. südliches Kerngebiet bezeichnet werden. Die Auswahl dieser Kerngebiete orientiert sich, um einen Vergleich der Ergebnisse möglich zu machen, an einer vorhergehenden Diplomarbeit [KOCH; 1999], die eine mathematische Lösung der Aufgabenstellung behandelt. Diese Kerngebiete wurden so gewählt, daß alle für eine Filterung interessanter Aspekte - Waldgebiete, Siedlungen, starke Steigungen - enthalten sind.

Das nördliche Kerngebiet mißt in Nord-Süd-Richtung 2,15 km und in Ost-West-Richtung 1,65 km. Es ergibt sich also eine Fläche von 3,55 km². In der nordwestlichen Ecke ragt das Gebiet über den Scanbereich hinaus, es liegen hier also keine Daten vor.

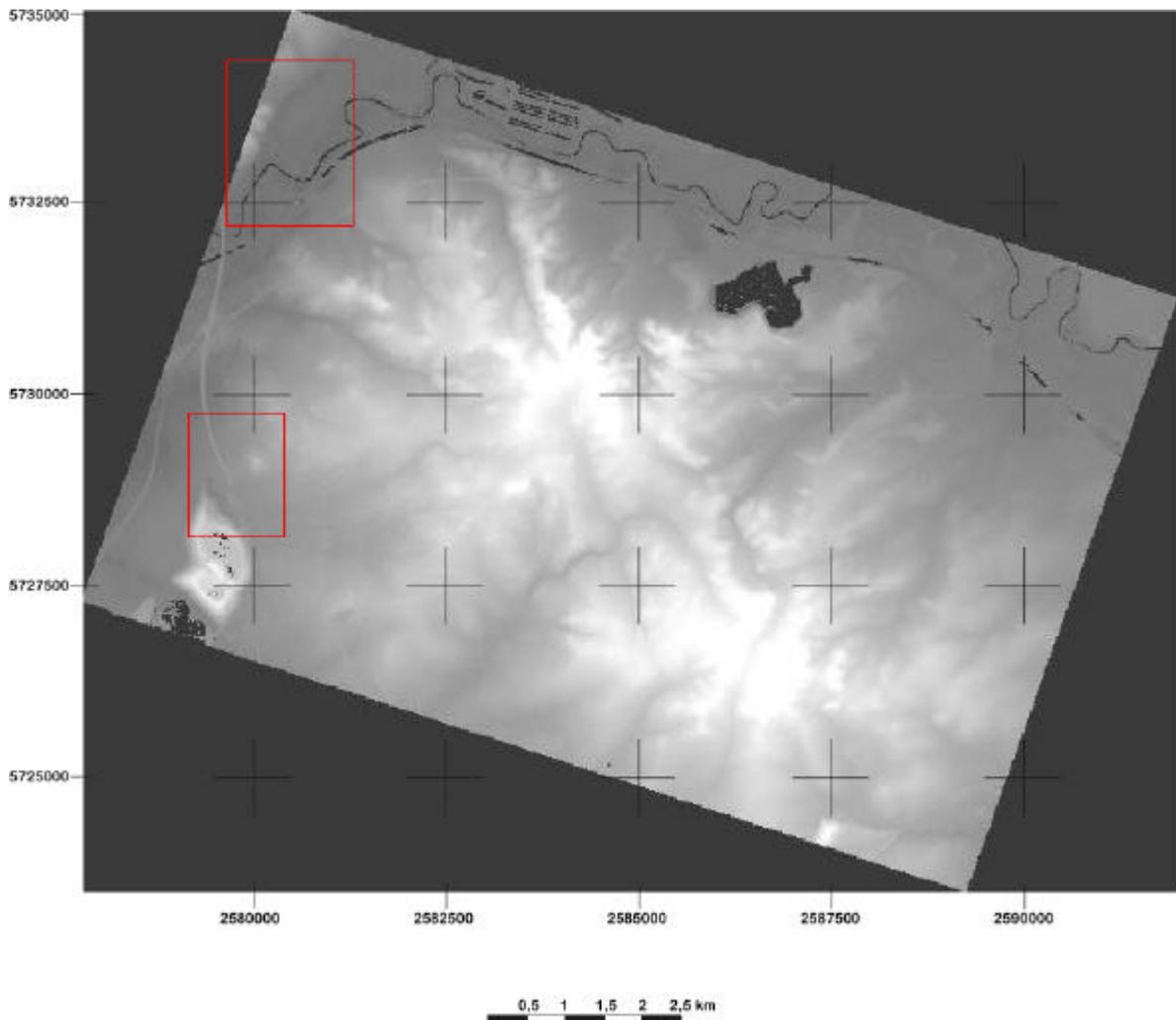


Abbildung 3-1: Scangebiet "Die Haard" mit Kerngebieten (rot umrandet)

Innerhalb des Gebietes finden sich Abschnitte des Weser-Datteln-Kanals sowie der Lippe. Auch ein Teil der Autobahn A52 ist enthalten, ebenso ein Stück der Eisenbahnstrecke Haltern - Recklinghausen. Das Dorf Hamm und der südliche Teil des Ortes Haltern zeigen im mittleren und nordöstlichen Teil Siedlungsstrukturen, während im südlichen und westlichen Teil kleinere Waldgebiete, Freiflächen und Wälder zu finden sind.

Das südliche Kerngebiet weist eine Ausdehnung von 1,60 km in Nord-Süd-Richtung und von 1,25 km in Ost-West-Richtung auf, was eine Fläche von 2,00 km² bedeutet. Wie im nördlichen Gebiet finden sich auch hier die Bahnstrecke Haltern - Recklinghausen und ein Stück Autobahn, diesmal jedoch die A43. Siedlungen sind in diesem Gebiet wenig zu finden. Kennzeichnend sind

hier mehrere Waldstücke und dünn bewachsene Flächen, sowie die im südwestlichen Bereich zu findende Halde Brinkfortsheide.

3.2 Durchführung der Befliegung

Aus der Flughöhe von 900 m bei der Befliegung ergab sich eine Streifenbreite von 220 m. Die Überlappung war mit etwa 35 m geplant, also ergab sich ein Abstand der Hauptflugstreifen von 150 m. Es wurden daher 76 Flugstreifen in Ost-West- bzw. West-Ost-Richtung inklusive Querflug aufgenommen.

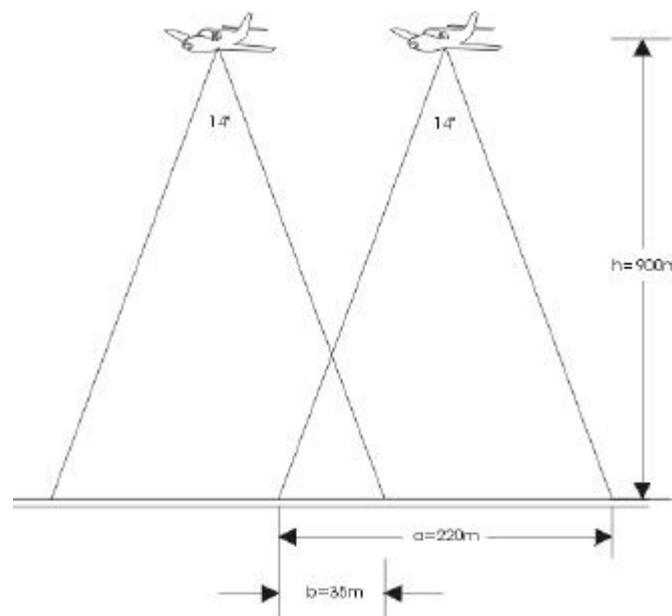


Abbildung 3-2: Befliegungsgeometrie des Untersuchungsgebietes

Die Befliegung des Untersuchungsgebietes wurde im Frühjahr 1998 zu folgenden Zeiten durchgeführt:

30.03.1998	17:12 - 19:36 UTC
31.03.1998	15:54 - 19:38 UTC
01.04.1998	08:37 - 11:18 UTC
03.04.1998	08:40 - 09:43 UTC

Zur Positions- und Orientierungsbestimmung wurde differentielles GPS (DGPS) im Zusammenhang mit einem Trägheits-Navigationssystem (INS) verwendet, die über registrierte Zeitmarken synchronisiert wurden. Für das DGPS stand die Referenzstation "Coesfeld" zur Verfügung, die sich etwa 28 km vom Scangebiet entfernt befindet. Da diese Station am 31.03.1998 aufgrund erheblicher Störungen nicht verwendet werden konnte, wick man an diesem Tag auf die Station "Gladbeck" aus, die ca. 22 km vom Scangebiet entfernt ist. An diesem Tag stand zur Auswertung für drei Streifen nur das L1-Signal zur Verfügung.

3.3 Betrachtung möglicher Fehlerquellen

Die Genauigkeit der Ergebniskoordinaten, die mit Laserscanning gewonnen wurden, hängt von mehreren Faktoren ab. Namentlich sind dies die jeweiligen Genauigkeiten und systematischen Fehler

- der Entfernungsmessung,
- der Position,
- der Richtung des Laserstrahls,
- der Transformation der Koordinaten.

Die drei erstgenannten Parameter werden von verschiedenen Sensoren registriert; die Entfernung mißt der Scanner selbst, für die Richtungsbestimmung ist das INS zuständig und die Position wird mittels DGPS bestimmt. Daher ist die Zeitregistrierung zur Synchronisation der Daten von erheblicher Bedeutung.

3.3.1 Genauigkeit der Entfernungsmessung

Der durch die Ungenauigkeit der Entfernungsmessung verursachte Fehler ist im Vergleich zu den anderen systematischen Fehlern relativ gering. Die Ausnahme bilden hier niedrige Flughöhen und

schmale Scanwinkel. Ein Faktor ist hier, wie schnell bei einem Laserpuls das volle Signal zur Verfügung steht. Bei einem gebräuchlichen Laserpuls der Länge 10 ns beträgt diese Schwellzeit etwa 1 ns. Dies entspricht, je nach verwendeter Wellenlänge, einer Laufweite des Lichtstrahls von ca. 30 cm, also einer Entfernung von 15 cm. Die Detektordiode arbeitet mit einem Schwellwert für das empfangene Signal, der überschritten sein muß, damit das Signal registriert wird. Bei unebenem Gelände spaltet sich das ausgesandte Signal jedoch in zahlreiche, eng beieinander liegende Echos auf, die sich im Detektor langsamer aufsummieren. Bei relativ glatten Oberflächen (z.B. Straßen) ist eine Genauigkeit von etwa 10 - 15 % dieser Schwellzeit zu erwarten. Für eine Dauer von 1 ns bedeutet dies 1.5 - 2.25 cm.

Ein weiterer Einflußfaktor ist die zeitliche Genauigkeit der Signalregistrierung. Die übliche Auflösung liegt zwischen 0.05 ns und 0.2 ns. Für einen Wert von 0.1 ns ergibt sich eine Entfernungsauflösung von 1.5 cm.

3.3.2 Genauigkeit der Positionsbestimmung

Die Genauigkeit der mit DGPS bestimmten Position ist abhängig von Konstellation und Zahl der empfangenen Satelliten und von der Entfernung der Referenzstation. Der erste Punkt stellt seit dem bestehenden Vollausbau des Systems kein Problem mehr dar. Die Entfernung zur Referenzstation sollte 50 km möglichst nicht überschreiten, im Notfall sind Entfernungen bis 100 km mit Genauigkeitseinbußen zu verwenden.

Weitere Parameter sind die ionosphärischen und troposphärischen Einflüsse auf die Signalausbreitung. Während jedoch die Auswirkungen der Ionosphäre durch die Verwendung eines Zweifrequenz-Empfängers und Differenzbildung weitgehend eliminiert werden können, stellt die Troposphäre, auch aufgrund ihrer schnellen Veränderlichkeit, ein größeres Problem dar.

Schließlich beinhaltet auch die Lösung des Mehrdeutigkeitsfaktors eine Fehlerquelle. Diese Unbekannte muß zu Beginn für jeden Satelliten einmal geschätzt werden. Wird die Verbindung zum Satelliten kurzfristig unterbrochen, muß diese Schätzung basierend auf einer prädierten Position erneut erfolgen. Das Potential dieser Fehlerquelle wird jedoch durch Einbeziehung der parallel registrierten INS-Daten erheblich geglättet.

Die erreichbare Genauigkeit der bestimmten Position kann mit 5 - 15 cm angegeben werden.

3.3.3 Genauigkeit der Richtungsbestimmung des Laserstrahls

Die Orientierung des Laserstrahls wird über das INS bestimmt. Zur Veranschaulichung denke man sich ein lokales Koordinatensystem mit Ursprung am Austrittsort des Laserstrahls, x-Achse in Flugrichtung, y-Achse quer zu dieser und z-Achse senkrecht darauf stehend. Die Winkel um diese Achsen sollen mit w , y und k bezeichnet werden, der Scanwinkel mit b

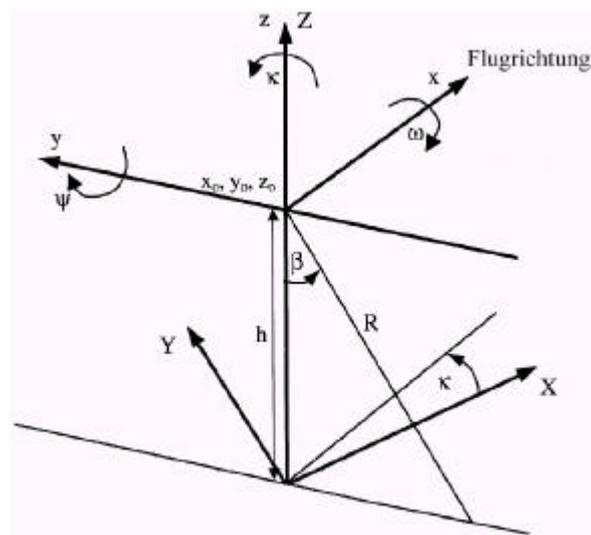


Abbildung 3-3: Koordinatensystem zur Berechnung der Strahlrichtungsabweichungen

und die Bodenkoordinaten mit X, Y und Z (**Abbildung 3-3**). Es ergeben sich folgende Auswirkungen:

$$\text{- für } \Delta w : \quad \Delta X = -h \frac{[\sin(\mathbf{b} + \Delta w) - \sin(\mathbf{b})]}{\cos(\mathbf{b})} \sin(\mathbf{k})$$

$$\Delta Y = h \frac{[\sin(\mathbf{b} + \Delta w) - \sin(\mathbf{b})]}{\cos(\mathbf{b})} \cos(\mathbf{k})$$

$$\Delta Z = h \left[1 - \frac{\cos(\mathbf{b} + \Delta w)}{\cos(\mathbf{b})} \right]$$

$$\text{- für } \Delta y : \quad \Delta X = -h \sin(\Delta y) \cos(\mathbf{k})$$

$$\Delta Y = -h \sin(\Delta y) \sin(\mathbf{k})$$

$$\Delta Z = h [1 - \cos(\Delta \mathbf{y})]$$

$$\text{- für } \Delta \mathbf{k} : \quad \Delta X = -h \tan(\mathbf{b}) [\sin(\mathbf{k} + \Delta \mathbf{k}) - \sin(\mathbf{k})]$$

$$\Delta Y = h \tan(\mathbf{b}) [\cos(\mathbf{k} + \Delta \mathbf{k}) - \cos(\mathbf{k})]$$

$$\Delta Z = 0$$

Gleichungen 3-1: Berechnung der Strahlabweichungen [BALTSAVIAS; 1999a]

Wird nun von einer Orientierungsungenauigkeit von $0,01^\circ$ und einer Flughöhe von 900 m ausgegangen, und nimmt man weiterhin an, daß $\mathbf{k} = 0$ ist, ergibt sich für den Rand für $\Delta \mathbf{w}$ ein Höhenfehler von 2 cm und ein maximaler Lagefehler in Y-Richtung von 16 cm. Für $\Delta \mathbf{y}$ ist der Höhenfehler vernachlässigbar klein und der Lagefehler beträgt wieder 16 cm, diesmal in X-Richtung. Für $\Delta \mathbf{k}$ berechnet sich der Fehler in X-Richtung zu 2 cm, in Y-Richtung ist er zu vernachlässigen.

3.3.4 Koordinatentransformation

Die Koordinaten der Referenzstation wurden aus dem Landeskoordinatensystem unter Berücksichtigung der Geoidundulation ins WGS84 umgewandelt, wofür die in Deutschland gebräuchlichen Standardparameter verwendet wurden.

ΔX	582,0 m
ΔY	105,0 m
ΔZ	414,0 m
m	$8,3 * 10^{-6}$
ω	$-2,8889^\circ * 10^{-4}$
φ	$-9,72222^\circ * 10^{-5}$
κ	$8,5556^\circ * 10^{-4}$

Tabelle 3-1: Standardparameter WGS84 für Deutschland

Nachdem die Polarkoordinaten der aufgenommenen Punkte ebenfalls in kartesische Koordinaten im WGS84 umgewandelt worden waren, konnten zunächst vorläufige Streifen eines digitalen Höhenmodells (DHM) erstellt werden, die dann einer Blockausgleichung zugeführt wurden. Das Ergebnis wurde schließlich wieder in Landeskoordinaten zurückgeführt. Die nun vorliegenden Daten wurden in ein 1 m-Raster gebracht.

Bei der Kontrolle mithilfe von Referenzpunkten im Bereich Blumenthal/Haard wurde eine mittlere Abweichung der Höhenwerte von -1,35 m festgestellt, die als Höhenkorrektur (Offset) an das gesamte Höhenmodell angebracht wurde.

Die Lage wurde anhand einer eingescannten DGK5 überprüft, was eine mittlere Abweichung von -2,1 m beim Rechtswert und -1,3 m beim Hochwert ergab. Diese Abweichungen wurden ebenfalls als Offset an das Modell angebracht.

4 Analyse der Toposys-Daten

In diesem Abschnitt soll das Digitale Oberflächenmodell (Digital Surface Model, DSM) untersucht werden und das Filterungsergebnis der Firma Toposys anhand des Vergleichs zwischen DSM und Geländemodell (Digital Terrain Model, DTM) analysiert werden.

Das DSM wurde von der Firma Toposys aus den Rohdaten der Befliegung berechnet. Aus den vorliegenden 4 - 5 Höhenpunkten, die pro Quadratmeter zur Verfügung standen, wurde ein 1 m - Raster erstellt. Dabei fand unter spezieller Berücksichtigung der tiefsten Werte eine Auswahl bzw. Zusammenfassung der Höhenwerte statt. Da, wie bereits dargelegt, die Verteilungsgeometrie der Punkte einen Abstand in Flugrichtung von etwa 11 cm und quer zur Flugrichtung von 1,70 m vorgibt, ist deutlich zu erkennen, daß diese Verteilung nicht optimal für die Erstellung eines Rasters von 1 m Seitenlänge ist. Bereits in diesem Schritt fand also eine erhebliche Datenreduktion, aber auch eine erste Interpolation statt. Der für die Interpolation gewählte Ansatz ist nicht bekannt. Anschließend wurden grob abweichende und offensichtlich fehlerhafte Höhenwerte entfernt. Flächen, die kein ausreichendes Signal reflektierten, wurden nicht gefüllt. Das war vor allem auf Wasserflächen, aber auch teilweise an Hauswänden der Fall. Außerdem entstehen diese Datenlücken auch vermehrt in Bereichen starker Bewaldung, was deutlich im südlichen Kerngebiet zum Tragen kommt. Das so erstellte DSM stand als Grundlage für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Es wurde zur Beurteilung des von Toposys erstellten DTM mit diesem verglichen.

4.1 Nördliches Kerngebiet

4.1.1 Datenlöcher

Das rechteckige Bild des nördlichen Kerngebietes umfaßt eine Fläche von 3.547.500 Pixeln, entsprechend einer Fläche von ~3,5 Millionen Quadratmeter. Da das Kerngebiet jedoch über das Scangebiet hinausragt, bleibt nur eine Fläche von 3.005.522 Pixeln, die innerhalb des Gebietes liegen. Nur dieses Gebiet wird bei der weiteren Untersuchung berücksichtigt. Es gibt in diesem

Gebiet eine Gesamtzahl von 102.382 Pixeln, die aufgrund eines ungenügenden Echos keine Daten enthalten. Diese Datenlücken verteilen sich auf 2.594 Einzelflächen. Die

Flächen der Datenlücken	[Pixel]	[%] der Gesamtfläche	[%] der berücksichtigten Fläche
Fläche nördliches Kerngebiet	3.547.500	100	
Berücksichtigte Fläche	3.005.522	84,72	100
Datenlücken (innerhalb ber. Fläche), DSM	102.382	2,89	3,41
Datenlücken (innerhalb ber. Fläche), DTM	89.527	2,52	2,98
Anzahl der Datenlücken	[]		
Anzahl schwarzer Flächen DSM, (innerhalb ber. Fläche)	2.594		
Anzahl schwarzer Flächen DTM, (innerhalb ber. Fläche)	108		

Tabelle 4-1: Statistik der Datenlöcher für nördliches Kerngebiet

Größenverteilung dieser Lücken ist in **Diagramm 4-1** verdeutlicht. Es liegen also für das nördliche Kerngebiet Daten für 2.903.140 Pixel vor. Beim DTM hingegen sind 2.915.995 Pixel mit Daten belegt, 12.855 mehr als im DSM. Das zeigt, daß bei der Bearbeitung nicht nur gefilterte Werte aufgefüllt werden, sondern auch Flächen, für die kein Signal vorlag, denn in diesem Bild gibt es nur noch 179 Flächen ohne Werte. Die Größenverteilung der Lücken nach dem Filtern ist **Diagramm 4-2** zu entnehmen.

Nicht gefüllt wurden vor allem die großen Flächen, die auf ein fehlendes Signal aufgrund von Wasseroberflächen zurückzuführen sind. Dies ist der Fall beim Weser-Datteln-Kanal und bei der Lippe. Ebenfalls nicht gefüllt wurde die Wasseroberfläche in einem Klärbecken. Aber auch kleinere Flächen wurden zum Teil nicht gefüllt. Hierunter sind 68 Flächen, die nur ein Pixel groß sind, 15 Flächen à 2 Pixel und jeweils 2 Flächen von 3 bzw. 4 Pixeln Größe. Nach welchem Kriterium die im DSM vorliegenden Datenlöcher gefüllt werden ist daher nicht einsichtig.

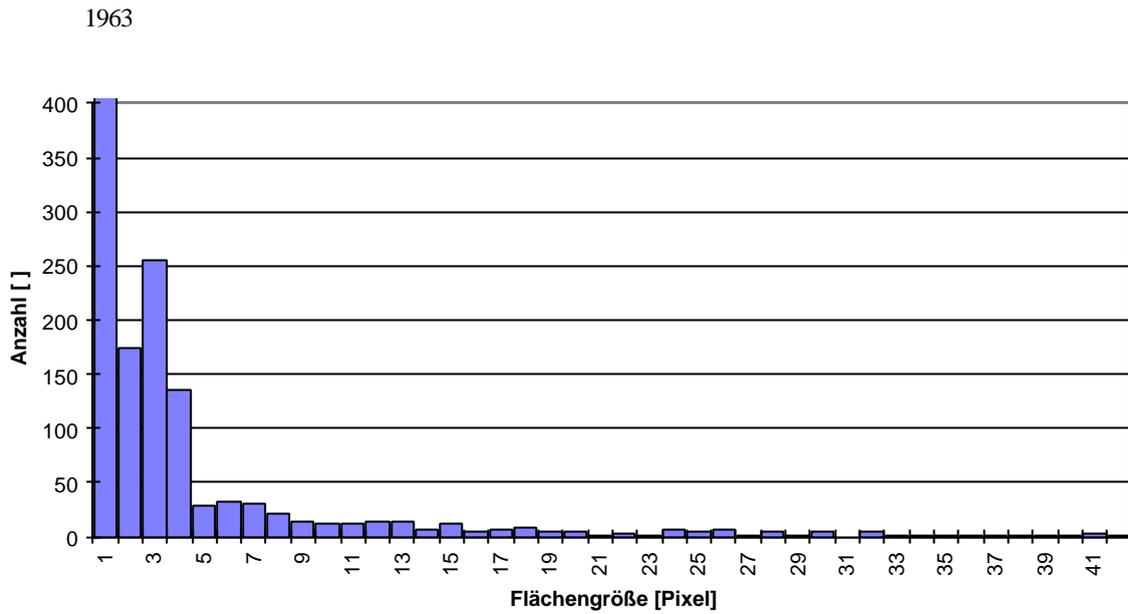


Diagramm 4-1: Größenverteilung der Datenlücken DSM, nördliches Kerngebiet

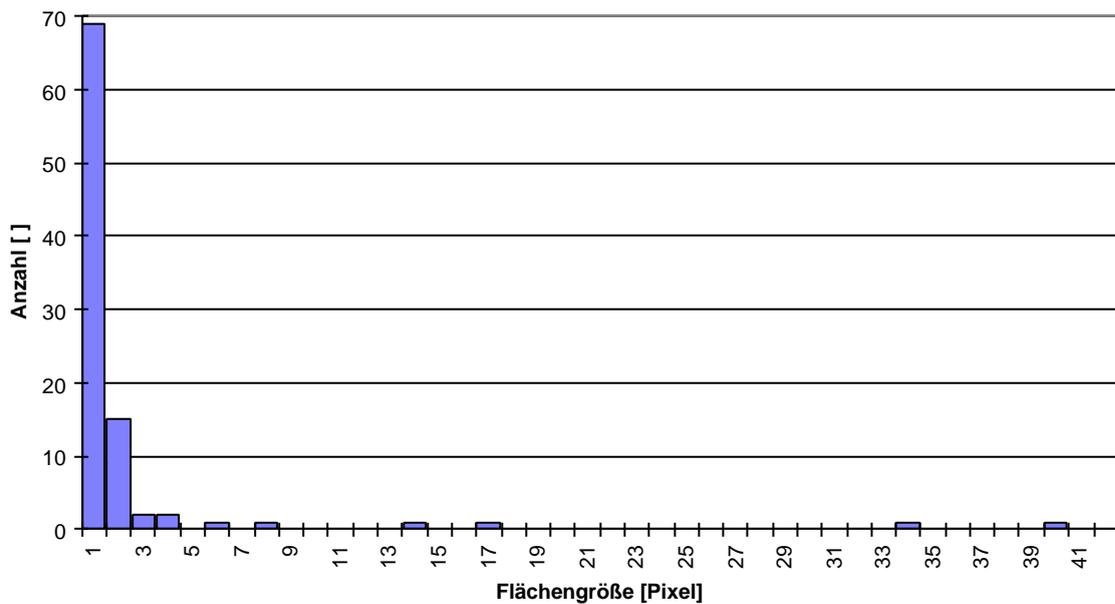


Diagramm 4-2: Größenverteilung der Datenlücken DTM, nördliches Kerngebiet

4.1.2 Verteilung der Höhendifferenzen

Zum Vergleich von DSM und DTM wurden die Grauwertbilder der beiden Modelle subtrahiert (DSM-DTM) und das Ergebnisbild mittels Schwellwertoperation (Threshold) analysiert.

Abbildung 4-1 zeigt das Differenzbild zwischen DTM und DSM. Berücksichtigt wurden aus-

schließlich Werte, für die sowohl im DSM wie auch im DTM Werte vorlagen, d.h. Datenlöcher im DSM wurden beim Vergleich ausgespart.



Abbildung 4-1: Grauwertbild Differenzen DSM - DTM

Die Höhendifferenzen wurden in Klassen der Breite 1 m eingeteilt und die Häufigkeiten wurden errechnet. Die Verteilung der Höhendifferenzen ist in **Diagramm 4-3** wiedergegeben.

Das Intervall, das die Werte von größer -0,5 bis kleiner gleich 0,5 umfaßt, enthält mit großem Abstand die meisten Werte (94,70%). In diesem Intervall sind die Werte enthalten, die gar nicht verändert wurden, da sie als Bodenpunkte identifiziert wurden (94,48%). Nur 0,71% der Werte sind kleiner als 0, d.h. sie wurden im DTM angehoben. Die Verteilung der übrigen Werte läßt keine besonders auffälligen Wertbereiche erkennen. Die Ursache dafür mag in der gemischten Charakteristik des Geländes liegen, denn Siedlungsgebiete unterschiedlicher Haushöhen, Bewaldung unterschiedlicher Vegetationshöhen und freies Gelände sind gleichermaßen vorhanden. Die Häufigkeit der Höhendifferenzen nimmt mit zunehmender Größe ab.

94,70

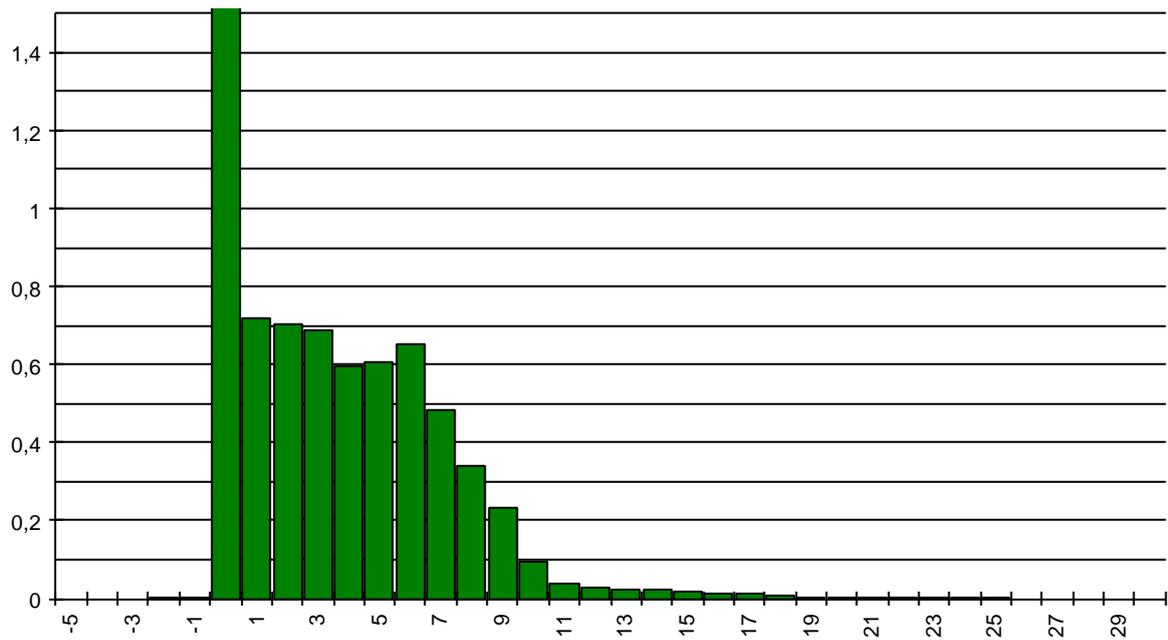


Diagramm 4-3: Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen, nördliches Kerngebiet

4.2 Südliches Kerngebiet

4.2.1 Datenlöcher

Flächen der Datenlücken	[Pixel]	[%] der Gesamtfläche
Fläche südliches Kerngebiet	2.000.000	100
Schwarze Fläche DSM	10.008	0,50
Schwarze Fläche DTM	207	0,01
Anzahl der Datenlücken	[]	
Anzahl schwarzer Flächen DSM	6727	
Anzahl schwarzer Flächen DTM	33	

Tabelle 4-2: Statistik der Datenlöcher, südliches Kerngebiet

Das südliche Kerngebiet liegt im Gegensatz zum nördlichen vollständig innerhalb des gescannten Bereiches. Mit seiner Abmessung von 1600x2000 m enthält es potentiell 2 Millionen Pixel. Von diesen sind 10.008 nicht mit Werten besetzt. Im Gegensatz zum nördlichen Kerngebiet herrschen hier Waldgebiete vor, Häuser sind die Ausnahme. Daher sind die Datenlücken auf eine große Zahl kleiner Flächen verteilt (siehe **Diagramm 4-4**). Dies zeigt sich bereits daran, daß die fehlenden Daten auf 6.727 Einzelflächen verteilt sind. Im Vergleich zum nördlichen Kerngebiet verteilen sich nur ca. ein Zehntel so viele Pixel ohne Höhenwerte auf etwa 3 mal so viele Flächen. Im DTM befinden sich wie beim nördlichen Kerngebiet noch ungefüllte Datenlücken. Wie dort kommen jedoch auch hier noch Lücken von geringer Größe (ab 1 Pixel) vor (**Diagramm 4-5**).

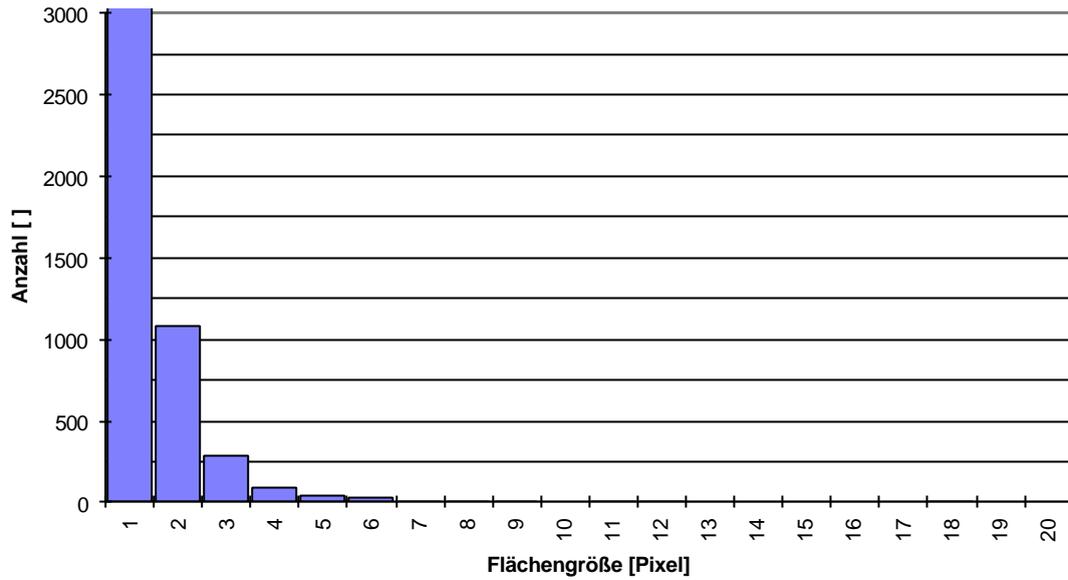


Diagramm 4-4: Größenverteilung der Datenlücken DSM, südliches Kerngebiet

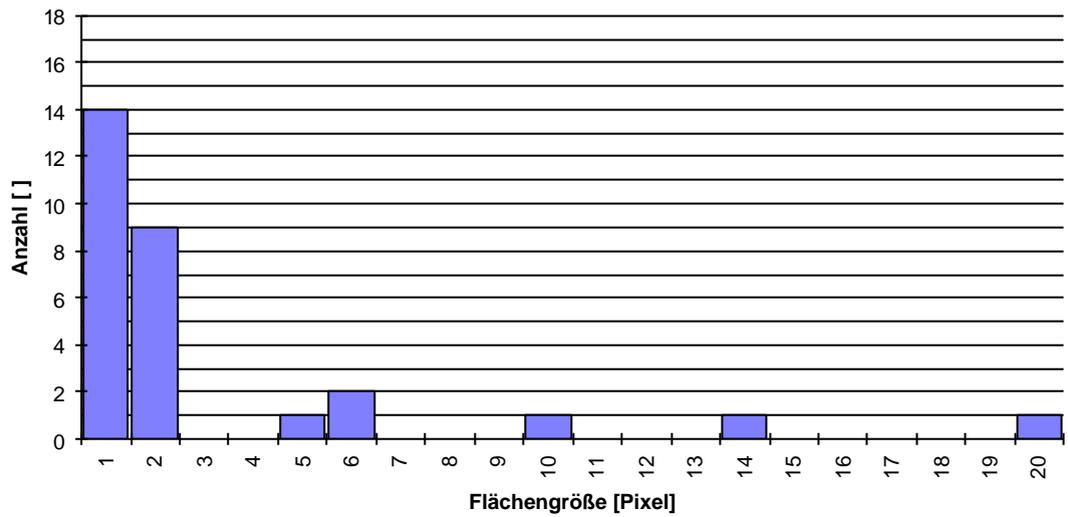


Diagramm 4-5: Größenverteilung der Datenlücken DTM, südliches Kerngebiet

4.2.2 Verteilung der Höhendifferenzen

Auch für das südliche Kerngebiet wurde das Grauwertbild des DTM von dem des DSM subtrahiert. Das Differenzenbild ist in **Abbildung 4-2: Differenzenbild südliches Kerngebiet**

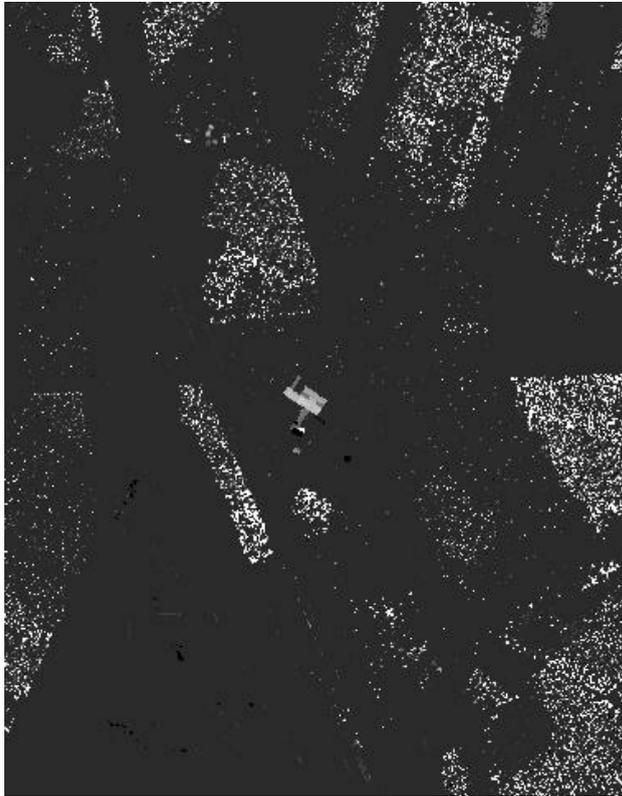


Abbildung 4-2: *Differenzenbild südliches Kerngebiet*

dargestellt. Das Histogramm der Höhendifferenzen DSM-DTM ist in **Diagramm 4-6** wiedergegeben. Auch hier liegt wieder, wie beim nördlichen Kerngebiet, der mit Abstand größte Anteil der Differenzen im Intervall von größer $-0,5$ bis $0,5$ (93,38%). Allein 93,20% entfallen auf unveränderte Werte, also auf die Differenz 0.

Im Gegensatz zum nördlichen Kerngebiet, weist ein zweites Maximum auf, und zwar im Bereich 16-17 m. Da das südliche Kerngebiet zum großen Teil von Waldflächen bedeckt ist und Gebäude hier die Ausnahme bilden, kann dieser Bereich der Höhendifferenzen als charakteristische Baumhöhe interpretiert werden. Die Werte, die um diesen Bereich streuen, stellen Baumhöhen dar, die von dieser meistvertretenen Höhe abweichen. Der Differenzenbereich nahe 0 kann einen niedrigeren Vegetationshorizont darstellen, der durch Messungen entsteht, die nicht ganz bis auf den Boden gelangen, sondern vom Unterholz reflektiert werden.

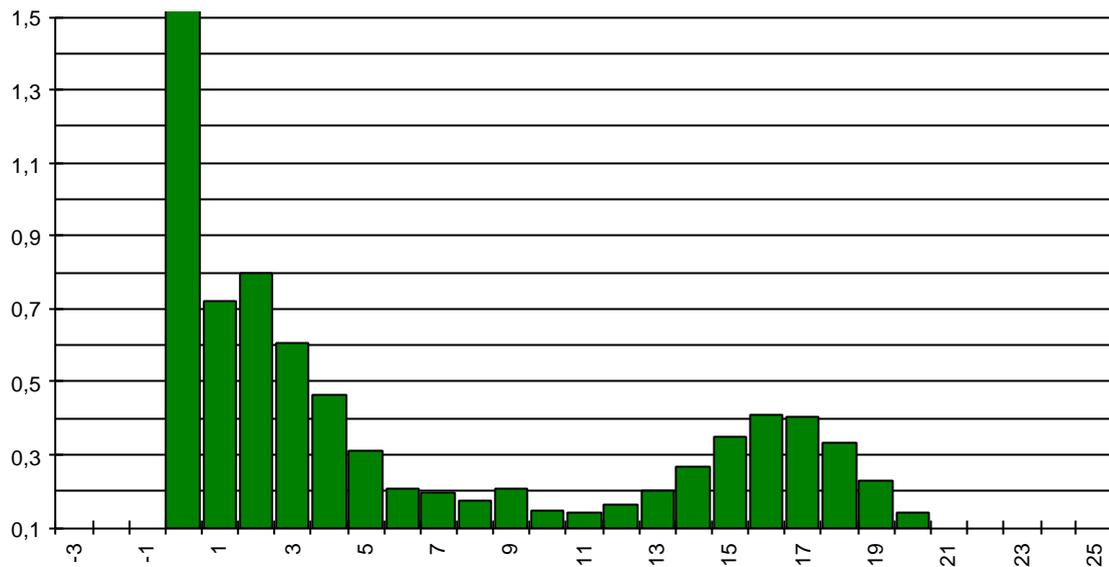


Diagramm 4-6: Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen, südliches Kerngebiet

4.3 Beurteilung der Toposys-Filterung

Bei der Analyse des von Toposys durch die Filterung erzeugte Digitale Geländemodells (DTM) zeigt sich das allgemeine Problem bei der automatischen Trennung von Bodenpunkten und auf Gebäuden oder Bäumen liegenden, nicht zum Boden gehörenden Punkten. Da bodennahe Vegetation ohne vorherige Kenntnis der Topographie nicht eindeutig von einer möglichen Geländerauhigkeit unterschieden werden kann, wird die Empfindlichkeit des Filterungsalgorithmus so bestimmt, daß Bodenpunkte möglichst nicht fälschlicherweise entfernt werden, manche niedrigen Vegetationshöhen jedoch auch erhalten bleiben.

Unproblematisch ist hingegen die Entfernung großer Höhenabweichungen. Auch Gebäude werden korrekt entfernt. Dabei tritt das Problem auf, daß die Randpunkte des ausgeschnittenen Bereichs nicht gleicher Höhe sind. Wie später bei der Füllung der Lücken durch den selbstentwickelten Algorithmus festgestellt wird, verwendet Toposys zur Füllung offensichtlich beim Auffüllen ausgefilterter Bereiche eine lineare Interpolation. Daher wird nebeneinander von verschiedenen hohen Punkten interpoliert, was eine Gitterstruktur der gefüllten Fläche zur Folge hat. Diese wird nicht geglättet oder der Umgebung angepaßt und wirkt daher unnatürlich.

Problematisch ist die Beurteilung innerhalb von Waldgebieten. Zum einen ist hier die Zahl der Messungen, die den Boden erreicht haben geringer als im unbewaldeten Gebiet, was durch die Technik der Datengewinnung bedingt ist. Zum anderen streuen die Punkte in ihrer Höhenverteilung sehr stark. Die Baumkronen lassen sich zwar eindeutig identifizieren, aber die Entscheidung, welcher Punkt wirklich auf dem Boden liegt und welcher eventuell einige dm höher auf einem anderen Vegetationshorizont, ist nicht eindeutig zu klären. Eine starke Gewichtung der niedrigsten Punkte, wie von Toposys durchgeführt, ist für das Ergebnis von entscheidender Bedeutung. Die Geländeoberfläche kann zwar besser approximiert werden als die unter Gebäuden, jedoch bleibt sie auch hier in einem nicht geringen Ausmaß hypothetisch.

Faßt man das Ergebnis zusammen, so ist das von Toposys erstellte DTM in sich schlüssig und zeigt eine durchaus wahrscheinliche gefilterte Oberfläche. In den angesprochenen Zonen zeigen sich die Schwächen einer weitgehend automatischen Bearbeitung eines Datensatzes. Hier ist offensichtlich abzuwägen, welcher manuelle Bearbeitungsaufwand für die Anwendung, für die ein DTM erstellt wird, angemessen ist.

5 Kontrolle durch photogrammetrische Messungen

Im folgenden sollen die von Toposys mithilfe des Laserscanners ermittelten Höhendaten mit photogrammetrisch gemessenen Höhendaten verglichen werden. Da dies bereits ausführlich in der eingangs erwähnten Diplomarbeit geschehen ist [KOCH; 1999], sollen die dort festgestellten Ergebnisse im folgenden nur zusammengefaßt werden.

Die photogrammetrische Befliegung fand im Jahr 1996 statt. Die erreichbare Höhengenaugigkeit der stereoskopischen Höhenmessung durch den Operateur wurde mit ± 10 cm abgeschätzt, wobei Waldgebiete nicht ausgewertet werden konnten. Die geringere Dichte der so gemessenen Punkte führte dazu, daß das DTM nur in einem 20m - Gitter und teilweise sogar nur in einem 50m - Gitter überprüft werden konnte.

5.1 Berücksichtigung von Senkungserscheinungen

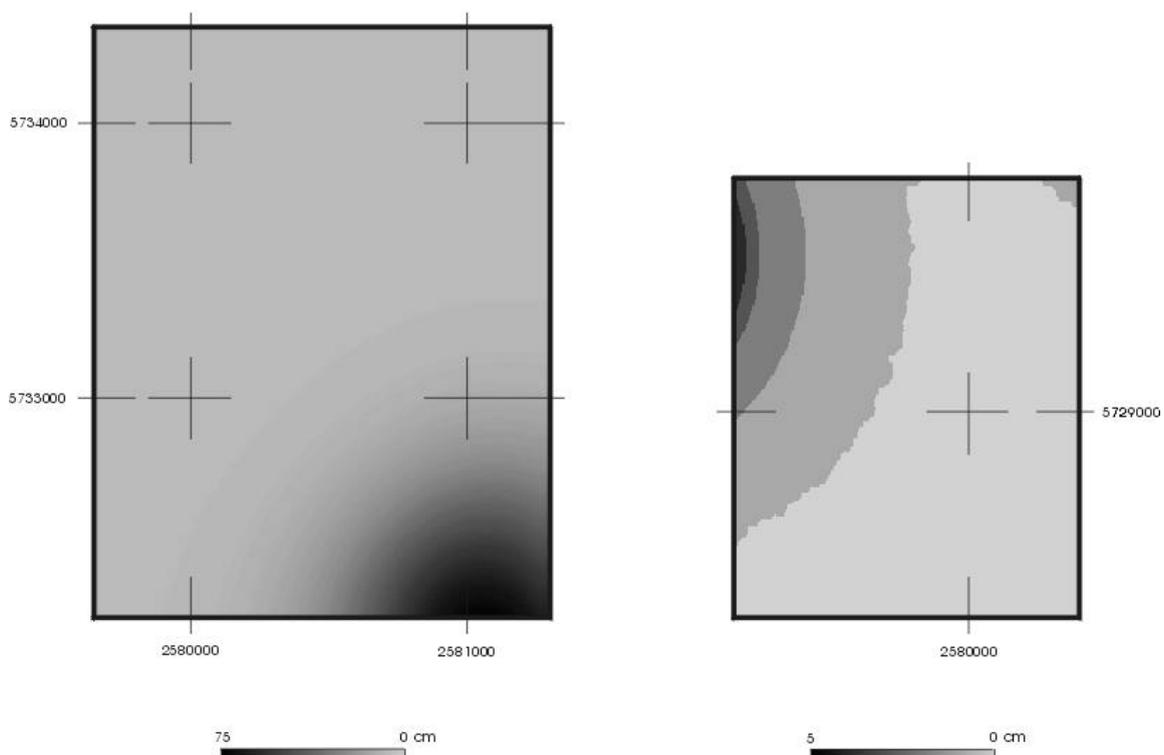


Abbildung 5-1: Auswirkungen des Senkungsmodells auf die Kerngebiete

Bei dem zu untersuchenden Gebiet handelt es sich um ein Senkungsgebiet. Da zwischen photogrammetrischer Befliegung und Aufnahme mittels Laserscanning etwa zwei Jahre lagen, war zu erwarten, daß zwischenzeitlich Senkungen das Gelände beeinflußt hatten. Daher wurde auf das Toposys-DTM ein hypothetisches Senkungsmodell angewandt. Die Verteilung der angebrachten Korrekturen ist in **Abbildung 5-1** zu sehen.

Die maximalen Auswirkungen des Modells liegen im nördlichen Kerngebiet bei 75 cm, im südlichen Kerngebiet bei 5 cm. Toposys wandte dieses Modell selbst auf die Daten an und stellte einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit unregelmäßiger Punktverteilung für die oben genannte Diplomarbeit zur Verfügung.

5.2 Genauigkeitsanalyse

Die geringe Punktdichte des photogrammetrisch erstellten Modells und die Anordnung der senkungsbereinigten Daten ergab eine Menge von 4.794 vergleichbaren Punkten im nördlichen Kerngebiet und 2.290 Punkten im südlichen Kerngebiet, wobei der Vergleich im südlichen Kerngebiet über die Gebietsgrenzen hinausging.

$$dz = z_{Photo} - z_{Laser}$$

Gleichung 5-1: Differenzbildung der Höhendaten

Nach der Differenzbildung gemäß **Gleichung 5-1** ergaben sich die in **Tabelle 5-1** zusammengefaßten mittleren Höhendifferenzen und Quadratmittel. Die Quadratmittel wurden im Sinne einer Standardabweichung berechnet. Da weder DSM noch DTM als Referenz angesehen werden können, werden die Abweichungen jedoch nicht als Standardabweichungen bezeichnet.

Während im nördlichen Kerngebiet mit einem Mittelwert von -1 cm kein erkennbarer systematischer Fehler aufzutreten scheint, ist ein solcher im südlichen Kerngebiet deutlich erkennbar anhand einer mittleren Differenz von +10,5 cm. Die Differenzen selbst sind in beiden Kerngebieten mit guter Näherung normalverteilt. Die Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen ist **Tabelle 5-2** zu entnehmen.

Höhendifferenzen	Punktzahl	Quadratmittel gegen Null [cm]	Mittelwert [cm]	Quadratmittel gegen Mittelwert [cm]
alle Punkte nördliches Gebiet	4.794	$\pm 30,6$	-1,0	$\pm 30,5$
ohne interpolierte Punkte	4.693	$\pm 30,1$	-1,4	$\pm 30,0$
alle Punkte südliches Gebiet	2.290	$\pm 22,4$	+10,5	$\pm 19,8$
ohne interpolierte Punkte	2.261	$\pm 22,4$	+10,4	$\pm 19,8$
ohne extrem negative Differenzen	2.249	$\pm 20,0$	+11,1	$\pm 16,7$

Tabelle 5-1: Mittelwerte und Abweichungen der Höhendifferenzen

nördliches Kerngebiet		südliches Kerngebiet	
dz [cm]	Häufigkeit [%]	dz [cm]	Häufigkeit [%]
< 10	47,74	< 10	54,23
< 20	75,83	< 20 (1σ)	81,13
< 30 (1σ)	87,41	< 40 (2σ)	94,72
< 60 (2σ)	95,40	< 60 (3σ)	97,56
< 90 (3σ)	98,05		

Tabelle 5-2: Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen

Als nächstes wurden untersuchte Punkte ausgeschlossen, die im Toposys-Modell interpoliert worden waren. Dies war im nördlichen Kerngebiet bei 101 Punkten und im südlichen Kerngebiet bei 29 Punkten der Fall. Diese wurden ausgeschlossen, und die Analyse wurde wiederholt. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind ebenfalls in **Tabelle 5-1** wiedergegeben. Der Einfluß der eliminierten Punkte ist aufgrund der geringen Anzahl erwartungsgemäß niedrig. Die Verteilung der ausgeschlossenen Punkte zeigt **Tabelle 5-3**.

nördliches Kerngebiet		südliches Kerngebiet	
dz [cm]	Häufigkeit [Punkte]	dz [cm]	Häufigkeit [Punkte]
< -90	2	< -60	0
< -60	4	< -40	0
< -30	9	< -20	1
> +30	29	> +20	9
> +60	11	> +40	2
> +90	5	> +60	1

Tabelle 5-3: Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen ausgeschlossener Punkte

Im folgenden wurden 12 Punkte aus der Auswertung ausgeschlossen, deren Höhendifferenzen höher als -1 m waren. Diese Punkte konzentrierten sich auf zwei Gebiete im südlichen Kerngebiet. Einer dieser Bereiche liegt nördlich der Halde Brinkfortsheide. Nachdem fehlerhafte Interpolation aufgrund gefilterter Vegetation und Höhenfehler durch Lagefehler ausgeschlossen werden konnten blieb hier als einzige Erklärung eine zwischenzeitliche Aufschüttung.

Der andere Bereich liegt im Bereich des Bergwerksgeländes. Die Gründe für die Abweichungen an dieser Stelle konnten keiner Ursache - Vegetation oder eventuell Aufschüttung - eindeutig zugeordnet werden.

Die Genauigkeitssteigerung, die durch den Ausschluß dieser 12 Punkte erreicht wurde, ist wieder **Tabelle 5-1** zu entnehmen.

Im nördlichen Kerngebiet konnte im Bereich des Klärwerks eine Ansammlung größerer Höhendifferenzen bestimmt werden. Hier gibt es 5 nach **Gleichung 5-1** berechnete Punkte, deren Höhendifferenz über -2 m liegt. Nachdem wiederum eine Verursachung durch einen Lagefehler verworfen wurde, konnte auch hier der Grund für diese Abweichungen nicht geklärt werden.

5.3 Systematische Fehler

Um die Ursache des systematischen Fehlers im südlichen Kerngebiet zu ermitteln, wurde dieses Gebiet zunächst in 11 theoretische Flugstreifen in Ost-West-Richtung aufgeteilt. Die Streifen liegen parallel zu den Scanbereichsgrenzen und sind 220 m breit bei einer Überlappung von 35 m. Die

Ergebnisse zu den einzeln ausgewerteten Streifen sind in **Tabelle 5-4** von Norden nach Süden zusammengefaßt.

Streifennummer	Punktanzahl	Mittelwert [cm]	Standardabweichung gegen Null [cm]	Standardabweichung gegen Mittelwert [cm]
1	5	+26,3	±56,0	±55,2
2	57	+34,2	±38,5	±17,9
3	108	+29,6	±35,1	±18,9
4	222	+12,5	±18,2	±13,2
5	396	+11,3	±16,7	±12,3
6	494	+10,7	±20,7	±17,7
7	499	+7,9	±16,1	±14,1
8	449	+6,3	±15,2	±13,8
9	746	+9,0	±19,1	±16,9
10	120	+16,7	±29,8	±24,8
11	100	+9,6	±15,9	±12,8

Tabelle 5-4: Mittelwerte und Standardabweichungen der theoretischen Flugstreifen, südliches Kerngebiet

Hier fällt ein durchgehender positiver systematischer Fehler auf. Daß dieser auf einer Messung eines höheren Vegetationshorizontes beruht konnte ausgeschlossen werden, da sich für diesen Fall ein Mittelwert kleiner Null ergeben müßte. Eine Verringerung der Differenzen von den äußeren Streifen zu den inneren wurde ebenso festgestellt, wie eine leichte Neigung, die insbesondere in den Streifen 4 bis 8 auffällig ist. Zugeschrieben wurde dies einem systematischen Fehler des INS und der Zusammensetzung der Flugstreifen.

Als nächstes wurde das Gebiet senkrecht zur Befliegungsrichtung in Streifen aufgeteilt. Die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser Streifen sind in **Tabelle 5-5** zusammengefaßt.

Als eine mögliche Ursache für die festgestellte Zunahme des Mittelwertes von Westen nach Osten wurde wieder eine Neigung aufgrund eines INS-Fehlers angegeben. Nicht ausgeschlossen werden konnte aber auch die Möglichkeit, daß dieser Effekt auf einem nicht optimalen Senkungsmodell

basieren könnte, denn die Korrekturen aufgrund dieses Modells nehmen von Westen nach Osten ab.

Streifennummer	Punktanzahl	Mittelwert [cm]	Standardabweichung gegen Null [cm]	Standardabweichung gegen Mittelwert [cm]
I	288	+9,0	±18,9	±16,7
II	614	+8,2	±18,1	±16,1
III	911	+12,0	±18,5	±14,1
IV	356	+14,2	±26,3	±22,2
V	80	+17,4	±22,7	±14,8

Tabelle 5-5: Mittelwerte und Standardabweichungen von Streifen senkrecht zu theoretischen Flugstreifen, südliches Kerngebiet

Schließlich wurden die normierten Kovarianzen der Höhendifferenzen in Abhängigkeit von der Entfernung der verglichenen Punkte gebildet. Bei einer gegen Unendlich gehenden Punktzahl entspräche die Kovarianz der Korrelation. Die Kovarianz beschreibt also, inwieweit die Höhendifferenzen, bezogen auf ihren Abstand, korreliert sind [JACOBSEN; 1997]. Die Entfernungen wurden in Intervalle zerlegt. Es zeigt sich, daß die Kovarianz von 0,39 im engsten Entfernungsbereich langsam abnimmt und dann leicht wieder ansteigt. Die Standardabweichung im Intervall der kleinsten Abstände beträgt ±13,9 cm und nähert sich mit zunehmendem Abstand der absoluten Standardabweichung.

Die so festgestellten lokalen Abhängigkeiten wurden erneut dem mangelhaften Senkungsmodell zugeschrieben.

Um auch das nördliche Kerngebiet lokal zu untersuchen, wurde dieses ebenfalls in theoretische Flugstreifen aufgeteilt und analysiert. Die Ergebnisse sind **Tabelle 5-6** zu entnehmen. Es ist auffällig, daß der Mittelwert von den äußeren Streifen zu den inneren zunimmt. Für den südlichen Bereich des Gebietes könnte eine Begründung in der Topographie zu finden sein, denn dort befinden sich mehrere Felder und unbebaute Flächen. Im Norden trifft dies jedoch nicht zu. Die offensichtliche Neigung des Modells, insbesondere in den Streifen 3 bis 11, wurde erneut einem Restfehler des INS angelastet.

Streifen- nummer	Punktanzahl	Mittelwert [cm]	Standardabweichung gegen Null [cm]	Standardabweichung ge- gen Mittelwert [cm]
1	62	-7,4	±16,7	±15,1
2	182	-9,9	±20,3	±17,8
3	244	-11,2	±27,7	±25,4
4	256	-4,3	±28,0	±27,7
5	219	-1,1	±24,4	±24,5
6	236	+1,6	±21,5	±21,5
7	190	+8,0	±28,3	±27,2
8	241	+9,0	±33,6	±32,5
9	311	+1,5	±27,5	±27,5
10	346	+3,1	±30,4	±30,3
11	276	-3,6	±57,3	±57,3
12	215	-3,0	±34,5	±34,4
13	162	-3,7	±20,7	±20,5
14	64	-1,7	±33,5	±33,7

Tabelle 5-6: Mittelwerte und Standardabweichungen der theoretischen Flugstreifen, nördliches Kerngebiet

Für eine quer zur Flugrichtung liegende Aufteilung in Streifen, wobei nur ein Teil des Kerngebietes abgedeckt ist, ergeben sich die Werte, die in **Tabelle 5-7** aufgelistet sind.

Streifen- nummer	Punktanzahl	Mittelwert [cm]	Standardabweichung gegen Null [cm]	Standardabweichung ge- gen Mittelwert [cm]
I	1841	-0,1	±29,0	±29,0
II	2155	-3,5	±31,1	±31,0
III	670	+1,6	±29,2	±29,2

Tabelle 5-7: Mittelwerte und Standardabweichungen von Streifen senkrecht zu theoretischen Flugstreifen, nördliches Kerngebiet

Die Standardabweichungen der Streifen variieren nur geringfügig, ein signifikanter Trend im Sinne einer Neigung kann hier nicht festgestellt werden. Zu dem Mittelwert von +1,6 cm muß angemerkt werden, daß dieser mit einer geringeren Anzahl von Punkten errechnet wurde.

Bei der Betrachtung der Kovarianzen sinken diese von 0,21 im Intervall der am nächsten zusammen liegenden Punkte in den nachfolgenden Intervallen rasch gegen Null. Die Standardabweichungen zeigen eine leichte Genauigkeitssteigerung gegenüber der allgemeinen Standardabweichung nur in nächster Nachbarschaft.

Eine auffällige Systematik in Bezug auf die geprüften Parameter konnte nicht festgestellt werden.

5.4 *Schlußfolgerung*

Es wurde festgestellt, daß die mit einem Laserscanner erstellten Höhenmodelle dem Einfluß verschiedener systematischer Fehler unterliegen. Zum einen haben Abweichungen in Richtungs- und Positionsbestimmung mittels INS und GPS einen unmittelbaren Einfluß auf die Rohdaten, zum anderen liegen in der Durchdringung bzw. Filterung der bodennahen Vegetation entscheidende Fehlerquellen. Der Lagefehler, der von Toposys anhand eingescannter DGK5 ermittelt wurde, wird mit $\pm 0,9$ m angegeben. Bei entsprechender Geländeneigung kann ein Lagefehler einen nicht unwesentlichen Höhenfehler bedeuten.

Ferner wurde eine Neigung des Gesamtmodells einer einfachen Zusammenfassung mit Höhenausgleich an den Streifenrändern angelastet. Es resultierte daraus die Forderung nach Einbeziehung von Paßinformationen.

Die Genauigkeit der Laserscanner-Höhendaten wurde letztendlich mit 1 - 3 dm angegeben, nach Abspaltung des systematischen Anteils für das nördliche Kerngebiet mit ± 30 cm und für das südliche mit $\pm 16,7$ cm. Auch die dem Vergleich zugrunde liegenden photogrammetrisch erzeugten Höhendaten sind nicht als fehlerfrei anzusehen.

Die von Toposys angegebene Höhengenaugigkeit wurde anhand von 16 Punkten in einem eindeutig identifizierbaren und flachen Bereich berechnet und wurde daher als nicht repräsentativ angesehen.

6 Entwickelte Programme

6.1 HALCON

Das Programmpaket HALCON wurde zunächst zwischen 1988 und 1996 unter dem Namen Horus bis zur Version 4.11 an der Technischen Universität München entwickelt. Das Paket wurde dann von der Münchener Firma MVTec überarbeitet und als kommerzielles Programm HALCON 5.0 vertrieben, in der erstmals auch andere Systeme als Unix-Systeme integriert wurden. Verwendet wurde für die vorgelegte Arbeit die Version 5.1.

HALCON ist eine Anwendung zur Bildanalyse und besteht aus mehreren Komponenten. Ein wesentlicher Bestandteil ist eine Bibliothek von über 750 sogenannten Operatoren. Diese Operatoren stellen in der Bildanalyse und -bearbeitung benötigte Funktionen zur Verfügung, wie beispielsweise Schwellwertoperationen, Histogrammauswertung, frei konfigurierbare Filter für Mittelwertbilder, usw. Man hat die Möglichkeit, Operatoren entweder direkt in C - oder C++ - Programme einzubinden, oder sie mit HDevelop, einem graphischen Interface, direkt zu einem lauffähigen Programm zusammenzufügen. Dieses sogenannte *CAVE* (Computer Aided Vision Engineering) Tool bietet die Möglichkeit, jederzeit während der Programmierung die Auswirkung der jeweilig verwendeten Operatoren und den Ablauf des Programmes zu beobachten. Abschließend kann das erstellte Programm entweder direkt in Verbindung mit HDevelop genutzt werden, oder es wird als C - oder C++ - Quelltext exportiert und kann dann zu einem eigenständigen Programm kompiliert werden.

6.2 Programme

Die zu lösende Aufgabe wurde zur besseren Übersichtlichkeit in vier Schritte gegliedert:

- Generierung von Grauwertbildern aus Punktdaten,
- Filterung von unerwünschten Objekten (Häuser, Bäume, etc.),
- Füllen der entstandenen Lücken,

- Umwandeln der Grauwertbilder in Punktdaten.

Zu jedem dieser Schritte wurde ein Programm entwickelt. Diese für die vorliegende Arbeit erstellten Programme wurden sämtlich mit HALCON realisiert und sollen im folgenden in ihrem Ablauf erläutert werden. Die Quelltexte in HDevelop-Syntax sind im Anhang zu finden. In den folgenden Kapiteln wird die Gesamtheit der entwickelten Programme der Einfachheit halber ebenfalls HALCON genannt. Ist also die Rede von einer Filterung oder Füllung durch HALCON so sind die im folgenden näher beschriebenen, eigenentwickelten Programme gemeint.

6.2.1 Wandeln der Daten in Grauwertbilder

Zunächst wird mit dem Hilfsprogramm "DatenBilder" eine ASCII-Datei mit den gegebenen georeferenzierten Höhendaten eingelesen und in ein Grauwertbild umgewandelt.

Die Daten liegen in der folgenden Form zeilensequentiell vor:

PunktNr.	Rechts-Wert	Hoch-Wert	Höhe
----------	-------------	-----------	------

Die Punktnummer wird beim Einlesen ignoriert. Die Eckkoordinaten des bearbeiteten Gebietes müssen bekannt sein, um die Größe des zu erstellenden Bildes im vorherein festzulegen. Da der Bildursprung bei HALCON in der linken oberen Bildecke mit der Koordinate $(x,y) = (0,0)$ liegt, werden von den eingelesenen Koordinaten die Koordinaten des linken oberen Eckpunktes des Gebietes subtrahiert. Verwendet wird ein spezielles Bildformat HALCONs, das es gestattet, Grauwerte als Fließkomma-Werte abzulegen, in diesem Falle die Höhenwerte mit 2 Nachkommastellen. **Abbildung 6-1** zeigt einen Ausschnitt eines so erzeugten Bildes, der in den folgenden Abbildungen zur Verdeutlichung der Bearbeitung verwendet wird. Das Ergebnisbild wird zur weiteren Verarbeitung abgespeichert.

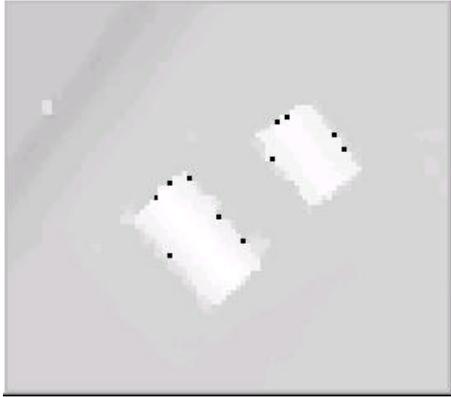


Abbildung 6-1: Ausschnitt eines Grauwertbildes



Abbildung 6-2: Darstellung des Ausschnittes mit LISA

6.2.2 Filtern der Daten

Das nächste Programm "Filtern", das zur Anwendung kommt, analysiert das Grauwertbild und filtert Häuser und Bäume, die einen bestimmten Schwellwert in der Höhendifferenz zu ihrer Umgebung überschreiten, aus dem Bild heraus.

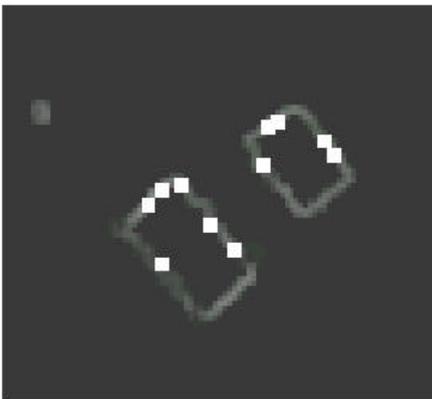


Abbildung 6-3: Bild der Standardabweichung

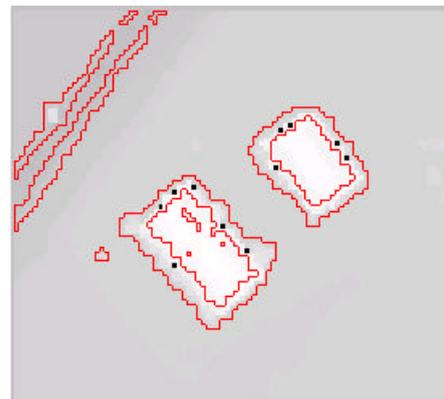


Abbildung 6-4: Markierte Regionen schwellwertüberschreitender Standardabweichungen

Das erstellte Grauwertbild wird zunächst einem Schwellwertoperator (Threshold) übergeben, um Datenlücken, die mit dem Grauwert 0 dargestellt werden, aus dem Gültigkeitsbereich ("Domäne") des Bildes auszuschließen. Der erste Schritt der Analyse besteht in der Anwendung eines Stan-

Standardabweichungsfilters auf das Originalbild (**Abbildung 6-3**). Hierbei wird eine 3x3 Pixel große Maske über das Bild geschoben, die Standardabweichung innerhalb der Maske bestimmt und das Ergebnis in einem neuen Bild im Schwerpunktpixel gespeichert. Nach Anwendung eines weiteren Threshold auf das Bild der Standardabweichungen erhält man nun die Regionen, in denen sich Kanten oder andere Bereiche größerer Höhenvarianzen befinden (**Abbildung 6-4**). Dabei bleiben jedoch Flächen auf Hausdächern unberücksichtigt, da nur Bereiche größere Höhenänderungen markiert werden, in diesem Fall also die Hauskanten. Daher werden als nächstes diese Löcher aufgefüllt (**Abbildung 6-5**). Die jetzt umschlossenen Bereiche umfassen alle für die Filterung interessanten Gebiete (region of interest - ROI). Die Gesamtheit dieser verbundenen Regionen wird nun aufgespalten in Einzelregionen, die nacheinander wie folgt bearbeitet werden.

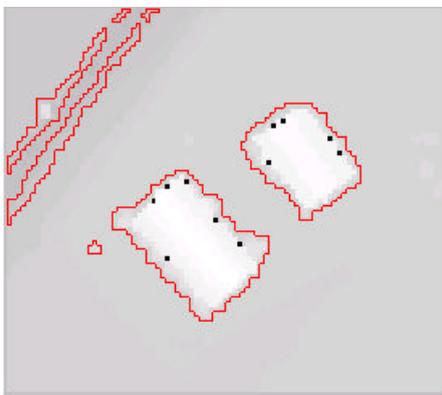


Abbildung 6-5: Aufgefüllte Regionen der Standardabweichung

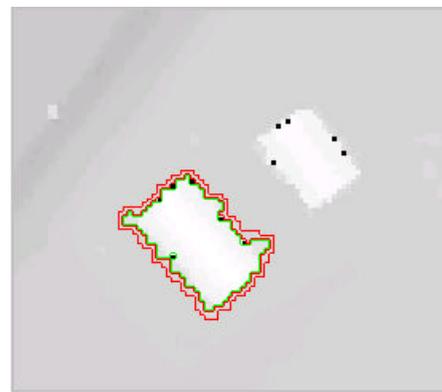


Abbildung 6-6: Automatischer Threshold

Die Region wird ausgeweitet und einem automatischen Threshold übergeben. Dieser segmentiert das Bild mittels eines mehrfachen Thresholding (**Abbildung 6-6**). Dabei wird das relative Histogramm des Eingabebildes einer Gaussglättung unterzogen, wonach die verbleibenden Minima als Schwellen für die Unterteilung dienen. Von diesen Unterregionen wird der jeweilige mittlere Grauwert bestimmt und der zweitniedrigste für den folgenden Schritt gewählt, um den umgebenden Boden auszuschließen. Von den Unterregionen, deren mittlerer Grauwert größer gleich diesem Wert ist, wird nun die flächenmäßig Größte ausgewählt. Im abgebildeten Beispiel ist dies das Haus selbst. Um hierbei eine grobe Fehlinterpretation zu vermeiden, wird eine Grenze für die maximale Größe gesetzt. Dies kann beispielsweise die vorher bestimmte Fläche des größten Gebäudes im Untersuchungsgebiet sein.

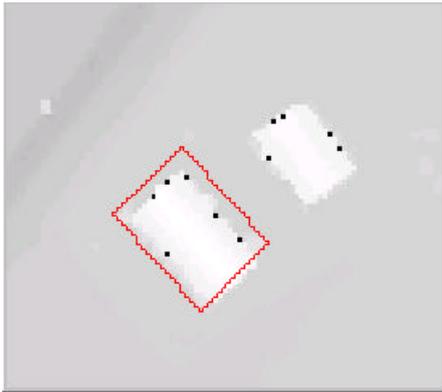


Abbildung 6-7: Bestpassendes Rechteck

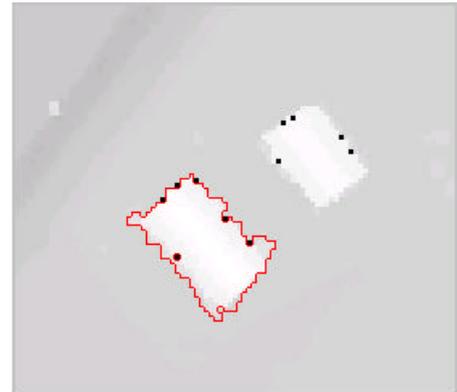


Abbildung 6-8: Zum Ausschneiden markierte Region

Um die gewählte Fläche wird ein bestpassendes, beliebig orientiertes Rechteck gelegt (**Abbildung 6-7**). Der Wert der kürzeren Seite des Rechteckes wird für den nachfolgend angewandten Operator genutzt.

Bei diesem handelt es sich um einen zweifachen Rang-Filter (dual rank). Eine Kreismaske, deren Radius dem eben ermittelten Wert entspricht, wird über das Bild geschoben. Die Grauwerte der in dieser Maske enthaltenen Pixel werden aufsteigend geordnet und der n-größte Grauwert in Prozent ausgewählt. Wird eine niedrige Prozentzahl gewählt, hat dies zur Folge, daß zum einen Außereißer im unteren Grauwertbereich eliminiert werden und zum anderen, z. B. bei Häusern, nur Grauwerte außerhalb der Gebäude berücksichtigt werden. Um dies auch für Punkte, die mittig auf einem Gebäude liegen, zu gewährleisten, ist es notwendig, den Radius größer als den kleinstmöglichen Abstand zu einem Umgebungspunkt zu erhalten. Dies ist mit der vorhergehenden Prozedur sichergestellt. Da es sich um einen zweifachen Rangfilter handelt, wird das Ergebnisbild nochmals nach der gleichen Methode behandelt, diesmal jedoch mit dem Rang 100-n. Das Produkt ist ein je nach Radius des Filters mehr oder weniger stark geglättetes Grauwertbild, dessen Morphologie grob der des Originals ohne die zu filternden Elemente entspricht. Werden nun die Grauwerte des Rangfilterbildes von denen des Originalbildes subtrahiert, so erhält man ein Bild, das die Differenzen der Grauwerte beider Bilder enthält. Wendet man auf dieses Bild wiederum einen Threshold an, dessen Grenzwert vom Benutzer festzusetzen ist, so erhält man nun endgültig die Regionen, die aus dem Originalbild herauszufiltern sind (**Abbildung 6-8**).

Die gefundenen Regionen werden abschließend im Ergebnisbild mit dem Wert Null gefüllt (**Abbildung 6-9, Abbildung 6-10**) und das Bild wird zur weiteren Bearbeitung gesichert.

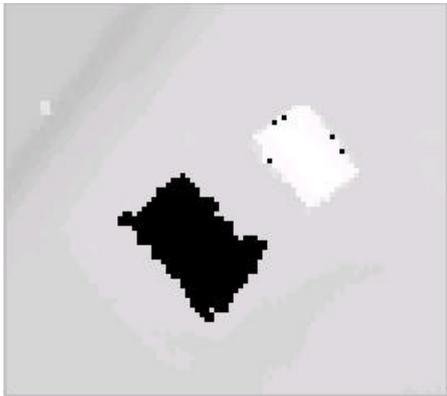


Abbildung 6-9: Ausgeschnittene Region

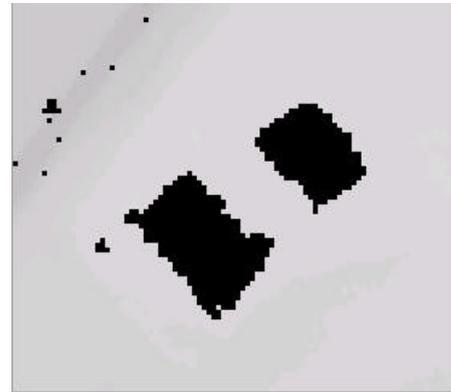


Abbildung 6-10: Ausschnitt aus dem gefilterten Grauwertbild

Bei diesem Algorithmus taucht folgendes Problem auf. Es ist unter HALCON zwar möglich, Bilder, die Grauwerte als Fließkommazahlen enthalten, zu generieren, jedoch lassen sich nicht alle Operatoren auf dieses Bildformat anwenden. Zu diesen Operatoren gehören auch der automatische Threshold und der Dual Rank Filter. Um diese Operatoren nutzen zu können, wird das Originalbild in ein gerundetes ganzzahliges Format umgewandelt, welches im vorliegenden Falle auch nur in Verbindung mit diesen Operatoren verwendet wird. Auf dieses Problem wird in **Kapitel 6.3** näher eingegangen.

6.2.3 Füllen der Datenlöcher

Die zweite Aufgabe, das Füllen der durch die Filterung entstandenen Datenlöcher in dem zu bearbeitenden Gebiet, wird durch das Programm "Füllen" gelöst.

Als einfachste Methode der Füllung wurde hier das lineare Interpolieren in zwei Richtungen gewählt. Es wird von Rand zu Rand der Grauwertlücken jeweils in x - und in y - Richtung interpoliert und der Mittelwert der beiden interpolierten Werte gebildet. Liegt das zu füllende Gebiet am Rand des Bildes, fehlt hierzu ein Grauwert. In diesem Fall wird nur in einer Richtung interpoliert und der dritte zur Verfügung stehende Grauwert wird nach Abstand gewichtet berücksichtigt. Gibt es Ge-

biere, in denen nur ein oder zwei Grauwerte gefunden werden können, ist eine lineare Interpolation hier nicht möglich und ein Füllen auch nicht sinnvoll. Diese Regionen bleiben ungefüllt. Das Ergebnisbild wird nun in den bearbeiteten Regionen mit einem quadratischen Mittelwertfilter der Größe 5x5 geglättet.



Abbildung 6-3: Ausschnitt nach dem Füllen

Problematisch beim Auffüllen von Datenlücken ist, daß die Füllwerte unabhängig von der verwendeten Methode nur vermutete Werte sein können, die sich in das umgebenden Gelände gut einpassen sollten, ohne die Grundcharakteristik des Gebietes wesentlich zu stören. Das lineare Interpolieren soll hier aus folgenden Gründen als ausreichend angesehen werden. Für kleine Gebäude bleibt die aufgefüllte Fläche ohnehin unauffällig, je größer ein Gebäude ist, desto größer ist auch die Wahrscheinlichkeit, daß es in einer relativ flachen Umgebung gebaut wurde. Problematisch könnte dieser Ansatz werden bei Bergkuppen, auf denen Gebäude stehen oder die relativ dicht bewaldet sind. Je spitzer eine Kuppe ist, desto unwahrscheinlicher wird es jedoch, daß auf ihr ein Gebäude errichtet wird. Außerdem tritt auch bereits bei der Filterung das mit zunehmend schrofferem Gelände wachsende Problem auf, natürliche Geländekanten von künstlichen Kanten oder Vegetation zu unterscheiden.

Der zweite zu berücksichtigende Punkt ist die Charakteristik der aufgefüllten Fläche. Da die umgebenden Punkte der entstandenen Lücke von unterschiedlicher Höhe sind, ist bei einer linearen parallelen Interpolation ein Streifenmuster zu erwarten. Bei der Interpolation in zwei zueinander senkrecht stehenden Richtungen ist mit der Entstehung eines Gittermusters zu rechnen. Dieser Effekt soll aufgefangen werden durch die abschließende Bearbeitung mit einem Mittelwertfilter, der

auch die Randpunkte bei der Mittelung mit einbezieht, diese aber nicht verändert. Das entstehende Bild sollte insgesamt harmonischer wirken.

6.2.4 Wandeln der Grauwertbilder in Daten

Der letzte Schritt ist das Zurückwandeln des gefüllten Grauwertbildes in eine ASCII - Datei in der Form der Eingabedatei durch das Programm "BildDaten".

Das gefüllte Bild wird hier spaltenweise Pixel für Pixel nach seinem Grauwert ausgelesen. Diese Werte werden wieder in der Form

PunktNr.	Rechtswert	Hochwert	Höhe
----------	------------	----------	------

in einer Datei abgelegt. Da bei der Bildbearbeitung unter HALCON die Punkte nur unter ihren Bildkoordinaten angesprochen werden, ist die Speicherung von Punktnummern als zusätzliche Information nicht möglich. Um die Punktnummern korrespondierend zu denen der Ausgangsdaten zu erhalten, muß das Programm gegebenenfalls der Numerierungssystematik der DSM-Datei angepaßt werden.

6.3 Probleme des Algorithmus

Wie bereits angesprochen, ist es unter HALCON nicht möglich, Bilder mit Fließkommazahlen einer Bearbeitung mit einem automatischen Threshold oder einem Dual-Rank-Filter zu unterziehen. Diese Beschränkung wurde wegen des sehr hohen zu erwartenden Rechenaufwandes vorgenommen. Zu diesem Punkt ist folgende Überlegung anzustellen.

Es ist nicht unbedingt ein Nachteil, daß die Höhenwerte im Vorfeld mathematisch gerundet werden. Werte um einen ganzzahligen Höhenwert X , die in einem Bereich $X - 0,5\text{m}$ bis $<X + 0,5\text{m}$ liegen werden auf diesen Wert zusammengefaßt. Das bedeutet, daß im ungünstigsten Fall Werte, die nahe beieinander im $0,5\text{ m}$ -Bereich liegen, auf einen Abstand von einem Meter auseinanderge-

zogen werden. Werte, die fast einen Meter auseinanderliegen, sich aber noch im oben angegebenen Bereich befinden, werden zusammengefaßt.

Als Voraussetzung für die Ausfilterung von Punkten soll aber ein Höhenwertsprung von etwa einem Meter angesetzt werden, da es bei einer Punktverteilung in einem 1m-Raster nicht ausgeschlossen werden kann, daß kleinere Geländeformen einen Höhenunterschied von bis zu einem Meter innerhalb einer Gittermasche ausmachen können. Will man auch geringere Höhenabweichungen unter einem Meter ausfiltern, so ist dies mit der gegebenen Implementierung nicht exakt möglich. Als Lösung käme hier eine Streckung des Grauwertbereichs oder eine Neuimplementierung der angesprochenen Operatoren in Frage, die in der Lage wäre, auch Nachkommastellen zu bearbeiten.

Ein weiterer problematischer Punkt ist die Filterung am Bildrand. Wird hier ein Gebäude geschnitten, so ergibt sich bei der Analyse durch das Standardabweichungsbild ein ROI, das nur die sichtbaren Kanten des Gebäudes umfaßt, da beim Schnitt durch den Bildrand der Abfall der Höhenwerte auf der anderen Seite des Gebäudes wegfällt. Beim Schließen der Regionen bleibt daher die Mitte des Gebäudes unberücksichtigt. Die Folge ist, daß zwar die im Bildbereich liegenden Kanten des Gebäudes entfernt werden, jedoch bleibt ein Rest des Gebäudes direkt am Rand ungefiltert. Dies führt beim Füllen der Lücken dazu, daß vom Boden auf die verblieben Gebäudepunkte interpoliert wird, was sich in falschen, stark ansteigenden Höhenwerten niederschlägt.

Um diese fehlerhaften Werte und eventuell einzelne andere, nicht entfernte Punkte nachträglich zu filtern, wurde ein Zwischenschritt eingeführt. Das Ergebnisbild der Füllung wird nochmals, diesmal vollständig in einem Durchgang, mit einem Dual-Rank-Filter behandelt. Das so gefilterte Bild wird von seinem Original subtrahiert. Differenzen, die größer als zwei Meter sind, werden aus dem Bild entfernt, das anschließend nochmals dem Füllprogramm übergeben wird.

Ein bei der Filterung auftretender kritischer Punkt wird von Datenlücken im DSM verursacht. Liegt eine größere Datenlücke direkt zwischen nahe zusammenstehenden Gebäuden, so kann es zu Fehlklassifikationen kommen. Um bei der Anwendung des Dual-Rank-Filters Datenlücken aus der Berücksichtigung auszuschließen werden diese aus der Domäne des Bildes herausgenommen. Sie stellen damit für den Filter einen Bildrand dar. Da der Filter seinen Einzugsbereich am Bildrand spiegelt, kann es dazu kommen, daß ein gegenüberliegendes Gebäude mehrfach bei der Rangbildung berücksichtigt wird. Daher entspricht im ungünstigsten Fall ein zu hoher Wert dem einge-

stellten Rang. Die Folge ist ein Hügel im gefilterten Bild. Bei anschließender Differenzbildung mit dem Originalbild erreichen dann Punkte in der Mitte des Gebäudes nicht den Schwellwert, der zum Ausfiltern führt und das Gebäude wird nicht vollständig gefiltert.

6.4 Wahl der Parameter

Die Parameter, die das Filterungsergebnis beeinflussen, sind im Vorfeld vom Benutzer festzusetzen. Sie sind im folgenden zusammengestellt.

Der erste Parameter, der die Auswahl der zu untersuchenden ROI beeinflusst, ist der auf das Bild der Standardabweichungen angewandte Threshold. Zur Wahl des Schwellwertes wird folgende Überlegung angestellt.

Die Maske zur Berechnung der Standardabweichung hat eine Größe von 3x3 Pixeln, enthält also 9 Pixel. Befindet sich in dieser Maske beispielsweise die Kante eines Hauses von 4 Metern Höhe (4 Pixel mit dem Wert 4, 5 Pixel mit dem Wert 0), so beträgt die Standardabweichung in diesem Fall 1,99 m. Diese soll auf jeden Fall ausgefiltert werden. Andererseits ergibt sich allein aufgrund der Bodenunebenheiten bereits ein Grundwert in der Standardabweichung, der durchaus den Wert von 1 m erreichen kann. Ein idealer Schwellwert liegt also innerhalb dieses Bereiches. Eine genaue Berechnung des Schwellwertes ist jedoch nicht ohne weiteres möglich. Eine Möglichkeit, einen günstigen Schwellwert abzuschätzen, ist es daher, in einem Bereich des Gebietes, das keine Bebauung und Bewaldung aufweist und das für die im Gebiet auftretenden Steigungen repräsentativ ist, probeweise den Mittelwert der Standardabweichungen zu ermitteln. Ist das Ergebnis der Filterung mit diesem Wert nicht befriedigend, so ist diese gegebenenfalls mit einem korrigierten Wert zu wiederholen. Für die Filterung der beiden behandelten Kerngebiete im 1m-Raster wurde der Wert 1,8 m als günstiger Schwellwert gewählt. Für die Filterung im 10m-Raster wurde ein Schwellwert von 2,5m verwendet.

Der nächste zu wählende Parameter ist im Zusammenhang mit dem automatischen Threshold zu wählen. Hier muß für die Gaussglättung des Histogramms der Wert für Sigma übergeben werden. Ein Wert von Null für Sigma würde bedeuten, daß das Histogramm ungeglättet bleibt. Auch hier kann im Voraus kein idealer Wert berechnet werden, weswegen der Wert für Sigma experimentell bestimmt wurde. Für die Filterung im 1m-Raster wurde ein Wert von 0,65 gewählt. Der Wert für

die Filterung im 10m-Raster fällt mit 0,05 deutlich geringer aus, da die zu unterscheidenden Flächen hier wesentlich kleiner sind und auf diesem Raum einen größeren Bereich von Grauwerten abdecken.

Bei der Wahl des Elementes, das den Radius der Dual-Rank-Filterung bestimmt, kann eine Grenze für die Fläche angegeben werden. Damit wird verhindert, daß in Bereichen starker Steigungen große Hangflächen hierfür ausgewählt werden. Die Folge einer solchen Wahl wäre ein sehr großer Radius und damit eine zu starke Glättung. Die Ausfilterung großer Teile dieses Gebietes wäre die Konsequenz.

Der letzte wesentliche Parameter ist beim Anwenden des Thresholds auf die Differenzen zwischen Dual-Rank-Filterung und Originalbild anzugeben. Nach den im vorigen Abschnitt angestellten Überlegungen wurde dieser hier mit einem halben Meter in positiver Richtung angegeben. Es werden also nur Höhen ausgefiltert, die mindestens einen halben Meter über dem Dual-Rank-Bild liegen. Aufgrund der geschilderten Problematik ist eine absolut einheitlich Behandlung der Höhenwerte jedoch leider nicht möglich, die Abweichungen bleiben aber begrenzt.

7 Vergleich der Ergebnisse Toposys - Halcon

Im folgenden wird das mit HALCON erstellte DTM mit dem von Toposys vorliegenden verglichen. Dafür wurde das Grauwertbild des Toposys-DTM von dem mit HALCON erstellten subtrahiert und das Ergebnisbild analysiert. Da im von Toposys angefertigten DTM noch Lücken vorhanden sind, wurde der Vergleich auf die Regionen beschränkt, bei denen in beiden Modellen Höhendaten vorliegen.

7.1 Kerngebiete

7.1.1 Nördliches Kerngebiet

Im nördlichen Kerngebiet lagen für ca 3 Mio. Punkte Höhendaten in beiden Modellen vor. Die Höhendifferenzen wurden in 5 cm breite Intervalle aufgeteilt. Das Intervall 0 reicht dabei von -0,249 cm bis +0,25 cm. Mittelwert und Standardabweichung sind **Tabelle 7-1** zu entnehmen.

	Punktzahl	Mittelwert [cm]	Quadratisches Mittel gegen Null [cm]	Quadratisches Mittel gegen Mittelwert [cm]
Alle Punkte	2.916.011	-3,6	±118,8	±118,8
interpolierte Punkte	158.059	-14,95	±276,7	±276,7

Tabelle 7-1: Mittelwert und Abweichungen der Differenzen, nördliches Kerngebiet

Der Mittelwert über alle Punkte zeigt zunächst, daß die Höhenwerte des HALCON-DTM leicht unter denen des Toposys-DTM liegt. Die sehr hohe Abweichung des quadratischen Mittels ändert sich auch bei Bezug auf den Mittelwert nicht merklich. Die Gründe für diesen sehr hohen Wert sollen im folgenden untersucht werden.

Zunächst wird das Histogramm der Höhendifferenzen betrachtet. Es zeigt, daß die Differenzen ihrer Größe nach normalverteilt sind. Das Maximum liegt hier mit 93,95% eindeutig im Intervall,

das auch den Wert Null enthält. Dies ist zu erwarten, denn allein 2.704.927 Punkte, entsprechend 92,76%, weisen keine Differenz auf, sind also in ihrem Höhenwert identisch. Berücksichtigt man dies, so ergibt sich eine Normalverteilung, die von den negativen

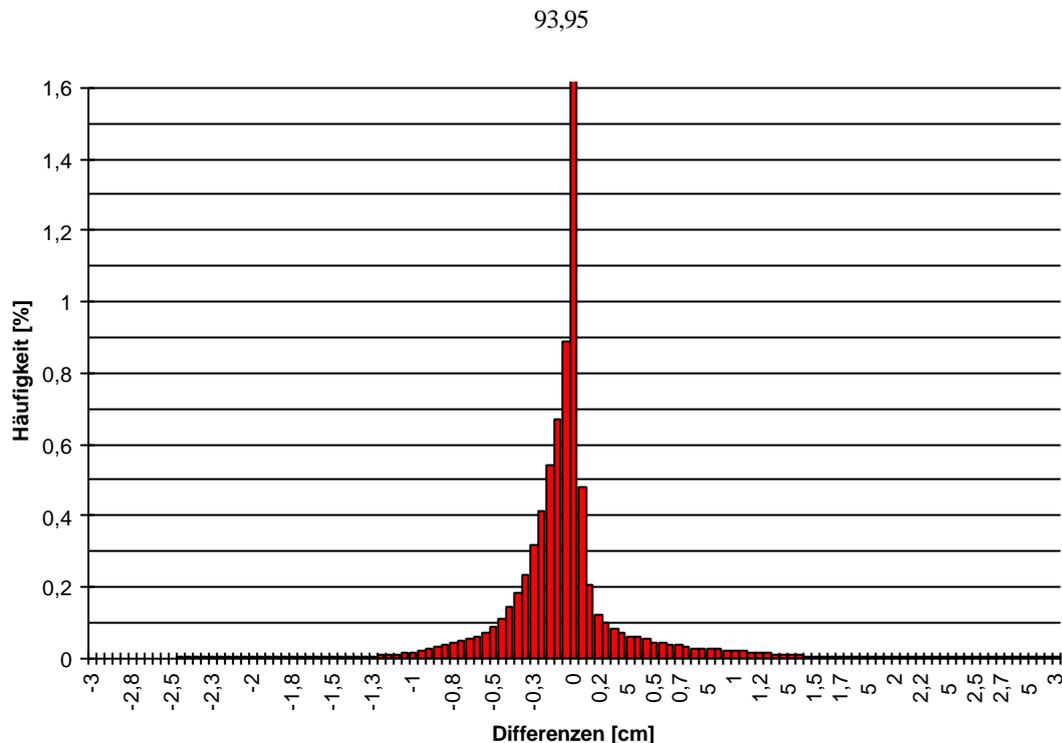


Diagramm 7-1: Differenzen HALCON - Toposys alle Punkte, nördliches Kerngebiet

Werten her langsamer ansteigt als von den positiven, wodurch sich der leicht im Negativen liegende Mittelwert erklärt. Im Histogramm nicht zu erkennen ist jedoch die sehr breite Streuung weniger Differenzwerte. Der größte negative Wert liegt im Intervall -75,10 cm, der größte positive Wert im Intervall +9,00 m. Immerhin 4075 Punkte (0,14%) haben im negativen Bereich eine Differenz die größer als -3 m ist, im positiven Bereich sind es 1675 Punkte (0,06%), deren Differenz größer als +3 m ist. Hier liegt die Ursache des hohen quadratischen Mittels.

Um zu klären, ob diese großen Differenzen durch die unterschiedlichen Filterungsalgorithmen hervorgerufen werden, sollen die betrachteten Höhendifferenzen auf die interpolierten Werte beschränkt werden. Berücksichtigt werden dabei nur Punkte, deren Höhendaten in beiden Modellen interpoliert wurden, also keine Punkte, die mit unveränderten Daten des DSM zu vergleichen wären. Dabei handelt es sich um 158.059 Punkte, das sind 5,42% der Punkte im Differenzbild. Von den Differenzen dieser Punkte liegen 109.791 (69,46%) im negativen Bereich, 48.258 (30,53%)

im positiven Bereich. 10 Höhenwerte sind im HALCON-DTM und im Toposys-DTM gleich. Wie **Tabelle 7-1** zu entnehmen ist, wird der Mittelwert wie auch die Abweichung des Quadratmittels im wesentlichen durch die verschieden interpolierten Punkte bestimmt. Berücksichtigt man die Zahl der Punkte, so zeigt der Mittelwert, daß die durch HALCON interpolierten Punkte systematisch tiefer als die durch Toposys berechneten liegen. Betrachtet man das Histogramm für die interpolierten Werte, so erkennt man die Verteilung der Werte für das gesamte Gebiet wieder. Es fehlen lediglich die Werte ohne Höhendifferenz.

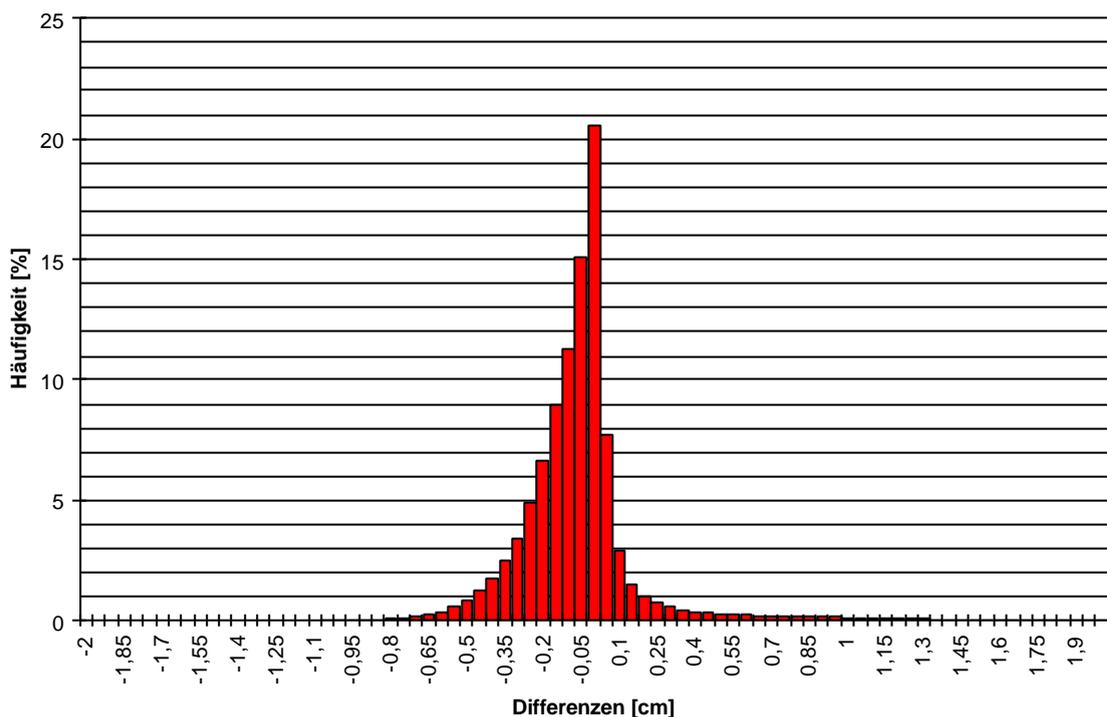


Diagramm 7-2: Differenzen HALCON - Toposys interpolierte Punkte, nördliches Kerngebiet

Um nun zu erklären, wie es zu den sehr unterschiedlichen Werten durch die beiden Filterungen kommt, werden die Verteilungen der Punkte höherer Differenzen im Gebiet betrachtet.

In **Abbildung 7-1** ist die Verteilung der Höhendifferenzen zwischen den interpolierten Werten wiedergegeben, die -2 m in negativer Richtung überschreiten. Zum einen sammeln sich die diese Werte an der Kante des Gebietes zur Scangrenze. Die stark unterschiedlichen Werte resultieren hier aus der unterschiedlichen Filterung und Interpolation von Randgebieten. Weitere Häufungen von hohen Differenzen sind bei der Brücke über den Kanal und der Eisenbahnbrücke über die

Lippe zu finden. Dies rührt daher, daß die Brücken bei der Filterung von Toposys in weiten Teilen erhalten bleiben, bei der Filterung durch HALCON werden die Brücken jedoch vollständig entfernt. Inwieweit die Darstellung der Brücken im Toposys-DTM durch manuelle Nachbearbeitung zustande kam, ist nicht bekannt. Damit hängt auch eine Ansammlung hoher Differenzbeträge am Brückenlager, bzw. Rampenende zusammen.

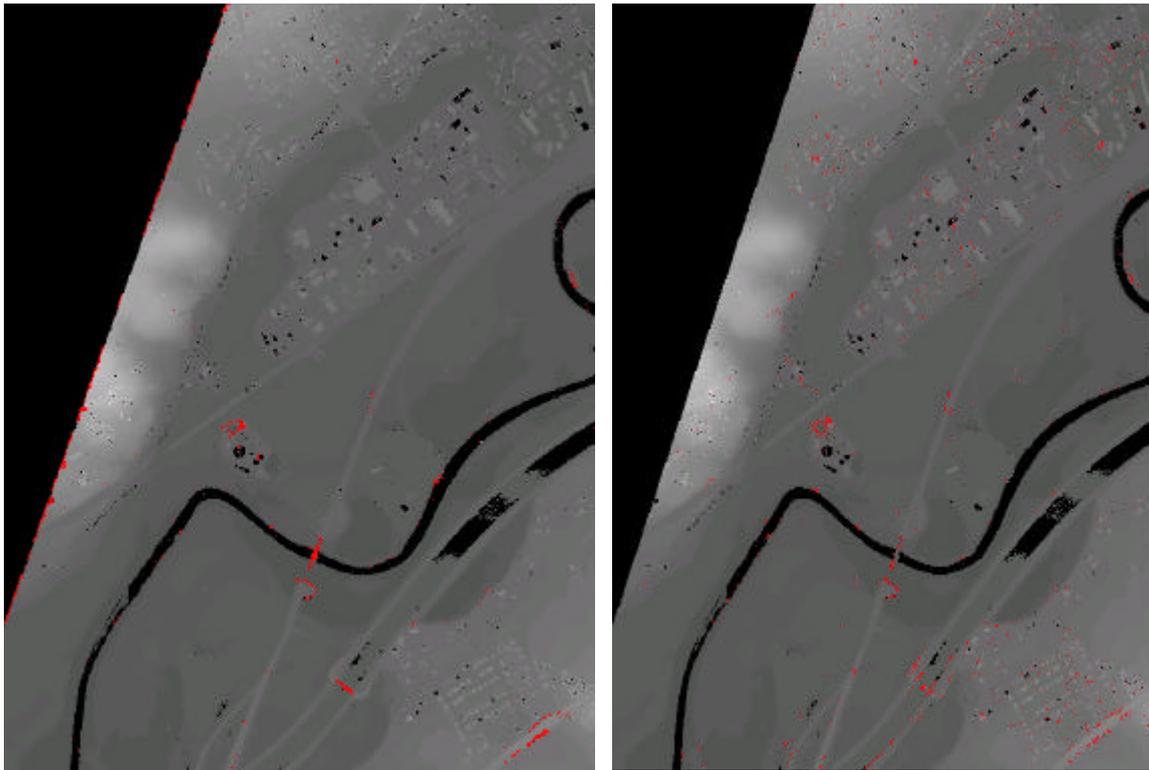


Abbildung 7-1: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall $< -2\text{ m}$, nördliches Kerngebiet

Abbildung 7-2: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall -2 m bis $< -1\text{ m}$, nördliches Kerngebiet

Eine weitere Anhäufung hoher Differenzbeträge findet sich im Bereich des Klärwerks. Hier wurde ein Gebäude von Toposys komplett im DTM belassen, was natürlich zu größeren Höhenwerten im DTM führt. Auch die Ränder der Klärbecken wurden bei Toposys nicht sauber gefiltert. Schließlich ist am Rand der A52 im Südosten des Kerngebietes die Vegetation auf der Seitenrampe unzulänglich und teilweise gar nicht entfernt worden. Auch hier sind größere Differenzen die Konsequenz.

Abbildung 7-2 zeigt die Verteilung der Differenzen in einem Wertebereich von einschließlich -2 m bis kleiner -1 m . Die Verteilung zeigt ähnliche Tendenzen wie die vorherige.

Es zeigt sich, daß die Vegetation in Bereichen starken Gefälles unterschiedlich gefiltert wird. Deutlich wird dies am Bahndamm, an den Fluß- und Kanalböschungen und an der Autobahnrampe. Wieder sind Ansammlungen im Bereich der Brücken und auf dem Gelände des Klärwerks deutlich auszumachen.

Auffällig ist, daß nun auch einzelne Punkte größerer Differenz in den Siedlungsgebieten liegen. Hier kommt der unterschiedliche Filterungsansatz zum Tragen.

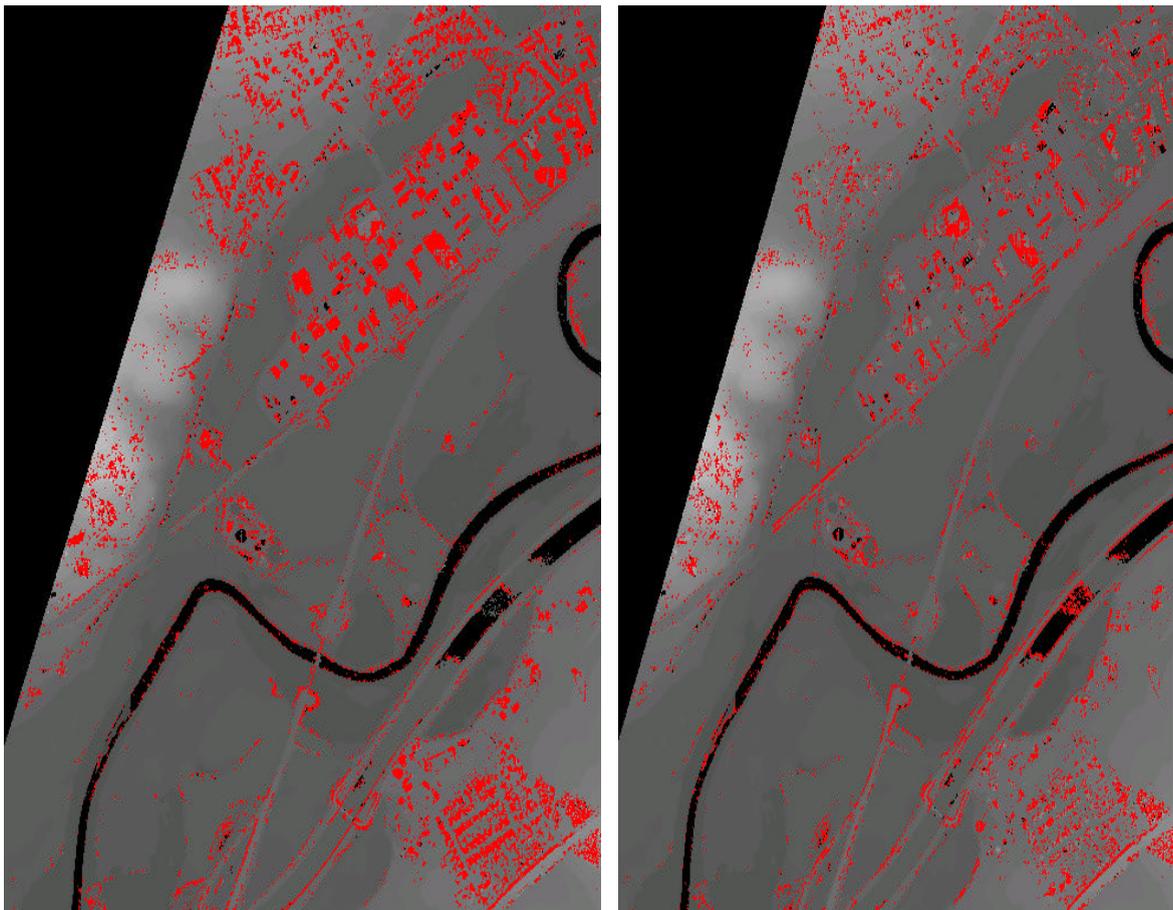


Abbildung 7-3: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall $-1\text{ m bis } < 0\text{ m}$, nördliches Kerngebiet

Abbildung 7-4: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall $> 0\text{ m bis } +1\text{ m}$, nördliches Kerngebiet

In **Abbildung 7-3** sind die Höhendifferenzen dargestellt, die in einem Differenzintervall von -1 m bis kleiner Null liegen. In diesem Intervall liegt der größte Anteil der Punkte, die in dem einen und/oder dem anderen DTM interpoliert wurden. Es zeigt sich auch hier, daß das mit HALCON erstellte DTM tendenziell niedriger liegt als das von Toposys erstellte. Neben den grundsätzlich von Toposys höher interpolierten Füllungen der Gebäude werden im Vergleich zu dem anderen DTM auch zahlreiche Vegetationspunkte anders bewertet und gefiltert.

Es wurde weiterhin festgestellt, daß Toposys, besonders in Siedlungsgebieten, dazu neigt, kleinere Geländeformen zu glätten. So werden einige Kuhlen, die sich im Bereich stärkerer Geländeneigung befinden, teilweise aufgefüllt.

Betrachtet man **Abbildung 7-4**, in dem die Punkte des Intervalls größer Null bis +1 m dargestellt sind, so sieht man den Trend, daß die mit HALCON interpolierten Werte niedriger liegen, bestätigt. Die Dichte der Punkte mit Null-naher Differenz im positiven Bereich ist wesentlich geringer als die im negativen Bereich.

In diesem Intervall sind Gebäudepunkte ebenso vertreten wie Vegetationspunkte, was in den verschiedenen Filterungsalgorithmen begründet liegt.

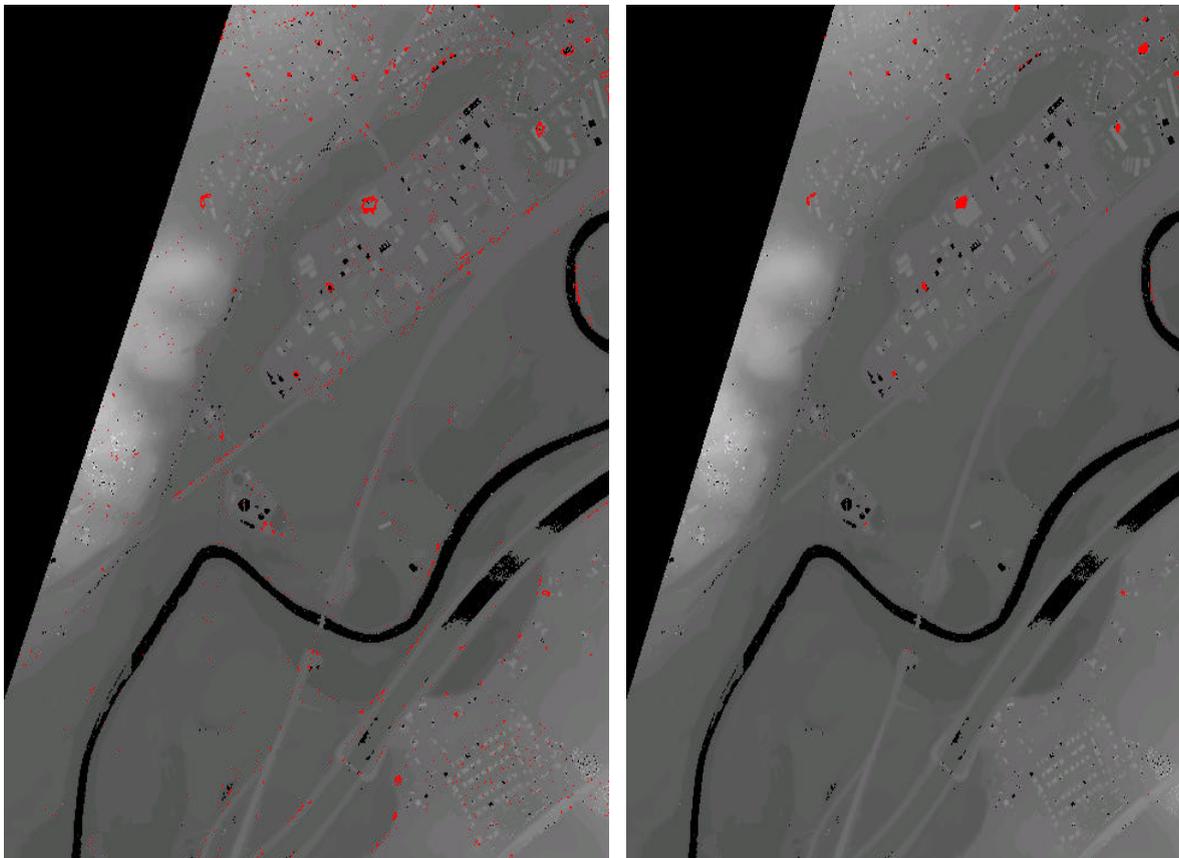


Abbildung 7-5: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall $> +1$ m bis $+2$ m, nördliches Kerngebiet

Abbildung 7-6: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall $> +2$ m, nördliches Kerngebiet

In den Abbildungen, die die Intervalle $>+1$ m bis $+2$ m und $> +2$ m enthalten (**Abbildung 7-5**, **Abbildung 7-6**), kommt zum einen die weniger einebnende Interpolation des HALCON-Algorithmus zum Tragen. Zum anderen zeigt sich hier aber auch der Schwachpunkt dieses Verfahrens, wenn größere Datenlücken in unmittelbarer Umgebung zu filternder Flächen auftreten. Dieses Problem ist zum größten Teil für die Differenzen größer $+2$ m verantwortlich.

Ein anderer Aspekt, der hier seine Auswirkungen zeigt, ist die unvollständige Entfernung der Gebäudeflächen, die durch den Gebietsrand geschnitten werden. Beim Interpolieren wird dann vom umgebenden Boden auf verbliebene Gebäudeteile interpoliert, was natürlich zu falschen Höhenwerten führt.

7.1.2 Südliches Kerngebiet

Das südliche Kerngebiet enthält knapp 2 Mio. Punkte, für die in beiden DTM's Höhendaten vorliegen. Das heißt, daß im Toposys-Modell Datenlücken mit einer Gesamtfläche von 207 Punkten vorhanden sind. Von den Höhendifferenzen sind 116.950 (5,84%) kleiner als Null, 63.523 (3,18%) liegen im positiven Bereich. Bei 1.819.320 Punkten (90,98%) waren die Höhen identisch. In **Tabelle 7-2** sind Mittelwert und Quadratmittel zusammengefaßt.

	Punktzahl	Mittelwert [cm]	Quadratmittel gegen Null [cm]	Quadratmittel gegen Mittelwert [cm]
Alle Punkte	1.999.793	-1,1	$\pm 13,8$	$\pm 13,8$
interpolierte Punkte	140.213	-5,1	$\pm 18,1$	$\pm 18,1$

Tabelle 7-2: Mittelwert und Abweichungen der Differenzen, südliches Kerngebiet

Genau wie im nördlichen Kerngebiet liegen auch hier die Höhenwerte des HALCON-DTM offensichtlich systematisch unter denen von Toposys, wenn auch nicht im gleichen Ausmaß. Wesentlich geringer hingegen fällt die Abweichung des Quadratmittels aus, das sich auch durch Bezug auf den nur geringfügig von Null verschobenen Mittelwert nicht ändert. Die Höhenwerte der beiden Modelle liegen anscheinend näher zusammen als im nördlichen Kerngebiet. Zunächst wird das Histo-

ogramm der Höhendifferenzen betrachtet, das wieder in Intervalle von 5 cm Breite unterteilt ist (Diagramm 7-3).

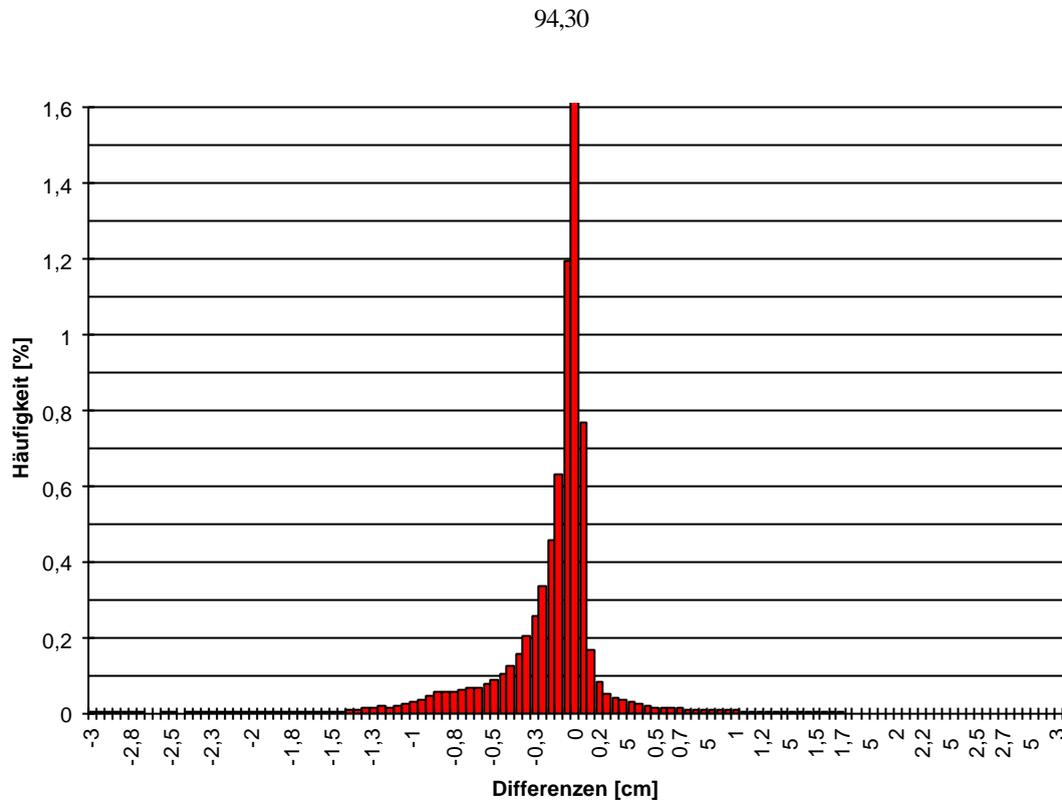


Diagramm 7-3: Differenzen HALCON - Toposys alle Punkte, südliches Kerngebiet

Die Werte sind annähernd normalverteilt. Auch hier liegt das Maximum in dem Intervall, das auch die Null-Differenzen enthält, wobei das Maximum ist leicht in die negative Richtung verschoben ist. Wie schon beim nördlichen Kerngebiet fallen die Werte ins Positive rascher ab als ins Negative. Die Streuung der Höhendifferenzen ist im südlichen Kerngebiet nicht so stark wie im nördlichen, obwohl auch hier der größte negative Wert in das Intervall -20,30 m fällt und der größte positive Wert in das Intervall 8,05 m. Setzt man hier die Grenze von -3 m an, so liegen insgesamt 480 Werte (0,02%) unter dieser Schwelle, 37 Werte (0,00%) sind größer als +3 m.

Auch im südlichen Kerngebiet sollen die in beiden Modellen interpolierten Werte verglichen werden, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Filterungsmethoden zu untersuchen. Die Anzahl der in beiden Modellen durch Interpolation gewonnenen Höhendaten liegt bei 140.213 Punkten, das entspricht 7% der Gesamtpunktzahl im Differenzbild. Von diesen Werten sind 83.590

(59,62%) mit einem negativen Vorzeichen behaftet, 55.428 (39,53%) mit einem positiven. Bei 1.195 Punkten (0,85%) ergeben sich also in beiden Modellen die gleichen Höhenwerte. Mittelwert und Quadratmittel sind **Tabelle 7-2** zu entnehmen.

46,26

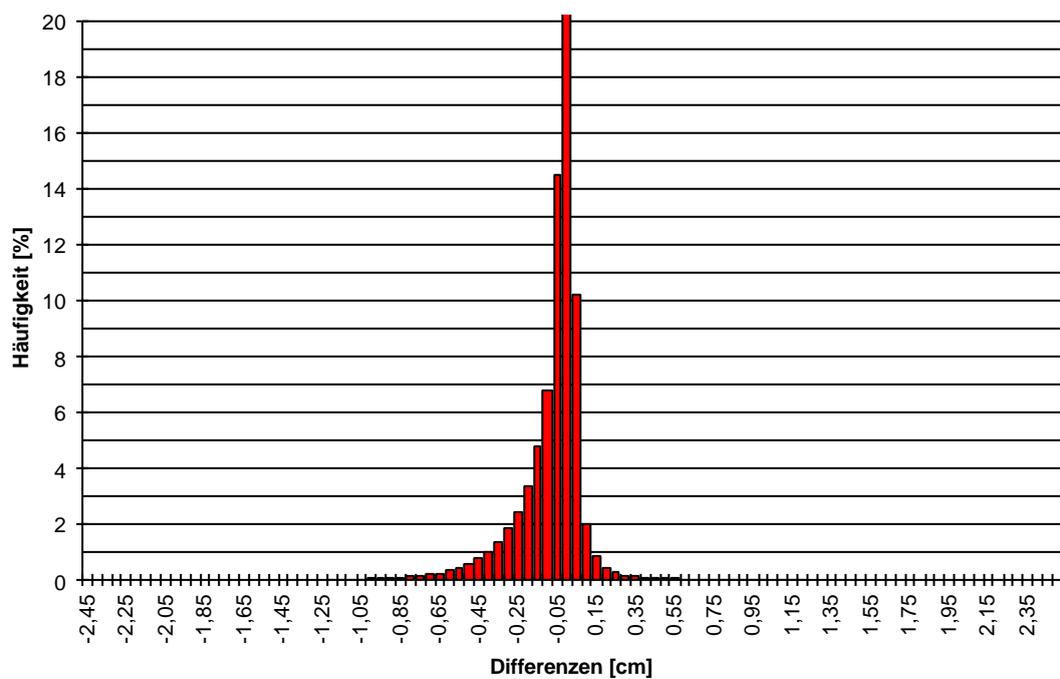


Diagramm 7-4: Differenzen HALCON - Toposys interpolierte Punkte, südliches Kerngebiet

Der Verlauf der Verteilung (**Diagramm 7-4**) ist ähnlich wie der über alle Werte. Bei genauerem Vergleich fällt jedoch auf, daß bei Einbeziehung aller Werte in negativer Richtung eine Kuppe zu finden ist. Die Ursache dafür liegt wahrscheinlich darin, daß Toposys insgesamt weniger Punkte aus dem DSM herausfiltert. Da die bei der Rasterung bereits vorgefilterten Werte an Hauswänden meist nicht sprunghaft auf ihren Maximalwert übergehen, bleibt hier aufgrund der höheren Filterungsschwelle eine "Anrampung" als Rand stehen, die dafür verantwortlich ist.

Um genauere Erkenntnisse darüber zu erlangen, wie es zu den Streuungen kommt, sollen die Höhendifferenzen wieder in ihrer Verteilung analysiert werden.

In **Abbildung 7-7** sind die Punkte, deren Höhendifferenz einen größeren negativen Wert als -2 m aufweist, wieder rot markiert. Die auffälligste Ansammlung solcher Punkte befindet sich im Bereich der Brücke der A43 über die Eisenbahnstrecke. Hier wurden unterschiedlich viele Punkte von Brücke und umliegender Rampe entfernt. Toposys hat hier offensichtlich weniger Punkte der Brücke als Bodenpunkte klassifiziert als das HALCON-Programm. Inwieweit dies automatisch geschehen ist oder durch manuelle Nachbearbeitung erreicht wurde, bleibt ungewiß. Weiterhin werden einige Ausreißer von Toposys nicht entfernt und auch in unmittelbarer Nähe des großen Gebäudes werden einige Punkte nicht herausgefiltert. Ein Problem von Toposys scheint Vegetation auf stark geneigtem Gelände besonders im Bereich von Neigungsänderungen zu sein, wie auf der Halde im Süden sichtbar wird. Dies vor allem im Fußbereich der Halde deutlich.

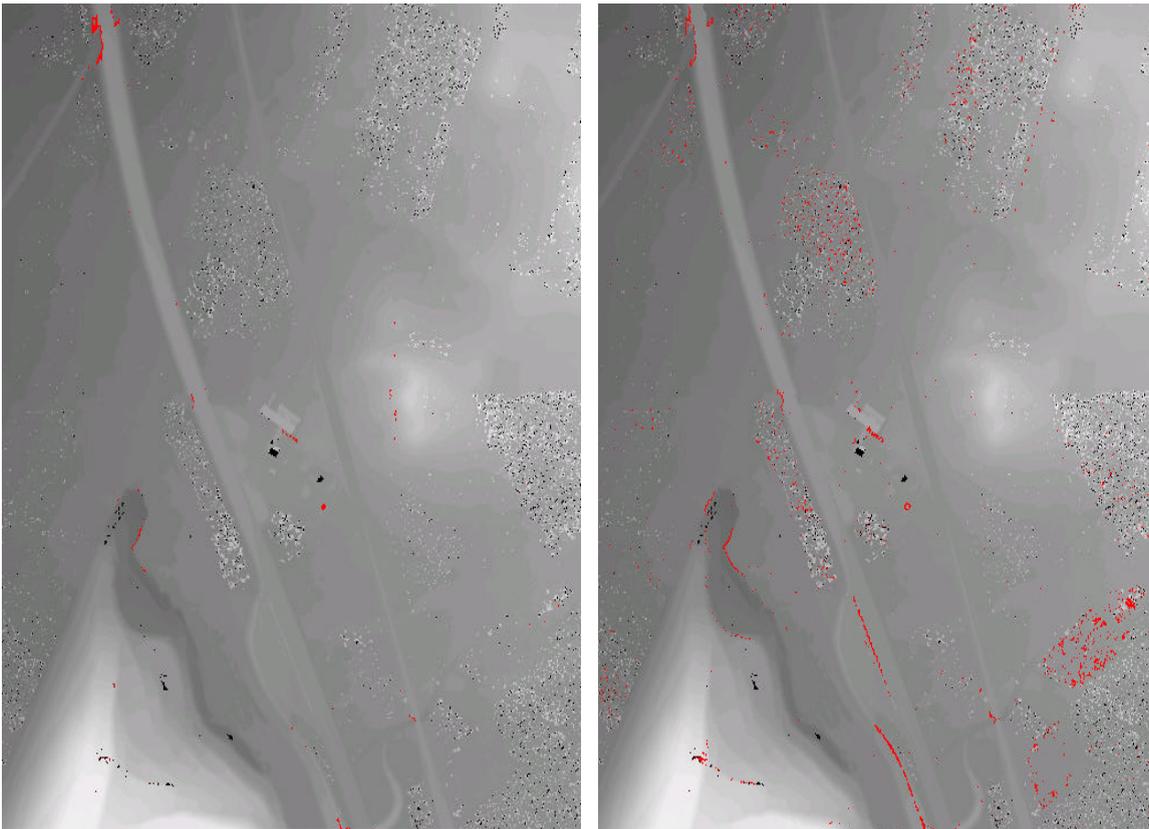


Abbildung 7-7: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall < -2 m, südliches Kerngebiet *Abbildung 7-8: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall -2 m bis < -1 m, südliches Kerngebiet*

Die Verteilung im Intervall -2 m bis kleiner -1 m (**Abbildung 7-8**) zeigt, daß von HALCON die Bereiche der Rampenseiten bei "aufgerampten" Straßen, hier insbesondere der A43, stärker von bodennaher Vegetation gereinigt wird. Der Trend aus dem vorherigen Intervall in Bezug auf Vegetation auf stark geneigtem Gelände bestätigt sich auch hier. Es zeigen sich jetzt größere Differenzen in bewaldeten Gebieten. Da die Streuung der Höhenwerte in diesen Bereichen besonders ausgeprägt ist, kommen hier die Unterschiede in Filterung und Interpolation in besonderem Maße zum Tragen.

Betrachtet man nun die Verteilung der restlichen negativen Differenzen im Bereich -1 m bis kleiner Null (**Abbildung 7-9**), ist zu erkennen, daß der weitaus größere Teil der Vegetationspunkte von HALCON niedriger aufgefüllt wurde, als bei Toposys. Wiederum wird deutlich, daß Vegetation an Schrägflächen von Toposys in geringerem Maße gefiltert wird.

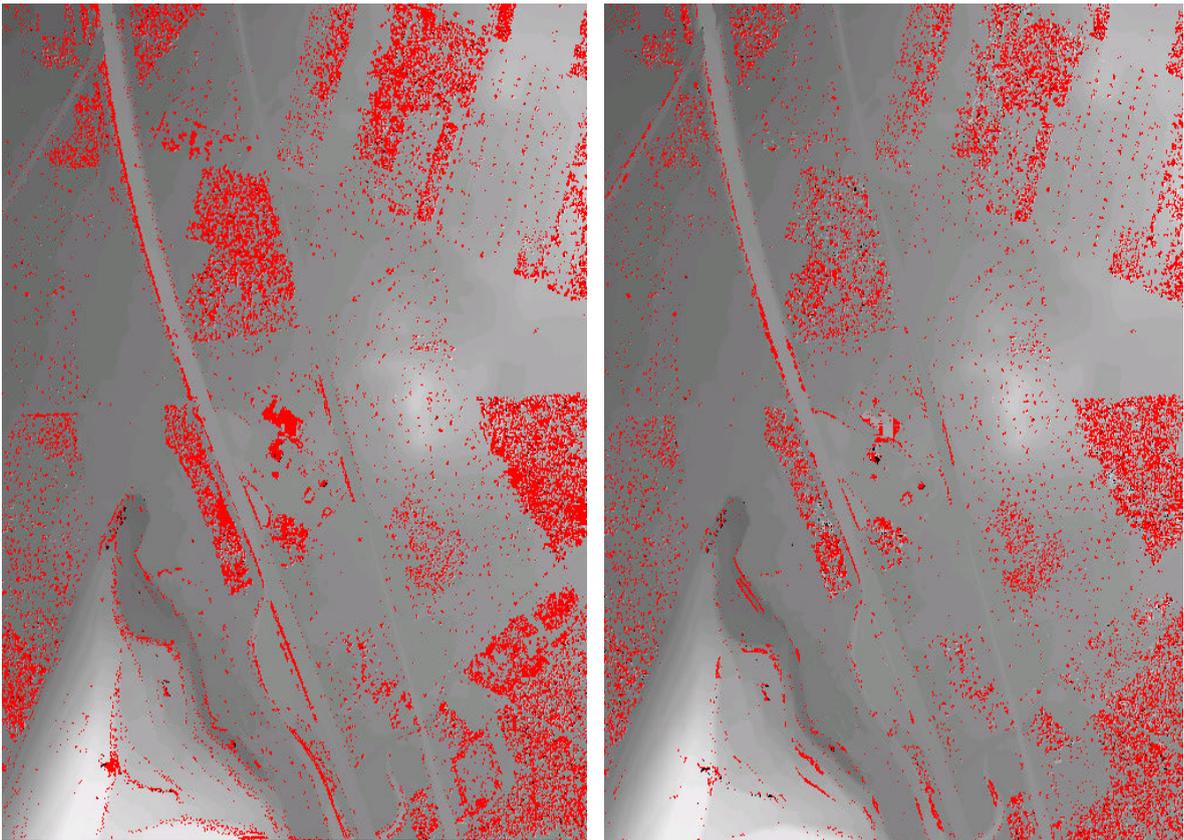


Abbildung 7-9: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall $-1\text{ m bis } < 0\text{ m}$, südliches Kerngebiet

Abbildung 7-10: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall $> 0\text{ m bis } +1\text{ m}$, südliches Kerngebiet

Im Vergleich zu **Abbildung 7-9**, in der die Differenzen der Ausmaße größer Null bis +1 m dargestellt sind, zeigt sich, daß besonders im Bereich von Kanten, also starker Höhenschwankungen, unterschiedlich gefiltert wird.

Ebenso wird im südlichen Kerngebiet deutlich, daß Waldgebiete die problematischsten Bereiche bei der automatischen Filterung darstellen. Hier wirken sich die unterschiedlichen als Boden identifizierten Punkte aufgrund der wenigen verbliebenen Stützpunkte zur Interpolation am stärksten aus.

Bei der Bewertung der **Abbildung 7-11**, Intervall größer +1 m bis +2 m, läßt sich feststellen, daß in diesen Differenzenbereich hauptsächlich wieder die Werte fallen, die, bedingt durch den HALCON-Algorithmus, dadurch entstehen, daß ein Waldgebiet durch die Kernbegrenzung geschnitten wurde. Es bleiben dadurch hochgelegene Vegetationspunkte am Rand stehen, auf die von Bodenpunkten aus interpoliert wird. Die restlichen Punkte dieses Intervalls entfallen wieder zum größten Teil auf die Halde im Süden, wo Toposys kleinere Bodenformen in der Nähe von Kanten stärker geglättet hat.

Die Differenzen, die noch größer sind (**Abbildung 7-12**), entstehen zum überwiegenden Teil wiederum durch nicht entfernte Vegetationspunkte am Bildrand.

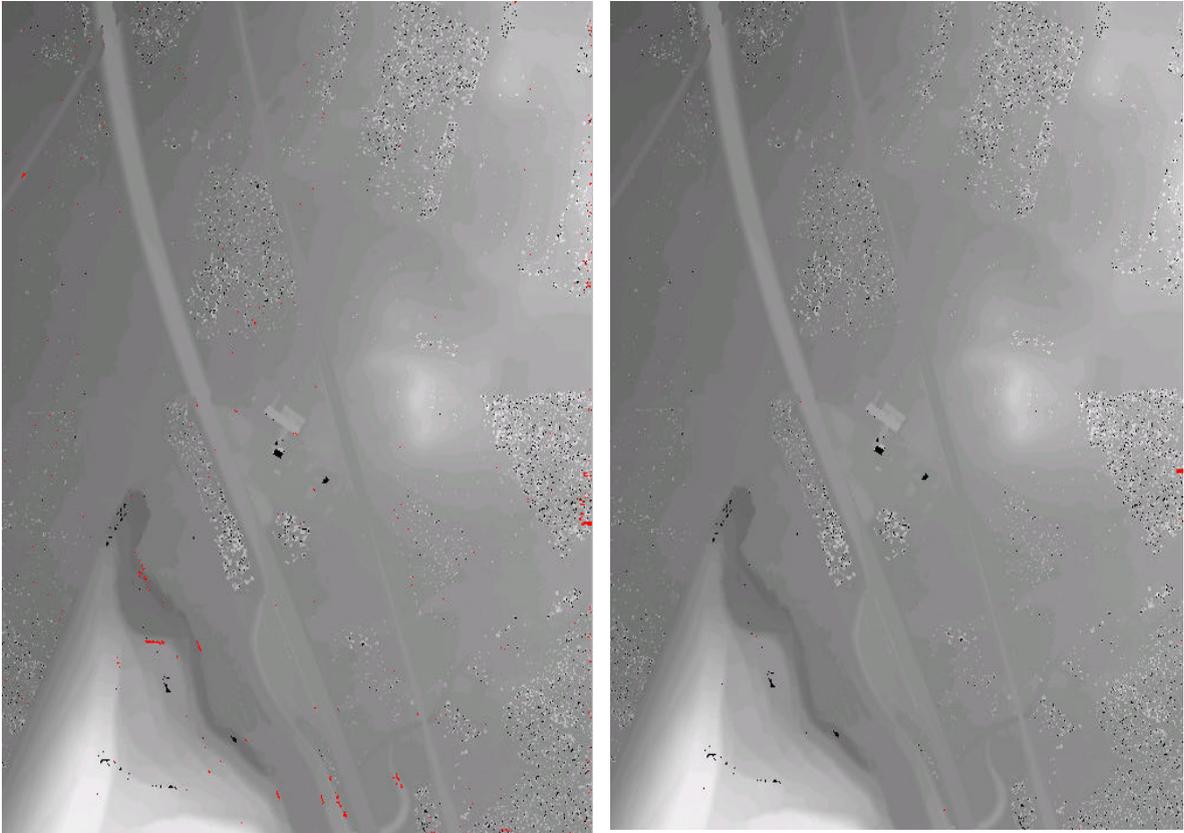


Abbildung 7-11: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall $> +1$ m bis $+2$ m, südliches Kerngebiet

Abbildung 7-12: Differenzen HALCON - Toposys, Intervall $> +2$ m, südliches Kerngebiet

7.1.3 Bewertung

Beim Vergleich der beiden Höhenmodelle wird deutlich, daß Toposys im allgemeinen weniger Punkte aus dem DSM herausfiltert als HALCON. Dabei neigt der Toposys-Algorithmus jedoch dazu, die Topologie glatter zu gestalten. Es werden also Bodenformen geringerer Ausmaße stärker geglättet. Das führt zwar zu einer insgesamt glatteren, harmonischeren Oberflächenform, jedoch werden so auch Punkte, die eindeutig als Bodenpunkte zu identifizieren sind, aus den Daten her-

ausgefiltert. Das zeigt sich beispielsweise an der Auffüllung von Kehlen in Bereichen von Boden-
neigungen und Kanten.

Nicht verständlich ist, daß im nördlichen Kerngebiet ein Gebäude komplett im Toposys-DTM
belassen wurde und auch einige Ausreißer nicht gefiltert wurden. Auch Vegetation wurde in einem
Bereich nicht gefiltert. Ebenso ist nicht klar, warum einige der Datenlücken von Toposys nicht
geschlossen wurden.

Das HALCON-DTM ist insgesamt etwas unruhiger und toleranter gegenüber kleinen Höhenän-
derungen. Die Zahl der gefilterten Vegetationspunkte in Bereichen starker Geländeneigung ist je-
doch größer als bei Toposys.

Gebäude werden durch HALCON etwas großräumiger ausgeschnitten als bei Toposys. Aufgrund
der Verteilung der Rohdaten auf ein Netz der Maschenweite 1 m wird der plötzliche Anstieg der
Höhenwerte an Gebäudekanten leicht abgeflacht. Daher wirkt HALCON der Podestbildung bei
der Füllung von Gebäuden durch die größere Ausschnittsmaske entgegen, was wiederum eine
allgemein niedrigere Höhe der Fülldaten zur Folge hat.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die teilweise recht hohen Differenzen in den Höhen-
werten der beiden Modelle hauptsächlich auf die unterschiedliche Behandlung im Bereich von
Brücken und auf die Eigenheiten des jeweiligen Algorithmus zurückzuführen sind (z.B. ungefilterte
Randwerte bei HALCON). Das Toposys-DTM weist teilweise grobe Fehler auf (z.B. ungefilterte
Gebäude), die HALCON entfernt. Das schlüssigere Modell liefert daher HALCON, obwohl auch
hier einige Probleme, die im Algorithmus begründet sind, vorhanden sind.

7.2 Exemplarische Ausschnitte

Nach dem Vergleich der vollständigen Kerngebiete werden nun zwei Ausschnitte qualitativ vergli-
chen, in denen alle vorkommenden Geländecharakteristiken vertreten sind. Zur besseren Visuali-
sierung wurden die Daten in diesem Abschnitt mit dem Programm LISA aufbereitet.

7.2.1 Ausschnitt 1

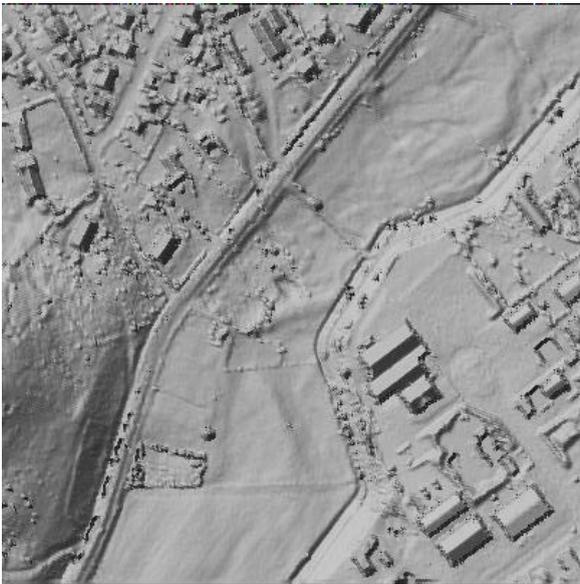


Abbildung 7-13: DSM, Ausschnitt 1

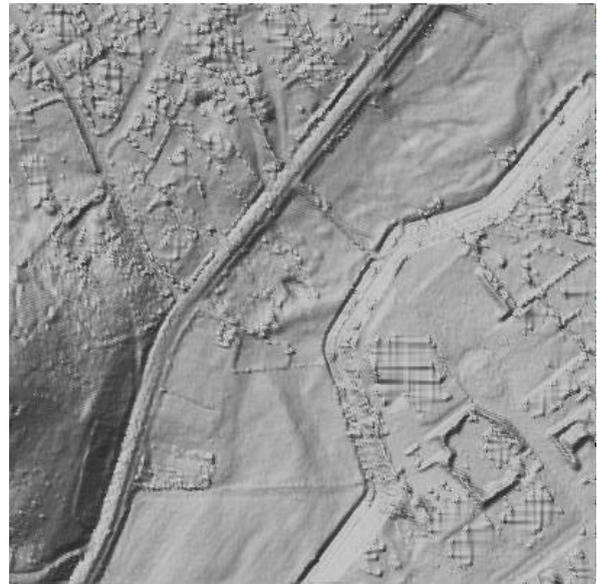


Abbildung 7-14: Toposys-DTM, Ausschnitt 1

Der erste Ausschnitt wurde dem nördlichen Kerngebiet entnommen. In **Abbildung 7-13** ist das DSM, also die von Toposys gelieferten Ausgangsdaten, dargestellt. Gut sind im Südwesten einige größere Gebäude zu erkennen, aber auch Siedlungsgebiete mit kleineren Häusern sind vorhanden. Im Westen wird das Gebiet durch die Flanke des Hügels begrenzt. Hecken, Büsche und einzelne Bäume machen die Vegetation aus.

Betrachtet man zunächst das Toposys-Ergebnis (**Abbildung 7-14**), so fällt zuerst die Füllung der größeren Gebäude auf. Durch den Füllalgorithmus ist hier ein deutliches Gittermuster entstanden, das sehr unnatürlich wirkt. Die Häuser wurden alle korrekt entfernt, wobei jedoch der Eindruck entsteht, daß die Füllung teilweise etwas zu hoch ausfällt. Vegetationspunkte wurden weitestgehend entfernt, sofern sie nicht der bodennahen Vegetation zuzuordnen und damit schwer von kleineren Bodenformen zu unterscheiden sind. Auch die Datenlücken auf der Straße neben dem Fuß des Hügels wurden geschlossen.

Abbildung 7-15 zeigt das mit HALCON erstellte DTM. Das Ergebnis ist im wesentlichen identisch mit dem von Toposys. Allerdings fügt sich hier die Füllung der gefilterten Gebäude besser in das umliegende Gelände ein und ist allgemein unauffälliger, obwohl auch hier noch Ansätze einer Gitterstruktur zu finden sind. Insgesamt wirkt das HALCON-DTM ebener und ruhiger. Es wurden mehr Punkte als bei Toposys entfernt, was sich auch im Bereich der Vegetationspunkte bemerkbar macht.

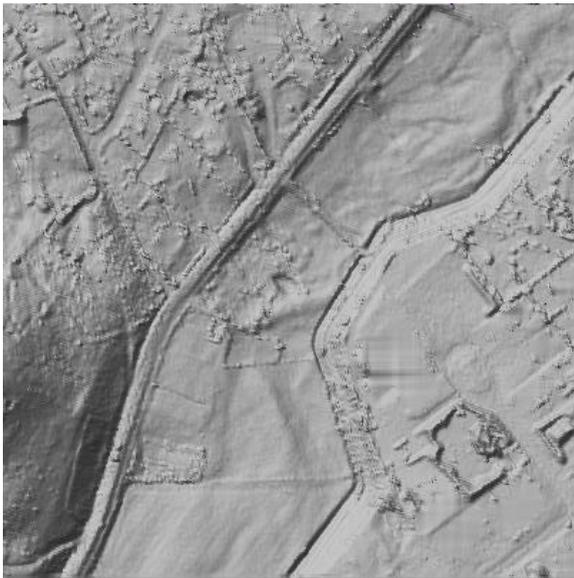


Abbildung 7-15: HALCON-DTM, Ausschnitt 1

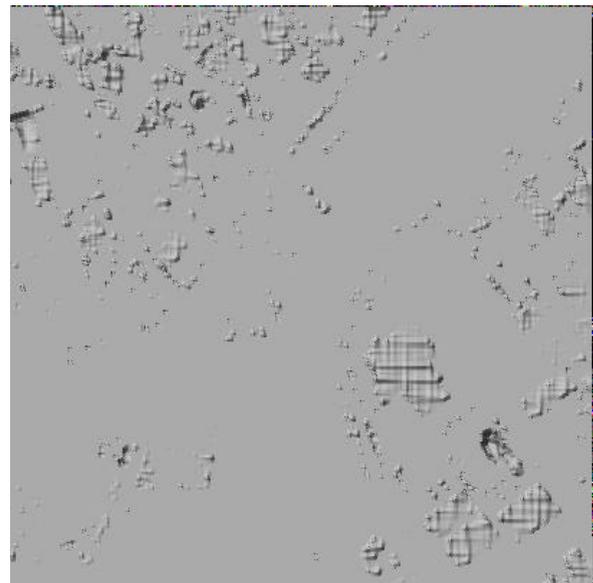


Abbildung 7-16: Differenzen Toposys-HALCON, Ausschnitt 1

Die Unterschiede der beiden Filterungen lassen sich am besten anhand der Differenzen zwischen den Modellen feststellen. Dazu wurden diesmal die Grauwerte des HALCON-DTM von denen des Toposys-DTM subtrahiert (**Abbildung 7-16**). Die Subtraktion wurde in dieser Weise durchgeführt, da bereits der Eindruck bestand, daß das Toposys-Modell höher liegt und positive Werte in dieser Visualisierung anschaulicher sind. Es zeigt sich, daß der erste Eindruck durchaus zutreffend ist. In der Überzahl der veränderten Höhenwerte zeigen sich positive Differenzen. Nur an zwei Stellen sind Ansammlungen negativer Differenzen zu sehen. Ein Haus im Norden der westlichen Begrenzung wurde von HALCON nur unvollständig entfernt. Der Grund hierfür ist der Effekt der Rampenbildung durch die direkt am Haus angrenzende Hecke. Dadurch war der Sprung in den Höhenwerten nicht ausreichend, um als signifikant gewertet zu werden.

Eine weitere Ansammlung negativer Höhendifferenzen zeigt sich in einem Bereich, der im DSM durch eine Datenlücke gekennzeichnet war. Hier handelt es sich wahrscheinlich um einen Teich, der von einem leichten Wall umgeben ist. Dieser Wall wurde nicht oder nur teilweise von HALCON entfernt und die Datenlücke wurde ausgehend von den Randpunkten aufgefüllt. Toposys hingegen hat den Wall vor dem Auffüllen entfernt. Dies ist eine Auswirkung der unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Ausfilterung von Punkten.

7.2.2 Ausschnitt 2



Abbildung 7-17: DSM, Ausschnitt 2

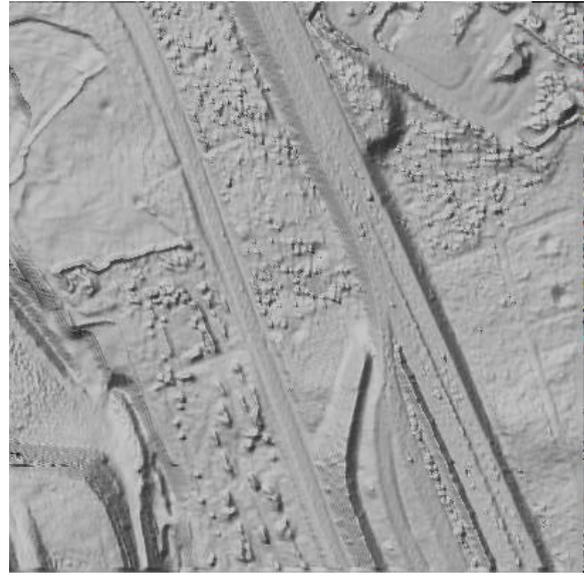


Abbildung 7-18: Toposys-DTM, Ausschnitt 2

Im DSM des zweiten Ausschnittes (**Abbildung 7-17**), der dem südlichen Kerngebiet entnommen ist, ist die A43 zu erkennen. An den Böschungen der Autobahn ist Vegetation vorhanden, auf beiden Seiten sind kleine Waldabschnitte. Auch einzelne Bäume sind westlich der Autobahn auszumachen. Im Südwesten ist ein Ausläufer der Halde zu sehen.

Toposys liefert hier ein zufriedenstellendes Ergebnis (**Abbildung 7-18**). In den Waldgebieten wurden alle Vegetationspunkte entfernt und auch die einzelnen Bäume wurden herausgefiltert. Nur die Vegetation an der Autobahntrasse wurde im Bereich der Autobahnabfahrt nicht komplett entfernt. Die Füllung wirkt in den Bereichen des Waldgebietes natürlich, in denen Bodenpunkte in ausreichender Zahl vorhanden sind. Bei der Füllung des östlich der Autobahn gelegenen Waldstücks läßt sich wieder ansatzweise die Gitterstruktur ausmachen. Hier konnten weniger Bodenpunkte in die Interpolation einbezogen werden.

Das Bild des von HALCON gefilterten DTM (**Abbildung 7-19**) zeigt, daß auch hier im Waldgebiet alle Vegetationspunkte ausgefiltert wurden. Allerdings wurden mehr Punkte entfernt als bei Toposys. Das führt gerade in Waldgebieten, in denen ohnehin weniger Bodenpunkte zur Verfügung stehen, dazu, daß recht große Lücken entstehen, die aufgefüllt werden müssen. Das Resultat solcher großflächigen Füllungen ist trotz Glättung das bei der linearen Interpolation nicht gänzlich vermeidbare Gittermuster.

Im Bereich der Vegetationspunkte an der Böschung der Autobahntrasse scheint die Filterung dagegen zu besseren Ergebnissen zu führen als im Toposys-DTM. Dies bestätigt sich bei der Betrachtung der Differenzen.

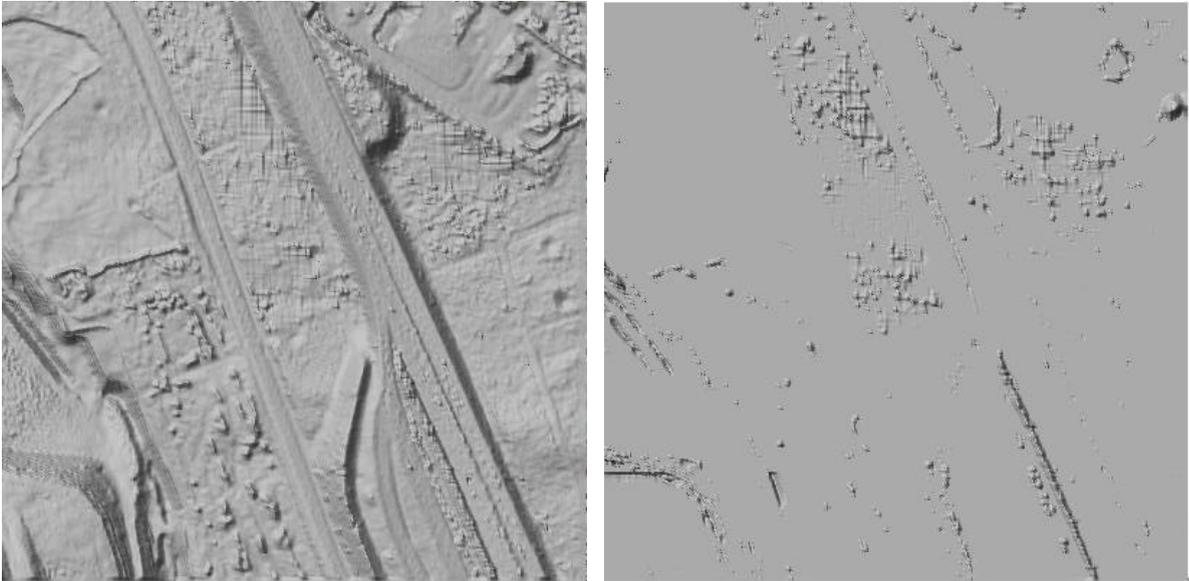


Abbildung 7-19: HALCON-DTM, Ausschnitt 2

Abbildung 7-20: Differenzen Toposys-HALCON, Ausschnitt 2

Betrachtet man diese Differenzen (**Abbildung 7-20**), so ist festzustellen, daß im Bereich der Waldgebiete durch die stärkere Filterung von HALCON positive Differenzen entstehen, wobei die Gitterstruktur der Differenzen diesmal von HALCON verursacht wurde. Deutlich erkennbar ist die stärkere Ausfilterung von Vegetationspunkten an der Autobahntrasse durch HALCON. Auffällig ist auch das Auftreten negativer Differenzen an den Kanten der Halde. Man kann daraus schließen, daß Toposys solche Bruchkanten zumindest teilweise entfernt.

7.2.3 Bewertung

Im qualitativen Vergleich zeigt sich, daß beide Filterungsmethoden in den gewählten Gebietsausschnitten zu befriedigenden Ergebnissen kommen. Ein eindeutiger Vorteil zugunsten eines der Verfahren besteht nicht, da beide Verfahren sowohl Schwachpunkte als auch Stärken haben.

Während HALCON bei der Entfernung von Gebäuden ein homogeneres Ergebnis erzeugt, liegen die Stärken von Toposys in der Filterung von Waldgebieten. Allgemein entfernt Toposys weniger Punkte als HALCON und liefert ein etwas rauheres Ergebnis.

8 Vergleich der Ergebnisse DTMCOR - HALCON

In diesem Abschnitt soll zunächst das in [KOCH; 1999] mit DTMCOR entwickelte Höhenmodell vorgestellt und dieses dann mit dem Ergebnis der HALCON-Filterung verglichen werden.

8.1 Vorstellung des DTMCOR - Höhenmodells

8.1.1 DTMCOR

Das Programm DTMCOR wurde zur Analyse und Reinigung von digitalen Höhenmodellen (DHM) entwickelt. Es soll unter anderem grobe Höhenfehler aus solchen Höhenmodellen entfernen, die z.B. mit MEPAS-IC erstellt wurden, welches Luftbilder automatisch zur Korrelation bringt. Dabei können durch Fehlkorrelationen grobe Fehler entstehen.

Das Programm entfernt zunächst Höhenwerte, die außerhalb eines vorher einzugebenden Höhenbereiches liegen und filtert die verbleibenden Daten mittels Prädiktion, die auf einer gleitenden Schrägebene basiert.

In [KOCH; 1999] wurde DTMCOR für die spezielle Aufgabe der Filterung von Laserscanner-Höhenmodellen modifiziert und eine iterative Abwandlung, dort DTMCOR_A genannt, entwickelt. Zur näheren Funktionsweise von DTMCOR und DTMCOR_A sei auf diese Quelle verwiesen.

8.1.2 Höhenmodell

Bei der Erstellung des DTMCOR - Modells wurden nur Werte aus einem 10 m - Gitter des Original-DSM verwendet, um die Menge der Daten zu reduzieren, d.h. nur jeder zehnte Wert in Rechts- und Hoch-Richtung wurde berücksichtigt. Daraus resultierte für das nördliche Kerngebiet eine mögliche Gesamtzahl von 35.475 Punkten, wobei jedoch wieder ein Teil aufgrund der Scangrenze ausfiel. Diese große Datenlücke umfaßte 5.528 Punkte. Noch weitere 94 Datenlöcher waren vorhanden, von denen vier auf die großen Lücken auf dem Kanal und der Lippe entfielen.

Die restlichen 90 Punkte ohne Höhenwerte verteilten sich auf Flächen der Größe 1 Punkt (68 Flächen) bis 7 Punkte (2 Flächen). Es lagen also insgesamt für 28.923 Punkte Höhendaten vor. Das südliche Kerngebiet, das eine Gesamtfläche von 20.000 Punkten umfaßte, enthielt 89 Datenlücken, von denen eine die Fläche von 3 Punkten einnahm und 9 Lücken mit einer Fläche von 2 Punkten. Die restlichen 79 Datenlücken waren jeweils einen Punkt groß. Daraus ergab sich eine Anzahl von 19.900 Punkten mit einem Höhenwert. Diese reduzierten DSM wurde der Filterung mit DTMCOR unterzogen.

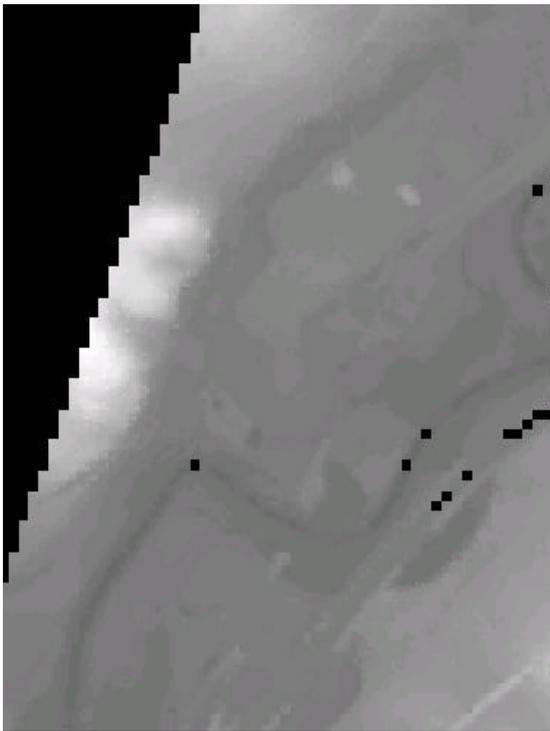


Abbildung 8-1: DTMCOR-DTM, nördliches Kerngebiet



Abbildung 8-2: DTMCOR-DTM, südliches Kerngebiet

Die Grauwertbilder der beiden mit DTMCOR erzeugten Oberflächenmodelle sind in **Abbildung 8-1** und **Abbildung 8-2** abgebildet. Hier zeigen sich einige Nachteile, die in der Reduzierung auf ein 10m - Netz und im verwendeten Algorithmus selbst liegen. So nahm die Scangrenze im nördlichen Kerngebiet eine Treppenform an, da Werte über die Grenze hinaus prädiert wurden. Aufgrund der geringeren Auflösung wurden auch viele Geländeformen fälschlicherweise entfernt. Insbesondere sind hier die Autobahn- und Eisenbahntrassen anzumerken. Aber auch Pixel mit deutlich niedrigerem Höhenwert als ihre Nachbarn sind vorhanden, was sich besonders auf der Halde

im südlichen Kerngebiet beobachten läßt. Diese Höhenwerte sind nicht durch die Topographie erklärbar.

8.2 Vergleich DTMCOR - HALCON

Das mit DTMCOR erzeugte Höhenmodell wird verglichen mit zwei Filterungsergebnissen von HALCON. Zum einen wird das im 1m-Raster berechnete HALCON-DTM auf ein 10m-Gitter reduziert, zum anderen wird das DSM auf ein 10m-Gitter reduziert und dann mit HALCON gefiltert (im folgenden HALCON_10-DTM). Dabei soll zum einen untersucht werden, inwieweit bei der Vergrößerung des Rasters Kleinformen der Filterung zum Opfer fallen, und zum anderen werden direkt die Filterwirkungen der beiden Algorithmen gegenübergestellt.

8.2.1 Nördliches Kerngebiet

Als erstes sollen die Ergebnisse beim Ausschluß von Punkten verglichen werden. Dazu sind in **Abbildung 8-3** und **Abbildung 8-4** die beiden im 10m-Raster durchgeführten Filterungen gegenübergestellt.

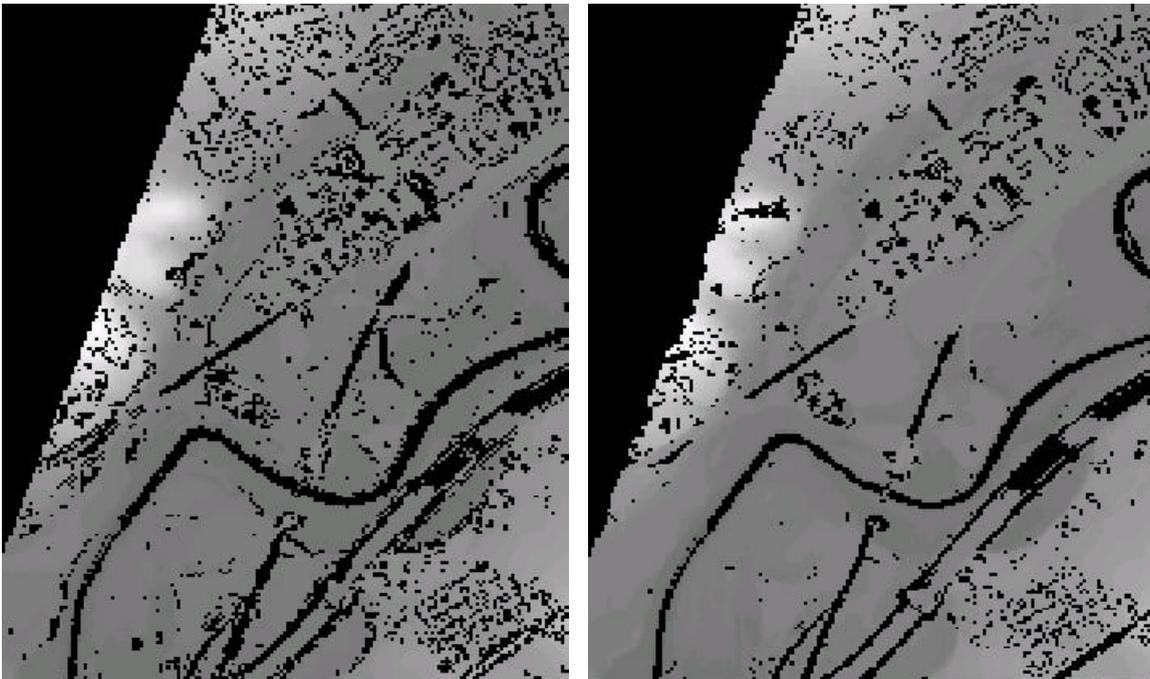


Abbildung 8-3: Filterungsergebnis DTMCOR, nördliches Kerngebiet

Abbildung 8-4: Filterungsergebnis HALCON_10, südliches Kerngebiet

Es ist zu erkennen, daß die Filterungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Prinzipiell filtert DTMCOR mehr Punkte aus dem DSM als HALCON. Besonders an Geländekanten ist deutlich zu sehen, daß HALCON hier eine größere Toleranz gegenüber Bodenstrukturen aufweist. Beiden Modellen ist gemeinsam, daß sie die beiden großen Gebäude im nördlichen Bereich nicht vollständig entfernen.

Im folgenden werden die Histogramme der Differenzen zwischen den interpolierten Höhenmodellen betrachtet. Dem Vergleich zwischen dem reduzierten HALCON-DTM und dem DTMCOR-Ergebnis liegen 29.888 Punkte zugrunde, bei denen für beide Modelle Höhenwerte vorlagen. Von den Höhendifferenzen lagen 23.333 (40,89%) im negativen Bereich, 16.925 (56,63%) im positiven Bereich und nur für 741 Punkte (2,48%) waren die Höhenwerte identisch. Das führt zu der Schlußfolgerung, daß das HALCON-Modell im Ganzen etwas über dem von DTMCOR liegt.

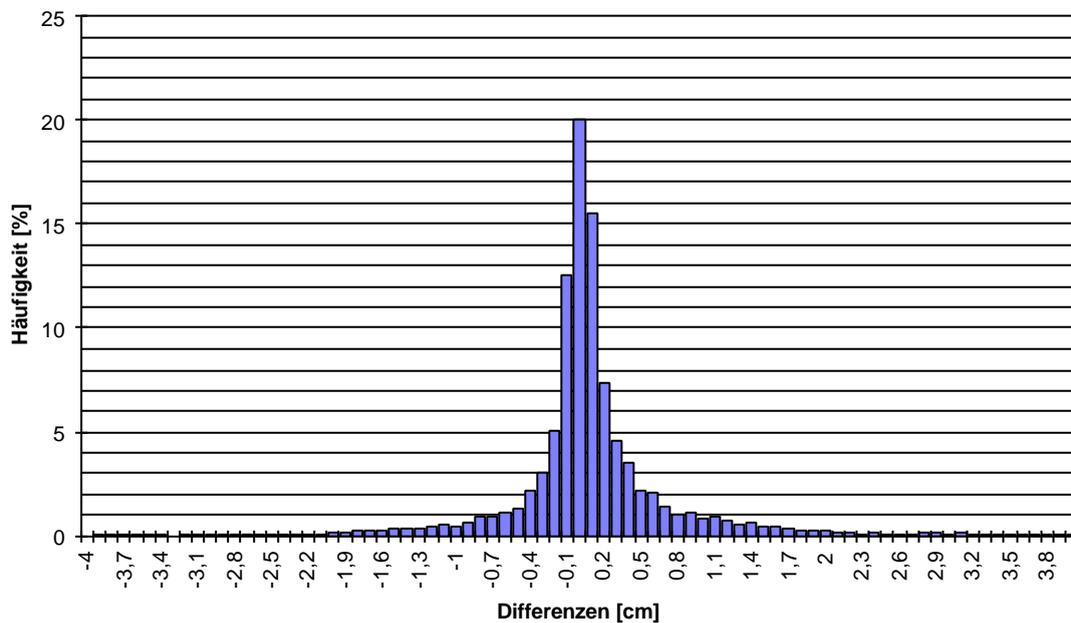


Diagramm 8-1: Verteilung der Höhendifferenzen HALCON - DTMCOR, nördl. Kerngebiet

Das Histogramm zu diesem Vergleich ist in **Diagramm 8-1** abgebildet. Wie zu sehen ist, sind die Differenzen normalverteilt. Das Maximum liegt im Null-Intervall, ist aber nicht so dominant wie im Vergleich von Toposys mit HALCON. Das zeigt, daß die Punkte gleicher Höhen hier nicht so

häufig sind. Vergleicht man dieses Histogramm mit dem, in dem die Differenzen zwischen dem mit HALCON neuberechneten 10m-DTM (im folgenden HALCON_10 genannt) und dem DTMCOR-Ergebnis zu sehen sind (**Diagramm 8-2: Verteilung der Höhendifferenzen HALCON_10 - DTMCOR; nördl. Kergebiet**), so stellt man fest, daß die Verteilung nahezu identisch ist, jedoch verläuft der Abfall der Werte mit zunehmendem Abstand von Null glatter. Der Grund hierfür liegt z.B. in der Filterung von Trassen und Brücken, die in den beiden 10m-Filterungen ähnlich durchgeführt wird. Dem Vergleich zwischen den beiden DTM liegen 30.112 Punkte zugrunde, von denen 13.112 (43,54%) eine negative Differenz aufweisen, 16.261 Differenzen (54,00%) liegen im positiven Bereich und 739 Punkte (2,45%) sind von identischer Höhe.

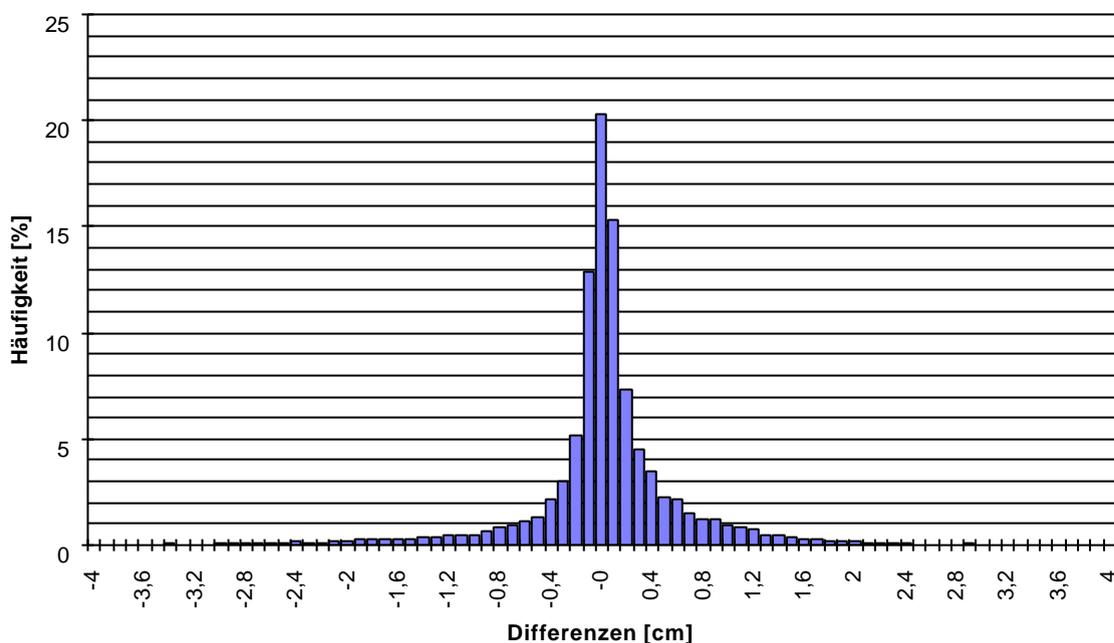


Diagramm 8-2: Verteilung der Höhendifferenzen HALCON_10 - DTMCOR; nördl. Kergebiet

Mittelwerte und Quadratmittel sind **Tabelle 8-1** zu entnehmen. Auffällig ist hier zunächst das sehr hohe Quadratmittel, das sich auch durch Berücksichtigung des Mittelwertes nicht registrierbar ändert. Erklären läßt sich dies durch die Besonderheiten der Füllungsergebnisse im nördlichen Kerngebiet. In beiden Modellen wird über den Rand des Scangebietes hinaus gefüllt, bei HALCON mit Werten, die von Null zum Rand des Gebietes schnell ansteigen, bei DTMCOR mit Werten, die ungefähr den Höhen der Randpunkte entsprechen. Für beide Modelle liegen also Werte im Bereich der großen Datenlücke vor, die in ihrer Höhe jedoch stark voneinander abweichen. Läßt man diese etwa 300 Punkte bei der Auswertung unberücksichtigt, so verbessert sich

das Quadratmittel recht deutlich. Auch der Mittelwert steigt an und zeigt nun eine bessere Übereinstimmung mit dem Histogramm, in dem das Maximum geringfügig in den positiven Bereich verschoben liegt. Die gleiche Aussage kann auch für den Vergleich des HALCON_10-DTM's mit dem DTMCOR-Ergebnisse getroffen werden. Dabei muß erwähnt werden, daß im reduzierten HALCON-Model, dem das 1m-Raster zugrunde liegt, Autobahn- und Bahntrassen im wesentlichen belassen wurden, hier also eine größere Anzahl an höher liegenden Punkten vorhanden ist. Insgesamt kann man daraus schließen, daß keines der beiden Modelle signifikant höher oder niedriger liegt als das andere.

	Anzahl Punkte	Mittelwert [cm]	Quadratmittel gegen Null [cm]	Quadratmittel gegen Mittelwert [cm]
HALCON-DTMCOR	30.112	-0,3	±261,58	±261,58
HALCON-DTMCOR ohne Randpunkte	29.807	+12,1	±85,0	±84,7
HALCON_10-DTMCOR	29.888	-61,9	±526,4	±526,4
HALCON_10-DTMCOR ohne Randpunkte	29.596	+1,7	±72,5	±72,5

Tabelle 8-1: Mittelwert und Abweichung der Differenzen, nördliches Kerngebiet

Um beurteilen zu können, wie sich die Bereiche verschieden großer Differenzen verteilen, werden die folgenden Abbildungen betrachtet. Dabei werden nur die Differenzen zwischen den beiden im 10m-Raster generierten Höhenmodellen untersucht, da hier von der gleichen Anfangssituation ausgegangen wird und die Ergebnisse daher besser vergleichbar sind. Im Gegensatz zum Vergleich HALCON - Toposys werden hier jedoch die Punkte gleicher Höhen in der Punktmenge belassen, da ihre Häufigkeit hier weitaus geringer ist und in diesem Fall auch eine qualitative Aussage beinhaltet.

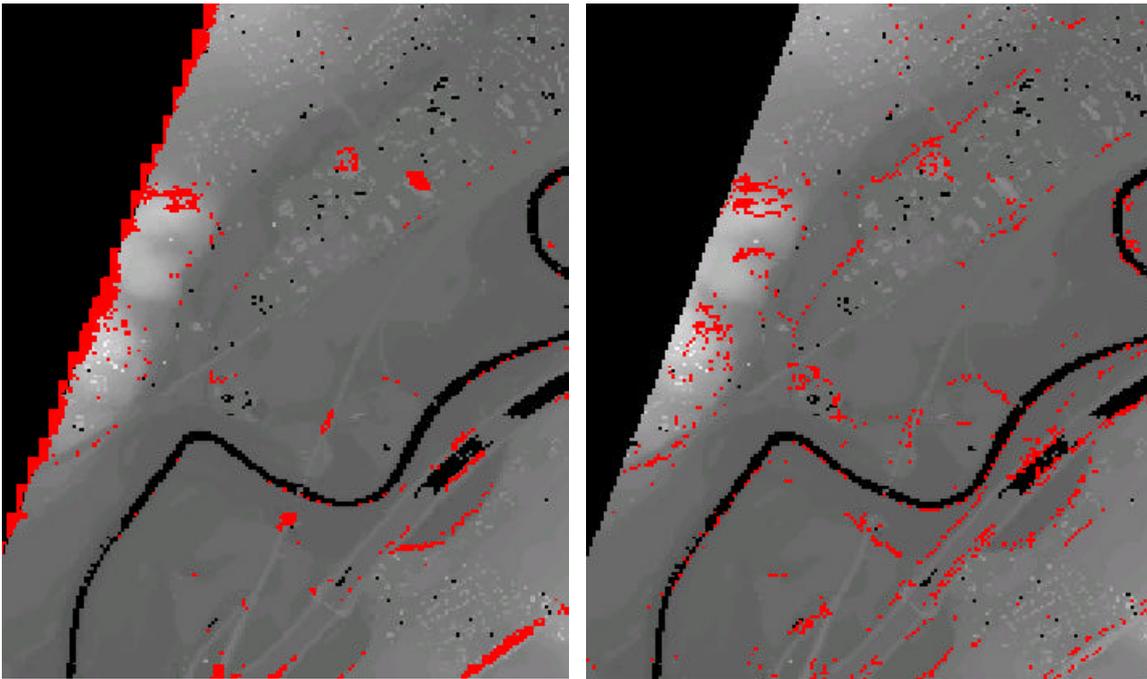


Abbildung 8-5: Differenzen HALCON_10-DTMCOR, Intervall < -2 m, nördliches Kerngebiet

Abbildung 8-6: Differenzen HALCON_10-DTMCOR, Intervall -2 m bis < -1 m, nördliches Kerngebiet

Deutlich zu sehen ist in **Abbildung 8-5**, die das Differenzenintervall < -2 m darstellt, die zu erwartende Markierung des Scangebiet-Randes, der im DTMCOR-Bild treppenförmig ausgebildet ist. Weiterhin sind größere Differenzen im Bereich des Hügels vorhanden, wo einige Vegetationspunkte von DTMCOR nicht entfernt wurden. Aber auch die teilweise Entfernung der Hügelkuppe durch HALCON resultiert in größeren negativen Differenzen. Ebenfalls sehr unterschiedlich werden auch die Brückenbereiche und der Abschnitt der A52 im Südosten behandelt. Im Bereich der Differenzen von -2 m bis < -1 m (**Abbildung 8-6**) kommen besonders Böschungsbereiche und damit auch wieder Geländekanten zum Tragen. Dies ist der Fall im Randbereich von Kanal und Fluß, aber auch am Rand der Geländeplateaus, auf denen Siedlungen zu finden sind. Auch auf dem Hügel, also in einem Gebiet starker Geländeneigung, sind zahlreiche deutliche Höhenunterschiede auszumachen.

Im Bereich der Höhendifferenzen von -1 m bis kleiner Null (**Abbildung 8-7**) zeigt sich, daß die durch DTMCOR durchgeführte Interpolation in vielen Bereichen höher liegt als das HALCON-Modell. Besonders kommt dies bei konkaven Geländeformen zum Ausdruck, Kuhlen werden also aufgefüllt. Dies ist ein Effekt der Prädiktion durch eine gleitende Ebene.

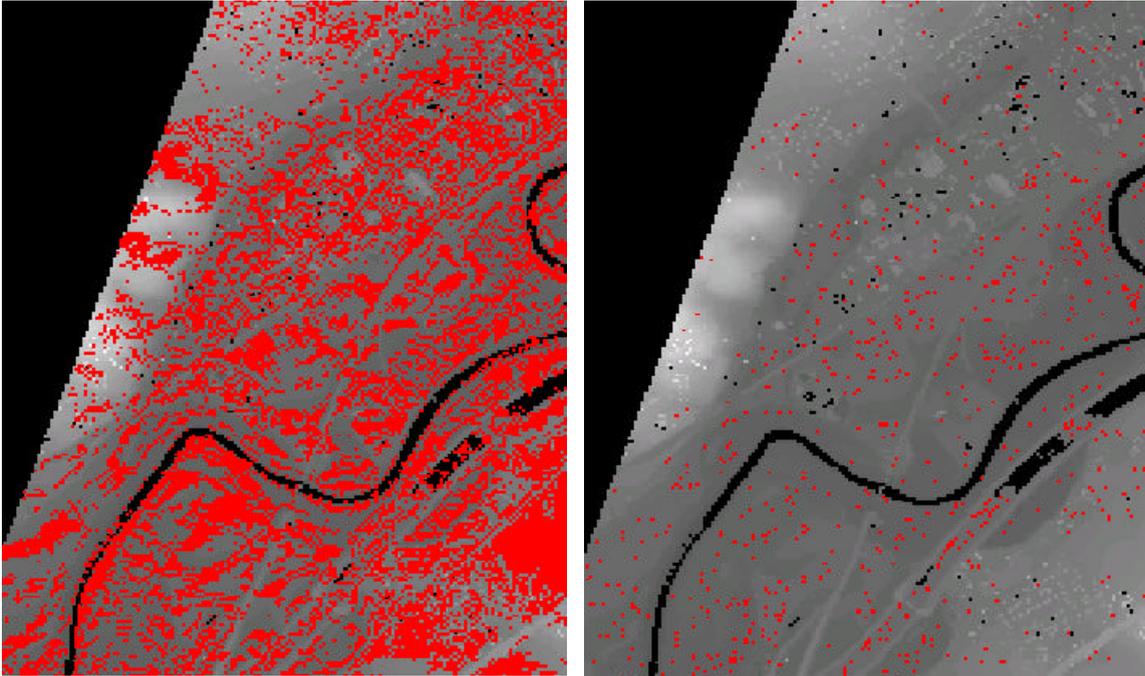


Abbildung 8-7: Differenzen HALCON_10-DTMCOR, Intervall -1 m bis $< 0\text{ m}$, nördliches Kerngebiet *Abbildung 8-8: Punkte gleicher Höhenwerte, nördliches Kerngebiet*

Punkte gleicher Höhe (**Abbildung 8-8**) sind eher die Ausnahme. Sie treten fast ausschließlich bei Bodenpunkten auf und sind ansonsten ohne erkennbare Systematik gestreut.

Häufiger noch als einen geringen negativen Abstand weisen die Geländemodelle einen geringen positiven Abstand auf (**Abbildung 8-9**). Dies kommt besonders zum Ausdruck bei konvexen Geländeformen. Etwas größere positive Differenzen treten wiederum besonders im Bereich von Geländekanten auf. Dies wird deutlich an den Bahntrassen, den Ufern von Kanal und Fluß sowie an Plateaukanten.

Differenzen über $+2\text{m}$ finden sich hauptsächlich im Bereich der Halde wieder und an einigen Böschungen.

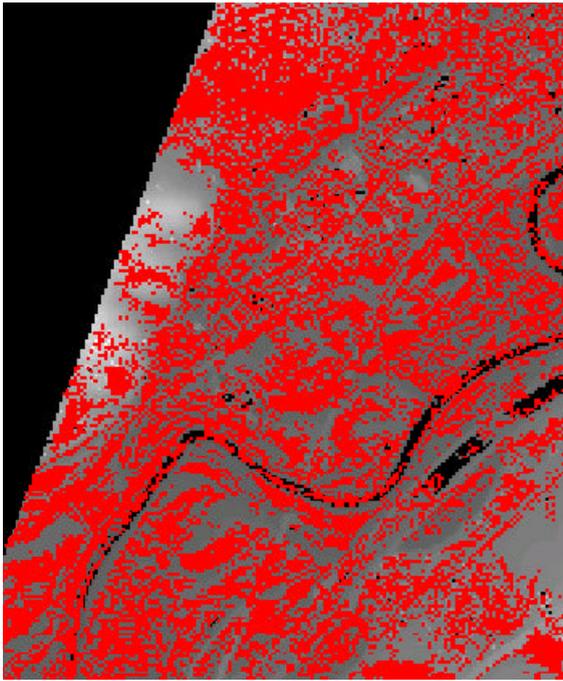


Abbildung 8-9: Differenzen HALCON_10-DTMCOR, Intervall >0 m bis $+1$ m, nördliches Kerngebiet

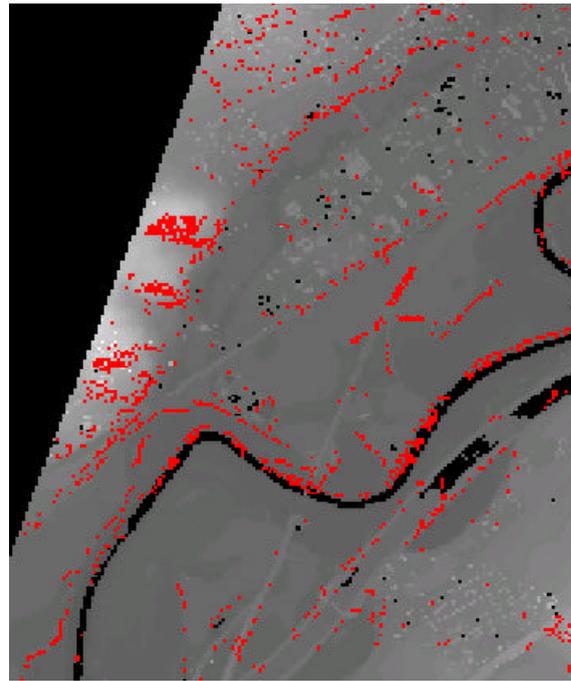


Abbildung 8-10: Differenzen HALCON_10-DTMCOR, Intervall $>+1$ m bis $+2$ m, nördliches Kerngebiet

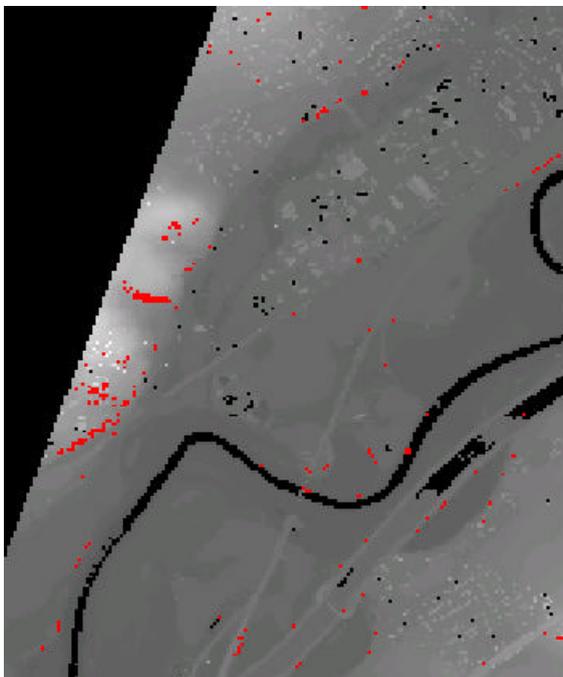


Abbildung 8-11: Differenzen HALCON_10-DTMCOR, Intervall $>+2$ m, nördliches Kerngebiet

Festzustellen ist nach diesem Vergleich, daß DTMCOR eine sehr viel stärker glättende Wirkung auf die Höhenwerte ausübt, als HALCON dies tut. Als Bodenpunkte identifizierte Punkte bleiben nur in den seltensten Fällen in ihrer Höhe unverändert. Der Algorithmus von HALCON sieht dagegen vor, Bodenpunkte, die als solche erkannt wurden, nicht zu verändern. Daher ist die logische Konsequenz, daß von DTMCOR leicht nach oben oder unten korrigierte Werte eine leichte Höhenabweichung zu denen des HALCON-Modells aufweisen. Im Mittel läßt sich hier aber keine eindeutige Bevorzugung einer Richtung ausmachen.

8.2.2 Südliches Kerngebiet

Wie beim nördlichen Kerngebiet sollen auch hier zunächst die Ergebnisse der Punktaussonderung der beiden Programme gegenübergestellt werden.

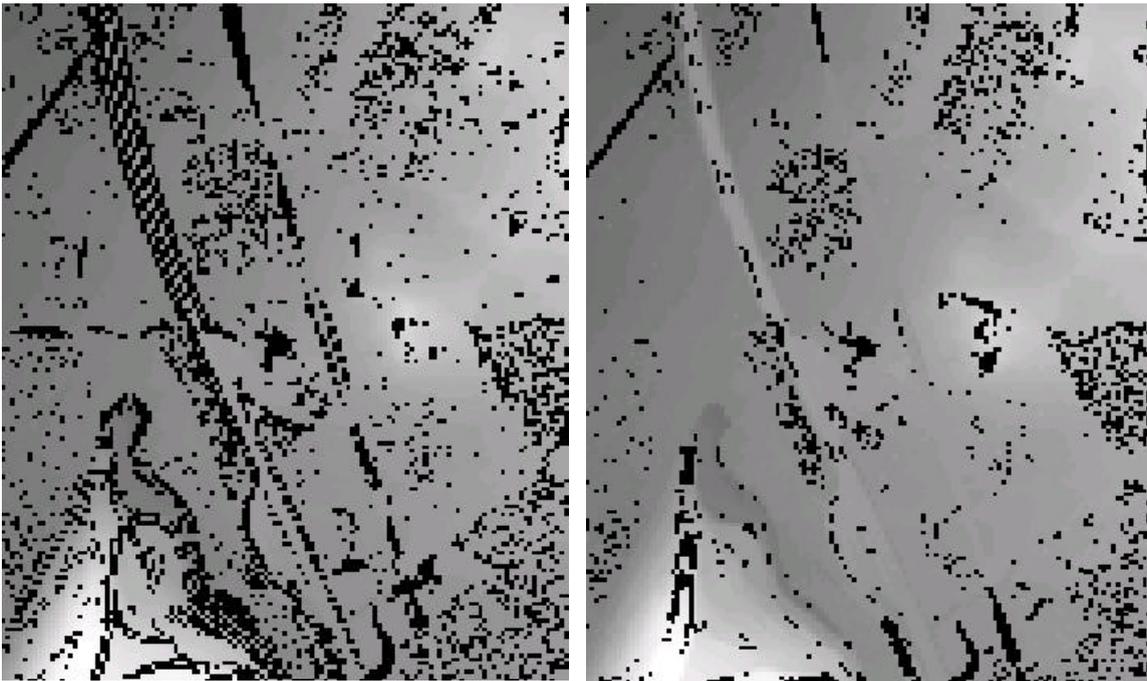


Abbildung 8-12: Filterungsergebnis DTMCOR, südliches Kerngebiet

Abbildung 8-13: Filterungsergebnis HALCON_10, südliches Kerngebiet

Das mit DTMCOR gefilterte DSM wird sehr viel stärker gefiltert als das mit HALCON bearbeitete. Das zeigt sich besonders im Bereich der Halde, wo die Kanten zum großen Teil entfernt wurden. Aber auch im relativ flachen restlichen Gelände werden geringe Höhenabweichungen stärker gefiltert. Dafür sind im HALCON-Modell noch einzelne Punkte verblieben, die der Vege-

tation zugeordnet werden können. Auffällig ist auch die unterschiedliche Behandlung der A43, die von DTMCOR teilweise schachbrettartig und insgesamt recht stark gefiltert wurde. Bei der Filterung durch HALCON bleibt die Autobahn jedoch nahezu unberührt, nur wenige Punkte wurden hier entfernt. Ähnliches ist auch zur Filterung der Eisenbahntrasse zu sagen. Auch hier wurden von DTMCOR zahlreiche Punkte entfernt, die bei HALCON erhalten blieben.

Beim Vergleich der Füllergebnisse wurden, jeweils in beiden Fällen, 20.000 Punkte berücksichtigt, da von beiden Programmen das Gebiet lückenlos aufgefüllt wurde. Innerhalb des Differenzbildes zum Vergleich des HALCON-DTM mit dem durch DTMCOR erzeugten wiesen 10.447 Punkte (52,24%) eine negative Differenz auf, 9.272 Punkte (46,36%) zeigten einen positiven Differenzbetrag und 281 Punkte (1,41%) waren von gleicher Höhe. In **Diagramm 8-3** ist das Histogramm der Differenzen abgebildet.

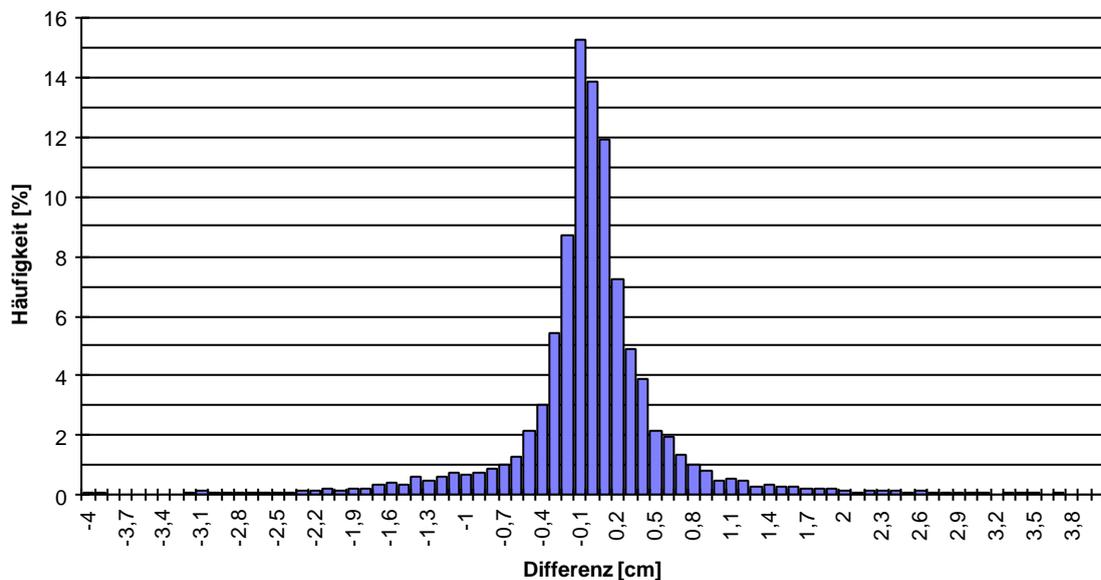


Diagramm 8-3: Verteilung der Höhendifferenzen HALCON-DTMCOR, südliches Kerngebiet

Wiederum liegt eine Normalverteilung vor, das Maximum liegt, leicht zum Negativen verschoben, im Intervall -10 cm. Das Histogramm wirkt uneben und die Streuung ist relativ groß. Eine Zuordnung zu bestimmten Bereichen des Kerngebietes lässt sich hier aber noch nicht ableiten.

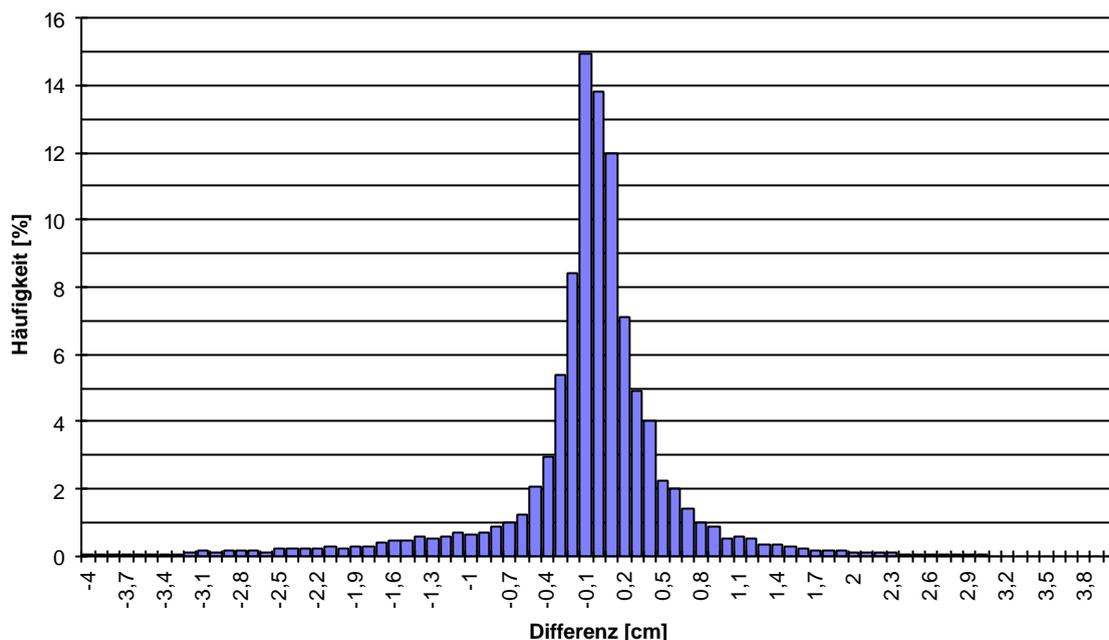


Diagramm 8-4: Verteilung der Höhendifferenzen HALCON₁₀ - DTMCOR, südliches Kerngebiet

Das **Diagramm 8-4**, in der die Differenzen zwischen dem HALCON₁₀-DTM und dem DTMCOR-Höhenmodell dargestellt sind, zeigt eine fast identische Verteilung der Höhendifferenzen. Lediglich der Streubereich fällt etwas schmaler aus.

Im südlichen Kerngebiet lagen von den 20.000 verglichenen Punkten 10.542 Punkte (52,71%) im negativen Differenzenbereich, 9.179 Punkte (45,90%) im positiven Bereich und 279 (1,40%) wiesen keinen Höhenunterschied auf.

Zur Beurteilung der Streuung wurden die in **Tabelle 8-2** zusammengestellten Mittelwerte und Quadratmittel berechnet.

	Punktzahl	Mittelwert [cm]	Quadratmittel [cm]	Quadratmittel gegen Mittelwert [cm]
HALCON - DTMCOR	20.000	-2,8	±86,9	±86,9
HALCON ₁₀ - DTMCOR	20.000	-10,4	±92,8	±92,8

Tabelle 8-2: Mittelwert und Abweichung der Differenzen, südliches Kerngebiet

Es zeigt sich, wie bereits in den Histogrammen zu erkennen, daß das HALCON-DTM in beiden Fällen in der Höhe etwas unter dem DTMCOR-DTM liegt. Dabei sind die Unterschiede im südlichen Kerngebiet, das flacher ist als das nördliche und weniger Bebauung aufweist, größer als beim Vergleich der beiden im 10m-Raster erstellten Höhenmodelle. Ein Grund dafür liegt in der verstärkten Filterung der Trassen durch HALCON im Verhältnis zum reduzierten DTM.

Zur Beurteilung der Verteilung der Höhendifferenzen soll wieder die Lokalisierung in den Grauwertbildern des Gebietes betrachtet werden. In diesen schlägt sich eine Systematik im DTMCOR-Höhenmodell nieder, die bereits beim Betrachten des Grauwertbildes der Differenzen (**Abbildung 8-14**) deutlich wird. Beim Interpolieren der Höhenwerte "schiebt" DTMCOR Höhenwerte an Kanten offensichtlich weiter. Besonders auffällig ist dieser Effekt entlang der A43. Der Grund dafür könnte bereits in der auffälligen Filterung der A43 (**Abbildung 8-12**) liegen. An der südöstlichen Flanke der Trasse sind die Höhendifferenzen durchgehend positiv, d.h. die von HALCON gelieferten Höhenwerte liegen hier höher. Auf der anderen Seite der Trasse sind ausschließlich negative Differenzen vorhanden, hier liegt also das DTMCOR-Modell höher.



Abbildung 8-14: Grauwertbild der Differenzen HALCON_10-DTMCOR, südliches Kerngebiet

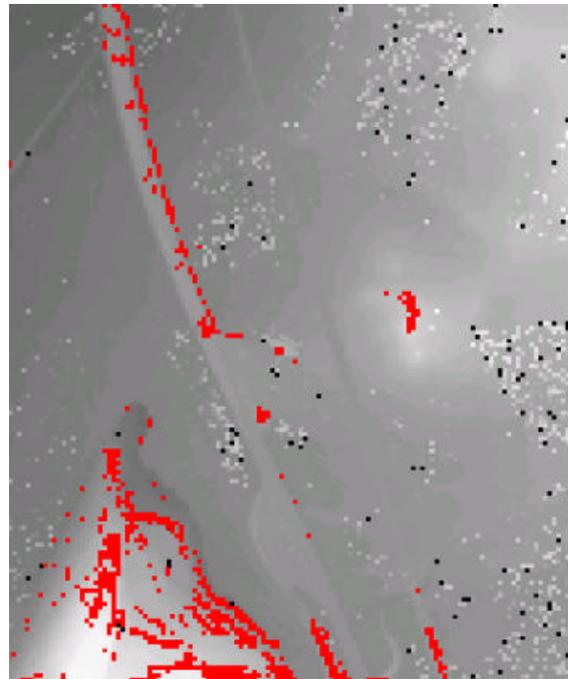


Abbildung 8-15: Differenzen HALCON_10-DTMCOR, Intervall < -3 m, südliches Kerngebiet

Die Differenzen, die im Intervall < -2 m liegen

(**Abbildung 8-15**), finden sich geballt im Bereich der Halde, an der Böschung der A43 und auf der Kuppe eines Hügels. Im wesentlichen sind dies Bereiche, in denen in jeweils einem der Modelle viele Punkte ausgefiltert wurden. Auf dem Haldenrücken und auf dem Hügel wurden von HALCON mehr Punkte entfernt. Da HALCON linear interpoliert, werden diese Flächen flacher aufgefüllt, als die Punkte im DSM vorliegen. Am westlichen Fußbereich wurden dagegen mehr Punkte von DTMCOR entfernt. Der Übergang vom flacheren Gelände zur steileren Haldenflanke wird hier aufgefüllt. Die negativen Differenzen an der nordöstlichen Seite der Autobahn erklären sich aus der angesprochenen Systematik.

Die Verteilung der Differenzen im Intervall -2 m bis $<-1\text{ m}$ (**Abbildung 8-16**) zeigt eine Häufung von Differenzen dieser Größenordnung an der westlichen Seite der Halde. Da hier in beiden Höhenmodellen nur wenige Punkte entfernt wurden, liegt die Ursache hierfür wahrscheinlich in der stärker glättenden Interpolation von DTMCOR, die die Höhenwerte dieser leicht konkaven Form anhebt.

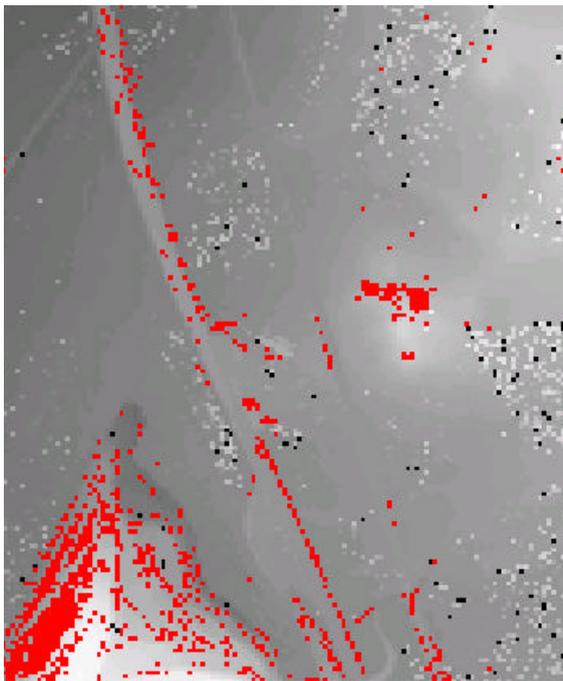


Abbildung 8-16: Differenzen HALCON_10 - DTMCOR, Intervall -2 bis <-1 m, südliches Kerngebiet

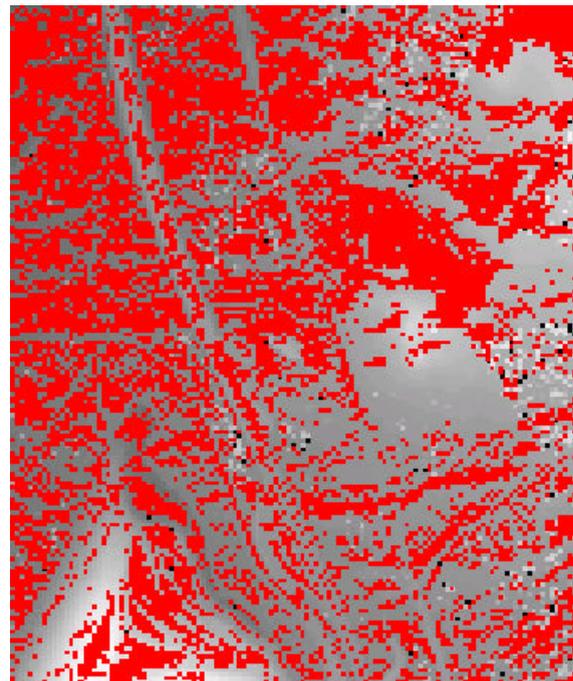


Abbildung 8-17: Differenzen HALCON_10 - DTMCOR, Intervall -1 bis <0 m, südliches Kerngebiet

Der glättende Charakter dieses Algorithmus zeigt sich auch in **Abbildung 8-17**. Leichte Bodensenken werden mit etwas höheren Werten aufgefüllt, was sich gut am Beispiel der Gegend nördlich der Kuppe beobachten läßt.

Die Auffüllung von Bodenformen wird am östlichen Hang der Halde deutlich. Die Differenzen fallen hier jedoch geringer als am westlichen Hang aus, da dieser steiler ist.

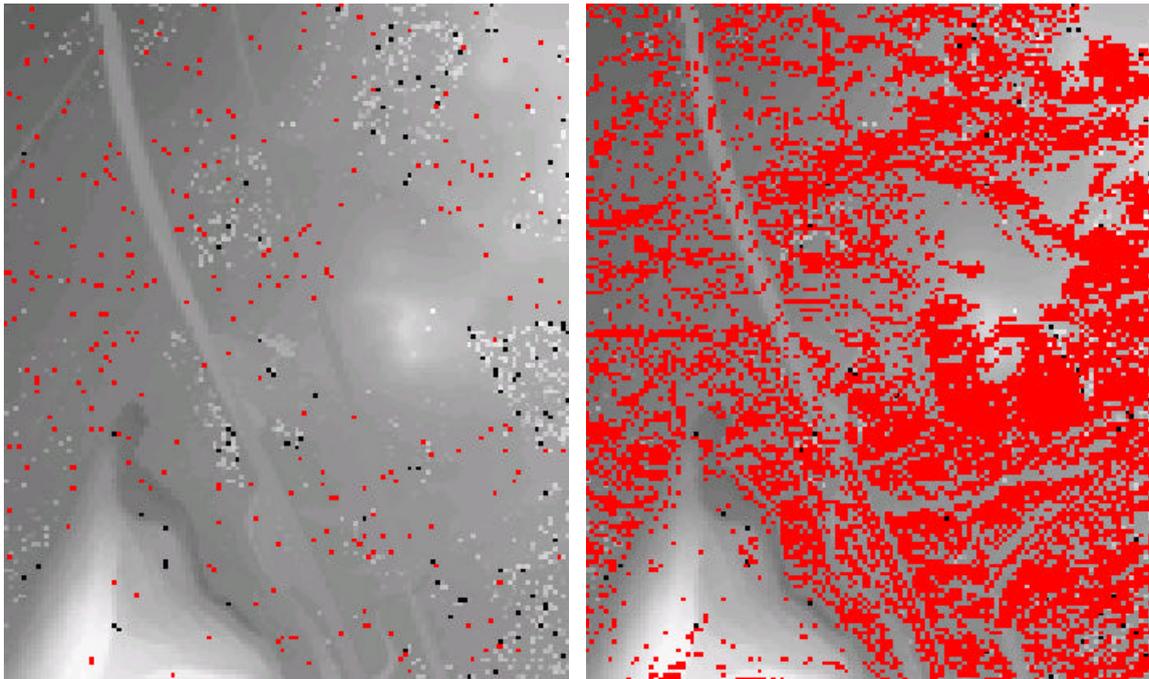


Abbildung 8-18: Punkte gleicher Höhenwerte, südliches Kerngebiet

Abbildung 8-19: Differenzen HALCON_10 - DTMCOR, Intervall >0 m bis $+1$ m, südliches Kerngebiet

Die Punkte gleicher Höhen (**Abbildung 8-18**) sind, wie im nördlichen Kerngebiet, die Ausnahme. Sie verteilen sich hauptsächlich auf relativ ebene Flächen und folgen ansonsten keiner erkennbaren Systematik. Dagegen kommen Bereiche geringer positiver Differenzen (**Abbildung 8-19**) hauptsächlich in Gegenden leichter Geländeerhöhungen vor. Dies ist wieder ein Hinweis auf die Glättung von Geländeformen durch DTMCOR.

Etwas größere Differenzen im positiven Bereich lassen sich zum einen an der A43 finden (**Abbildung 8-20**), was wieder der "verschobenen" Autobahn zuzuschreiben ist. Die Eisenbahntrasse wurde von DTMCOR großräumiger entfernt und daher mit niedrigeren Höhenwerten aufgefüllt. Die stärkere Einebnung von Bodenformen zeigt sich diesmal an der Südseite der Kuppe. Die deutlicheren Höhenabweichungen konzentrieren sich neben der Autobahn auf den nördlichen

und nordöstlichen Fußbereich der Halde (**Abbildung 8-21**). Dies ist dadurch zu erklären, daß DTMCOR hier Punkte ausgefiltert hat, die in der Nähe der Kante eher auf dem Gebiet der Halde liegen. Da die Flanke der Halde aber in diesem Gebiet besonders stark ansteigt, weisen die interpolierten Werte hier eine geringere Höhe auf als die reale Geländeoberfläche.

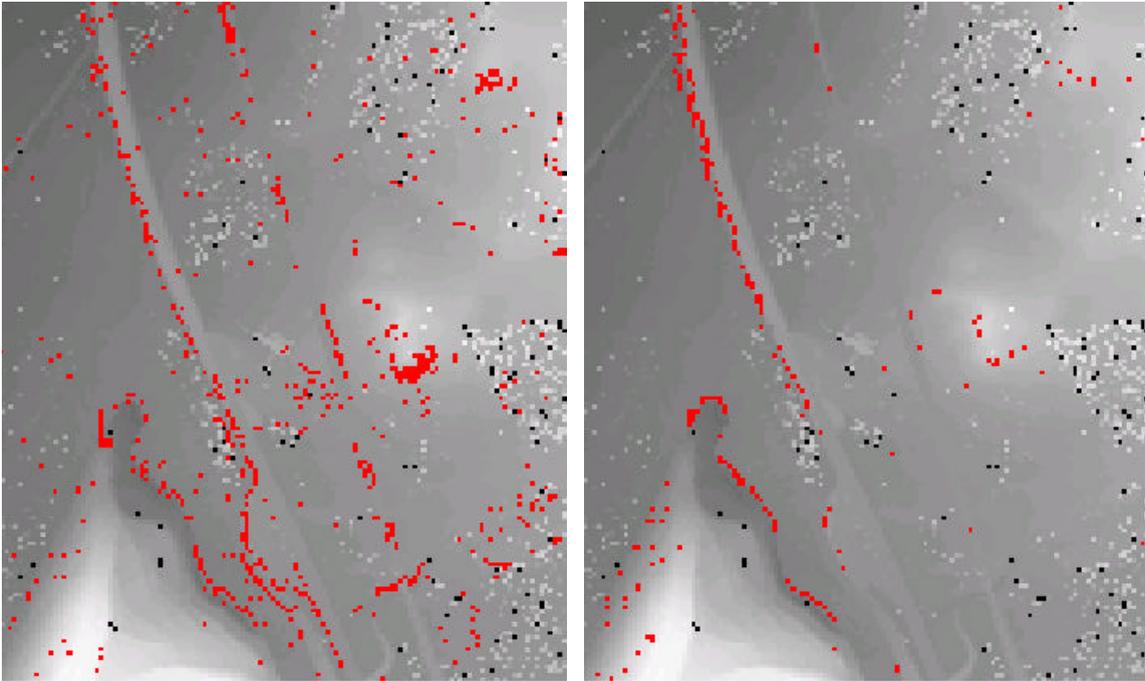


Abbildung 8-20: Differenzen HALCON_10 - DTMCOR, Intervall $>+1$ m bis $+2$ m, südliches Kerngebiet
Abbildung 8-21: Differenzen HALCON_10 - DTMCOR, Intervall $>+2$ m, südliches Kerngebiet

8.2.3 Bewertung

Beim Vergleich der durch die beiden Programme erzeugten Höhenmodelle zeigt sich, daß die Ergebnisse recht unterschiedlich ausfallen. So werden durch DTMCOR durchgehend mehr Punkte als nicht zum Gelände gehörig aus dem DSM herausgefiltert. Dies trifft besonders an Steigungsänderungen, also Geländekanten zu. In diesem Punkt ist HALCON durchgängig toleranter, was im unterschiedlichen Ansatz der beiden Algorithmen begründet ist. Während DTMCOR eine Maske über das DSM schiebt und innerhalb dieser nach Punkten mit stärkeren Abweichungen von der Durchschnittshöhe sucht, betrachtet HALCON zunächst das gesamte Bild und sucht mithilfe der Standardabweichung der Grauwerte nach Kanten, die dann näher untersucht werden. Es findet

also zunächst eine Eingrenzung auf interessierende Regionen statt (Region of Interest, ROI), innerhalb derer individuell gefiltert wird. Daher kann HALCON flexibler auf die Gegebenheiten des jeweiligen ROI reagieren.

Ein weiterer Unterschied besteht in der Behandlung nach dem Ausfiltern von Punkten. Während HALCON als Bodenknoten identifizierte Punkte nicht weiter verändert, beschränkt sich DTMCOR nicht auf das Füllen von entstandenen Lücken, sondern glättet das gesamte Gelände.

Ein Umstand der bei dieser Bewertung berücksichtigt werden muß, ist die geringe Auflösung der Ausgangsdaten. So kann ein Einfamilienhaus unter Umständen nur durch einen Punkt repräsentiert werden. Liegen stärkere Bodenbewegungen von geringen flächenmäßigen Ausmaßen vor, werden auch diese wahrscheinlich als Vegetationspunkt klassifiziert. Außerdem werden großräumige Bodenbewegungen gestaucht und es entsteht daher ein Bodenprofil von großer Rauheit, was die Analyse zusätzlich erschwert.

Zur Qualität der Ergebnisse läßt sich sagen, daß das durch HALCON berechnete Modell etwas realistischer als das mit DTMCOR berechnete wirkt. Das DTMCOR-DTM vermittelt jedoch einen guten Überblick über die allgemeine Bodenform des betrachteten Gebietes, da es insgesamt harmonischer und glatter erscheint, während das HALCON-DTM kleinere Formen, darunter unter Umständen auch Vegetationspunkte, im Modell beläßt und daher einen rauheren Eindruck macht.

9 Schlußbetrachtung und Ausblick

Der Einsatz des Laserscanners liefert Höhenmodelle, die mit denen der analytischen Photogrammetrie in den meisten Bereichen konkurrieren können und diese in einigen Aspekten in ihrer Qualität auch übertreffen.

Vorteile des Laserscannings liegen in der hohen möglichen Punktdichte und besonders in der Durchdringung in Waldgebieten, die auch hier die Erstellung eines DTM ermöglicht. Diese bewaldeten Gebiete können mittels analytischer Photogrammetrie nicht oder nur sehr unbefriedigend ausgewertet werden.

Nachteil des Last-Pulse-Verfahrens ist der fehlende semantische Aspekt der gewonnenen Daten. Es erfolgt eine reine Entfernungsmessung, die keine Aussage darüber enthält, welches Objekt getroffen wird. Daraus resultiert die Aufgabe, Punkte nur anhand ihrer Höhenmerkmale in Bodenpunkte oder Vegetations- bzw. Gebäudepunkte zu klassifizieren.

Die gestellte Aufgabe einer automatischen Klassifizierung mit nachfolgender Entfernung der nicht zum Boden gehörenden Punkte und Auffüllung der entstandenen Datenlücken, wird mit unterschiedlichem Erfolg gelöst. Gebäude werden meist erfolgreich erkannt und vollständig entfernt. Die Auffüllung durch lineare Interpolation paßt sich der umgebenden Bodenform meist in ausreichendem Maße an. Wie sich herausstellte, benutzt Toposys den gleichen Füllalgorithmus. Da die Füllung durch Toposys jedoch nicht geglättet wird, entsteht hier eine sehr künstlich wirkende Gitterstruktur.

Problematischer gestaltet sich die Entfernung von Vegetationspunkten, insbesondere in Waldgebieten. Aufgrund der verschiedenen Vegetationshorizonte ist hier eine eindeutige Identifikation von Bodenpunkten schwierig. Dadurch, daß in Waldgebieten viele Punkte entfernt werden und nur einzelne Punkte verbleiben, entsteht bei der linearen Interpolation ein sehr unruhiges Bild.

Im Vergleich zu DTMCOR zeigt der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus eine deutlich weniger glättende Auswirkung. Der Vorteil liegt in der realistischer wiedergegebenen Bodenform. Nachteilig ist jedoch die sehr rauhe Oberfläche des Ergebnis-DTM, in der teilweise auch bodennahe Vegetation verbleibt. Letztlich hängt es aber vom Verwendungszweck des erstellten DTM ab, welche Variante sinnvoller erscheint.

Abschließend bleibt festzustellen, daß eine fehlerfreie automatische Filterung von Laserscanner-Daten bisher nicht möglich scheint. In allen der drei verglichenen Modelle sind teilweise grobe Fehler vorhanden. Ein manuelles Eingreifen in den Filterungsvorgang ist offensichtlich - zumindest momentan - unumgänglich, will man Fehlklassifizierungen vermeiden.

Es erscheint daher wünschenswert, daß eine Offenlegung der von Privatanbietern verwendeten Algorithmen geschieht, um in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen möglicherweise einen optimierten Rechengang zu destillieren, der zur Vereinheitlichung der Filterung genutzt werden könnte.

Literaturverzeichnis

Ackermann, F. (1999): *Airborne laser scanning - present status and future expectations*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3), Seite 64-67

Baltsavias, E. (1999): *A comparison between photogrammetry and laser scanning*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3), Seite 83-94

Baltsavias, E. (1999a): *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3), Seite 199-214

Hug, C. (1996): *Entwicklung und Erprobung eines abbildenden Laseraltimeters für den Flugeinsatz unter Verwendung des Mehrfrequenz-Phasenvergleichsverfahrens*, Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 457

Jacobsen, K. (1997): *Handbuch BLAN, Programmiersystem BLUH, Analyse und graphische Darstellung der Ergebnisse*, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen Hannover

Koch, A. (1999): *Analyse und Aufbereitung von Laser-Scanner-Aufnahmen*, Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover, Mai 1999

MVTec (1998): *HALCON/hdevelop, reference manual*, MVTec Software GmbH, München, 9.3.1998

MVTec (1998a): *HDevelop User's Manual*, MVTec Software GmbH, 19.3.1998

Toposys (1999): Toposys GmbH, Freiherr-vom-Stein-Str.7, 88212 Ravensburg, Internet: www.toposys.com, Zugriff am 6.8.99

Wehr, A.; Lohr, U. (1999): *Airborne laser scanning - an introduction and overview*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3), Seite 68-82

Wehr, A.; Lohr, U. (1999a): *Editorial*, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3), Seite 61-63

