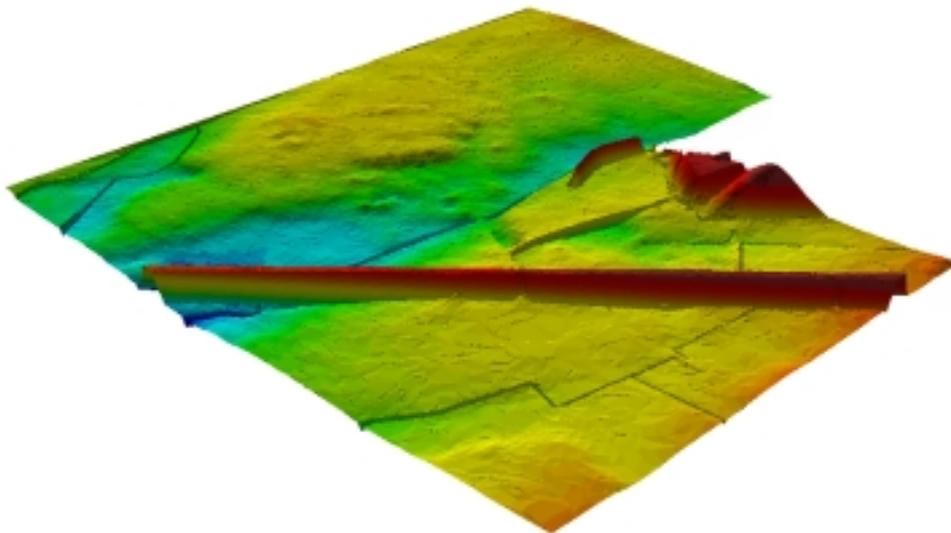


**Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen
Universität Hannover**

Diplomarbeit

Automatische Generierung von Höhenmodellen und ihre Auswirkung auf Orthophotos



Karsten Raguse

Dezember 2000

Universität Hannover

Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen

Diplomarbeit

**Automatische Generierung von Höhenmodellen
und ihre Auswirkung auf Orthophotos**

vorgelegt von

cand. geod. **Karsten Raguse**

im

Dezember 2000

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Hannover, Dezember 2000

.....

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung in das Thema	1
1.2	Inhalt dieser Arbeit	4
2	Vorbereitung des Projektes	6
2.1	Untersuchungsgebiet „Oer Erkenschwick“	6
2.2	Datenerfassung	8
2.2.1	Befliegung	8
2.2.2	Scannen.....	9
2.2.3	Aerotriangulation / Bündelblockausgleichung	10
2.2.4	Kauf der Ausgangsdaten.....	11
3	Grundlagen der Auswertung	12
3.1	Allgemeines	12
3.2	Matching Algorithmen zur Oberflächenmodellgenerierung	12
3.2.1	Area Based Matching	13
3.2.2	Feature Based Matching	17
3.2.3	Epipolargeometrie	20
3.2.4	Korrelatorprinzip (Vertical Line Locus).....	21
3.2.5	Beschaffung von Näherungswerten.....	22
3.3	Filterung von Oberflächenmodellen zu Höhenmodellen.....	23
3.3.1	„Phoenics-Verfahren“	24
3.3.2	Lineare Prädiktion	26
3.3.3	Interpolationsverfahren.....	29
3.4	Orthophotogenerierung.....	31
3.5	Zusammenfassung	32
4	Eingesetzte Software	34
4.1	Oberflächenmodellgenerierung	34
4.1.1	Programmpaket LISA.....	34
4.1.2	IMAGINE OrthoMAX	36
4.1.3	Softplotter	38
4.2	Filterung der Oberflächenmodelle und Erzeugung des Höhenmodells.....	39
4.2.1	RASCOR	39
4.2.2	„Phoenics-Verfahren“.....	40
4.3	Orthophotogenerierung mit OrthoBASE.....	42
5	Aufbereitung der Höhenmodelle	44
5.1	Allgemeines	44
5.2	Bestehende Höhenmodelle	45
5.2.1	DGM5 und DGM25 des Landesvermessungsamtes NRW	45
5.2.2	DHM/M745 vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	47
5.2.3	MONA Pro der Firma GEOSYS/MONA PRO Visual Media, France.....	48
5.3	Generierte Oberflächenmodelle.....	49
5.3.1	LISA-Oberflächenmodell	49
5.3.2	OrthoMAX-Oberflächenmodell	50
5.3.3	Softplotter-Oberflächenmodell.....	51
5.4	Filterung der generierten Oberflächenmodelle zu Höhenmodellen	53
5.4.1	LISA-Höhenmodelle	53
5.4.2	OrthoMAX-Höhenmodelle.....	54
5.4.3	Softplotter-Höhenmodelle	55
5.5	Referenzmodell.....	56

5.6 Zusammenfassung	59
6 Analyse der Höhenmodelle	60
6.1 Allgemeines	60
6.2 Analyse der Filterungsverfahren	61
6.2.1 Ergebnisse der RASCOR-Filterung.....	61
6.2.2 Ergebnisse der Filterung mit dem „Phoenics-Verfahren“	64
6.2.3 Vergleich der Ergebnisse.....	65
6.3 Analyse der Differenzen zum Referenzmodell	66
6.3.1 Differenzmodelle der bestehenden Höhenmodelle.....	67
6.3.2 LISA-Differenzmodelle.....	68
6.3.3 OrthoMAX Differenzmodelle	69
6.3.4 Softplotter Differenzmodelle.....	70
6.3.5 Statistische Analyse des Gesamtgebietes	71
6.3.6 Statistische Analyse einzelner Gebiete mit spezieller Topographie.....	76
6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	77
7 Analyse der Orthophotos und Orthophotomosaik	79
7.1 Allgemeines	79
7.2 Lagefehler im Orthophoto durch Höhenfehler im Höhenmodell	79
7.2.1 Eisenbahndamm.....	80
7.2.2 Siedlung.....	83
7.3 Problematik der Schnittkanten.....	84
7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	84
8 Vergleich und Bewertung der Ergebnisse	86
8.1 Allgemeines	86
8.2 Bestehende Höhenmodelle	86
8.3 Generierte Höhenmodelle.....	87
8.3.1 Oberflächenmodellgenerierung	87
8.3.2 Filterung mit dem Phoenics-Verfahren	88
8.3.3 Filterung mit dem Programm RASCOR	88
8.4 Orthophotomosaik	89
8.5 Zusammenfassung	89
9 Vergleich der Kosten	91
9.1 Allgemeines	91
9.2 Kosten der Vorverarbeitungsschritte	91
9.3 Kosten der einzelnen Höhenmodelle.....	92
9.3.1 Bestehende Höhenmodelle	92
9.3.2 Generierte Höhenmodelle.....	93
9.4 Kosten der Orthophotogenerierung (Orthophotomosaik).....	94
9.5 Zusammenstellung der Kosten	94
10 Schlussbetrachtung und Ausblick	98
Literaturverzeichnis	100
Abbildungsverzeichnis	104
Tabellenverzeichnis	106
Anhang	107

1 Einleitung

1.1 Einführung in das Thema

Die Erstellung von Digitalen Höhenmodellen ist seit jeher eine wichtige Aufgabe der Geodäsie. Digitale Höhenmodelle können mit unterschiedlichen Techniken erzeugt werden, beispielsweise durch Digitalisierung von Höhenlinien aus Karten, durch terrestrische Messungen, durch Auswertung von Luftbildern oder aus anderen Sensoraufnahmen.

Die Begriffsunterscheidung zwischen Oberflächen-, Höhen- und Geländemodell ist in der Fachliteratur teilweise nicht einheitlich. Diese Begriffe werden manchmal auch als Synonyme gebraucht. In dieser Arbeit werden die Begriffe folgendermaßen unterschieden und benutzt. Diese Begriffsunterscheidung findet sich auch in diversen Fachbüchern.

Als Oberflächenmodell wird ein Modell bezeichnet, in dem die Höhenwerte aller Objekte dargestellt werden. Auf diese Arbeit bezogen ist das Oberflächenmodell das Modell, welches direkt mit den automatischen Matching-Verfahren erstellt wird.

In einem Höhenmodell werden nur die Höhenwerte von Objekten dargestellt, welche Bestandteil der Erdoberfläche sind. In dieser Arbeit sind die Höhenmodelle die gefilterten Oberflächenmodelle.

Ein Geländemodell beinhaltet zusätzlich zu dem Höhenmodell noch Grundrissinformationen über die abgebildeten Objekte. Diese Art der Darstellung wird in der vorliegenden Arbeit nicht benutzt.

Generell sind alle in der vorliegenden Arbeit bearbeiteten Modelle digitale Modelle, sodass im Weiteren nur noch von Modellen gesprochen wird und nicht jeweils noch der Zusatz „digital“ hinzugenommen wird.

Die Einsatzgebiete von Höhenmodellen sind in Zeiten von Geo-Informationssystemen (GIS) sehr weitreichend. Sie dienen innerhalb der GIS als Datengrundlage für

- 3D-Stadtmodelle (3D-Visualisierung),
- Funknetzplanung,
- Raumplanung,
- Flächenversieglungskartierung,
- Hydrologische Berechnungen,
- Emissions- und Immissionsanalysen sowie
- Orthophotogenerierung.

Die Höhenmodelle für die oben genannten Anwendungsbereiche sind meist großflächige Modelle, sodass sich die Erstellung durch terrestrische Messungen aus Kosten- und Zeitgründen nicht rentiert. Die Erstellung von Höhenmodellen aus digitalisierten Höhenlinien ist für diese Anwendungsbereiche aufgrund der teilweise geforderten Genauigkeit, der Auflösung und vor allem der Aktualität nicht nutzbar. Somit werden die benötigten Modelle meist durch Luftbilddauswertung oder andere Sensordatenauswertungen, wie beispielsweise der Laserdistanzmessung, gewonnen.

Die Einsatzgebiete von Höhenmodellen liegen, wie bereits aufgeführt, in vielfältigen Bereichen. Ein großer Bereich ist zurzeit die Funknetzplanung. Dort werden für Emissionspläne und die Wahl der Antennenstandorte Höhenmodelle benötigt. Aus Kostengründen sind die Funknetzbetreiber daran interessiert, möglichst genaue Höhenmodelle zu erhalten, um die Anzahl der Antennenstandorte gering zu halten und sie so zu legen, dass damit eine möglichst große und geschlossene Ausleuchtzone bzw. Abdeckung erreicht wird. Die für diese Zwecke benötigten Modelle bestehen aus einem Höhenmodell, auf das die Gebäude „aufgesetzt“ werden. Hierbei müssen speziell die Gebäude hinsichtlich ihrer Lage und Höhe sehr genau sein. Das Höhenmodell bildet die Grundlage des Datensatzes, sowohl für die Orthophotogenerierung als auch für die Erstellung des benötigten Höhenmodells.

Von den Funknetzbetreibern bzw. Funknetzplanern wird meistens das Verfahren der Höhenmodellgenerierung über Luftbilder gewünscht. Bei diesem Verfahren können aus dem vorhandenen Datenmaterial neben dem Höhenmodell weiterhin Orthophotos abgeleitet werden. Diese Orthophotos dienen zum einen der Kontrolle der Modelle und zum anderen erlangen die Funknetzbetreiber einen optischen Eindruck der möglichen

Antennenstandpunkte und können eventuell auftretende Hindernisse zuordnen und eigenständig bewerten. Diese Möglichkeit bietet die Laserdistanzmessung nicht, da der Sensor keine Luftbilder erzeugt.

Je nach Unternehmen kommen dabei verschiedene Erstellungsmethoden und unterschiedliche Anforderungen an die zu generierenden Höhenmodelle infrage. Die Firma Phoenics GmbH erstellt auf der Grundlage von Höhenmodellen Orthophotos, welche dann beispielsweise für Flächenversiegelungskartierungen genutzt werden. Die erstellten Höhenmodelle werden auch direkt als Grundlage für die bereits angesprochenen Funknetzplanungen eingesetzt.

Bei der Firma Phoenics GmbH kommen für die Generierung der benötigten Höhenmodelle Verfahren der digitalen Photogrammetrie zum Einsatz. Mit diesen Verfahren werden aus den Luftbildern durch Matching-Algorithmen Oberflächenmodelle generiert, welche dann im weiteren Verarbeitungsablauf auf den Erdboden reduziert werden.

Neben diesen bei der Firma Phoenics GmbH eingesetzten digitalen Verfahren können Höhenmodelle auch durch Auswertung der Luftbilder an einem analytischen Plotter erstellt werden. Jedoch tritt dieser Bereich immer mehr in den Hintergrund, da die digitalen Methoden mit steigender Rechnerkapazität und ständiger Verbesserung der Algorithmen immer genauer und vor allem schneller werden.

Die mit den Matching-Verfahren erzeugten Oberflächenmodelle liegen in diesen Verfahren als Rasterdatensätze vor. Höhenmodelle können allerdings auch als Vektordatensätze vorliegen. Dabei unterscheidet man zwischen Datensätzen, welche in einen regelmäßigen oder einem unregelmäßigen Raster vorliegen, oder sogenannten hybriden Höhenmodellen, in welchen sowohl ein regelmäßiges Raster als auch auftretende Bruchkanten in Form von Linien oder Polygonen vorhanden sind. Die zuletzt genannten Höhenmodelle haben sich aufgrund ihrer Genauigkeit für die meisten Einsatzgebiete durchgesetzt.

Die Erstellung von Höhenmodellen für die angesprochenen Anwendungsbereiche wird heutzutage größtenteils durch zwei Verfahren gewährleistet. Dies ist zum einen die photogrammetrische Erzeugung aus Luftbildern, welche in dieser Arbeit untersucht wird, und zum anderen die Erzeugung aus Laserdistanzmessungen [KOCH 1999; SCHAEFFER 1999].

1.2 Inhalt dieser Arbeit

Die Generierung von Oberflächenmodellen und die Reduzierung dieser Modelle zu Höhenmodellen kann auf unterschiedliche Art und Weise geschehen. In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, inwieweit sich die unterschiedlichen Verfahren in der Genauigkeit und Qualität der Höhenmodelle widerspiegeln. Weiterhin wird analysiert, inwieweit sich die Höhenfehler der Höhenmodelle in den zugehörigen Orthophotos wiederfinden und welche Größenordnung die dadurch verursachten Lagefehler einnehmen. Dies soll im Rahmen dieser Arbeit anhand des Untersuchungsgebietes Oer-Erkenschwick durchgeführt werden. In dieser Arbeit werden neben den gekauften Höhenmodellen nur solche untersucht, welche aus Luftbildern erstellt wurden. Eine Auswertung auf der Grundlage von Laserdistanzmessungen wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

Das Ziel dieser Untersuchung ist – wie bereits angesprochen – zum einen die Bestimmung der Genauigkeit der Höhenmodelle und zum anderen die Einflüsse der eingesetzten Programme auf die Genauigkeit aufzuzeigen. Durch die berechnete Genauigkeit werden weiterhin die Einsatzgebiete der Höhenmodelle und der, auf der Grundlage der jeweiligen Höhenmodelle, generierten Orthophotos aufgeführt.

Neben dem Aspekt der Genauigkeit und Qualität wird in der vorliegenden Arbeit auch der Aspekt der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Modelle untersucht.

In Kapitel 1 wird zunächst eine grundlegende Einführung in die Thematik und eine kurze Zusammenfassung der Inhalte der hier vorliegenden Arbeit aufgeführt.

Im zweiten Kapitel werden nach einer kurzen Beschreibung des Untersuchungsgebietes die Datenerfassung und die Vorverarbeitungsschritte, welche nicht Bestandteil der hier vorliegenden Untersuchung sind, aufgeführt. Dies ist zum einen die eigentliche Befliegung und zum anderen die grundlegende Auswertung der Befliegung (Scannen, Triangulation).

Die weitergehenden Auswertungs- und Generierungsschritte werden in Kapitel 3 aufgelistet. In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Arbeitsschritte der Oberflächenmodellgenerierung, der Filterung der Oberflächenmodelle zu Höhenmodellen und der Orthophotogenerierung aufgezeigt. Es wird ein Überblick über den derzeitigen Stand der Technik und die Unterschiede in den einzelnen Algorithmen sowie über deren Vor- und Nachteile gegeben.

In Kapitel 4 werden verschiedene, für die Auswertung einsetzbare Softwareprogramme aufgezeigt und kurz erläutert. Dabei wird aufgeführt, welche im dritten Kapitel beschriebenen Algorithmen in den einzelnen Programmen zum Einsatz kommen. Weiterhin wird der Arbeitsablauf der einzelnen Programme dargestellt.

In Kapitel 5 werden alle zu untersuchenden Höhenmodelle aufbereitet. Es wird auf die besonderen Eigenschaften, beispielsweise auf die Rasterweite und die – falls gegeben – Genauigkeit, jedes einzelnen Höhenmodells eingegangen.

Die Analyse der Höhenmodelle wird in Kapitel 6 vorgestellt. Dabei werden im ersten Abschnitt des Kapitels die Ergebnisse der Filterungsverfahren untersucht und bewertet. Im zweiten Teil des Kapitels werden die Höhenmodelle mit dem erstellten Referenzmodell verglichen und bewertet. Dies geschieht zum einen mit den Gesamtmodellen und zum anderen mit speziell auftretenden Problembereichen.

In Kapitel 7 wird die Orthophotogenerierung untersucht. Im Mittelpunkt stehen dabei die Ergebnisse in den Problembereichen, und dabei speziell die durch die Höhendifferenzen verursachten Lageverschiebungen in den Orthophotos.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse aller Bearbeitungsschritte sowie die Endergebnisse einander gegenübergestellt und bewertet. Neben der Genauigkeit der Höhenmodelle sind in diesem Abschnitt die bei der Orthophotogenerierung gefunden Fehler untersucht und bewertet worden. Weiterhin werden mögliche Einsatzgebiete der Daten aufgeführt.

In Kapitel 9 werden die bei der Auswertung entstehenden Kosten für die einzelnen Ergebnisse zusammengestellt und verglichen. Dabei werden die einzelnen Kostenpunkte miteinander in Beziehung gesetzt, und es wird auch speziell auf den Nutzen der Maßnahmen eingegangen.

Kapitel 10 gibt schließlich eine Zusammenfassung der gesamten Arbeit und einen Ausblick auf neue Methoden und auf aktuelle Forschungsvorhaben.

2 Vorbereitung des Projektes

2.1 Untersuchungsgebiet „Oer Erkenschwick“

Das Untersuchungsgebiet Oer-Erkenschwick liegt im Ruhrgebiet im Bundesland Nordrhein-Westfalen, etwa 3 km nördlich von Recklinghausen, im Kreis Recklinghausen (vgl. Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1: Übersicht Ruhrgebiet mit Untersuchungsgebiet (schwarzes Quadrat)

Das Gebiet Oer-Erkenschwick wurde im Jahre 1998 durch die Firma Phoenics GmbH aufgrund eines Auftrages der Stadt Oer-Erkenschwick ausgewertet. Das im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchende Gebiet ist ein etwa 1 km x 1 km großer Ausschnitt des gesamten Auswertgebietes. Das Untersuchungsgebiet wird als Orthophotomosaik in Abbildung 2.2 dargestellt. Bei dem Untersuchungsgebiet kommt es nicht besonders auf die Größe des Gebietes an. Es soll vielmehr untersucht werden, inwieweit „Problembereiche“ verarbeitet werden. Diese Problembereiche sind Bereiche, welche bei den automatischen Verfahren zur Höhenmodellgenerierung aufgrund ihrer Struktur zu fehlerhaften Ergebnissen führen können. Auf die genaue Problematik wird in den weiteren Abschnitten noch näher eingegangen.

Die Problembereiche in diesem Untersuchungsgebiet sind der Eisenbahndamm, welcher quer durch das Gebiet verläuft, kleine Flüsse oder Bäche, Waldgebiete, lokale Erhebungen und Senken sowie das Siedlungsgebiet.



Abbildung 2.2: Orthophotomosaik des Untersuchungsgebietes Oer-Erkenschwick

2.2 Datenerfassung

In dem hier vorliegenden Untersuchungsgebiet sollte von der Firma Phoenics GmbH im Rahmen eines Auftrages von der Stadt Oer-Erkenschwick eine Flächenversiegelungskartierung durchgeführt werden. Das Gebiet wurde daraufhin befliegen, die entsprechenden Luftbilder gescannt und trianguliert. Diese Vorarbeiten sind nicht Bestandteil dieser Untersuchung. Somit werden diese hier zwar der Vollständigkeit halber erwähnt, jedoch wird auf die Durchführung dieser Arbeiten nicht eingegangen. Die erzeugten Ergebnisse werden in dieser Arbeit als Datengrundlage angesehen und in allen weiteren Arbeitsschritten in gleicher Weise eingesetzt und weiterverarbeitet.

Das Untersuchungsgebiet besteht aus sieben Luftbildern, welche in zwei Streifen angeordnet sind (vgl. Abbildung 2.3).

Neben den von der Firma Phoenics GmbH zur Verfügung gestellten Daten werden weitere bereits bestehende Höhenmodelle untersucht.

2.2.1 Befliegung

Die Befliegung dieses Gebietes wurde im März 1998 im Auftrag der Firma Phoenics GmbH von der Firma Terra Bildmeßflug GmbH durchgeführt. Dabei wurde der gesamte Block Oer-Erkenschwick befliegen. Er besteht aus 102 Bildern, 99 Bilder davon wurden gescannt, und sieben dieser Bilder, verteilt auf zwei Streifen, gehören zum Untersuchungsgebiet Oer-Erkenschwick (vgl. Abbildung 2.3).

Die Ergebnisse sollten im Maßstab 1:3500 erstellt werden. Auf dieser Grundlage wurde die Befliegung geplant und durchgeführt. Die Daten der Befliegung sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst. Die Luftbilder wurden mit der Luftbildkamera RMK TOP 30 (s/n 143 093) aufgenommen, welche am 15.01.1997 folgendermaßen kalibriert wurde:

- Kammerkonstante: 305.024 mm

X1	113,001	X2	-112,999	X3	0,011	X4	0,006
Y1	0,008	Y2	0,003	Y3	113,000	Y4	-113,002

X5	113,009	X6	-112,997	X7	-112,988	X8	113,002
Y5	112,996	Y6	-112,999	Y7	113,003	Y8	-112,995

Tabelle 2.1: Rahmenmarken Soll-Koordinaten in [mm]

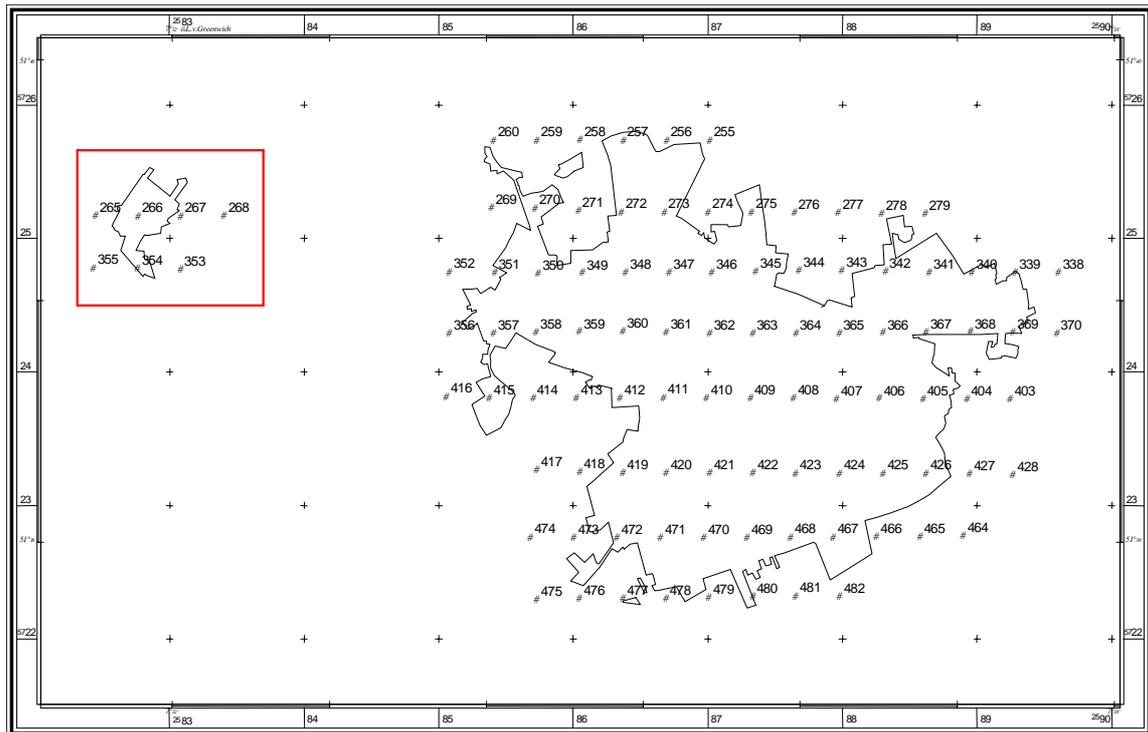


Abbildung 2.3: Bildmittenübersicht des Befliegungsgebietes Oer-Erkenschwick mit den Grenzen des Auswertgebietes (Untersuchungsgebiet rot umrandet)

Flugdatum	25.03.1998
Maßstab	1:3500
Material	Color-Diapositiv
Zahl der Flugstreifen	8
Bildzahl	102 (99 gescannt)
Aufnahmekamera	RMK Top 30
Brennweite	305,024 mm
Seriennummer	143 093
Kalibrierung	15.01.1997

Tabelle 2.2: Informationen zum Bildflug

2.2.2 Scannen

Die Luftbilder wurden am Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart im Auftrag der Firma Phoebics GmbH in 28 µm Color mit dem photogrammetrischen Präzisionsscanner SCAI der Firma Zeiss gescannt. Beim Scannen der Luftbilder werden die analogen Bildinformationen durch die angesetzte Scann-Auflösung bereits eingeschränkt. Jedoch werden durch das Scannen mit dieser Auflösung für die Untersuchung keine signifikanten

Einschränkungen der Informationen vorgenommen. Somit kann das analoge Ausgangsmaterial von der Bildinformation her, mit dem digitalen – gescannten – Bild für diese Untersuchung gleichgesetzt werden.

Durch das Scannen der Luftbilder in 28 µm Color Auflösung ergibt sich eine Speichermenge von etwa 200 MB pro Luftbild. Dies bedeutet, dass bei der Verarbeitung dieses kleinen Blockes von sieben Luftbildern bereits eine Datenmenge von etwa 1,5 GB – allein für die Ausgangsdaten – entsteht.

2.2.3 Aerotriangulation / Bündelblockausgleichung

Die Aerotriangulation als automatische photogrammetrische Punktbestimmung wurde in diesem Untersuchungsgebiet mit dem Programm Phodis AT der Firma Zeiss durchgeführt. Dazu wurden neben den sieben gescannten Luftbildern die Kalibrierungsdaten der benutzten Luftbildkamera, die mit DGPS bestimmten Bildmitten und die Passpunktkoordinaten für diesen Block benötigt. Das Ablaufschema der Aerotriangulation wird im Folgenden skizziert.

Arbeitsablauf der Aerotriangulation mit Phodis AT:

- 1.) Import der Luftbilder
- 2.) Automatische Berechnung der Bildpyramiden
- 3.) Messen der inneren Orientierung
- 4.) Automatische Messung der Verknüpfungspunkte (etwa 100 bis 150 Punkte pro Bild)
- 5.) Manuelles Messen der Passpunkte

Nach Abschluss der Aerotriangulation für diesen Block wurde die Ausgleichung des Blockes, die sogenannte Bündelblockausgleichung, durchgeführt. Dies geschah für dieses Untersuchungsgebiet mit dem Programmsystem BLUH von Herrn Dr. Karsten Jacobsen der Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen. Die für das Programm BLUH benötigten Informationen sind die Passpunktkoordinaten im Landes- und Bildkoordinatensystem, die DGPS Koordinaten der Projektionszentren und die Verknüpfungspunkte. Mit diesen Informationen wird für den gesamten Block eine Bündelblockausgleichung durchgeführt. Die Ergebnisse der Orientierung der sieben Bilder sind in Tabelle 2.3 aufgeführt.

Bild-Nr.	Phi	Omega	Kappa	X ₀	Y ₀	Z ₀
265	0.21563	1.69413	-1.72044	2582450.329	5725182.330	1110.143
355	-0.34751	-0.09964	199.26379	2582436.163	5724793.102	1120.108
266	-0.00077	0.69581	-0.33140	2582763.747	5725179.067	1108.915
354	0.17149	0.91367	198.95178	2582761.148	5724788.588	1120.606
267	-0.90062	-1.02870	1.46804	2583085.152	5725177.793	1108.656
353	-0.52030	-1.50384	198.61034	2583081.376	5724781.070	1119.859
268	-0.29056	0.69898	0.77412	2583405.665	5725183.342	1112.950

Tabelle 2.3: Orientierungsparameter der sieben Luftbilder

Bei der Betrachtung der Tabelle 2.3 ist zu beachten, dass Phi, Omega und Kappa die Rotationswinkel und die Achsen X, Y und Z sind. Die Größen X₀, Y₀ und Z₀ sind die Koordinaten des jeweiligen Projektionszentrums im jeweiligen Landeskoordinatensystem. In dieser Arbeit ist das zugrundeliegende Landeskoordinatensystem das Gauß-Krüger Koordinatensystem mit dem zweiten Hauptmeridian bei 6° östlicher Breite bezogen auf den Bessel-Ellipsoid mit dem geodätischen Datum Potsdam, im weiteren als GK2 bezeichnet.

2.2.4 Kauf der Ausgangsdaten

Um einen umfassenden Überblick über die möglichen Ausgangsdaten zu bekommen, wird hier auch die Möglichkeit des Kaufes von bereits bestehenden Höhenmodellen berücksichtigt. Die zur Verfügung stehenden Höhenmodelle sind dabei in bezug auf Genauigkeit und Aktualität zu untersuchen. Es gibt verschiedenste bereits bestehende Höhenmodelle. Die Auswahl wurde in dieser Untersuchung auf Folgende beschränkt.

- DGM5 vom LVA NRW
- DGM25 vom LVA NRW
- DHM/M745 vom BKG
- MONA-Pro von der Firma GEOSYS/MONA PRO Visual Media, France

Teilweise ist die Herkunft und Aktualität der Daten, wie beispielsweise beim MONA-Pro Höhenmodell, nicht genau bekannt, da sie aus militärischen Quellen stammen und erst seit kurzer Zeit für zivile Bereiche freigegeben wurden.

Auf die Unterschiede und die Eigenschaften der genannten Höhenmodelle wird in Abschnitt 5.2 genauer eingegangen.

3 Grundlagen der Auswertung

3.1 Allgemeines

Die in dieser Untersuchung durchzuführenden Arbeitsschritte setzen erst nach der Triangulation an. Es wird also davon ausgegangen, dass die Luftbilder bereits in digitaler Form vorliegen und für jedes Luftbild die Orientierungsdaten zur Verfügung stehen. Die weitere Auswertung gliedert sich in drei Hauptbestandteile. Dies ist zum ersten die Oberflächenmodellgenerierung, welche mit den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Methoden durchgeführt wurde. Diese Oberflächenmodelle werden auf die Erdoberfläche reduziert. Man spricht dann von Höhenmodellen. Dies geschieht mit den in Abschnitt 3.3 aufgeführten Filterungsmethoden. Im Rahmen dieser Filterung werden die entstandenen Lücken durch die Eliminierung von Punkten, welches nicht Bestandteil der Geländeoberfläche sind, über Interpolationsverfahren geschlossen. Es entsteht ein Höhenmodell. Im dritten Schritt des Arbeitsablaufes werden aus den digitalen Luftbildern und dem erstellten Höhenmodell die für weitere Auswertungen, wie beispielsweise 2D-Digitalisierung, benötigten Orthophotos generiert (vgl. Abschnitt 3.4). Die einzelnen Arbeitsschritte und die anzuwendenden Techniken werden im Weiteren gesondert erläutert.

3.2 Matching Algorithmen zur Oberflächenmodellgenerierung

Es gibt verschiedene Verfahren die eine automatische Oberflächenmodellgenerierung ermöglichen. Die Ansätze können grob in zwei Verfahren gegliedert werden, zum einen in Area Based Matching und zum anderen in Feature Based Matching. Innerhalb dieser beiden Verfahren gibt es Ansätze, welche eine spezielle geometrische Grundlage für die Oberflächenmodellgenerierung nutzen. Dies sind die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Methoden über die Epipolarometrie und über das Korrelatorprinzip. Diese Verfahren werden nach der Vorstellung der beiden Hauptgruppen als Sonderfälle aufgeführt.

Das Grundprinzip aller Algorithmen zur automatischen Oberflächenmodellgenerierung geht von zwei sich um etwa 60 % überlappende Bilder aus. Bei der automatischen Bildzuordnung wird im weiteren Berechnungsablauf für jeden Punkt des linken Bildes – innerhalb des

Überlappungsgebietes – ein korrespondierender Punkt im rechten Bild gesucht. Die Grundidee lässt sich anhand Abbildung 3.1 verdeutlichen. Mathematisch betrachtet ist eine erfolgreiche Bildzuordnung dann erreicht, wenn sich die beiden Strahlen, ausgehend von den jeweiligen Projektionszentren, durch die gefundenen korrespondierenden Punkte in einem Punkt auf der Geländeoberfläche schneiden.

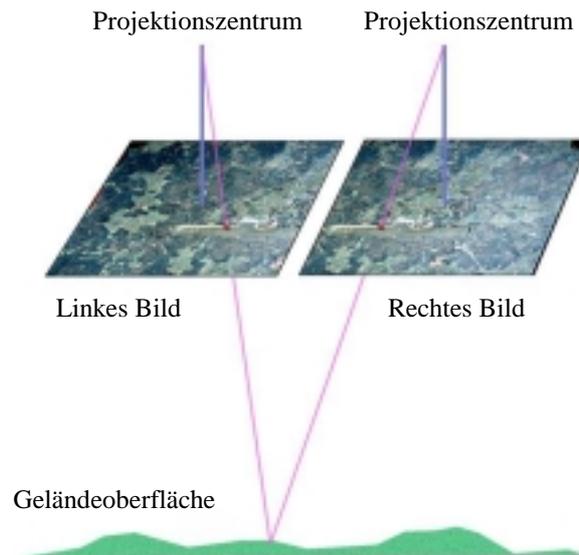


Abbildung 3.1: Grundidee der automatischen Oberflächenmodellgenerierung nach [AUTOMETRIC 1999B]

3.2.1 Area Based Matching

Eine Zuordnung über Area Based Matching wird teilweise auch als Ikonische Bildzuordnung bezeichnet. Die Zuordnung arbeitet mit den originären Grauwerten. Dies bedeutet, dass mit dieser Zuordnungsmethode eine automatische Zuordnung korrespondierender Punkte in einem Stereopaar allein über die Verteilung der Grauwerte der beiden Bilder durchgeführt wird.

Der einfachste Fall des Area Based Matching ist die Kreuzkorrelation. Bei diesem Verfahren wird ein grauwertorientierter, flächenhafter Vergleich der Umgebung des zu korrelierenden Bildpunktes im Ausgangsbild, im Weiteren als Musterbild oder Mustermatrix bezeichnet, mit einem entsprechenden Bereich des Zielbildes, im Weiteren Suchbild oder Suchmatrix genannt, durchgeführt. Das Bewertungsmaß ist der Korrelationskoeffizient, welcher über folgende Berechnungsformel bestimmt wird:

$$\rho = \frac{\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g(r,c)' - \bar{g}') \cdot (g(r,c)'' - \bar{g}'')}{\sqrt{\left(\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g(r,c)' - \bar{g}')^2 \right) \cdot \left(\sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g(r,c)'' - \bar{g}'')^2 \right)}}$$

ρ	Korrelationskoeffizient (Werte: $-1 \leq \rho \leq 1$)
r, c	(Rows, Columns) Zeilen- bzw. Spaltenindex der Pixel bzw. der Grauwerte
$g(r, c)'$	Grauwert an der angegebenen Position im Musterbild
$g(r, c)''$	Grauwert an der entsprechenden Position im Suchbild
\bar{g}'	Mittlerer Grauwert im Musterbild
\bar{g}''	Mittlerer Grauwert im Suchbild
R, C	Maximale Anzahl Zeilen und Spalten

Für die Bildzuordnung wird zunächst eine Mustermatrix im Ausgangsbild definiert und diese in der vorher definierten Suchmatrix im Zielbild variiert, schematisch dargestellt in Abbildung 3.2 (vgl. Seite 16). Für jede Position der Mustermatrix in der Suchmatrix wird der zugehörige Korrelationskoeffizient berechnet. Der maximale Korrelationskoeffizient repräsentiert die Position des zu verknüpfenden Punktes in der Suchmatrix. Ein wichtiges Kriterium bei dieser Art der Bildzuordnung ist die Wahl der Größe und Position der Suchmatrix. Sie sollte nach Möglichkeit durch gegebene Näherungskordinaten des Verknüpfungspunktes im Zielbild eingegrenzt werden. Falls keine Näherungskordinaten vorhanden sind, ergibt sich das Problem, dass die Mustermatrix im gesamten Bild variiert werden muss und somit bei der Bildzuordnung eine relativ hohe Rechenzeit entsteht. Durch die Vielzahl der möglichen Zuordnungen wird auch das Problem der Fehlkorrelationen vergrößert.

Das Verfahren der Kreuzkorrelation liefert allerdings nur eine Zuordnung von diskreten Pixelkoordinaten, welches einen gewissen Genauigkeitsverlust implementiert. Ein weiterer Nachteil der Kreuzkorrelation ist die Tatsache, dass Maßstabsunterschiede, Rotationen und Höhenunterschiede im Bereich der Mustermatrix, wie sie beispielsweise bei Luftbildauswertungen auftreten, zwischen Muster- und Suchbild nicht ohne weiteres modelliert werden können und so direkt zu Genauigkeitsverlusten bei der Bildzuordnung führen.

Die Kreuzkorrelation ist zwar eine Methode der Bildzuordnung, welche robust arbeitet, jedoch aufgrund der oben genannten Nachteile nur selten Anwendung findet. In vielen Programmpaketen wird diese Methode zur Festlegung der ersten Näherungswerte angewandt,

d.h. auf der obersten, größten Bildpyramidenebene wird meist eine Bildzuordnung über die Methode der Kreuzkorrelation durchgeführt. Die beschriebenen Vor- und Nachteile der Kreuzkorrelation werden in Tabelle 3.1 auf der Grundlage von [HAALA 1999] zusammengefasst.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - leicht zu implementieren - kann als Hardwarelösung implementiert werden - keine genauen Näherungswerte notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> - diskrete Positionen (keine Sub-Pixel Genauigkeit) - nur Verschiebung zwischen korrespondierenden Bildausschnitten erlaubt - zu einfache geometrische Transformation für die Beschreibung einer Bild-zu-Bild-Zuordnung

Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile der Kreuzkorrelation nach [HAALA 1999]

Eine verfeinerte Methode der Korrelation ist das Least-Squares-Matching. Bei dieser Methode werden neben den beiden Translationen, auch die Maßstäbe, die linearen Maßstabsvariationen und die Rotationen berücksichtigt. Neben diesen geometrischen Parametern werden bei dem Least-Squares-Matching aber auch die linearen radiometrischen Variationen beachtet. Diese radiometrische Anpassung wird über zwei Parameter durchgeführt, einen für den Grauwert-Offset und einen für eine Grauwertstreckung. Somit spricht man in diesem Fall von einer Acht-Parameter-Transformationen, sechs Parameter für die geometrische Anpassung und zwei Parameter für die radiometrische Anpassung der beiden Bilder. Diese Acht-Parameter-Transformation besteht also aus zwei Transformationen, einer geometrischen für die Position des Bildpunktes und einer radiometrischen Transformation für den Grauwert des entsprechenden Bildpunktes. Die geometrische Transformation der Position zwischen dem Muster- und dem Suchbild lautet:

$$\begin{aligned}x'' &= a_0 + a_1 \cdot x' + a_2 \cdot y' \\ y'' &= b_0 + b_1 \cdot x' + b_2 \cdot y'\end{aligned}$$

Die radiometrische Transformation zwischen dem Muster- und dem Suchbild, welche den entsprechenden Grauwert der Bildposition bestimmt, lautet:

$$g'(x', y') = r_0 + r_1 \cdot g''(x'', y'')$$

Mit diesen beiden Transformationen ergeben sich entsprechend folgende Verbesserungsgleichungen im Rahmen der Ausgleichung:

$$v(x', y') = r_0 + r_1 \cdot g''(a_0 + a_1 \cdot x' + a_2 \cdot y', b_0 + b_1 \cdot x' + b_2 \cdot y') - g'(x', y')$$

x', y'	Bildkoordinaten im Musterbild
x'', y''	Bildkoordinaten im Suchbild
$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$	Geometrische Transformationsparameter
r_0, r_1	Radiometrische Transformationsparameter
$g'(x', y')$	Grauwert im Musterbild
$g''(x'', y'')$	Grauwert im Suchbild

Die Methode des Least Squares Matching ist eine sehr weit verbreitete Methode. Sie liefert von den Verfahren die genauesten Ergebnisse, hat allerdings den Nachteil, dass für diese Methode bereits sehr gute Näherungswerte benötigt werden. Aus diesem Grund wird diese Methode in den meisten Fällen als letzter Schritt angewandt. Die benötigten Näherungswerte werden durch die Ergebnisse aus der vorigen, größeren Pyramidenstufe zur Verfügung gestellt. Die Vor- und Nachteile dieser Methode werden in Tabelle 3.2 auf der Grundlage von [HAALA 1999] zusammengestellt.

Vorteile	Nachteile
- sehr genau (1/3 bis 1/10 Pixel, abhängig von der Bildtextur)	- Näherungswerte notwendig (2-3 Pixel, abhängig von der Maskengröße)
	- relativ hoher Rechenaufwand

Tabelle 3.2: Vor- und Nachteile des Least-Squares Matching nach [HAALA 1999]



Linkes Bild (Mustermatrix)

Rechtes Bild (Suchmatrix)

Abbildung 3.2: Area Based Matching nach [AUTOMETRIC 1999B]

3.2.2 Feature Based Matching

Das Feature Based Matching – Merkmalsbasierte Bildzuordnung – basiert nicht nur auf der Zuordnung nach den Intensitäten, sondern auf einer symbolischen Zuordnung extrahierter Merkmale. Somit wird bei diesem Zuordnungsverfahren zunächst eine Merkmalsextraktion in beiden Bildern durchgeführt. Die extrahierten Punkte werden miteinander in Beziehung gesetzt und bilden aufgrund ihrer ähnlichen Attribute oder guter Korrelation Punktepaare. Innerhalb dieser Menge der Punktepaare gibt es allerdings Mehrfachzuordnungen. Um diese Mehrfachzuordnungen zu lösen, wird eine Konsistenzprüfung durchgeführt. Dies geschieht durch die Eliminierung von Fehlzuordnungen und einer robusten Schätzung der geometrischen Transformation zwischen den Punktepaaren. Nach dieser Bildzuordnung über die extrahierten Bildmerkmale kann weiterhin noch eine Feinzuordnung über eine flächenbasierte Zuordnung der Originalgrauwerte, meist über die Methode des Least-Squares Matching, erfolgen.

Ablaufplan der Merkmalsbasierten Bildzuordnung:

- 1.) Mit Hilfe der Interest-Operatoren werden in den beiden zu verknüpfenden Bildern – getrennt voneinander – markante Bildpunkte oder Fenster für die Korrelation gesucht. Für jedes Bild entsteht somit eine Liste mit möglichen Verknüpfungsstellen.
- 2.) Die Merkmalslisten der beiden Bilder werden verglichen, und es werden für die Bildzuordnung geeignete Punktepaare gesucht.
- 3.) Die gefundenen Punktepaare werden auf ihre Plausibilität überprüft.
- 4.) Die Arbeitsschritte 1.) bis 3.) sind für jede der Bildpyramidenstufen durchzuführen. Dabei gehen jeweils die gefundenen Ergebnisse in die nächst feinere Pyramidenstufe ein. Für die größte Pyramidenstufe müssen die Werte (Näherungswerte) auf andere Art gefunden werden, beispielweise über eine Kreuzkorrelation. Auf der feinsten Stufe wird abschließend meist noch ein Least Squares Matching durchgeführt, um die Genauigkeit der Bildzuordnung noch weiter zu steigern.

Der wichtigste Punkt bei dieser Methode der Bildzuordnung ist die Merkmalsextraktion. Die Algorithmen, die für diese Merkmalsextraktion benutzt werden, bezeichnet man als Interest-Operatoren. Die Aufgabe dieser Operatoren ist es, geeignete Punkte bzw. Bildmuster zu finden, welche sich für eine Bildzuordnung optimal eignen. Dies bedeutet, dass sich die gefundenen Bildmuster deutlich von ihrer Umgebung abheben und sich mit hoher Wahrscheinlichkeit im korrespondierenden Bild in ähnlicher Struktur wiederfinden lassen.

Die Interest-Operatoren geben für jeden gefundenen Bildpunkt mehrere Kenngrößen an, welche bei der späteren Merkmalszuordnung benötigt werden. Diese Kenngrößen werden als Interest-Werte bezeichnet.

Nach [LUHMANN 2000] sind die Kriterien für markante Zuordnungskandidaten und die Anforderungen an einen optimalen Interest-Operator folgende:

- Deutlichkeit (lokale Einzigartigkeit, Unterscheidbarkeit vom Hintergrund)
- Invarianz gegenüber geometrischen und radiometrischen Verzerrungen
- Robustheit (Unempfindlichkeit gegenüber Rauschen)
- Seltenheit (globale Einzigartigkeit, Unterscheidbarkeit zu anderen Kandidaten)
- Interpretierbarkeit (Interest-Werte sind zur weiteren (höheren) Bildanalyse geeignet)

Für die Auswahl der markanten Bildstellen lassen sich verschiedene Interest-Operatoren einsetzen. Es gibt eine Vielzahl von Interest-Operatoren. An dieser Stelle werden zwei dieser Interest-Operatoren – der Moravec- und der Förstner-Operator – näher vorgestellt.

1.) Moravec-Operator

Der Moravec-Operator berechnet die mittleren quadratischen Gradientensummen in den vier Hauptrichtungen eines Fensters.

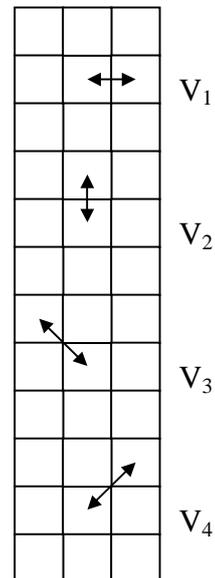
$$V_1 = \frac{1}{R \cdot (C - 1)} \cdot \sum_{r=-\frac{R}{2}}^{\frac{R}{2}} \sum_{c=-\frac{C}{2}}^{\frac{C}{2}-1} [g(r, c) - g(r, c + 1)]^2$$

$$V_2 = \frac{1}{(R - 1) \cdot C} \cdot \sum_{r=-\frac{R}{2}}^{\frac{R}{2}-1} \sum_{c=-\frac{C}{2}}^{\frac{C}{2}} [g(r, c) - g(r + 1, c)]^2$$

$$V_3 = \frac{1}{(R - 1) \cdot (C - 1)} \cdot \sum_{r=-\frac{R}{2}}^{\frac{R}{2}-1} \sum_{c=-\frac{C}{2}}^{\frac{C}{2}-1} [g(r, c) - g(r + 1, c + 1)]^2$$

$$V_4 = \frac{1}{(R - 1) \cdot (C - 1)} \cdot \sum_{r=-\frac{R}{2}}^{\frac{R}{2}-1} \sum_{c=-\frac{C}{2}}^{\frac{C}{2}-1} [g(r, c + 1) - g(r + 1, c)]^2$$

$$V = \text{Min}(V_1, V_2, V_3, V_4)$$



Wenn der berechnete Interest-Wert V einen vorher festgelegten Schwellwert überschreitet, liegt eine markante Bildstelle vor, welche in den vier Hauptrichtungen über signifikante Grauwertsprünge verfügt, d.h. je größer der berechnete Interest-Wert V ist, desto markanter ist die untersuchte Bildstelle. Somit werden beispielsweise Kanten, welche nicht in allen Hauptrichtungen signifikante Grauwertänderungen

aufweisen, nicht als markante Bildstellen eingeordnet und von der Bildzuordnung ausgeschlossen.

2.) Förstner-Operator

Der Förstner-Operator berechnet die Kovarianzmatrix der Verschiebung des Grauwertfensters. Wenn die daraus bestimmte Fehlerellipse klein und kreisförmig ist, handelt es sich bei diesem Fenster um eine markante Bildstelle, d.h. die Bildstelle ist für die mögliche Korrelation geeignet.

Zunächst werden bei der Arbeit mit dem Förstner-Operator die entsprechenden Grauwertdifferenzen in x- und y-Richtung berechnet.

$$\begin{aligned}g'_x &= g_{x+1,y} - g_{x-1,y} \\g'_y &= g_{x,y+1} - g_{x,y-1}\end{aligned}$$

Dies wird für alle Pixel innerhalb des definierten Fensters vorgenommen. Für diese Berechnung günstige Fenstergrößen liegen zwischen fünf und sieben Pixeln.

Die Grauwertdifferenzen stellen bei diesem Operator die Koeffizienten für die beiden Verschiebungsparameter in den Verbesserungsgleichungen einer Kleinste-Quadrate Schätzung dar. Somit ergibt sich für die Normalgleichungsmatrix N:

$$N = \begin{bmatrix} \sum g_x'^2 & \sum g_x'g_y' \\ \sum g_x'g_y' & \sum g_y'^2 \end{bmatrix}$$

Die berechnete Normalgleichungsmatrix N enthält das funktionale Modell für eine Verschiebung des Fensters in x- und y-Richtung. Die Eigenwerte λ_1 und λ_2 der Inversen dieser Matrix, welche auch als Varianz-Kovarianz-Matrix bezeichnet werden kann, beschreiben die Halbachsen der gesuchten Fehlerellipse.

$$Q = N^{-1} = \frac{1}{\det(N)} \begin{bmatrix} \sum g_y'^2 & -\sum g_x'g_y' \\ -\sum g_x'g_y' & \sum g_x'^2 \end{bmatrix}$$

Die beiden Kenngrößen für den Förstner-Operator lauten w und q. w ist ein Maß für die Größe der Ellipse und q ein Maß für die Rundheit der Ellipse.

$$w = \text{spur}(Q) = \frac{\text{spur}(N)}{\det(N)} \quad q = \frac{4 \cdot \det(N)}{\text{spur}^2(N)}$$

Eine markante Bildstelle liegt dann vor, wenn die beiden Werte die vorher definierten Schwellwerte w_{\min} und q_{\min} überschreiten.

$$w_{\min} = (0.5 \dots 1.5) \cdot w_{\text{mittel}}$$

$$q_{\min} = 0.5 \dots 0.75$$

(w_{mittel} ist der Mittelwert von w über das gesamte Bildfenster)

Ein großer Vorteil der Interest-Operatoren gegenüber den flächenbasierenden Bildzuordnungsmethoden ist die Tatsache, dass diese Operatoren nur in kontraststarken Gebieten mögliche Punkte für die Bildzuordnung suchen. Dadurch kommt es bei dieser Methode zu weniger Fehlkorrelationen. Die Genauigkeit der Bildzuordnung wird somit gesteigert.

3.2.3 Epipolargeometrie

Wenn für die Bildzuordnung die Ergebnisse der relativen Orientierung vorliegen und genutzt werden, kann die Bildzuordnung auch über die Methode der Epipolargeometrie durchgeführt werden. Das Prinzip der Epipolargeometrie wird in Abbildung 3.3 dargestellt. Durch die Rekonstruktion des Strahlengangs zum Zeitpunkt der Aufnahme reduziert sich die Suche nach dem korrespondierenden Punkt im Suchbild auf die sogenannte Kernlinie bzw. Epipolarlinie. Auf dieser Epipolarlinie liegt der zuzuordnende Bildpunkt. Somit verringert sich die für die Korrelation benötigte Rechenzeit extrem. Aufgrund von Unsicherheiten in der Orientierung wird meistens ein Puffer links und rechts von der Epipolarlinie eingerichtet, in dem ebenfalls die Korrelationen überprüft werden. Diese Methode ist vom Rechenaufwand her wesentlich schneller, da die Suche nach korrespondierenden Punkten nur auf den Kernlinien des entsprechend anderen Bildes – und einem Pufferbereich um diese Kernlinie – durchgeführt werden muss.

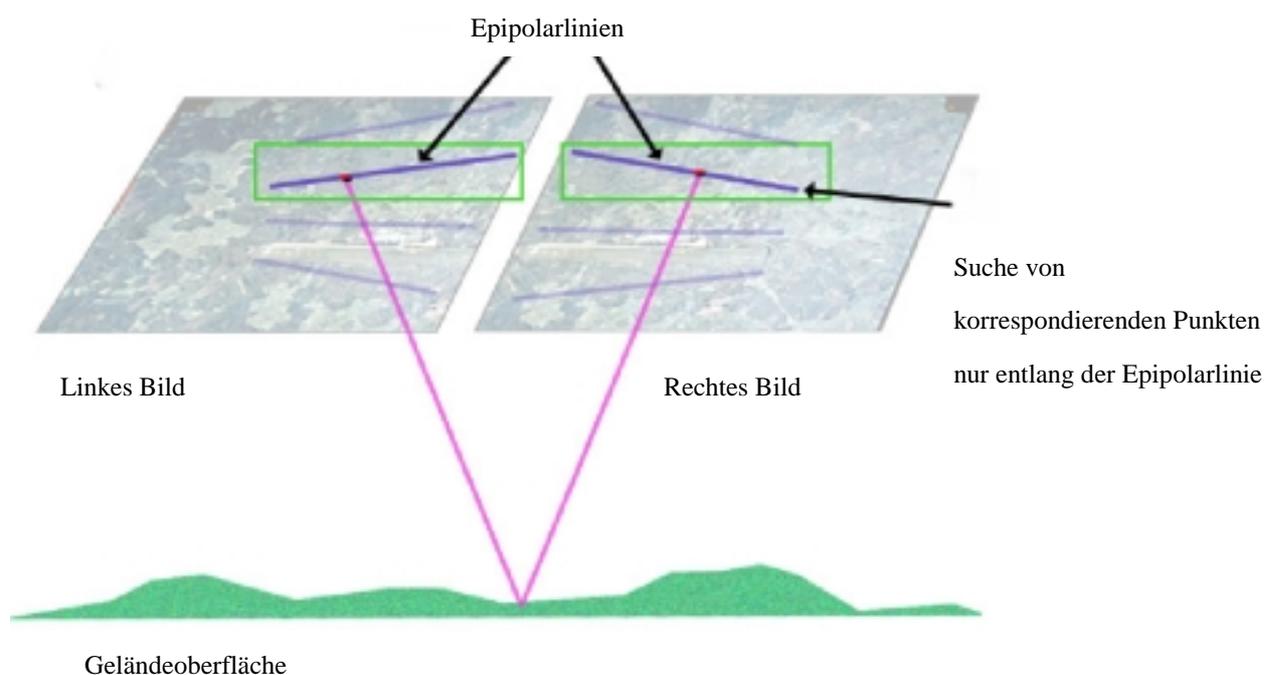


Abbildung 3.3: Epipolargeometrie nach [AUTOMETRIC 1999B]

3.2.4 Korrelatorprinzip (Vertical Line Locus)

Ähnlich wie die Bildzuordnung über die Epipolargeometrie arbeitet das Korrelatorprinzip (vgl. Abbildung 3.4) zur Eingrenzung des Suchbereiches mit der Rekonstruktion des Strahlengangs. Bei dieser Methode wird zunächst ein Ausschnitt im Objektraum definiert. Dieser Ausschnitt wird in die beiden Bildräume der zu verknüpfenden Bilder übertragen. Anschließend wird die Korrelation der beiden Ausschnitte in den zu verknüpfenden Bildern überprüft. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass das zu korrelierende Fenster auf der mittleren Geländehöhe liegt. Anschließend wird dieses Gebiet in der Höhe solange variiert, bis ein vorher definierter Schwellwert für den Korrelationskoeffizienten überschritten wird. Die korrespondierenden Punkte werden bei diesem Verfahren allerdings nicht nur auf einer Linie mit einem zugehörigen Puffer gesucht, sondern es wird die Korrelation im gesamten definierten Ausschnitt berechnet und jeweils überprüft, ob der gegebene Schwellwert für den Korrelationskoeffizient überschritten wurde.

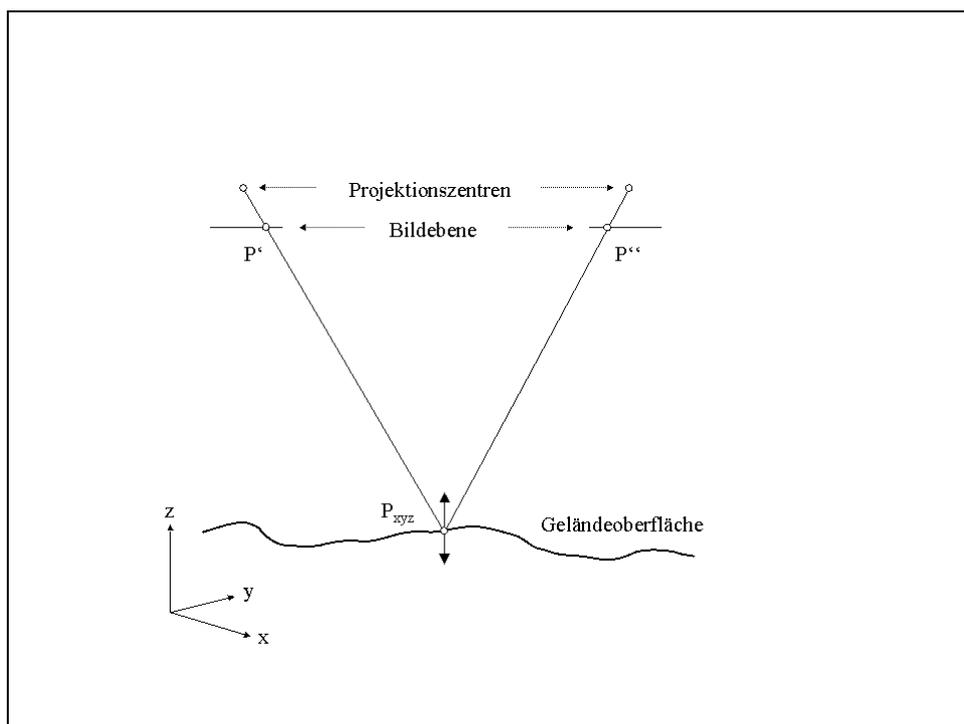


Abbildung 3.4: Korrelatorprinzip nach [LINDER 2000B]

Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber dem der Epipolargeometrie ist die Tatsache, dass bei der Variation der Geländehöhe die Lage des zu korrelierenden Punkte nicht verändert wird. Die Höhe des Punktes wird somit genau an der gewünschten Stelle bestimmt. Dies ist von enormen Vorteil, wenn ein regelmäßiges Punktraster erstellt werden soll.

3.2.5 Beschaffung von Näherungswerten

Ein großes Problem bei der automatischen Bildzuordnung ist die Beschaffung von Näherungswerten. Näherungswerte bilden einen entscheidenden Anteil des Genauigkeitspotenzials der Bildzuordnung. Die benötigten Näherungswerte bzw. Parallaxen können auf verschiedene Arten beschafft werden. Diese werden im Folgenden vorgestellt [HAALA 1999].

1.) Einfache Methode

Sie werden aus bestehenden Oberflächenmodellen oder aus anderen bestehenden Datenquellen abgeleitet.

2.) Bildpyramiden

Bei der Bestimmung der Parallaxen über Bildpyramiden wird zunächst die räumliche Auflösung des Originalbildes in Stufen verringert. Die erste Zuordnung wird dabei mit dem Bild in der größten Auflösung durchgeführt. Danach wird die Zuordnung mit dem Bild in der nächst feineren Auflösung fortgesetzt. Die Ergebniskoordinaten der groben Stufe werden dabei als Näherungswerte in die nächst feinere Stufe übernommen.

3.) Region Growing

Bei diesem Ansatz wird eine kleine Anzahl von korrespondierenden Punkten manuell gemessen, und über die Zuordnung von Punkten in der Nachbarschaft werden weitere korrespondierende Punkte bestimmt. Es werden allerdings für diesen Ansatz ähnliche Parallaxen für benachbarte Punkte vorausgesetzt.

Die gängigsten Softwarepakete arbeiten meist nicht nur mit einem dieser Algorithmen, sondern benutzen in den verschiedenen Ebenen bzw. auf den verschiedenen Bildpyramidenstufen unterschiedliche Algorithmen. Dabei wird auf der größten Ebene zunächst eine erste Zuordnung über die Kreuzkorrelation geschaffen. Dies dient zunächst einmal nur der Festlegung von Näherungswerten. Die mit der Zuordnung durch die Kreuzkorrelation gefundenen korrespondierenden Punkte gehen bei dem Matching auf der nächst feineren Pyramidenebene als Näherungswerte ein. Dieser Ansatz über die Kreuzkorrelation ist in fast allen Softwarepaketen vorhanden. Im weiteren Ablauf bzw. auf den nächst feineren Ebenen werden Merkmalsbasierende Zuordnungsmethoden benutzt. Dabei fließen jeweils die Ergebnisse der gröberen Ebene als Näherungswerte für die Zuordnung in die nächst feinere Ebene ein. Als letzten Schritt – auf der Ebene der

Originaldaten – wird ein Least-Squares-Matching durchgeführt. Dies liefert in diesem Fall die genauesten Ergebnisse. Dafür werden allerdings, wie bereits angesprochen, Näherungswerte benötigt, welche bereits auf zwei bis drei Pixel dem wahren Wert entsprechen.

3.3 Filterung von Oberflächenmodellen zu Höhenmodellen

An dieser Stelle sei zunächst erwähnt, dass bereits das Oberflächenmodell ein „Endprodukt“ darstellt. Das von Korrelationsfehlern – wie sie beispielsweise im Bereich von Wasserflächen auftreten können – bereinigte Oberflächenmodell ist für die Funknetzplanung zur „Line-of-Sight“-Berechnung ein entscheidender Datensatz.

Die Filterung der Daten ist einer der wichtigsten Punkte bei der automatischen Höhenmodellgenerierung. Unter Filterung versteht man die Eliminierung von Punkten, die nicht auf dem Erdboden liegen. Somit werden in diesem Arbeitsschritt Punkte, welche nicht Bestandteil der Geländeoberfläche sind, also auf Gebäude oder auf Vegetation liegen, eliminiert. Die entstandenen Lücken werden über Interpolationsverfahren geschlossen. Wenn diese Interpolation direkt in das Verfahren der Eliminierung integriert ist, spricht man auch von einer Interpolation mit Filterung, wie sie beispielsweise beim Phoenix-Verfahren zum Einsatz kommt. Hierbei bleiben auch die Stützpunkte nicht exakt erhalten. Das Programm RASCOR eliminiert dagegen nur die Punkte. Es gibt zwar auch bei diesem Programm die Möglichkeit der anschließenden Interpolation, jedoch werden damit die verbliebenen Stützpunkte nicht verändert, sondern nur die Lücken geschlossen.

Es gibt für diesen Arbeitsschritt verschiedene automatische Ansätze. Teilweise arbeiten diese Ansätze über die Höhendifferenzen benachbarter Punkte. Dabei wird ein Wert festgesetzt, welcher die maximal zulässige Höhenänderung zwischen zwei benachbarten Punkten festlegt. Wird dieser Wert überschritten geht der Ansatz davon aus, dass es sich bei diesem Punkt nicht um einen Punkt auf der Geländeoberfläche handelt und dieser Punkte wird entsprechend vom Programm eliminiert.

Andere Ansätze gehen von der Bildgrundlage aus. Über automatische Suchalgorithmen werden Vegetation und Bebauung extrahiert, und die entsprechenden Stellen können nach der Selektierung eliminiert werden. In diesem Bereich gibt es zurzeit vielseitige Forschungen. Die entwickelten Verfahren führen teilweise auch bereits zu zufriedenstellenden Ergebnissen, allerdings entsprechen die aufgeführten Beispielgebiete für diese Algorithmen nicht der Realität. Die Beispielgebiete sind meist Gebiete mit einzeln stehenden Gebäuden und wenig Vegetation. Der Einsatz dieser Algorithmen in dicht bebautem Stadtgebiet führt zurzeit noch

nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen bzw. ist der manuelle Nachbearbeitungsaufwand zu groß, sodass von einem operationellen Einsatz der Systeme zurzeit noch abzuraten ist.

3.3.1 „Phoenics-Verfahren“

Das Phoenics-Verfahren wurde im Jahre 1994 von der Firma Phoenics GmbH entwickelt. Dieses Verfahren arbeitet mit Methoden der Digitalen Bildverarbeitung. Es handelt sich bei diesem Verfahren um ein semiautomatisches Verfahren. Der Operateur muss bei diesem Verfahren im Bereich der Auswahl der Parameter und in der Kennzeichnung der nicht zu filternden Gebiete eingreifen. Dies erfordert zwar einen relativ hohen manuellen Aufwand, ist dafür aber operationell einsetzbar und liefert im Rahmen der gewünschten Genauigkeit korrekte Ergebnisse.

Der Ausgangsdatensatz für dieses Verfahren ist, wie bei allen anderen Filterungsalgorithmen auch, ein Oberflächenmodell. Das Oberflächenmodell ist das Modell, welches direkt mit dem Matching-Algorithmus erzeugt wurde. Für das Phoenics-Verfahren wird der Ausgangsdatensatz – anders als bei anderen Algorithmen – als Rasterdatensatz benötigt, da mit Methoden der Digitalen Bildverarbeitung gefiltert wird. Das benötigte Oberflächenmodell wurde bis vor Kurzen mit dem Programm *OrthoMax* generiert und wird derzeit mit dem Programm *Softplotter* erstellt. Die Tatsache, mit welchem Programm das Oberflächenmodell generiert wird, spielt nur eine untergeordnete Rolle. Es kommt in diesem Bereich nur darauf an, dass bei dem Algorithmus des Programms die Interpolationsverfahren die „Ecken“ bzw. die Höhengsprünge nicht zu stark glätten, d.h. von den Programmen nicht versucht wird, einen stetigen Verlauf in der Oberfläche zu schaffen. Dies würde zur Folge haben, dass Gebäude geglättet würden und die Grauwertsprünge, welche für das Phoenics-Verfahren den Ansatzpunkt darstellen, nicht mehr so deutlich zum Vorschein kommen.

Das Oberflächenmodell stellt die Ausgangsposition für das Verfahren dar. Über eine iterative Abfolge von Tiefpassfiltern werden jeweils genäherte Höhenmodelle erzeugt und diese mit dem jeweiligen Ausgangsmodell in Beziehung gesetzt. Die dabei entstehenden Differenzmodelle zeigen die herauszufilternden Daten. Diese Daten stellen in dem Oberflächenmodell Bereiche dar, in welchen Bebauung, Vegetation oder andere lokale Erhebungen vorhanden sind. Durch die Eingrenzung des Höhenbereichs für die Geländehöhe und eine durch die Iteration stets verfeinerte Abfolge der Filter entsteht am Ende ein durchlöchertes Höhenmodell, aus welchem die Vegetation und die Bebauung eliminiert wurden. Diese Löcher werden im weiteren Ablauf durch Interpolationsverfahren geschlossen. Dies bedeutet, dass die Höhe des Geländes, auf welchem vorher Bebauung oder Vegetation

vorhanden war, über die Höhen in der näheren Umgebung bestimmt und eingesetzt wird. Somit entsteht ein geschlossenes kontinuierliches Höhenmodell. In Bereichen, in denen die Löcher größere Ausmaße annehmen, werden vor der Schließung der Löcher zusätzliche Stützpunkte, wahre Bodenpunkte, eingebracht. Diese erhält man entweder aus Karten oder durch manuelles Messen der Geländehöhe in den entsprechenden Stereopaaren. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass die gesetzten Geländehöhen auch tatsächlich dem Bodenniveau entsprechen und nicht die Höhen von Gebäuden oder Vegetation sind.

Die entstandenen Löcher sind aber auch teilweise Bereiche, in denen die wahre Geländehöhe eliminiert wurde. Dies sind meist Bereiche mit lokalen Erhöhungen, wie Dämmen (Eisenbahndämme), Brücken oder Hügeln. Diese Bereiche müssen über die zugrundeliegenden Luftbilder kontrolliert werden. Falls sich herausstellt, dass die Löcher die angesprochenen wahren Geländehöhen darstellen, werden die Höhen nachträglich wieder aus dem Oberflächenmodell in das Höhenmodell eingesetzt.

Der erste Schritt der Verarbeitung, die Eliminierung von Höhenwerten läuft größtenteils automatisch ab. In diesem Bereich müssen nur die Kontrollen und die Wahl der Parameter, beispielsweise für die Höhengrenzung manuell getätigt werden. Im zweiten Teil des Verfahrens, dem Schließen der entstandenen Löcher, ist dagegen der manuelle Einsatz des Operators gefragt. Hier müssen zunächst die falsch eliminierten Bereiche wieder eingefügt und die Lücken anschließend über Interpolationsverfahren geschlossen werden. Dieser Teil ist der anspruchsvollere Teil des Phoenix-Verfahrens. Der Bearbeiter muss hier anhand von Erfahrungswerten und anhand von Sekundärinformationen (Karten und Luftbilder) entscheiden, inwieweit die Höhen manuell gesetzt oder automatisch bestimmt werden können. Der beschriebene Ablauf des Phoenix-Verfahrens wird im Folgenden zusammengefasst.

Ablauf des Phoenix-Verfahrens in Kurzform (vgl. Abbildung 3.5):

- 1.) Generieren eines Rohhöhenmodells
- 2.) Eliminierung der Gebäude und Vegetation aus dem Modell (Iteration)
 - a.) Tiefpassfilterung und Differenzbildung
 - b.) Eingrenzung des Höhenbereiches und Klassifizierung
 - c.) Kontrolle anhand von Passpunkten
- 3.) Interpolation der offenen Bereiche
 - a.) Tiefpassfilterung
 - b.) Manuelles Setzen von Bodenpunkten
 - c.) Kontrolle der Problembereiche (Brücken, Dämme)

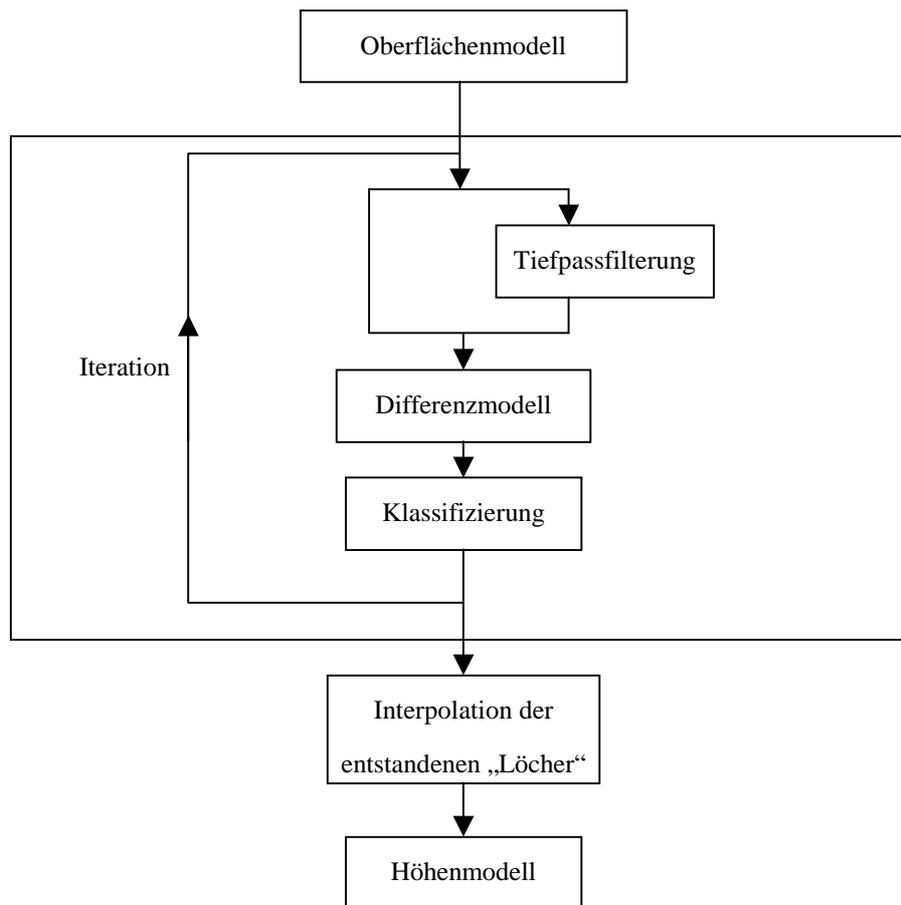


Abbildung 3.5: Ablaufschema des „Phoenics-Verfahrens“

3.3.2 Lineare Prädiktion

Dieses Verfahren ist eine Interpolation mit gleichzeitiger Filterung. Aus diesem Grund wird es in dieser Untersuchung nicht unter den Interpolationsverfahren aufgeführt, sondern in einem eigenen Abschnitt behandelt.

Die lineare Prädiktion wird auch als Interpolation und Filterung nach kleinsten Quadraten oder Kollokation bezeichnet. Im Prinzip ist dieser Ansatz nur eine Verallgemeinerung der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen. Bei dieser Methode wird eine lineare Trendfunktion abgespalten. Die verbleibenden Abweichungen von dieser Trendfunktion stellen bei dieser Methode die auszugleichenden Größen dar. Durch die Abspaltung einer Trendfunktion ergibt sich die Möglichkeit der Anwendung einer Kovarianzfunktion. Diese steuert dieses Interpolations- und Filterungsverfahren und hat folgende Grundgleichung:

$$C(P_i P_k) = C(0) \cdot e^{-\left(\frac{P_i P_k}{c}\right)^2}$$

$C(0)$ ist der Scheitelwert, also die Kovarianz für $\overline{P_i P_k} = 0$. c ist der Normierungsfaktor für den Punktabstand, mit der die Neigung der Kovarianzfunktion im mittleren Bereich festgelegt wird. Die Kovarianz $C(P_i P_k)$ zwischen den beiden Punkten P_i und P_k ist abhängig vom Abstand der beiden Punkte voneinander. Liegen die beiden Punkte nah beieinander, ist die Kovarianz groß. Mit wachsender Entfernung tendiert die Kovarianz gegen Null.

Wie bereits erwähnt, ist erst nach der Abspaltung eines deterministischen Anteils bzw. eines Trends die Voraussetzung für die Anwendung einer Kovarianzfunktion geschaffen. Diese Abspaltung des Trends kann über eine Polynominterpolation oder auch einfach über eine gleitende Schrägebene durchgeführt werden.

In Abbildung 3.6 wird eine solche Abspaltung aufgezeigt. In dieser Abbildung wird die Trendfunktion durch eine Gerade dargestellt. Diese ist allerdings nur eine sehr grobe Näherung an die wahre Erdoberfläche und dient der Verdeutlichung des Arbeitsablaufes.

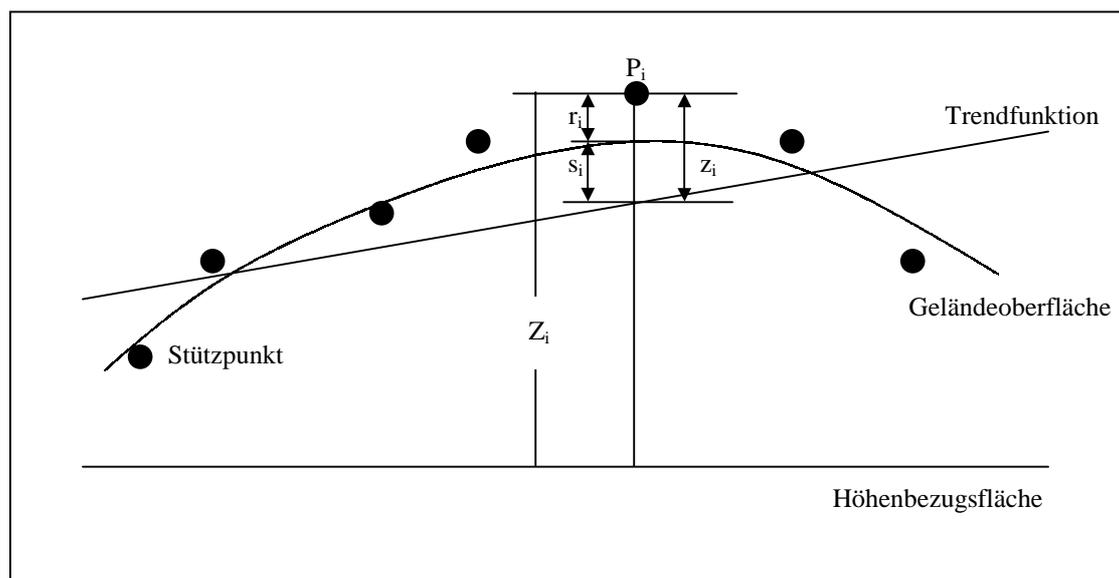


Abbildung 3.6: Trend- und Geländeoberfläche sowie Stützpunkte P_i

Die ursprünglichen Höhenwerte Z_i , bezogen auf die Höhenbezugsfläche, werden durch die Abspaltung zu Höhenwerten z_i reduziert, welche die Abweichung der Punkte von der Trendfunktion angeben. Diese reduzierten Höhenwerte spalten sich im Weiteren in einen unregelmäßigen Anteil r_i und einen korrelierten bzw. systematischen Anteil s_i auf. Der unregelmäßige Anteil r_i wird als Messfehler, d.h. Höhenfehler bei der Bestimmung des Höhenmodells, betrachtet oder anders ausgedrückt wird er als „Rauschen“ angesehen. Der

korrelierte bzw. systematische Anteil s_i wird als eigentliches Signal gedeutet. Die Summe aller Anteile s_i stellt ein geglättetes Höhenmodell des Bereiches dar. Es gilt:

$$z_i = s_i + r_i$$

Die der Linearen Prädiktion zugrundeliegende Grundgleichung für die Interpolation nach kleinsten Quadraten, unter Berücksichtigung der Trendabspaltung, lautet:

$$\hat{z} = (C(P_i P_1), C(P_i P_2), \dots, C(P_i P_n)) \cdot \begin{bmatrix} \underline{V_{zz}} & C(P_1 P_2) & \dots & C(P_1 P_n) \\ & \underline{V_{zz}} & \dots & C(P_2 P_n) \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \underline{V_{zz}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}$$

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

Die Koordinaten X und Y des Punktes P_i , der nur im Vektor \underline{c} auftritt, sind die variablen Koordinaten für die Geländeoberflächenbeschreibung. Dieser Punkt P_i ist die Interpolationsstelle, an der die obige Gleichung zahlenmäßig auszuwerten ist. Der Vektor \underline{c} enthält die Kovarianzen der Interpolationsstelle P_i zu den n Stützpunkten P_j . Diese werden durch das Einsetzen der berechneten Entfernung zwischen dem Neupunkt P_i und dem Stützpunkt P_j in der Kovarianzfunktion bestimmt. In der Matrix \underline{C} stehen die Kovarianzen zwischen den einzelnen Stützpunkten. Diese werden ebenso wie die Kovarianzen zwischen Neu- und Stützpunkten über die Kovarianzfunktion bestimmt. Auf der Hauptdiagonalen der Matrix \underline{C} steht entweder der Scheitelwert $C(0) = V_{ss}$ oder die Varianz V_{zz} . Dies hängt davon ab, ob eine Interpolation mit oder ohne Filterung durchgeführt werden soll. Steht die Varianz V_{zz} – wie in dieser Untersuchung – auf der Hauptdiagonalen der Matrix, wird eine Interpolation mit Filterung durchgeführt. Die Stützpunkthöhen werden um den Anteil des Rauschens verbessert. Dieser Anteil wird bei der Auswertung herausgefiltert. Bei der Nutzung der Varianz V_{ss} des korrelierten Anteils wird entsprechend eine Interpolation ohne Filterung durchgeführt, und σ_z^2 ist Null.

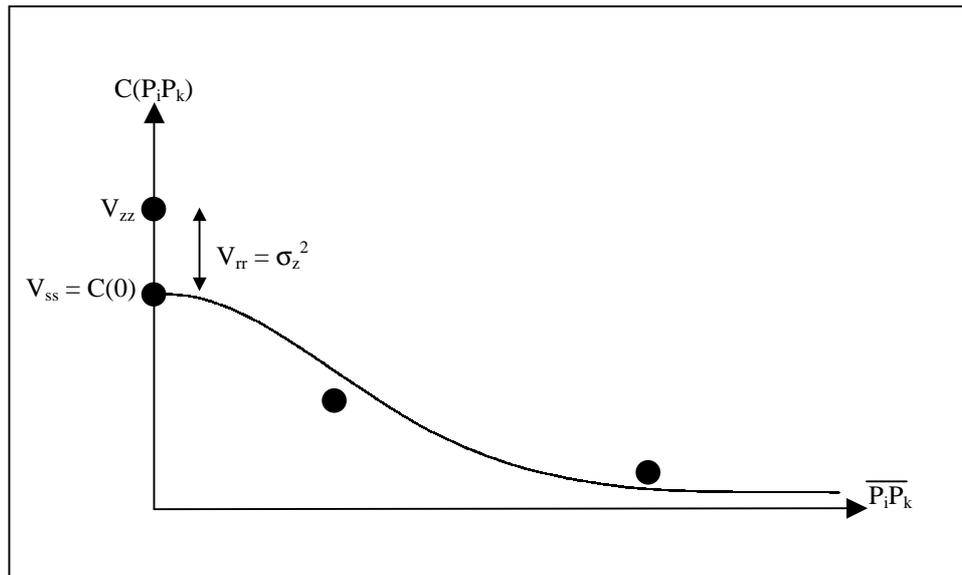


Abbildung 3.7: Kovarianzfunktion

Anhand Abbildung 3.7 kann der Zusammenhang zwischen der Varianz V_{zz} und der Varianz V_{ss} des korrelierten Anteils und der Varianz V_{rr} des unregelmäßigen Anteils verdeutlicht werden. Zwischen den drei Größen besteht folgender Zusammenhang:

$$V_{zz} = V_{ss} + V_{rr} = C(0) + \sigma_z^2$$

Eine unterschiedliche Genauigkeit der Stützpunkte kann durch die Variation der Elemente auf der Hauptdiagonalen der Matrix \underline{C} in die Berechnung eingeführt werden.

3.3.3 Interpolationsverfahren

Durch die bereits beschriebenen Verfahren der Bildzuordnung werden meist nur Stützpunktfelder bestimmt bzw. werden bei der Filterung der Daten Punkte eliminiert und es entstehen Lücken im Datensatz. Die entstandenen Lücken müssen nach der Filterung wieder zu einem geschlossenen Datensatz interpoliert werden. Dies kann über verschiedene Interpolationsverfahren durchgeführt werden. Die gängigsten Verfahren werden im Folgenden kurz erläutert.

1.) Dreiecksvermaschung

Bei der Dreiecksvermaschung entsteht ein Triangulated Irregular Network. Bei dieser Art der Interpolation wird das Gebiet in Dreiecke eingeteilt. Dabei bilden jeweils drei

Stützpunkte ein Dreieck. Diese Art der Dreiecksvermaschung kann auf unterschiedliche Art durchgeführt werden. Anders ausgedrückt gibt es verschiedene Kriterien für die Dreieckbildung. Im Bereich der Höhenmodellgenerierung wird meistens das Delaunay-Kriterium angesetzt. Dreiecke, die bei einer Delaunay-Triangulation erzeugt werden, sind nach [KRAUS 2000] die Dreiecke

- mit den kleinsten Umkreisradien,
- mit Umkreisen, in denen kein Eckpunkt eines anderen Dreieckes liegt,
- mit den größten minimalen Winkeln (Min-Max-Kriterium) und
- mit Dreiecksseiten, deren Längen am wenigsten differieren (gleichseitige Dreiecke als Zielfunktion).

Anders ausgedrückt ergibt sich eine Delaunay-Triangulation aus einer Thiessen-Polygonierung oder einer Voronoi Parkettierung. Eine Thiessen-Polygonierung kann man sich vorstellen als sich gleichmäßig ausbreitende Kreise um die jeweiligen Stützpunkte, sodass die Grenzen zwischen zwei benachbarten Kreisen eine Mittelsenkrechte auf der Verbindungslinie der beiden Stützpunkte bilden.

2.) Polynominterpolation

Die Auswertung dieses Interpolationsverfahrens läuft in zwei Stufen ab. In der ersten Stufe werden aus den unregelmäßig verteilten Stützpunkten mit ihren bekannten Koordinaten die benötigten Koeffizienten a_i über eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. In der zweiten Stufe werden mit den berechneten Koeffizienten die unbekanntenen Höhen z_i der zu interpolierenden Punkte über folgende Formel berechnet:

$$z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + \dots$$

3.) Gleitende Schrägebene

Die Interpolation über eine gleitende Schrägebene ist vom Prinzip her ebenfalls eine Polynominterpolation. Allerdings mit dem Unterschied, dass bei dieser Methode zusätzlich eine Filterung der Stützpunktwerte durchgeführt wird. Dieses Verfahren wird im Rahmen der Linearen Prädiktion für die Trendabspaltung genutzt (vgl. Abschnitt 3.3.2).

4.) Gewichtetes Mittel

Bei der Interpolation über das gewichtete Mittel wird die Höhe des zu interpolierenden Punktes über die Höhen von Nachbarpunkten in einem vorher definierten Umkreis bestimmt. Dabei werden die Höhen der Nachbarpunkte entsprechend ihrer Entfernung zum Interpolationspunkt gewichtet. Punkte in direkter Nachbarschaft werden entsprechend höher gewichtet als Punkte die sich in größerer Entfernung befinden.

3.4 Orthophotogenerierung

Bei der Orthophotogenerierung wird das Bild von der perspektivischen Geometrie in die orthometrische Geometrie transformiert. Dafür werden neben der äußeren Orientierung der Bilder auch entsprechende Geländehöhen benötigt. Es wird also jedes differentiell kleine Oberflächenelement aufgrund seiner Koordinaten entzerrt. Das Ergebnis ist eine Abbildung in der Parallelprojektion.

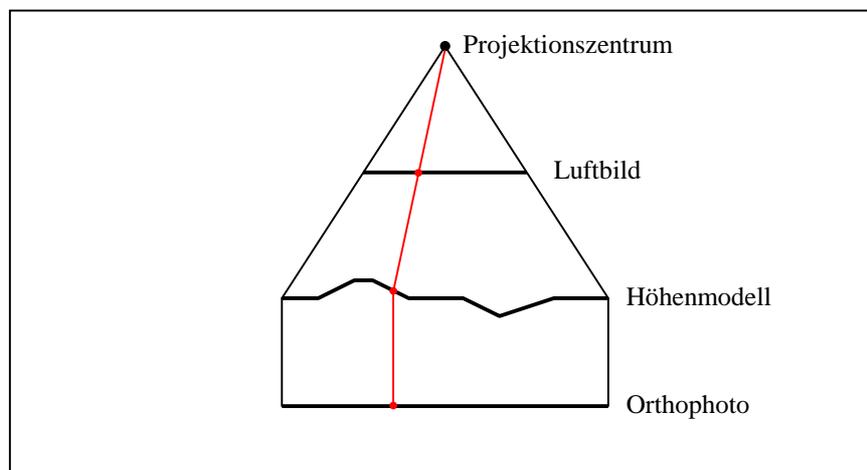


Abbildung 3.8: Prinzip der Orthophotogenerierung

In Abbildung 3.8 wird der Strahlengang der Orthophotogenerierung schematisch dargestellt. Prinzipiell wird das Luftbild auf das Höhenmodell projiziert und dieses in Parallelprojektion in eine Ebene abgebildet.

Die Orthophotoberechnung läuft dabei nach folgendem Schema ab: [LUHMANN 2000]

- 1.) Festlegung des abzubildenden Objektbereiches
- 2.) Festlegung des Ausgabemaßstabes

- 3.) Festlegung der Rasterweite
- 4.) Berechnung des Z-Wertes für jeden Rasterpunkt aus dem Höhenmodell durch Interpolation
- 5.) Berechnung der zugehörigen Bildkoordinaten über die Kollinearitätsgleichungen
- 6.) Bestimmung des entsprechenden Grauwertes an der mit den Kollinearitätsgleichungen bestimmten Stelle im Ausgangsbild
- 7.) Setzen des interpolierten Grauwertes an der entsprechenden Stelle im Ergebnisbild

Diese Methode der Orthophotogenerierung wird als indirekte Methode bezeichnet. Dies bedeutet, dass ausgehend vom Ergebnisbild die ehemalige Position des Pixels im Ausgangsbild bestimmt wird. Der Grauwert wird an der entsprechenden Stelle im Ausgangsbild interpoliert und im Ergebnisbild eingesetzt. Der Berechnungsweg führt also ausgehend vom Ergebnisbild zum Ausgangsbild und zurück zum Ergebnisbild.

Eine andere Methode der Orthophotogenerierung ist die direkte Methode. Hier wird ausgehend vom Ausgangsbild die Position jedes Pixels im Ergebnisbild berechnet und der Grauwert an der entsprechend berechneten Stelle im Ergebnisbild eingesetzt. Bei dieser Methode entstehen allerdings Lücken und Überlappungen im Ergebnisbild. Diese müssen dann nachträglich berechnet werden. Aus diesem Grund wird bei den meisten Programmen die Methode der direkten Orthophotoberechnung eingesetzt.

3.5 Zusammenfassung

Es gibt verschiedene Ansätze für die automatische Oberflächengenerierung, welche in vielen Bereichen gute Ergebnisse liefern. Die automatische Orthophotogenerierung ist in allen Bereichen möglich. Das Problem in diesem Bereich liegt bei der Filterung der Oberflächenmodelle zu Höhenmodellen. In diesem Bereich gibt es zwar diverse automatische Ansätze, aber diese Ansätze gehen meist von „einfachen“ Gebieten aus. Mit einfachen Gebieten sind Gebiete gemeint, in welchen nur einzeln stehende Gebäude und wenig Vegetation vorkommen. Diese werden bei den automatischen Verfahren über Algorithmen selektiert und extrahiert. Die so entstehenden Lücken werden über Interpolationsverfahren geschlossen.

Von einem operationellen Einsatz der automatischen Verfahren ist man heute noch weit entfernt. In städtischen Gebieten, welche einen großen Teil der Anwendungsgebiete

darstellen, liefern die bestehenden automatischen Ansätze keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Die Gebäude werden nicht komplett eliminiert, sondern es bleiben noch kleine Stümpfe der Gebäude erhalten. Die Größe dieser Stümpfe ist dabei auch von dem eingesetzten Programm zur Oberflächenmodellgenerierung abhängig. Relativ gute Ergebnisse werden erreicht, wenn die Algorithmen in den Programmen zur automatischen Oberflächenmodellgenerierung nicht versuchen, einen stetigen Verlauf der Oberfläche zu erzeugen, sondern auch größere Höhengsprünge wie sie bei dem Übergang vom Erdboden zum Gebäude entstehen, zulassen und nicht glätten. Generell muss man allerdings sagen, dass die Ergebnisse der automatischen Filterung mit enormem Aufwand durch den Operateur nachbearbeitet werden müssen, sodass sich der Einsatz von diesen automatischen Verfahren zurzeit noch nicht lohnt. In diesem Bereich kommen meist interaktive Verfahren zum Einsatz, bei denen die Problemgebiete von der eigentlichen Filterung ausgeschlossen werden. Die Problembereiche bei der automatischen Ableitung sind beispielsweise Eisenbahndämme oder andere Geländeerhebungen, welche zum eigentlichen Höhenmodell dazugehören, aber aufgrund ihrer Struktur von den automatischen Verfahren ebenfalls eliminiert werden.

4 Eingesetzte Software

4.1 Oberflächenmodellgenerierung

Die automatische Oberflächenmodellgenerierung ist der erste Schritt bei der Erzeugung von Höhenmodellen. In diesem Abschnitt werden die eingesetzten Softwarepakete näher untersucht. Dabei soll speziell auf die zugrundeliegenden Bildzuordnungsalgorithmen eingegangen werden.

Die Funktionsweisen der einzelnen Algorithmen wurden bereits in Abschnitt 3.2 aufgeführt. In diesem Abschnitt werden – soweit es bekannt ist – die von dem jeweiligen Programm benutzten Algorithmen zugeordnet und der Arbeitsablauf der Bildzuordnung der einzelnen Programme kurz aufgezeigt. Bei den kommerziellen Lösungen wird selbstverständlich von den Firmen nicht jedes Detail des Ablaufes offengelegt. An dieser Stelle wird nur der generelle Ablauf dargestellt. Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle bereits sagen, dass in den meisten Programmen nicht nur ein Bildzuordnungsverfahren zum Einsatz kommt. Meist ist es eine Kombination von verschiedenen Algorithmen, welche die besten Ergebnisse liefern.

4.1.1 Programmpaket LISA

Das Programmpaket LISA ist eine Eigenentwicklung von Herrn Dr. Lindner von der Universität Düsseldorf, Geographisches Institut. Das Programmpaket LISA besteht aus drei Komponenten, einem Basis-Paket LISA Basis, einem Modul zur photogrammetrischen Auswertung LISA Foto und einem Modul zur Verwaltung großer Datenmengen LISA GIBD. In dieser Untersuchung wurden zwei Komponenten vom Programmpaket LISA genutzt. Dies sind die Module LISA Basis und LISA Foto. LISA Basis stellt, wie der Name bereits sagt, als Basispaket des Programms Funktionen zur Digitalen Bildbearbeitung zur Verfügung. Mit diesem Modul können Bilder be- und verarbeitet werden, sowohl in der Geometrie als auch in der Radiometrie. Von besonderem Interesse für diese Untersuchung sind die Möglichkeiten zur Bearbeitung von Höhenmodellen, wie beispielsweise die Erstellung von 3D-Blockmodellen oder die Ableitung von Höhenlinien.

Das neben LISA Basis verwendete Modul LISA Foto stellt eine digitale photogrammetrische Arbeitsstation dar, die auf dem Korrelatorprinzip beruht. Mit diesem Modul können

ausgehend vom Luftbild alle zur Erstellung von Orthophotos oder Höhenmodellen notwendigen Schritte durchgeführt werden.

Mit dem Programm soll ein semi-analytisches Gerät 2.Ordnung nachgebildet werden. Das bedeutet, dass die Anwendungsbereiche dieses Programms nicht im Bereich höchster geometrischer Genauigkeit anzusiedeln sind.

Das Modul LISA Foto stellt unter anderem folgende Funktionen zur Auswertung digitaler Luftbilder zur Verfügung:

- Messen und Bearbeiten von Bildkoordinaten, Export nach BLUH,
- Messen von Geländekoordinaten im orientierten Stereomodell,
- Automatische Oberflächenmodellgenerierung (Matching) aus einem orientierten Stereomodell,
- Orthobilderstellung und
- Zusammenfügen geocodierter Höhenmodelle bzw. von Bildern zu Mosaiken

Dazu kommen diverse Funktionen, wie beispielsweise Rasterbild-Import und -Export, Kameradefinition, innere und äußere Orientierung.

Da in der vorliegenden Arbeit die Methoden zur automatischen Oberflächenmodellgenerierung untersucht werden, wird diese Funktionsweise des Moduls LISA Foto an dieser Stelle näher vorgestellt. Das Programm LISA Foto arbeitet, bezogen auf den Strahlengang, im Gegensatz zu einigen anderen Programmen von „unten nach oben“. Das zugrundeliegende Prinzip ist das Korrelatorprinzip (vgl. Abschnitt 3.2.4). Dies bedeutet, dass ausgehend von einer Start-Geländehöhe die Höhe solange variiert wird, bis der Korrelationskoeffizient sein Maximum erreicht und somit die optimale Bildzuordnung erzielt wird. Die dafür notwendigen Arbeitsschritte werden im Folgenden aufgeführt.

Arbeitsschritte der DHM-Generierung (Matching) nach [LINDER 2000B]:

1.) Vorverarbeitungsschritte

Wie bei den meisten anderen Programmen auch, müssen die Vorverarbeitungsschritte Kameradefinition und Orientierung der Bilder bereits durchgeführt worden sein. Anschließend laufen – teils iterativ – die drei folgenden Arbeitsschritte ab.

2.) Startpunkte

In diesem Arbeitsschritt wird aus allen gegebenen Punkten (Passpunkte) eine erste Übersicht des Gebietes generiert.

3.) Näherungs-DHM

Ausgehend von der in Arbeitsschritt 2.) erstellten Übersicht werden in diesem Arbeitsschritt in die acht Haupt-Himmelsrichtungen sternförmig Spuren gelaufen. Dabei wird für jeden neuen Punkt jeweils von der Höhe des vorigen ausgegangen und dieser Wert solange variiert, bis der Schwellwert für den Korrelationskoeffizienten überschritten wurde. Nach diesem ersten Spuren laufen wird ausgehend von den vorhandenen Information iterativ ein 16x16 Gitter interpoliert. Dieses Gitter stellt das Näherungs-DHM dar.

4.) Verbesserung des DHM

In diesem Arbeitsschritt wird das vorher interpolierte Gitter weiter verfeinert. Dazu wird zunächst ein 4x4 Pixel-Gitter homologer Punkte erzeugt, das weiter auf ein 2x2 Pixel-Gitter verfeinert wird. Abschließend können die erzeugten Daten mit einem 5x5-Mittelwertfilter geglättet werden.

4.1.2 IMAGINE OrthoMAX

IMAGINE OrthoMAX ist ein add-on Applikationsmodul für das Programmpaket ERDAS IMAGINE. Dieses Modul beinhaltet die Möglichkeit, ausgehend von gescannten Luftbildern und den zugehörigen Orientierungsparametern ein Oberflächenmodell und damit Orthophotos zu erzeugen. In der hier eingesetzten Version 8.3 des Moduls wird allerdings nur die Funktion zur Höhenmodellgenerierung genutzt. Die Triangulation der Bilder entstammt einer anderen Quelle, und die Orthophotogenerierung wird mit dem Programm OrthoBASE, welches ebenfalls zu dem Softwarepaket ERDAS IMAGINE gehört, durchgeführt.

Der Ablauf der Höhenmodellgenerierung, welcher hier im Weiteren beschrieben wird, wurde von der Firma Phoenix GmbH operationell eingesetzt. Das Ergebnis dieser Generierung ist ein Höhenmodell. In diesem Modell sind die Vegetation und die Gebäude noch vorhanden und müssen durch entsprechende Filterungsmethoden eliminiert werden. Die Ergebnisse der Filterung werden in Abschnitt 4.2 gesondert aufgeführt.

Wie bei den meisten anderen Programmen zur automatischen Oberflächenmodellgenerierung auch, müssen bei diesem Programm folgende Vorverarbeitungsschritte vor dem eigentlichen Matching durchgeführt werden:

- Anlegen eines Projektblockes
- Importieren der Orientierungsparameter
- Importieren der Bilder
- Berechnung der Bildpyramiden
- Messen der inneren Orientierung

Nachdem diese Vorverarbeitungsschritte durchgeführt wurden, werden die zu korrelierenden Bild-Modelle definiert und die Oberflächenmodellgenerierung gestartet. Bei diesem Programm kann für die Oberflächenmodellgenerierung eine bestimmte Strategie festgelegt werden, mit welcher der Ablauf der Berechnung beeinflusst wird. Die Möglichkeiten der Strategie-Festlegung werden in Abschnitt 4.1.3 erläutert (vgl. Tabelle 4.1 auf Seite 39).

Der Algorithmus, der der automatischen Höhenmodellgenerierung in diesem Programm zugrunde liegt, wurde von der Firma Vision International, einer Abteilung von Autometric, Inc., entwickelt. Der grobe Ablauf dieses Algorithmus – des Vision Algorithmus – wird in der zugehörigen Bedienungsanleitung des Programms (vgl. [ERDAS 1998]) wie folgt beschrieben.

Der Vision Algorithmus gehört zu der Klasse der Area Based Matching Algorithmen (vgl. Abschnitt 3.2.1). Der Algorithmus arbeitet mit Bildpyramiden. Dies bedeutet, dass die Korrelation der beiden Bilder zunächst auf der größten Bildpyramidenstufe und danach auf den jeweils nächst feineren Pyramidenstufen durchgeführt wird. Dabei werden die Ergebnisse der größeren Stufe als Näherungswerte für die aktuelle Pyramidenstufe genutzt. Der Algorithmus arbeitet dabei auf jeder Pyramidenstufe mit der Kreuzkorrelationsmethode. Nach jeder Pyramidenstufe wird eine Ausgleichung durchgeführt. Damit werden grobe Ausreißer – Korrelationsfehler – eliminiert. Die so entstandenen Lücken werden im Weiteren über Interpolationsverfahren geschlossen. So entsteht nach jeder Pyramidenstufe ein, entsprechend der Auflösung der Stufe, Höhenmodell des Gebietes.

Zusammenfassend lässt sich über das Programm OrthoMAX Folgendes sagen:

Das Programm OrthoMAX arbeitet mit einer einfachen Bildkorrelation der Grauwerte (Area Based Matching) über Bildpyramiden, d.h. es sucht korrespondierende Punkte in vorher festgelegten Positionen (Punktraster). Dem Vorteil der hohen Geschwindigkeit des

zugrundeliegenden Zuordnungsverfahrens steht der Nachteil gegenüber, dass auch Korrelation in kontrastschwachen Gebieten durchgeführt werden. Diese sind entsprechend nicht so genau und es kann in diesen Gebieten leicht zu Fehlkorrelationen kommen.

4.1.3 Softplotter

Das Programm Softplotter wurde von der Firma Autometric, Inc. entwickelt. Prinzipiell ist es eine Weiterentwicklung des Programms OrthoMAX, sodass sich die Funktionalitäten teilweise ähnlich sind. Bei diesem Programm handelt es sich allerdings um ein eigenständiges Programm. Dieses Programm beinhaltet, ebenso wie das Programm OrthoMAX die Funktionalitäten um ausgehend von gescannten Luftbildern und den zugehörigen Orientierungsparametern ein Oberflächenmodell und damit Orthophotos zu erzeugen. Wie bereits angesprochen wurde die Höhenmodellgenerierung bei der Firma Phoenics GmbH bis vor kurzem ausschließlich mit dem Programm OrthoMAX durchgeführt. Dies wurde nun weitgehend durch das Programm Softplotter ersetzt.

Das Programm Softplotter in der Version 2.0 bietet zwei Methoden zur Höhenmodellgenerierung an. Dies sind die in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.3 angesprochenen Methoden des Area Based Matching und der Epipolargeometrie (vgl. Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3). Das Area Based Matching beruht auf einer Weiterentwicklung des Vision Algorithmus, der bei den Erläuterungen zum Programm OrthoMAX bereits aufgeführt wurde (vgl. Abschnitt 4.1.2).

Bei diesem Programm kann neben der Auswahl der grundlegenden Methode auch die Strategie für die Methode festgelegt werden. Die Strategie wird über die Variation der der Oberflächenmodellgenerierung zugrundeliegenden Berechnungsparameter bestimmt. Die zu variierenden Parameter sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Diese Parameter müssen allerdings nicht unbedingt manuell gesetzt werden. Es sind Standardwerte vorgegeben, mit denen gute Ergebnisse erzielt werden können. Aber je nach den Spezifikationen der zugrundeliegenden Daten, wie beispielsweise dem Maßstab, in welchem die Luftbilder vorliegen, sollten die Parameter individuell angepasst werden. Eine Übersicht für diese Anpassungen findet man in [AUTOMETRIC 1999B]. Die Firma Phoenics GmbH hat, je nach Ausgangsdaten, verschiedenen Strategien entwickelt, welche optimale Ergebnisse liefern. Diese werden in der weiteren Benutzung des Programms Softplotter genutzt, können aber aus firmeninternen Interesse nicht veröffentlicht werden.

Die für die Oberflächenmodellgenerierung notwendigen Parameter sind analog zu denen bei der Oberflächenmodellgenerierung mit dem Programm OrthoMAX (vgl. Abschnitt 4.1.2).

Berechnungsparameter	Beschreibung
Minimum Threshold	Minimaler Korrelationskoeffizient für Zuordnung
Noise Threshold	Minimaler Korrelationskoeffizient für weitere Versuche der Zuordnung
Maximum Parallax	Maximale X-Parallaxe in Pixeln
Minimum Template Size	Größe der Mustermatrix in Pixeln
Maximum Template Size	
Minimum Precision	Anzusetzende minimale Genauigkeit für die Ausgleichung
Rejection Factor	Faktor für die Eliminierung von Punkten bei der anschließenden Ausgleichung
Skip Factor	Abstand zwischen zwei zu korrelierenden Punkten in Pixeln
Edge Factor	Maximaler Faktor für das Verhältnis zwischen den Achsen der bei der Ausgleichung berechneten Fehlerellipse
Start RRDS	Begrenzung der Bildpyramidenstufen, auf welchen die Korrelation begonnen und beendet wird
End RRDS	
Y-Parallax Allowance	Größe der zulässigen Y-Parallaxe
Resampling	Auswahl für das Interpolationsverfahren bei der Bildung der Mustermatrix
Post Process	Auswahl, ob eine Ausgleichung nach jeder Zuordnung auf einer Pyramidenstufe durchgeführt werden soll
Band Selection	Auswahl, welches Band des Bildes für die Korrelation genutzt werden soll

Tabelle 4.1: Parameter für die Oberflächenmodellgenerierung (Programm Softplotter)

4.2 Filterung der Oberflächenmodelle und Erzeugung des Höhenmodells

4.2.1 RASCOR

RASCOR ist ein Modul des Programmpaketes BLUH, welches von Herrn Dr. K. Jacobsen am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen (IPI) der Universität Hannover programmiert wurde.

Dieses Programm erwartet einen ASCII-Datensatz, es wird also eine Filterung auf ASCII-Basis durchgeführt. Der der Filterung zugrundeliegende Algorithmus ist die Lineare Prädiktion (vgl. Abschnitt 3.3.2). Das Programm läuft größtenteils automatisch ab, bzw.

schlägt das Programm an den entscheidenden Stellen bereits die erforderlichen Parameter vor. Diese sollten in den meisten Fällen auch übernommen werden. Durch die große Automation kann auch ein ungeübter Operateur mit diesem Programm zu zufriedenstellenden Ergebnissen kommen. Eine Übersicht über die benötigten Berechnungsparameter für die Filterung mit dem Programm RASCOR sowie eine kurze Beschreibung dieser Parameter ist in Tabelle 4.2 dargestellt.

Berechnungsparameter	Beschreibung
X-Minimum	Begrenzungskordinaten des auszuwertenden Gebietes (mit den Z-Werten können bereits die Höhenwerte eingeschränkt werden und so grobe Ausreißer von vorne herein eliminiert werden)
X-Maximum	
Y-Minimum	
Y-Maximum	
Z-Minimum	
Z-Maximum	
Max height change neighbored Points in X-dir.	Begrenzung der Höhendifferenzen zwischen zwei in X- und Y-Richtung benachbarten Punkten
Max height change neighbored Points in Y-dir.	
Number of points for linear Interpolation 1	Spezifikationen der ersten Interpolation (Anzahl Punkte und maximal zulässige Höhendifferenz)
Max dz against linear Interpolation 1	
Number of points for linear Interpolation 2	Spezifikationen der zweiten Interpolation (Anzahl Punkte und maximal zulässige Höhendifferenz)
Max dz against linear Interpolation 2	
Weight factor for lower points (>1.)	Gewichtungsfaktor für Punkte unterhalb der Ebene
Size of Moving Plane (Points in X/Y-Direction)	Spezifikationen der Schrägebene (Größe und maximal zulässige Höhendifferenz)
Max dz against moving tilted plane	
Value A for covariance function ($0 < A < 0.99$)	Schwellwert für den Korrelationskoeffizienten
Max dz against plane of prediction	Maximal zulässige Höhendifferenz gegenüber

Tabelle 4.2: Berechnungsparameter für das Programm RASCOR nach [JACOBSEN 2000C]

4.2.2 „Phoenics-Verfahren“

Dieses Verfahren wurde bereits in Abschnitt 3.3.1 ausführlich aufgezeigt. An dieser Stelle soll nur noch einmal kurz der Ablauf gekennzeichnet werden. Der Ausgangsdatensatz ist ein Oberflächenmodell. Anders als bei dem Programm RASCOR muss der Datensatz als Rasterdatensatz vorliegen. Das Oberflächenmodell, welches alle Erhebungen noch enthält, wird über Filteralgorithmen zu einem Höhenmodell reduziert. Diese Reduzierung erfordert

hohen manuellen Einsatz. So müssen Bereiche, welche aufgrund ihrer Struktur leicht eliminiert werden können, speziell markiert und nach der Filterung wieder eingefügt werden. Dies sind Bereiche, wie beispielsweise Dämme, kleinere lokale Erhebungen und Senken. Weiterhin müssen entscheidende Parameter, wie beispielsweise die Eingrenzung des Höhenbereiches sowie spätere Eingrenzungsparameter, manuell gesetzt werden. Dies erfordert einen geübten Operator. Das Programm läuft über das ERDAS Imagine Modul Spatial Modeler. Dies bedeutet, dass vorhandene Funktionen des Programmpaketes so kombiniert werden, dass die geforderte Funktionalität erreicht wird. Das Phoenix-Verfahren ist in dieser Form also nur mit dem Programm ERDAS Imagine durchführbar, könnte aber prinzipiell mit jedem größeren Bildverarbeitungsprogramm reproduziert werden.

Die aufgeführten Abbildungen – Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 – zeigen die Ergebnisse einer Filterung mit dem Phoenix-Verfahren. Das ausgewählte Beispiel stammt aus dem Projekt Cuxhaven. Auf der linken Seite sieht man jeweils das Oberflächen- bzw. Höhenmodell in 2.5D-Ansicht. Auf der rechten Seite wird jeweils der gekennzeichnete Ausschnitt in 3D-Ansicht dargestellt. Anhand der Abbildungen wird deutlich, dass Gebäude und Vegetation eliminiert wurden, der Damm jedoch erhalten bleibt.

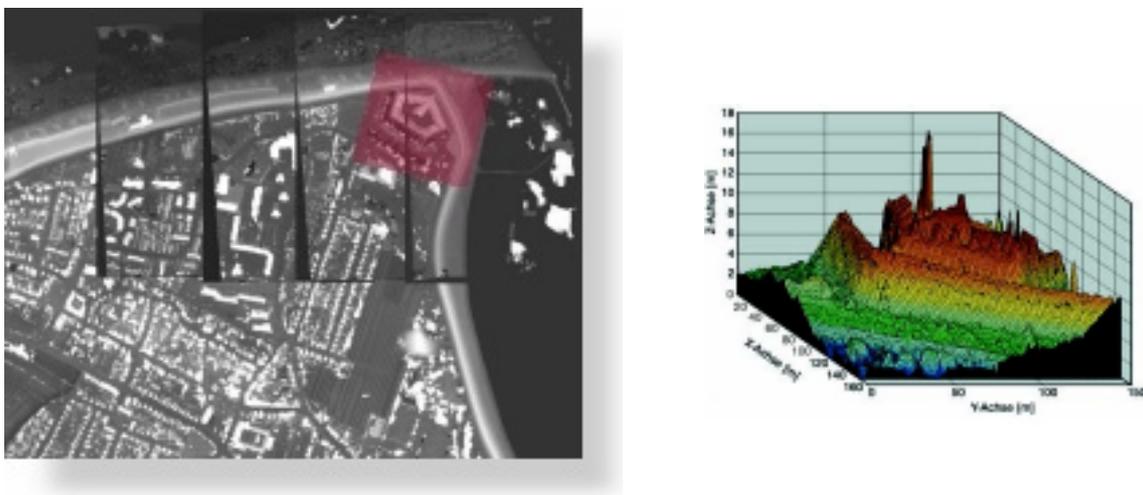


Abbildung 4.1: Oberflächenmodell (2.5D und 3D-Ansicht) [Quelle: Phoenix GmbH]

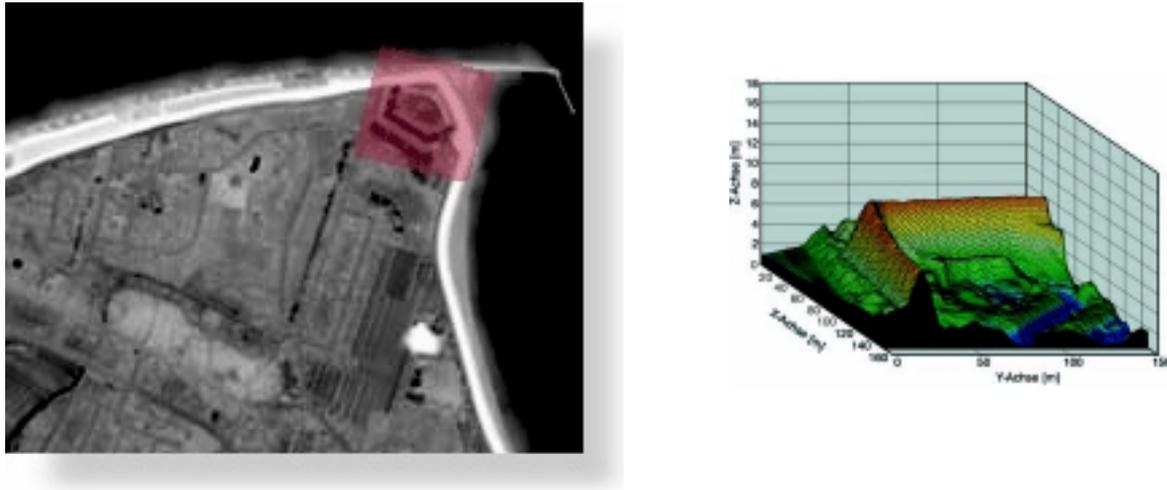


Abbildung 4.2: Höhenmodell (2.5D und 3D-Ansicht) [Quelle: Phoenix GmbH]

4.3 Orthophotogenerierung mit OrthoBASE

Bei der Orthophotogenerierung wurde bewusst nur das Programm OrthoBASE der Firma ERDAS, Inc. benutzt. Hiermit sollte vermieden werden, dass durch die Variation der Programme zur Orthophotogenerierung eine zusätzliche Unsicherheit im Bereich der Orthophotogenerierung hinzukommt. Durch die Beschränkung auf nur ein Programm sind die generierten Orthophotos alle mit den gleichen programmspezifischen Besonderheiten behaftet und weisen die zu untersuchenden Unterschiede, welche aufgrund der verschiedenen zugrundeliegenden Höhenmodelle zustande kommen, auf.

Das Programm OrthoBASE benötigt für die Orthophotogenerierung folgende Ausgangsdaten:

- Luftbilder in digitaler Form
- Spezifikationen der eingesetzten Luftbildkamera (Kalibrierungszertifikat)
- Orientierungsdaten der Luftbilder
- Höhenmodell

Ablaufschema der Orthophotogenerierung mit dem Programm OrthoBASE:

1.) Anlegen eines Blockes

In diesem Arbeitsschritt werden die grundlegenden Spezifikationen des auszuwertenden Gebietes festgelegt, wie beispielsweise dem Bezugssystem und den Spezifikationen der eingesetzten Luftbildkamera (vgl. Abschnitt 2.2.1).

2.) Import der Orientierungsdaten

Das Programm OrthoBASE besitzt eine eigene Funktion zur Bestimmung der Orientierungsparameter, jedoch wurde diese aufgrund der besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht genutzt. Die Orientierungsparameter, die an dieser Stelle importiert wurden, sind die in Abschnitt 2.2.3 bereits angesprochenen.

3.) Import der Rohbilder

An dieser Stelle werden alle dem Block zugehörigen Bilder in diesen importiert. Dabei stehen verschiedene Ausgangsformate zur Verfügung.

4.) Berechnung der Pyramiden der Rohbilder

Für die weitere Auswertung benötigt das Programm OrthoBASE die bereits mehrfach angesprochenen Bildpyramiden. Diese werden vom Programm nach dem Import der Bilder automatisch berechnet.

5.) Messung der inneren Orientierung

Bei der Messung der inneren Orientierung werden die Rahmenmarkenkoordinaten im Pixelkoordinatensystem bestimmt. Durch das Kalibrierungszertifikat der eingesetzten Kamera sind die Rahmenmarken im Bildkoordinatensystem bekannt und es kann ein Bezug zwischen den beiden Systemen hergestellt werden.

6.) Auswahl des zugrundeliegenden Höhenmodells

An dieser Stelle wird das entsprechende Höhenmodell ausgewählt und die Vorbereitungsschritte für die Orthophotogenerierung sind abgeschlossen.

7.) Berechnung der Orthophotos

In diesem Arbeitsschritt müssen abschließend die Spezifikationen des zu berechnenden Orthophotos, wie beispielsweise der gewünschten Pixelgröße, festgelegt und die Orthophotoberechnung gestartet werden.

Nachdem alle benötigten Orthophotos generiert wurden, werden diese im Weiteren zu einem Orthophotomosaik zusammengesetzt und auf den in dieser Arbeit zu untersuchenden Bereich begrenzt.

5 Aufbereitung der Höhenmodelle

5.1 Allgemeines

Als Datengrundlage wurden verschiedene Höhenmodelle herangezogen. Dies sind zum einen die bereits bestehenden Höhenmodelle DGM5 und DGM25 des Landesvermessungsamtes NRW, das Höhenmodell DHM/M745 vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie und das Höhenmodell MONA-Pro der Firma GEOSYS/MONA Pro Visual Media, France. Zum anderen werden noch einige neu generierte Höhenmodelle, welche mit den gängigsten, in diesem Bereich vertretenden Softwarepakete generiert wurden, untersucht. Die hier eingesetzten Softwarepakete sind das Programm-Modul LISA Foto, das Modul OrthoMAX von ERDAS Imagine der Firma ERDAS, Inc. in der Version 8.3 sowie das ebenfalls von ERDAS vertriebene Programm SOFTPLOTTER der Firma Autometric, Inc. in der Version 2.0.

Die Aufbereitung der zu untersuchenden Höhenmodelle gliedert sich in zwei Bereiche. Die bereits bestehenden Höhenmodelle werden auf den zu untersuchenden Ausschnitt reduziert und die Daten in einen Rasterdatensatz mit einer Auflösung von einem Meter gebracht (vgl. Abschnitt 5.2). In den beiden folgenden Abschnitten – Abschnitt 5.3 und 5.4 – werden zunächst die Ergebnisse der Oberflächenmodellgenerierung und danach die Ergebnisse der entsprechenden Filterungen dargestellt. Für den Vergleich der einzelnen Modelle und für eine Bewertung dieser, also eine Bestimmung der Standardabweichung, wurde ein Referenzmodell benötigt (vgl. Abschnitt 5.5). Für diesen Zweck wurden die Luftbilder des zu untersuchenden Gebietes an einem Planicom P1 analytisch ausgewertet und dort ein regelmäßiges Punktraster mit zusätzlichen Bruchkanten gemessen, welche in der späteren Analyse der Höhenmodelle als Referenzhöhen genutzt werden.

Die dargestellten Ausschnitte der Oberflächen- und Höhenmodelle wurden alle auf den auszuwertenden Bereich beschränkt und die Farbdarstellung einheitlich skaliert. Dazu wurden jeweils 33 cm große Farbklassen gebildet (vgl. Anhang 1). Dadurch entstehen zwar bei einigen Modellen in den Abbildungen harte Übergänge, jedoch ist für den Vergleich der Modelle diese Einteilung von Vorteil. Für die Differenzmodelle wie auch für die statistische Auswertung wurden die Originalwerte genutzt, sodass durch diese Klassenbildung kein

Informationsverlust entsteht. Diese Einteilung der Höhenwerte in Farbklassen wurde nur zur optischen Verdeutlichung vorgenommen.

5.2 Bestehende Höhenmodelle

5.2.1 DGM5 und DGM25 des Landesvermessungsamtes NRW

Die Landesvermessungsämter der einzelnen Bundesländer in Deutschland haben unter anderem den gesetzlichen Auftrag, die Geländeformen der Erdoberfläche zu erfassen, zu dokumentieren und darzustellen. Somit liegen in jedem Bundesland verschiedene Höhenmodelle vor und können bei den entsprechenden Landesvermessungsämtern erworben werden.

Das Untersuchungsgebiet in dieser Arbeit liegt in Nordrhein-Westfalen und von dem zuständigen Landesvermessungsamt werden für diesen Bereich die Höhenmodelle DGM5 und DGM25 angeboten.

Das DGM5 liegt im Bundesland Nordrhein-Westfalen zurzeit für etwa 75 % der Landesfläche vor und besitzt eine Rasterweite von 10 m x 10 m. Diese Rasterweite ist allerdings nicht in allen Bundesländern einheitlich. So besitzen die DGM5 in Bayern, Thüringen und Sachsen-Anhalt ebenfalls eine Rasterweite von 10 m x 10 m, die in Niedersachsen, im Saarland und in Schleswig-Holstein eine Rasterweite von 12,5 m x 12,5 m und das DGM5 in Rheinland-Pfalz eine Rasterweite von 20 m x 20 m. Die Ausgangsdaten für das DGM5 in Nordrhein-Westfalen werden durch eine Digitalisierung der Höhenlinien der jeweiligen Deutschen Grundkarte 1:5000 (DGK5), durch photogrammetrische Auswertungen und seit dem Jahreswechsel 1996/97 aus Ergebnissen der Laserscannerbefliegung gewonnen.

Für das hier vorliegende Untersuchungsgebiet bietet das Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen zusätzlich das DGM25 an. Dieses Höhenmodell hat eine Rasterweite von 50 m x 50 m und wird seit dem Jahre 1987 aus analogen Profilen für die Orthophotoherstellung erstellt.

Die Daten, die dem DGM5 und dem DGM25 für das ausgewählte Untersuchungsgebiet zugrunde liegen, stammen aus dem DGK5-Blatt 4309/14. Der in dieser Arbeit untersuchte DGM25-Ausschnitt entstand im Jahre 1977 durch eine Profilmessung mit einem Profilabstand von 40 m. Die Daten des DGM5 wurden im Jahre 1978 durch die Digitalisierung der DGK5 Höhenlinien bestimmt [Quelle: LVA NRW].

Die Punktkoordinaten der vorliegenden Höhenmodelle liegen bereits als Gauß-Krüger Koordinaten vor. Die Geländehöhe ist bei beiden Modellen in Meter über NN angegeben. Die Spezifikationen der Höhenmodelle DGM5 und DGM25 sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Höhenmodell	Rasterweite	Lagegenauigkeit	Höhengenauigkeit
DGM5	10 m	0,5 m	0,5 m
DGM25	50 m	keine Angabe	5 m

Tabelle 5.1: Spezifikationen der Höhenmodelle DGM5 und DGM25 nach LVA NRW

Für den Vergleich der beiden Höhenmodelle DGM5 und DGM25 mit den anderen zu untersuchenden Höhenmodellen wurden diese beiden Modelle in Rasterdatensätze umgeformt und auf eine Pixelgröße von einem Meter gebracht (vgl. Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2).

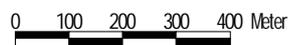
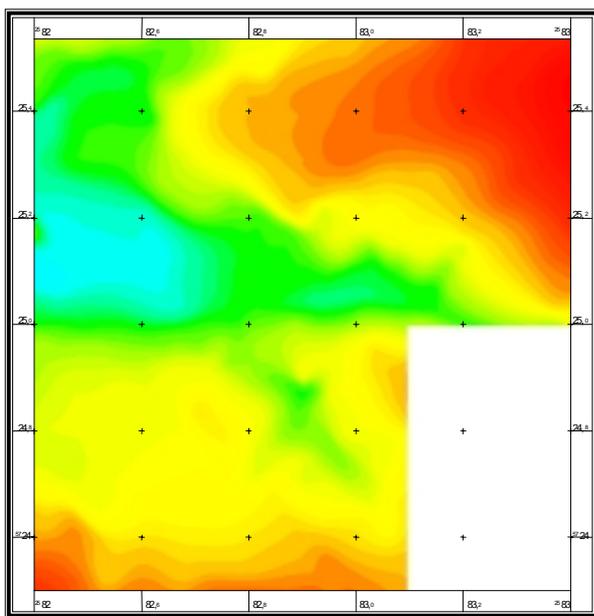


Abbildung 5.1: Ausschnitt aus dem DGM5 des LVA NRW

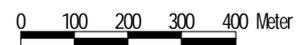
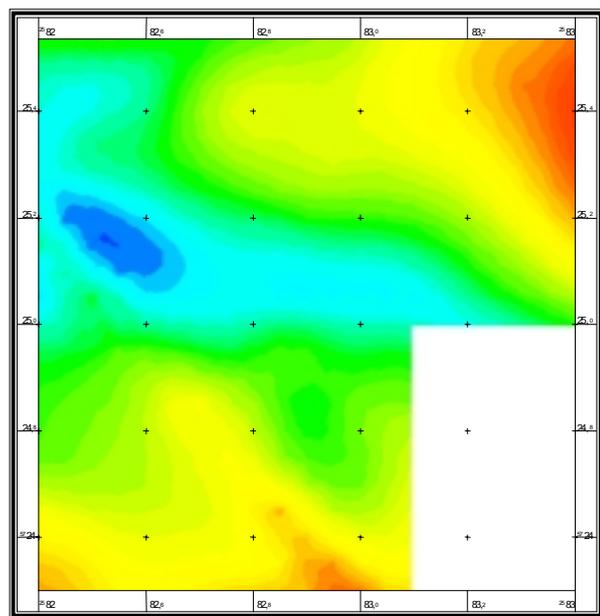


Abbildung 5.2: Ausschnitt aus dem DGM25 des LVA NRW

Für die beiden Abbildungen – Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 – gilt:

Darstellung auf der Grundlage des Digitalen Geländemodells DGM5 bzw. DGM25 des Landes NRW mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes NRW vom 12.04.2000, Az.: S 1070/2000.

5.2.2 DHM/M745 vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt am Main vertreibt das Höhenmodell DHM/M745. Das DHM/M745 liegt in geographischen Koordinaten, Datum Potsdam (Zentralpunkt Rauenberg), Bessel-Ellipsoid vor. Die Auflösung dieses Höhenmodells beträgt 1“ x 1“, welches einer Auflösung von etwa 30 m x 20 m entspricht. Die Auflösung in der Höhe beträgt bei diesem Modell einen Meter. Die zugrundeliegenden Daten des DHM/M745 sind durchweg älter als 10 Jahre und eine Fortführung des Höhenmodells ist nicht geplant. Das Modell weist, laut BKG, eine Lagegenauigkeit von 26 m und eine Höhengenaugigkeit von 20 m (absolut) bzw. 12 m (relativ) auf (vgl. Tabelle 5.2). Für die Bestimmung der Genauigkeit wurden pro Kartenblatt M745 etwa 300 photogrammetrisch bestimmte Kontrollpunkte mit denen des Höhenmodells verglichen und statistisch ausgewertet.

Die Daten des DHM/M745 stammen aus dem DMG – Datenbestand Digitales Höhenmodell DHM/M745 des Amtes für Militärisches Geowesen, Euskirchen (AMilGeo). Dabei wurden durch AMilGeo die Blätter der Karte TK50 gescannt, vektorisiert und bearbeitet sowie in ein anderes Koordinatensystem transformiert. Durch das BKG wurden die Daten anschließend in das derzeit vorliegende Format gebracht.

	Rasterweite	Höhengenaugigkeit
DHM/M745	1“ x 1“ bzw. 30 m x 20 m	20 m (abs.) bzw. 12 m (rel.)

Tabelle 5.2: Spezifikationen des Höhenmodells DHM/M745 nach [BKG 1997]

Für die hier vorliegende Arbeit lagen die Daten bereits im benötigten GK2-Koordinatensystem vor und wurden auf eine einheitliche Pixelgröße von 25 m resampled. Die Höhenwerte des Modells lagen nur als ganzzahlige Werte vor. Innerhalb dieser Untersuchung wurde der benötigte Ausschnitt des Höhenmodells auf eine Pixelgröße von einem Meter gebracht. Das Ergebnis der Umformung des Modells ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Den bei der Umformung eventuell zu erwartenden Genauigkeitsverlust wird hier keine weitere Beachtung geschenkt, da die generell anzusetzende Genauigkeit von 20 m bzw. 12 m durch dieses Resampling und die Transformation nicht überschritten wird.

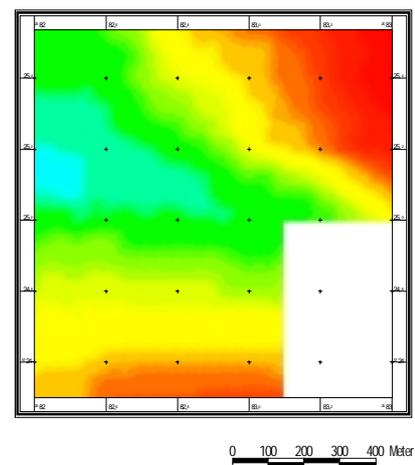


Abbildung 5.3: Ausschnitt aus dem DHM/M745 des BKG

5.2.3 MONA Pro der Firma GEOSYS/MONA PRO Visual Media, France

Das Höhenmodell MONA Pro der Firma GEOSYS/MONA PRO Visual Media, France ist ein weiteres verfügbares Höhenmodell. Dieses Modell ist für den größten Bereich Europas und Teile Nordafrikas erhältlich. In Deutschland wird es von der Firma GAF mbH in München vertrieben.

Für dieses Höhenmodell gibt es allerdings keine genauen Angaben in bezug auf Quellen, Auflösung und Aktualität. Dies kommt zum einen dadurch zustande, dass das Modell ehemals nur dem Militär zur Verfügung stand und zum anderen dass die Daten für diese Gebiete aus unterschiedlichen Quellen stammen. Diese Quellen sind beispielsweise US Army/Satellitenbilder, Luftbilder, topographische Karten, oder die Daten wurden durch Stereoauswertung oder Digitalisierung erzeugt. Über das Alter der Daten lässt sich nur sagen, dass sie ihren Ursprung etwa Ende der 80er bis Anfang der 90er haben. Eine Fortführung bzw. Aktualisierung der Daten war und ist nicht geplant. Ursprünglich lagen die Daten in einem Raster von 3" x 3" – das entspricht in Deutschland etwa einer Rasterweite von 90 m x 60 m – in geographischen Koordinaten bezogen auf das WGS84-Koordinatensystem vor. Die Genauigkeit des Modells ist im ebenen Gelände mit 3,5 m bis 5 m, im Hochgebirge mit 12 m bis 15 m angegeben. Die Spezifikationen des Höhenmodells MONA Pro sind in Tabelle 5.3 zusammenfassend aufgeführt.

	Rasterweite	Höhengenauigkeit
MONA Pro	3" x 3" bzw. 90 m x 60 m	3,5 m - 5 m

Tabelle 5.3: Spezifikationen des Höhenmodells MONA Pro nach Internet GAF mbH

Die Ausgangsdaten, die bei dieser Untersuchung zur Verfügung stehen, wurden bereits in das GK2-Koordinatensystem transformiert und auf eine einheitliche Pixelgröße von 75 m gebracht. Die Höhenwerte des Modells sind in ganzen Metern angegeben. Innerhalb der hier durchgeführten Untersuchung werden die Daten auf den benötigten Ausschnitt reduziert und auf eine Pixelgröße von einem Meter resampled (vgl. Abbildung 5.4). Auch bei diesem Modell ist der eventuell entstehende Genauigkeitsverlust durch die Transformationen und das Resampling aufgrund der anzusetzenden Genauigkeit von 3,5 m bis 5 m zu vernachlässigen.

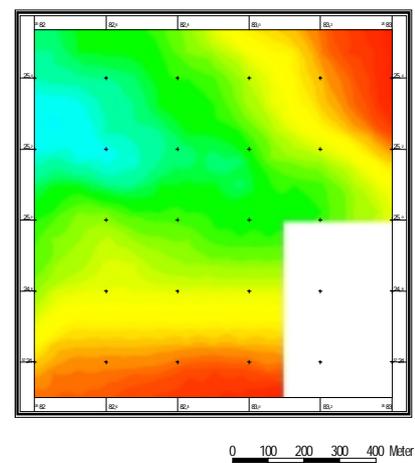


Abbildung 5.4: Ausschnitt aus dem Höhenmodell MONA Pro

5.3 Generierte Oberflächenmodelle

Neben den bereits genannten existierenden Höhenmodellen werden weiterhin neu generierte Oberflächenmodelle untersucht. Für die Erstellung von Oberflächenmodellen gibt es eine Vielzahl von Softwarepaketen, welche aus Zeitgründen und aufgrund fehlender Verfügbarkeit nicht alle untersucht werden können. So wurde die Auswahl auf folgende Softwarepakete beschränkt.

Das erste untersuchte Oberflächenmodell wurde mit dem Programm-Modul LISA Foto erzeugt. Ein weiteres mit dem Programm OrthoMAX in der Version 3.1 des Programmsystems ERDAS Imagine generiert. Und das dritte Oberflächenmodell wurde mit dem Softwarepaket Softplotter in der Version 2.0 der Firma Autometric, Inc. erstellt. Weitere Informationen zu den unterschiedlichen Softwarepaketen zur automatischen Oberflächenmodellgenerierung wurden bereits in Abschnitt 4.1 aufgeführt.

Diese drei Oberflächenmodelle werden im Weiteren zu Höhenmodellen reduziert. Dies geschieht mit den bereits angesprochenen Filtermethoden (vgl. Abschnitt 4.2). Zum Vergleich der beiden hier benutzten Filtermethoden wurden alle drei Oberflächenmodelle jeweils mit beiden Filteralgorithmen reduziert. Die Analyse der Filterungsergebnisse erfolgt in Abschnitt 6.2.

In der vorliegenden Arbeit werden die generierten Oberflächen- und Höhenmodelle entsprechend der Programme, mit denen sie erzeugt wurden, benannt. Das mit dem Programm LISA Foto generierte Oberflächenmodell wird im Weiteren kurz als LISA-Oberflächenmodell bezeichnet, ebenso verhält es sich bei dem OrthoMAX-Oberflächenmodell und dem Softplotter-Oberflächenmodell.

5.3.1 LISA-Oberflächenmodell

Das mit dem Programm LISA Foto generierte Oberflächenmodell (vgl. Abbildung 5.5) wurde mit den vom Programm vorgegebenen Berechnungsparametern generiert. Eine Variation der Parameter brachte in dieser Untersuchung keine deutlich besseren Ergebnisse, sodass das Oberflächenmodell, welches mit den Standardparametern generiert wurde, für die weitere Untersuchung genutzt wird. Eventuell können die entstandenen Abweichungen durch eine gezieltere Variation der Berechnungsparameter noch verbessert werden, jedoch ist eine Optimierung der Berechnungsparameter nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Die Standardparameter für die Berechnung des Oberflächenmodells mit dem Programm LISA Foto sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

	Startparameter	Verbesserungsparameter
Verschiebung in z	± 3 m	± 4 m
Korrelationsfenster	17 Pixel	11 Pixel
Korrelationskoeffizient	0,8	0,8

Tabelle 5.4: Parameter für die Oberflächenmodellgenerierung (Programm LISA Foto)

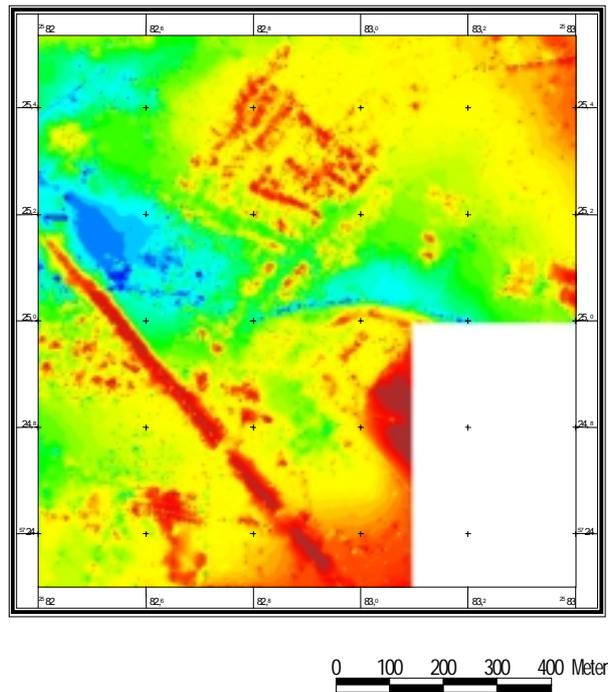


Abbildung 5.5: LISA-Oberflächenmodell

Das LISA-Oberflächenmodell weist – im Gegensatz zu den anderen generierten Oberflächenmodellen – einen wesentlich höheren Rauschanteil auf. Die Gebäude und der Damm sind zwar noch deutlich zu erkennen, grenzen sich allerdings nicht mehr so deutlich von ihrer Umgebung ab. Die Übergänge vom Gelände zum Gebäude sind in diesem Oberflächenmodell etwas abgerundet, was an dem zugrundeliegenden Algorithmus liegt (vgl. Abschnitt 3.2.4). Auch der Damm weist Unterbrechungen in seiner Struktur auf.

5.3.2 OrthoMAX-Oberflächenmodell

Das in Abbildung 5.6 dargestellte Oberflächenmodell wurde mit dem Programm OrthoMAX erstellt. Im Vergleich zum LISA-Oberflächenmodell (vgl. Abbildung 5.5) weist es eine sehr viel ruhigere Struktur auf. Die dargestellte Oberfläche beinhaltet wesentlich weniger Rauschen. Besonders der Übergang vom Gelände zu Gebäuden kommt in diesem

Oberflächenmodell deutlich zum Vorschein. Anhand der Struktur des Oberflächenmodells können bereits markante Stellen identifiziert werden, so ist beispielsweise der Fluss in der Mitte des Gebietes deutlich zu erkennen. Auch die Siedlungsstruktur ist wesentlich differenzierter als im LISA-Oberflächenmodell dargestellt.

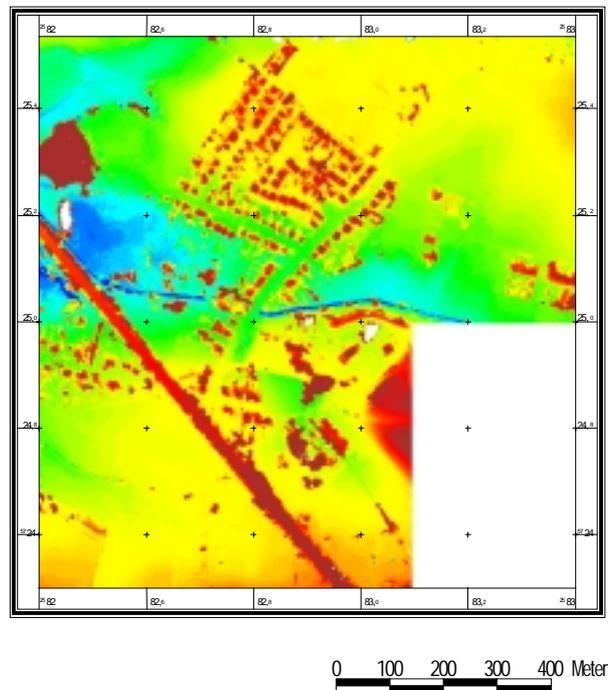


Abbildung 5.6: OrthoMAX-Oberflächenmodell

5.3.3 Softplotter-Oberflächenmodell

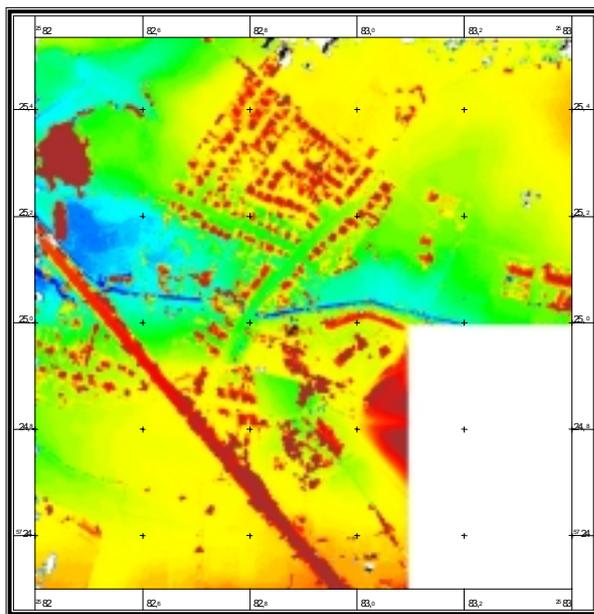
Das Programm Softplotter bietet, wie bereits in Abschnitt 4.1.3 angesprochen, zwei Optionen zur Oberflächenmodellgenerierung. Diese wurden in dieser Untersuchung beide eingesetzt und somit zwei Oberflächenmodelle generiert. Das Ergebnis des Area Based Matching wird in Abbildung 5.7 und das der Epipolargeometrie in Abbildung 5.8 dargestellt.

Die beiden dargestellten Ergebnisse weisen nur sehr geringe Unterschiede auf, da beide Verfahren prinzipiell auf demselben Algorithmus basieren. Der einzige gravierende Unterschied zwischen den beiden Modellen liegt in der Zeit, die zur Generierung benötigt wurde. Die Oberflächenmodellgenerierung mit der Methode der Epipolargeometrie ist etwa nur halb so zeitintensiv. Dies liegt an dem geringeren Suchbereich, der bei der Methode der Bildzuordnung über die Epipolargeometrie überprüft wird. Bei dieser Methode werden korrespondierende Punkte nur entlang der Epipolarlinien gesucht (vgl. Abschnitt 3.2.3),

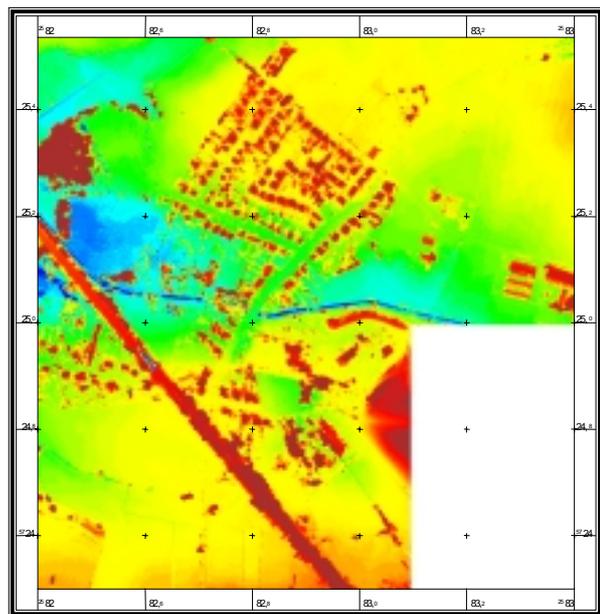
wohingegen bei der Methode des Area Based Matching (vgl. Abschnitt 3.2.1) größere Suchbereiche überprüft werden.

Da sich die beiden Oberflächenmodelle – wie bereits angesprochen – nicht sehr unterscheiden, wurde zur weiteren Bearbeitung nur das Oberflächenmodell, welches über das Verfahren der Epipolargeometrie generiert wurde, herangezogen. Diese wird im Folgenden als Softplotter-Oberflächenmodell bezeichnet.

Die Struktur der beiden Oberflächenmodelle ist mit der des OrthoMAX-Oberflächenmodells in vielen Bereichen nahezu übereinstimmend. Das Programm Softplotter benutzt – wie bereits in Abschnitt 4.1.3 angesprochen – lediglich eine Weiterentwicklung des bei dem Programm OrthoMAX eingesetzten Algorithmus. Somit ist es auch nicht überraschend, dass sich die Ergebnisse der beiden Programme sehr ähneln. Inwieweit sich die Modelle unterscheiden, wird bei der Filterung näher untersucht. Zu erwarten ist, dass sich die Ergebnisse der Filterung der Oberflächenmodelle, welche mit den beiden Programmen OrthoMAX und Softplotter generiert wurden, nicht signifikant unterscheiden.



**Abbildung 5.7: Softplotter-Oberflächenmodell
(Area Based Matching)**



**Abbildung 5.8: Softplotter-Oberflächenmodell
(Epipolargeometrie)**

5.4 Filterung der generierten Oberflächenmodelle zu Höhenmodellen

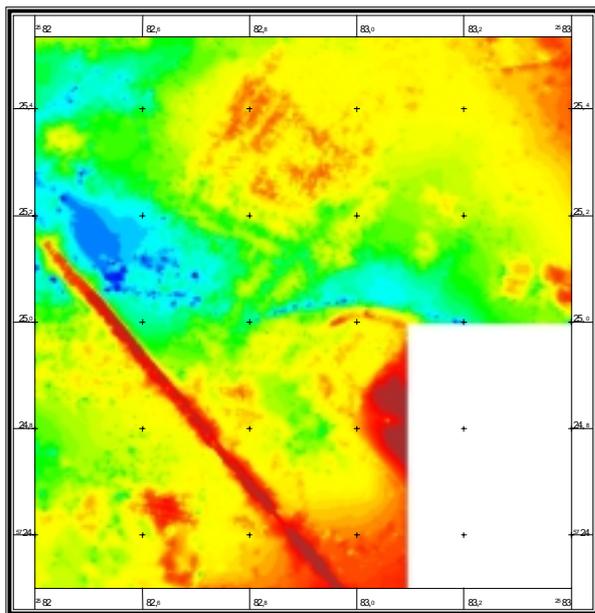
Um die Oberflächenmodelle auf die Geländeoberfläche zu reduzieren, wurden auf die drei neu generierten Oberflächenmodelle die beiden hier zur Verfügung stehenden Filterungsverfahren angewandt. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden in den folgenden Abbildungen dargestellt und erläutert. Eine genaue Analyse der Unterschiede zwischen den beiden Verfahren und deren Fehlern erfolgt in Abschnitt 6.2. Die Namensgebung der Höhenmodelle erfolgt analog zur Namensgebung der Oberflächenmodelle. So wird das Höhenmodell, welches auf dem LISA-Oberflächenmodell beruht und mit dem Programm RASCOR gefiltert wurde, als LISA-RASCOR-Höhenmodell bezeichnet. Entsprechend wird das mit dem Phoenix-Verfahren gefilterte Modell als LISA-Phoenix-Höhenmodell bezeichnet.

5.4.1 LISA-Höhenmodelle

Das mit dem Programm LISA Foto generierte Oberflächenmodell besitzt, wie in Abbildung 5.5 zu sehen ist, eine relativ unruhige Struktur. Dies bedeutet, dass im Modell noch ein hoher Rauschanteil vorhanden ist und somit auch nicht so gute Ergebnisse bei der Filterung erwartet werden können. In der Abbildung 5.9 wird das Ergebnis der Filterung mit dem Phoenix-Verfahren dargestellt. Neben dem Aspekt der Genauigkeit des Ergebnisses muss an dieser Stelle auch auf die benötigte Zeit für diese Filterung hingewiesen werden. Bei dieser Filterung war aufgrund der unruhigen Struktur des Oberflächenmodells ein größerer zeitlicher Aufwand von Nöten, als beispielsweise bei der Filterung des OrthoMAX-Oberflächenmodells. Die Filterung mit dem Programm RASCOR benötigte dagegen nicht merklich mehr Zeit für die Berechnungen. Das Ergebnis der Filterung des Oberflächenmodells mit dem Programm RASCOR wird in Abbildung 5.10 dargestellt.

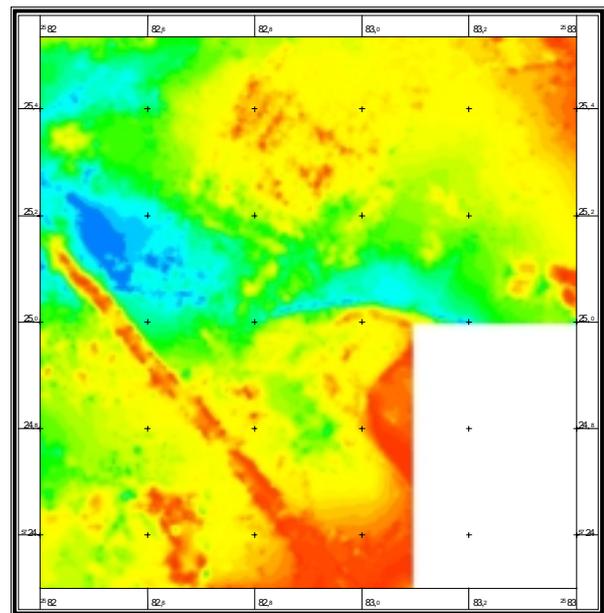
Wie bereits erwartet liefern die beiden durchgeführten Filterungen des LISA-Oberflächenmodells keine allzu guten Ergebnisse. Die unruhige Struktur des zugrundeliegenden Oberflächenmodells ist auch noch in beiden Höhenmodellen erhalten geblieben. Die Struktur der Siedlung ist leider noch deutlich erkennbar und auch sonst sind noch zu viele unruhige Strukturen im Höhenmodell enthalten. Das Höhenmodell, welches mit dem Programm RASCOR reduziert wurde, ist von den drei mit dem Programm RASCOR bearbeiteten Oberflächenmodellen das Einzige, welches die Struktur des Eisenbahndammes noch annähernd enthält. Bei den anderen beiden RASCOR-Höhenmodellen (vgl. Abbildung 5.12 und Abbildung 5.14) ist diese Struktur durch die Filterung eliminiert worden. Der Grund

dafür liegt eindeutig in der unruhigen Struktur des Eisenbahndammes im LISA-Oberflächenmodell. Ebenso wie auch beim Phoenix-Verfahren arbeitet das Programm RASCOR prinzipiell mit Höhendifferenzen benachbarter Punkte, und diese sind in diesem Oberflächenmodell nicht so deutlich, dass sie für eine Eliminierung in Betracht kommen. Jedoch trifft dies nicht nur bei der Struktur des Eisenbahndammes zu, sondern leider auch bei dem Großteil der Struktur der Siedlungsfläche.



0 100 200 300 400 Meter

Abbildung 5.9: LISA-Phoenix-Höhenmodell



0 100 200 300 400 Meter

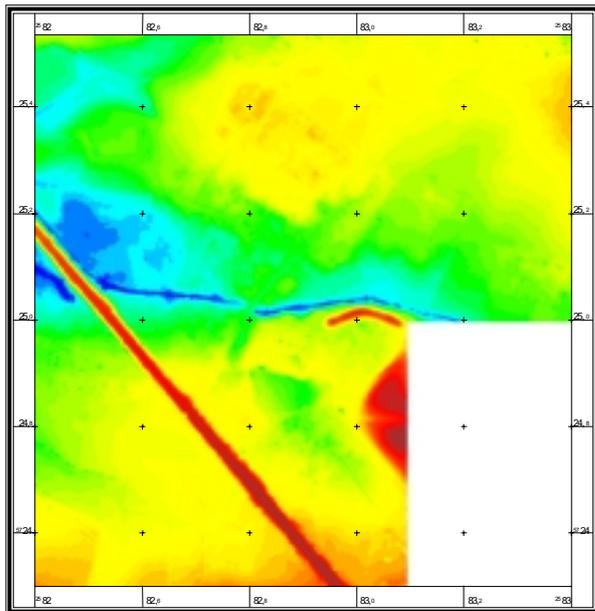
Abbildung 5.10: LISA-RASCOR-Höhenmodell

5.4.2 OrthoMAX-Höhenmodelle

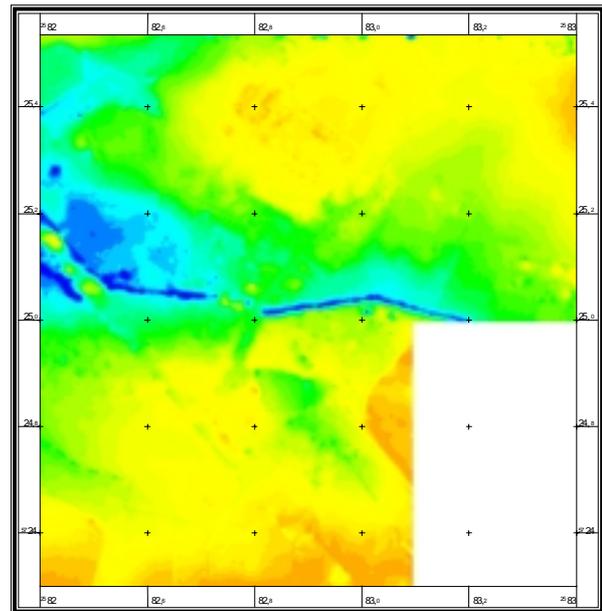
Das mit dem Programm OrthoMAX generierte Oberflächenmodell wurde ebenfalls mit den beiden hier zu untersuchenden Filter-Algorithmen reduziert. Das in Abbildung 5.11 dargestellte Höhenmodell wurde mit dem Phoenix-Algorithmus und das in Abbildung 5.12 gezeigte Höhenmodell mit dem Programm RASCOR gefiltert.

Das mit dem Phoenix-Verfahren erzeugte Höhenmodell weist eine relativ homogene Struktur auf und kann als gelungene Filterung bezeichnet werden. An den Stellen, an denen vorher die Siedlung war, sind noch kleinere Erhöhungen vorhanden. Hierbei handelt es sich um „Überreste“ der Siedlungsstruktur. Allerdings weisen diese Strukturen nur Höhendifferenzen von wenigen dm auf.

Bei dem Ergebnis der RASCOR-Filterung verhält es sich im Bereich der Siedlung ähnlich. Auch dort sind noch minimale Strukturen zu erkennen, welche ebenfalls auf die Siedlung zurückzuführen sind. Jedoch wurden bei diesem Höhenmodell die Strukturen des Eisenbahndammes und die der Form eines Bumerangs ähnlichen Erhebung komplett eliminiert und auch die Erhebung im rechten unteren Teil des Höhenmodells ist stark geglättet worden.



0 100 200 300 400 Meter



0 100 200 300 400 Meter

Abbildung 5.11: OrthoMAX-Phoenics-Höhenmodell Abbildung 5.12: OrthoMAX-RASCOR-Höhenmodell

5.4.3 Softplotter-Höhenmodelle

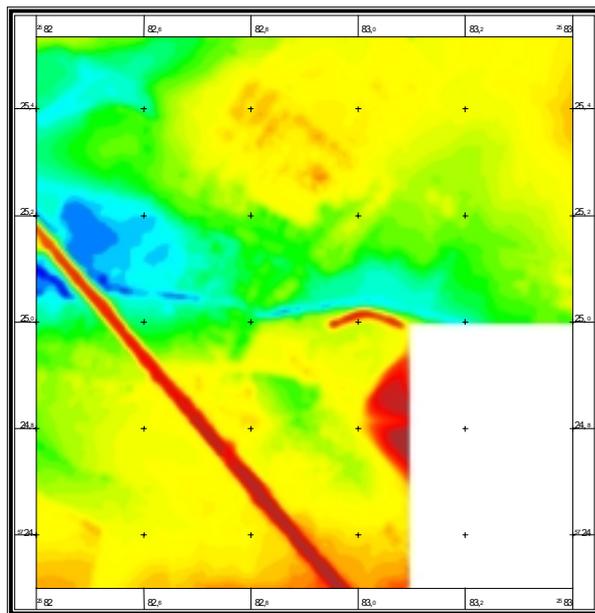
Ebenso wie auch die beiden anderen Oberflächenmodelle wird das Softplotter-Oberflächenmodell mit den beiden hier zur Verfügung stehenden Filterungsverfahren zu Höhenmodellen reduziert. Die Ergebnisse sind denen der Filterung des OrthoMAX-Oberflächenmodells sehr ähnlich. Die Unregelmäßigkeiten im Bereich der Siedlung sind in diesen beiden Höhenmodellen etwas deutlicher vorhanden.

Das Ergebnis der Filterung mit dem Phoenics-Verfahren (vgl. Abbildung 5.13) kann auch an dieser Stelle als gelungene Filterung bezeichnet werden. Die markanten Strukturen des zu untersuchenden Geländes sind in diesem Höhenmodell erhalten geblieben.

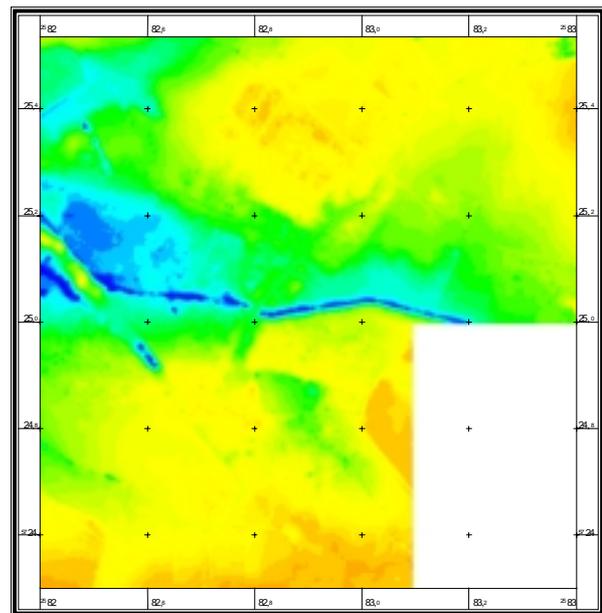
Bei dem Ergebnis der Filterung des Softplotter-Oberflächenmodells mit dem Programm RASCOR (vgl. Abbildung 5.14) treten die gleichen Fehler wie bei der Filterung des

OrthoMAX-Oberflächenmodells auf. Auch hier wurde die Struktur des Eisenbahndammes und die der Bumerang-Erhebung komplett eliminiert und die Erhebung im rechten unteren Bereich deutlich geglättet.

Die beiden Softplotter-Höhenmodelle weisen im Vergleich zu den beiden OrthoMAX-Höhenmodellen keine signifikanten Unterschiede auf. Die geringen Unterschiede sind durch die Filterung entstanden und liegen im Bereich von etwa einem bis zwei dm.



0 100 200 300 400 Meter



0 100 200 300 400 Meter

Abbildung 5.13: Softplotter-Phoenix-Höhenmodell Abbildung 5.14: Softplotter-RASCOR-Höhenmodell

5.5 Referenzmodell

Ziel dieser Untersuchung ist die Beurteilung der Genauigkeiten der generierten und der bereits bestehenden Höhenmodelle, also die Abweichungen dieser Modelle von der Realität. Zu diesem Zweck muss ein Soll-Höhenmodell vorliegen. Da es sich bei allen zur Verfügung stehenden Höhenmodellen um gerasterte und meist kleinmaßstäbige Modelle handelt, d.h. die Informationen sind bereits gefiltert bzw. eingeschränkt, wurde an dieser Stelle ein neues Referenzmodell benötigt. Zu diesem Zweck wurden die sieben Luftbilder des Untersuchungsgebietes an einem Planicomp P1 analytisch ausgewertet.

Das Referenzmodell wurde mit einer Gitterweite von 16 m in X- und Y-Richtung gemessen. Zusätzlich zu diesem regelmäßigen Raster wurden auch vorhandene Bruchkanten separat aufgenommen. Die Wahl der Gitterweite von 16 m wurde aufgrund der Tatsache gewählt,

dass die Höhenmodelle, welche von den Landesvermessungsämtern oder ähnlichen Organisationen vertrieben werden, meist ein regelmäßiges Raster besitzen (5m, 10m, 20m, usw.). Um nicht die gleichen Stützpunkte zu treffen und so eventuell „gleiche“ Werte zu vergleichen, wurde an dieser Stelle ein unregelmäßiges Punktraster von 16 m Rasterweite gewählt. Eine geringere Rasterweite würde aufgrund der Struktur des Gebietes – geringe Höhenvariationen – und der Tatsache, dass vorhandene Bruchkanten, wie beispielsweise Brücken oder Dämme, zusätzlich aufgenommen werden, keine weiteren wichtigen Informationen bringen. Die so gemessenen Daten sind für diesen Bereich des Geländes aussagekräftig.

Bei der Messung des Referenzmodells wurde darauf geachtet, dass nur Bodenpunkte gemessen wurden, sodass an dieser Stelle bereits von einem Höhenmodell gesprochen werden kann. Das hier vorliegende Referenzmodell ist natürlich nicht fehlerfrei. Die Fehler in diesem Modell kommen zum einen durch die Messung der Punkte durch den Operateur zustande, allerdings liegen die Abweichungen bei maximal 10 cm ($0,1 \text{ ‰}$ der Flughöhe, welche in diesem Untersuchungsgebiet bei etwa 1000 m lag). Zum anderen müssen die Fehler des Scannens und die der Orientierung der Luftbilder berücksichtigt werden. Aber ebenso wie die Fehler des Operateurs kann man diese Fehler als nicht signifikant bezeichnen, sodass dieses Modell als Referenzmodell angesehen werden kann. Bei der Untersuchung werden die Abweichungen zu anderen Modellen auch in diesem Rahmen gewertet. Dies bedeutet, dass Abweichungen im Bereich von einem dm nicht als signifikant fehlerhafte Stellen im Höhenmodell angesehen werden, da nicht mit Gewissheit gesagt werden kann, ob diese Abweichungen wahre Abweichungen von der Erdoberfläche sind, oder durch Ungenauigkeiten im Referenzmodell hervorgerufen werden.

Eine Übersicht über die Messungen ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Anhand der Struktur der Übersicht lassen sich bereits die wichtigsten Bereiche erkennen. Es sind speziell die Bruchkanten, welche bei den Matching- und Filter-Algorithmen nicht erkannt bzw. eliminiert werden.

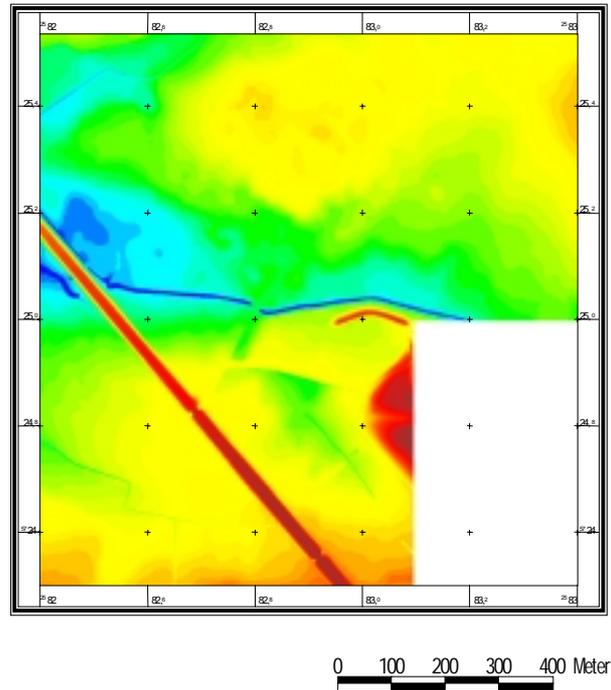


Abbildung 5.15: Übersicht des Referenzmodells mit Raster und Bruchkanten

Da es sich bei den zu vergleichenden Höhenmodellen um Rasterdatensätze handelt, wurde das vorliegende Punktraster mit Bruchkanten in einen Rasterdatensatz konvertiert. Bei der durchgeführten Interpolation wurden die Punkte der Bruchkanten speziell berücksichtigt, sodass nicht über die Bruchkanten hinweg interpoliert wurde. Das in Abbildung 5.16 dargestellte Höhenmodell ist das Ergebnis der Umformungen und wird im Weiteren als Referenzmodell bezeichnet und genutzt.

Durch diese Interpolation des Referenzmodells auf einen Meter Pixelgröße entsteht eine gewisse Ungenauigkeit, welche teilweise

mehrere dm groß werden kann. Diese Ungenauigkeiten treten zwischen den gemessenen Rasterpunkten auf. Bei der Untersuchung der bereits bestehenden Höhenmodelle hat diese Tatsache keine Auswirkungen auf die Untersuchung. Bei den LISA-Höhenmodellen kann diese Tatsache aufgrund des hohen Rauschanteils des Modells ebenfalls vernachlässigt werden. Jedoch muss dieser Aspekt bei der Betrachtung der Genauigkeit der Softplotter- und OrthoMAX-Höhenmodelle berücksichtigt werden. Da diese durch die Interpolation des Referenzmodells verursachten Ungenauigkeiten im Referenzmodell nicht zahlenmäßig aufgeführt werden können, sei an dieser Stelle nur darauf hingewiesen.



**Abbildung 5.16: Interpoliertes Referenzmodell
(Rasterdatensatz)**

5.6 Zusammenfassung

In allen Modellen ist die grundsätzliche Struktur des Untersuchungsgebietes klar zu erkennen. Allerdings ist der Detailgrad der einzelnen Modelle stark unterschiedlich. Dies ist aufgrund der verschiedenen Datenquellen und den unterschiedlichen Punktdichten der einzelnen Modelle auch nicht weiter verwunderlich. Es gibt in diesem Untersuchungsgebiet zwei Stellen, welche für die weitere Auswertung von speziellem Interesse sind. Dies ist zum einen der Bereich der Siedlung und zum anderen der Bereich des Eisenbahndammes. Anhand der abgebildeten Höhenmodelle lässt sich an dieser Stelle noch keine Aussage über die Genauigkeit im Bereich der Siedlung treffen. Im Bereich des Eisenbahndammes lässt sich nur sagen, dass die Struktur des Eisenbahndammes nicht in allen Höhenmodellen enthalten ist. Welche Auswirkungen das für die Genauigkeit der jeweiligen Höhenmodelle hat und welche Höhenfehler im Bereich des Eisenbahndammes durch das Fehlen der Struktur auftreten, wird in den folgenden Abschnitten untersucht.

6 Analyse der Höhenmodelle

6.1 Allgemeines

Nach der Aufbereitung der Höhenmodelle (vgl. Abschnitt 5) liegen alle Modelle in einem vergleichbaren Datenformat vor und werden mit dem photogrammetrisch gemessenen Referenzmodell verglichen. In diesem Abschnitt wird untersucht, mit welcher Genauigkeit die Geländehöhen in den einzelnen Höhenmodellen dargestellt werden. Bei den gekauften Höhenmodellen ist von besonderem Interesse, ob die von den Herstellern angegebenen Genauigkeiten den hier berechneten Genauigkeiten entsprechen. Allerdings sind die hier bestimmten Genauigkeiten für die bestehenden Modelle nur auf den vorliegenden Untersuchungsbereich bezogen und können nicht für den gesamten Bereich des jeweiligen Modells angesetzt werden. Bei den neu generierten Höhenmodellen hängt die erzielte Genauigkeit von zwei Faktoren ab. Zum einen hängt sie von dem Verfahren, welches dem eingesetzten Programm zur Oberflächenmodellgenerierung zugrunde liegt, ab und zum anderen von der Filterungsmethode, mit welcher das Oberflächenmodell zum Höhenmodell reduziert wurde. Der erste Faktor – der Einsatz der Software – sollte dabei allerdings keinen allzu großen Einfluss haben. Auch bei den neu generierten Höhenmodellen gilt die Aussage, dass die berechneten Genauigkeiten nur für den hier untersuchten Ausschnitt gelten und nicht ohne weiteres auf andere Bereiche übertragbar sind.

Die hier durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf das in Abbildung 5.16 dargestellte photogrammetrisch gemessene Referenzmodell. Die Höhenwerte des Referenzmodells werden in dieser Untersuchung als Referenzhöhen genutzt. Die Fehler der Höhenwerte dieses interpolierten Referenzmodells können durchaus eine Größenordnung von mehreren dm einnehmen (vgl. Abschnitt 5.5). Unter diesem Aspekt müssen die durchgeführten statistischen Untersuchungen auch betrachtet werden. Speziell bei der Betrachtung der Ergebnisse der OrthoMAX- und Softplotter-Höhenmodelle ist diese Ungenauigkeit im zugrundeliegenden Referenzmodell zu berücksichtigen.

6.2 Analyse der Filterungsverfahren

Die generierten Oberflächenmodelle wurden mit den beiden hier zu untersuchenden Filterungsverfahren zu Höhenmodellen reduziert. Dabei ist auf die unterschiedliche Struktur der Eingangsdaten zu achten. Das Programm RASCOR benötigt die zu filternden Daten als ASCII-Datensatz, wohingegen das Phoenix-Verfahren mit Rasterdaten arbeitet. Allerdings kommen durch die verschiedenen Datenformate keine Unterschiede in den Ausgangsdaten zustande. Der ASCII-Datensatz wurde, ebenso wie der Rasterdatensatz, mit einer Pixelgröße von einem Meter ausgegeben und mit dem Programm RASCOR verarbeitet.

6.2.1 Ergebnisse der RASCOR-Filterung

Der Algorithmus, der dem Programm RASCOR zugrunde liegt, brachte für die Oberflächenmodelle die in Tabelle 6.1 aufgeführten Ergebnisse.

	LISA-Oberfl.-Modell		OrthoMAX-Oberfl.-Modell		Softplotter-Oberfl.-Modell	
Anzahl Punkte (ungefiltert)	883842	100,00	883842	100,00 %	883842	100,00 %
Durch Filterung eliminiert	286050	32,36 %	317339	35,90%	317709	35,95 %
Anzahl Punkte (gefiltert)	597792	67,64 %	566503	64,10 %	566133	64,05 %

Tabelle 6.1: Übersicht der Ergebnisse der RASCOR-Filterung

Die eliminierten Punkte wurden anhand der in Tabelle 6.2 zusammengefassten Kriterien aus dem Datensatz eliminiert. Die Angaben sind allerdings nicht ohne weiteres auf das Gelände zu übertragen. Die Eliminierung der Punkte erfolgt in der Reihenfolge der Eliminierungskriterien, wie sie in der Tabelle angegeben sind. Somit werden bei den ersten Schritten Punkte eliminiert, welche auch durch später ablaufende Kriterien eliminiert werden würden.

	LISA-Oberfl.-Modell		OrthoMAX-Oberfl.-Modell		Softplotter-Oberfl.-Modell	
Anzahl der Punkte (ungefiltert)	883842	100,00 %	883842	100,00 %	883842	100,00 %
Höhenbegrenzung	55589	6,29 %	137313	15,53 %	155504	17,6 %
Höhenänderung in X	23613	2,67 %	30352	3,44 %	22241	2,51 %
Höhenänderung in Y	45333	5,13 %	64043	7,24 %	58839	6,66 %
Höhendiff. gegen Interpolation 1	60973	6,90 %	37145	4,20 %	34475	3,90 %
Höhendiff. gegen Interpolation 2	95829	10,84 %	44940	5,08 %	45277	5,12 %
Höhendiff. gegen Schrägebene	2478	0,28 %	1354	0,15 %	452	0,05 %
Höhendiff. gegen Prädik.-ebene	2235	0,25 %	2192	0,25 %	921	0,10 %

Tabelle 6.2: Aufschlüsselung der Kriterien für die Eliminierung von Punkten durch das Programm RASCOR

Die Anzahl der zu filternden Punkte ist bei allen drei Oberflächenmodellen die Gleiche, sodass die Ergebnisse direkt miteinander verglichen werden können. Die Ergebnisse der Filterung des OrthoMAX-Oberflächenmodells sind mit denen des Softplotter-Oberflächenmodells in vielen Punkten sehr ähnlich. Dies bestätigt an dieser Stelle die bereits angesprochene Tatsache, dass der bei dem Programm Softplotter eingesetzte Algorithmus nur eine Weiterentwicklung des bei dem Programm OrthoMAX eingesetzten Algorithmus ist. Jedoch variieren die Ergebnisse der Filterung dieser beiden Oberflächenmodelle stark zu denen der Filterung des LISA-Oberflächenmodells. Besonders im Punkt der Eliminierung der Punkte durch die Höhenbegrenzung ist eine hohe Differenz festzustellen. Deshalb werden an dieser Stelle die vom Programm RASCOR automatisch berechneten Höhenbegrenzungen näher untersucht. Die automatisch bestimmten Höhenbegrenzungen werden in Tabelle 6.3 für die drei Oberflächenmodelle zusammengefasst.

	LISA-Oberfl.-Modell	OrthoMAX-Oberfl.-Modell	Softplotter-Oberfl.-Modell
Minimale Höhe	57,29 m	52,99 m	55,72 m
Maximale Höhe	66,00 m	64,34 m	64,17 m

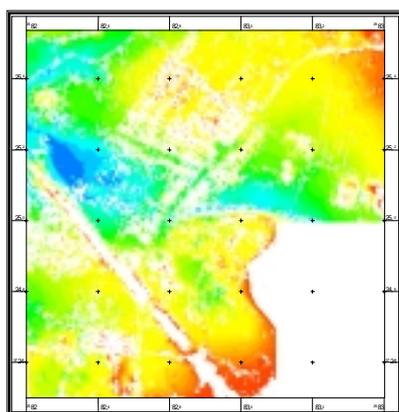
Tabelle 6.3: Automatische Höheneingrenzung durch das Programm RASCOR

Diese Differenz in der Höhenbegrenzung lässt sich anhand der zugrundeliegenden Oberflächenmodelle erklären. Bei dem LISA-Oberflächenmodell (vgl. Abbildung 5.5) sind im Gegensatz zu den anderen beiden Oberflächenmodellen wesentlich mehr Bereiche mit größeren Höhen vorhanden. Insgesamt ist die Struktur des LISA-Oberflächenmodells auch

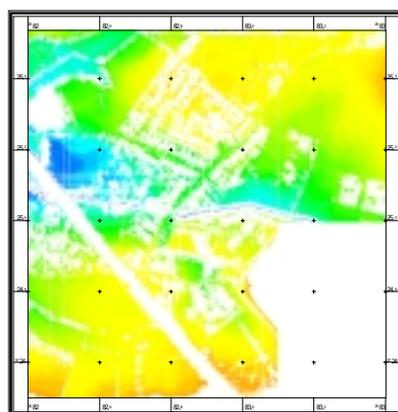
wesentlich unruhiger. Somit sind die Höhenänderungen beim Übergang von beispielsweise Gebäuden zum Gelände nicht so groß. Der Grund für diese „Ausrundung“ der Höhenübergänge liegt an dem zugrundeliegenden Algorithmus zur Oberflächenmodellgenerierung. Dies ist auch der Grund dafür, dass das LISA-Oberflächenmodell das einzige der drei mit dem Programm RASCOR gefilterten Oberflächenmodelle ist, in welchem die Struktur des Eisenbahndammes erhalten blieb. Allerdings blieb bei diesem Höhenmodell nicht nur die Struktur des Damms erhalten, sondern auch die entsprechenden Übergänge zu dem Gebäuden.

Die Ergebnisse der Eliminierung werden in den folgenden Abbildungen – Abbildung 6.1, Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 – dargestellt. Die Bereiche, die von dem Programm RASCOR eliminiert wurden, werden in den Abbildungen durch Lücken dargestellt. Bei dem Ergebnis der Filterung des LISA-Oberflächenmodells ist anhand der Abbildung deutlich zu erkennen, dass an den Rändern der eliminierten Bereiche noch die Übergänge zu den ehemals herausragenden Bereichen vorhanden sind. Bei den anderen beiden Abbildungen ist ein solcher Übergang nicht zu sehen.

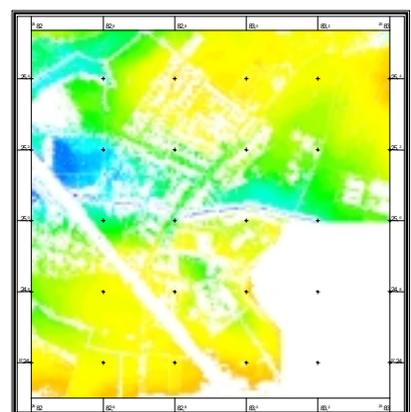
Die eliminierten Bereiche werden in der weiteren Verarbeitung durch Interpolationsverfahren geschlossen, sodass wieder ein geschlossener Datensatz entsteht. Bei der Interpolation haben die übrig gebliebenen Übergänge zu höheren Bereichen eine wichtige Bedeutung, denn speziell die Werte an den Randbereichen von eliminierten Gebieten sind ausschlaggebend für die Werte, die in die entstandenen Lücken gesetzt werden.



**Abbildung 6.1: Zwischenenergebnis
LISA-Oberflächenmodell
(RASCOR)**



**Abbildung 6.2: Zwischenenergebnis
OrthoMAX-Oberflächenmodell
(RASCOR)**



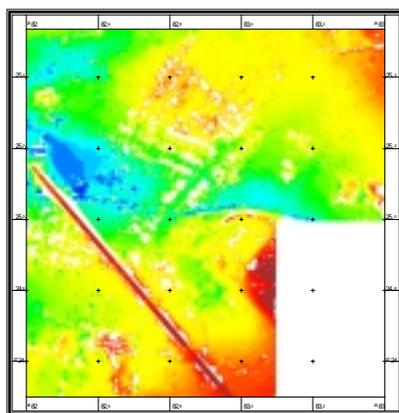
**Abbildung 6.3: Zwischenenergebnis
Softplotter-Oberflächenmodell
(RASCOR)**

An dieser Stelle sei noch mal darauf hingewiesen, dass anders als beim Phoenix-Verfahren keine Gebiete von der Filterung ausgeschlossen wurden und das gesamte Gebiet in einem gefiltert wurde. Es ist somit zu erwarten, dass mehr Punkte eliminiert werden und die Ergebnisse in den sogenannten Problembereichen schlechter sind als bei der Filterung mit dem Phoenix-Verfahren.

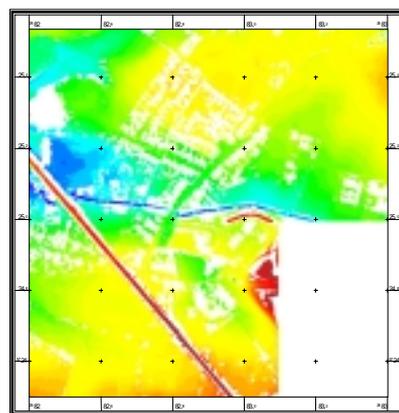
6.2.2 Ergebnisse der Filterung mit dem „Phoenix-Verfahren“

Da dieses Verfahren Methoden der Digitalen Bildverarbeitung nutzt, kann nicht, wie bei der Filterung mit dem Programm RASCOR, die Anzahl der eliminierten Punkte und der entsprechende Grund für die Eliminierung angegeben werden. Im Prinzip werden nämlich bei dieser Methode der Filterung durch den Einsatz von Tiefpassfiltern auf das gesamte Gebiet alle Punkte bearbeitet. Allerdings ist die Anzahl der gefilterten Punkte auch kein Maß für die Genauigkeit der eingesetzten Filterung.

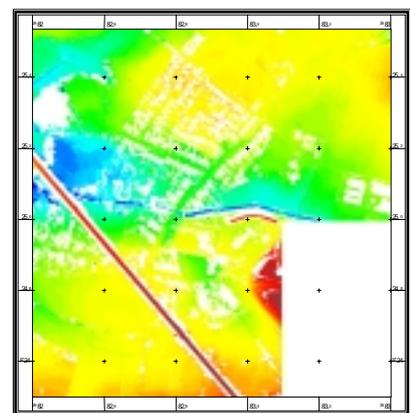
Da die Filterung von Gebäuden in den meisten Fällen funktioniert, sollen hier speziell Problembereiche untersucht werden. Problembereiche sind Bereiche, welche aufgrund ihrer Struktur leicht mit Gebäuden verwechselt werden können, aber nicht eliminiert werden sollten. Dies sind beispielweise Brücken, Dämme, Gräben oder andere natürliche Bruchkanten.



**Abbildung 6.4: Zwischenenergebnis
LISA-Oberflächenmodell
(Phoenix-Verfahren)**



**Abbildung 6.5: Zwischenenergebnis
OrthoMAX-Oberflächenmodell
(Phoenix-Verfahren)**



**Abbildung 6.6: Zwischenenergebnis
Softplotter-Oberflächenmodell
(Phoenix-Verfahren)**

In Abbildung 6.4, Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 werden jeweils die Zwischenenergebnisse der Phoenix-Filterung dargestellt. Die Lücken im Datensatz stellen die durch das Phoenix-

Verfahren eliminierten Bereich dar. Die dargestellten Abbildungen zeigen das Ergebnis des iterativen Durchlaufes der Eliminierung der Gebäude bevor die entstandenen Lücken interpoliert werden. Der Eisenbahndamm und der Graben in der Mitte des Bildes wurden in diesem Fall – um die Struktur zu erhalten – von der Filterung ausgeschlossen. Ohne diese Maßnahme wären große Bereiche dieser beiden Strukturen ebenso wie die Gebäude durch die Berechnung eliminiert worden.

Die Filterung mit dem Phoenix-Verfahren führt zu genaueren Ergebnissen, aber auch nur aufgrund der Tatsache, dass die Problembereiche wie Brücken und Dämme bei der Filterung ausgeschlossen werden und somit auch im Höhenmodell erhalten bleiben. Dieses Verfahren erfordert aufgrund der manuellen Eingriffe zwar mehr Bearbeitungszeit als bei der Bearbeitung mit dem Programm RASCOR, hat aber den großen Vorteil, dass bei diesem Verfahren die angesprochenen Schwierigkeiten mit den Problembereichen zufriedenstellend gelöst werden.

6.2.3 Vergleich der Ergebnisse

Wie bereits angesprochen können die Ergebnisse der beiden Filterungen nicht direkt miteinander verglichen werden, da beim Phoenix-Verfahren die Problembereiche von der Filterung ausgeschlossen werden und so keine Konfrontation mit dem eigentlichen Problem der automatischen Filterung stattfindet. Wenn die Problembereiche allerdings außer Acht gelassen werden, zeigen die Ergebnisse der beiden Filterungsmethoden ähnliche Eigenschaften. Die Strukturen der Siedlung wurden bei beiden Methoden in etwa gleicher Weise erkannt und eliminiert. Dies ist durch die Tatsache zu erklären, dass die beiden hier eingesetzten Filterungsmethoden prinzipiell zunächst auf der Untersuchung von Höhendifferenzen benachbarter Pixel beruhen. Damit lässt sich, wie bereits angesprochen, auch das relativ schlechte Ergebnis der Filterung des LISA-Oberflächenmodells erklären. In diesem Modell sind die angesprochenen Höhendifferenzen nicht so deutlich erkennbar, und deshalb kommt es bei beiden Methoden nicht zu optimalen Ergebnissen.

Dem Vorteil des Ergebnisses des Phoenix-Verfahrens steht der Nachteil des großen manuellen Aufwandes gegenüber. Allerdings muss man an dieser Stelle deutlich darauf hinweisen, dass ein Höhenmodell, welches weniger Fehler aufweist, dafür aber in der Herstellung wesentlich mehr Zeit in Anspruch nimmt und somit kostenintensiver ist, einem in kürzer Zeit zu generierenden aber fehlerbehafteten Höhenmodell natürlich vorzuziehen ist.

Die im Folgenden zu beantwortende Frage ist allerdings, wie groß sind diese Fehler und inwieweit zeigen sie sich in den später mit den Höhenmodellen generierten Orthophotos. Ob

sie tolerierbar sind oder nicht, muss dabei je nach Einsatzgebiet und Größenordnung speziell entschieden werden.

6.3 Analyse der Differenzen zum Referenzmodell

An dieser Stelle werden alle vorhandenen Höhenmodelle in Bezug zum gemessenen Referenzmodell gesetzt. Für diese Untersuchung wurde für jedes Höhenmodell ein Differenzmodell berechnet. Diese werden im Weiteren als gesamt untersucht und die entsprechenden Standardabweichungen berechnet. Neben dem Gesichtspunkt der Standardabweichung ist die Vollständigkeit und Genauigkeit in den bereits angesprochenen Problembereichen von Interesse. Deshalb werden diese Problembereiche noch einmal speziell untersucht. Dabei soll neben der absoluten Höhengenaugkeit der Bereiche auch die Struktur der Bereiche untersucht werden. Dies bedeutet, dass untersucht wird inwieweit beispielsweise ein Damm nach der Filterung noch als Damm erkennbar ist.

Aufgrund der gleichen Problematik bei der Untersuchung aller bereits bestehenden Höhenmodelle werden die Ergebnisse der Differenzmodellbildung gemeinsam im ersten Abschnitt – Abschnitt 6.3.1 – aufgezeigt und untersucht. Die neu generierten Höhenmodelle werden in den drei folgenden Unterabschnitten getrennt voneinander betrachtet, da die Problematik bei den einzelnen Höhenmodellen teilweise differenziert betrachtet werden muss. In den Abschnitten 6.3.5 und 6.3.6 erfolgt dann die statistische Untersuchung aller erstellten Differenzmodelle.

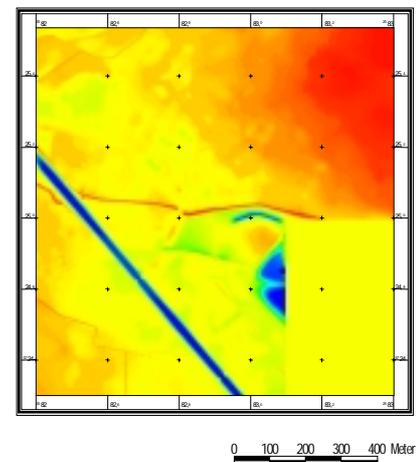
Für die Untersuchung wurden die Höhenwerte des Referenzmodells vom jeweiligen Höhenmodell abgezogen. Für die Bildung der Differenzmodelle gilt:

$$\text{Differenzmodell} = \text{Höhenmodell} - \text{Referenzmodell}$$

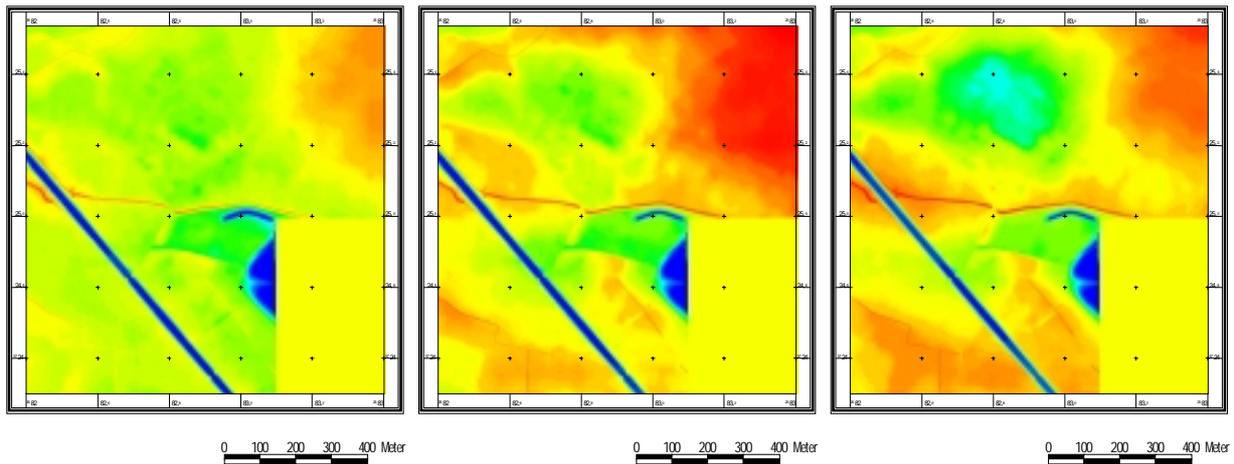
Die für die Darstellung benutzte Farbtabelle ist im Anhang 2 dargestellt. An dieser Stelle sei nur erwähnt, dass die gelblichen Bereiche die minimalen Abweichungen darstellen. Blaue Bereiche stellen eine stark negative Abweichung dar und die roten Bereiche eine stark positive Abweichung.

6.3.1 Differenzmodelle der bestehenden Höhenmodelle

Wie bereits angesprochen ist die Problematik bei allen bereits bestehenden Höhenmodellen eine Ähnliche. Aufgrund ihrer Punktdichte können diese Höhenmodelle nicht den Informationsgehalt eines mit einer Auflösung von einem Meter generierten Höhenmodells enthalten. So ist auch die Tatsache zu erklären, dass in allen Höhenmodellen die Strukturen des Eisenbahndammes, der Bumerang-Erhebung, der anderen Erhebung im rechten unteren Bereich und die des Flusses in der Mitte des Gebietes nicht vorhanden sind. Demzufolge werden diese Stellen im jeweiligen Differenzmodell als fehlerhafte Stellen gekennzeichnet. Mit diesen Ungenauigkeiten muss bei Höhenmodellen mit einer Auflösung von etwa 25 m gerechnet werden. Bei dem Höhenmodell DGM5, welches eine Rasterweite von 10 m besitzt, ist das doch recht schlechte Ergebnis etwas überraschend (vgl. Abbildung 6.7). In diesem Differenzmodell treten ebenso wie bei den Modellen mit größeren Rasterweiten die gleichen Höhenfehler in den angesprochenen Bereichen auf. Ein weiterer Punkt fällt bei der Betrachtung dieses Differenzmodells besonders auf. Der gesamte rechte obere Bereich weist eine stark positive Abweichung in der Größe von etwa vier Metern auf. Diese Abweichung ist in ähnlich ausgeprägter Form auch in dem Differenzmodell des DHM/M745 und dem des MONA Pro Höhenmodells vorhanden (vgl. Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10). Die Gründe für diese Differenz können beispielsweise bei den in dem Untersuchungsgebiet auftretenden Bodensenkungen durch den Bergbau liegen. Bei den Höhenmodellen DGM25, DHM/M745 und MONA Pro liegt diese großflächige Abweichung nach den jeweiligen angegebenen Spezifikationen allerdings noch im Bereich der angegebenen Genauigkeiten. Bei dem DGM5, welches nach den Spezifikationen eine Höhengenaugigkeit von 0,5 m aufweisen soll, ist diese Abweichung von mehreren Metern deutlich außerhalb der zulässigen Höhengenaugigkeit.



**Abbildung 6.7: Differenzmodell
DGM5**



**Abbildung 6.8: Differenzmodell
DGM25**

**Abbildung 6.9: Differenzmodell
DHM/M745**

**Abbildung 6.10: Differenzmodell
Mona Pro**

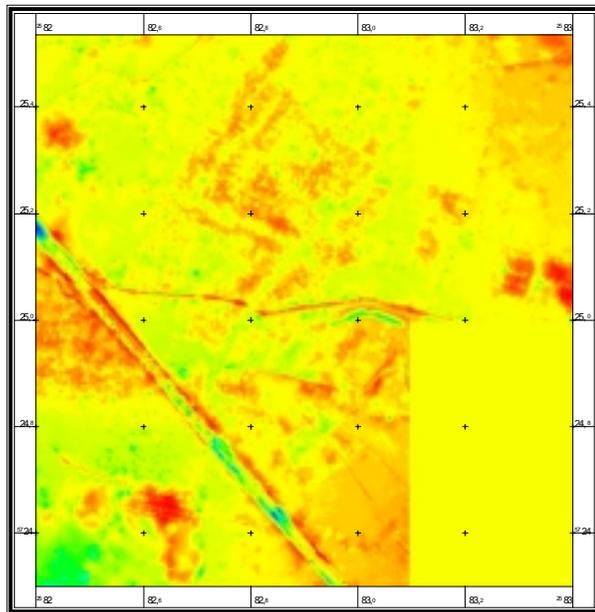
Das in Abbildung 6.8 dargestellte Differenzmodell des DGM25 weist von den untersuchten bestehenden Höhenmodellen die geringsten Abweichungen zum Referenzmodell auf. Das DGM25 Höhenmodell (vgl. Abbildung 5.2 auf Seite 46) ist auch das einzige der untersuchten bestehenden Höhenmodelle, welches die Struktur des Eisenbahndammes in Ansätzen enthält.

Generell liegen die Einsatzgebiete dieser Höhenmodelle in wesentlich kleinmaßstäbigeren Bereichen. Bei einer Rasterweite von 25 m oder 75 m kann nicht erwartet werden, dass Strukturen mit einer Ausdehnung von nur wenigen Metern in diesen Höhenmodellen enthalten sind.

6.3.2 LISA-Differenzmodelle

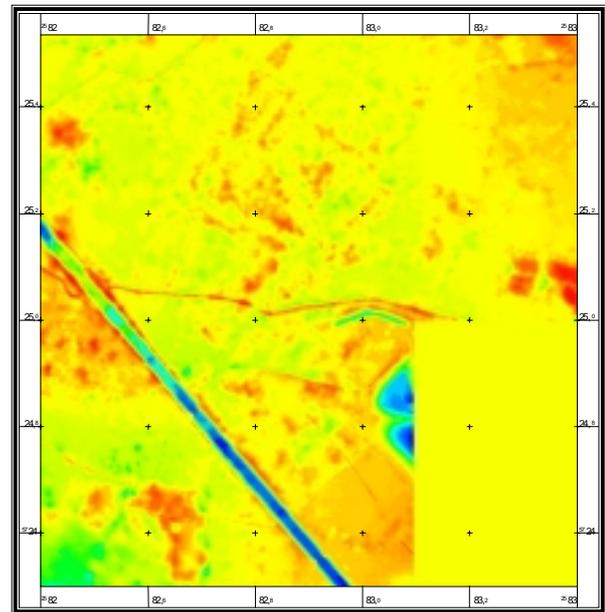
Die beiden Differenzmodelle (vgl. Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12), welche auf der Grundlage der beiden LISA-Höhenmodelle erzeugt wurden, weisen die bereits vermuteten Ungenauigkeiten auf. Die Strukturen der Gebäude sind in beiden Differenzmodellen als fehlerhafte Bereiche gekennzeichnet. Die Unterschiede der beiden eingesetzten Filterungsmethoden kommen bei diesen Differenzmodellen nicht so deutlich zum Vorschein. Die Unterschiede liegen bei diesen beiden Modellen nur im Bereich des Eisenbahndammes und im Bereich der Erhebung im rechten unteren Bereich. Das Differenzmodell des LISA-RASCOR-Höhenmodells weist in diesen Bereichen negative Abweichungen auf. Das bedeutet, dass die Bereiche in dem zugrundeliegenden Höhenmodell eliminiert wurden. Im anderen Differenzmodell fallen diese Bereiche nicht aus der sonstigen Struktur des Modells

heraus, was wiederum auf die manuellen Eingriffe während der Filterung mit dem Phoenix-Verfahren zurückzuführen ist.



0 100 200 300 400 Meter

Abbildung 6.11: Differenzmodell LISA-Phoenix-Höhenmodell



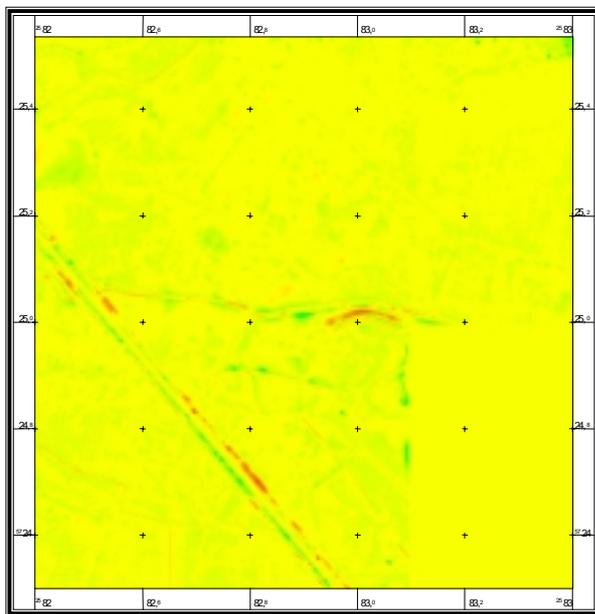
0 100 200 300 400 Meter

Abbildung 6.12: Differenzmodell LISA-RASCOR-Höhenmodell

6.3.3 OrthoMAX Differenzmodelle

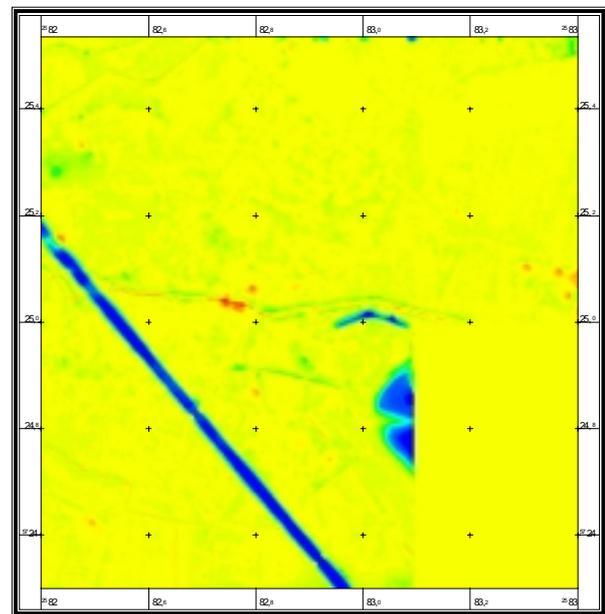
Bei dem Differenzmodell zwischen dem Höhenmodell, welches mit dem Programm OrthoMAX generiert und mit dem Phoenix-Verfahren gefiltert wurde, treten keine signifikanten Abweichungen auf (vgl. Abbildung 6.13). Der Großteil der Punkte hat eine Abweichung zwischen $-0,25$ m und $+0,25$ m zum Referenzmodell. Die einzige Stelle, welche etwas aus dem Rahmen fällt, ist die Bumerang-Erhebung. Diese ist im OrthoMAX-Phoenix-Höhenmodell höher dargestellt als sie in Wirklichkeit ist. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass diese Erhebung vollkommen mit Vegetation bedeckt ist. Dadurch handelt es sich bei den bei der Oberflächengenerierung bestimmten Punkte nicht um Bodenpunkte, sondern um Punkte, welche auf der Vegetation liegen. Somit ist dieser Bereich bereits im Oberflächenmodell zu hoch berechnet worden. Bei der Filterung wurden diese Bereiche direkt übernommen und so kommt die Abweichung von etwa zwei Metern zustande. Entlang des Eisenbahndammes treten ebenfalls noch Abweichungen in der Größenordnung bis zu zwei Metern auf. Diese sind im Höhenmodell aus den gleichen Gründen wie bei der Bumerang-

Erhebung noch vorhanden. Es handelt sich hier um Vegetation, welche entlang des Eisenbahndammes vorhanden ist.



0 100 200 300 400 Meter

Abbildung 6.13: Differenzmodell OrthoMAX-Phoenix-Höhenmodell



0 100 200 300 400 Meter

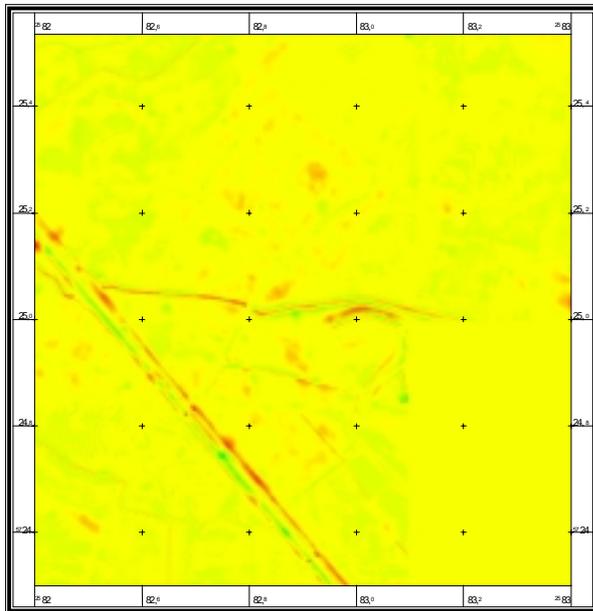
Abbildung 6.14: Differenzmodell OrthoMAX-RASCOR-Höhenmodell

Das in Abbildung 6.14 dargestellte Differenzmodell wurde mit dem Programm RASCOR gefiltert. Bis auf die drei Problembereiche – Eisenbahndamm, Bumerang-Erhebung und Erhebung im rechten unteren Bereich – wurde das Höhenmodell korrekt erzeugt. Diese Bereiche werden, aufgrund ihrer Struktur, vom Programm RASCOR als zu eliminierende Strukturen gewertet und dementsprechend eliminiert. Die Abweichungen der übrigen Bereiche liegen bei diesem Modell in der gleichen Größenordnung – Abweichungen von $-0,25$ m bis $0,25$ m – wie beim Differenzmodell des OrthoMAX-Phoenix-Höhenmodells.

6.3.4 Softplotter Differenzmodelle

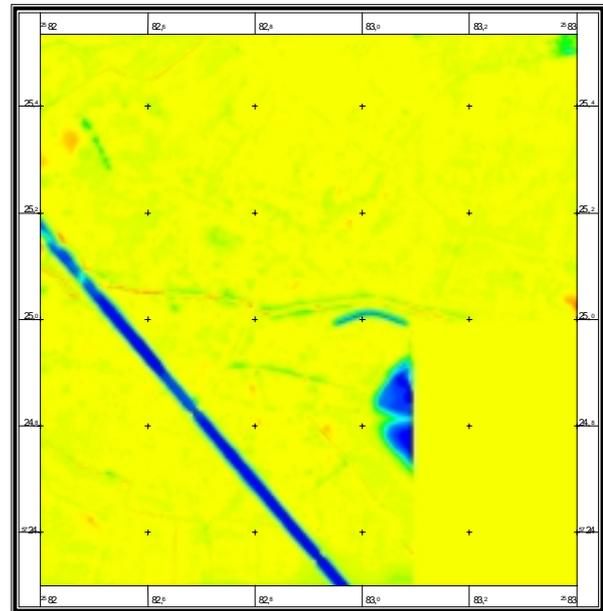
Die in Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16 dargestellten Differenzmodelle weisen, wie bereits das entsprechende Oberflächenmodell, die gleiche Struktur der OrthoMAX-Modelle auf. Für die beiden Differenzmodelle gilt somit das Gleiche, was in Abschnitt 6.3.3 bei den Differenzmodellen der beiden OrthoMAX-Höhenmodelle festgestellt wurde. Bei dem Differenzmodell des Softplotter-Phoenix-Höhenmodells sind die Abweichungen minimal größer als bei dem Differenzmodell des OrthoMAX-Phoenix-Höhenmodells. Die

Unterschiede in den Abweichungen dieser beiden Differenzmodelle kommen durch die manuellen Eingriffe während der Filterung mit dem Phoenics-Verfahren zustande. Allerdings sind die Unterschiede nur minimal, sodass sie als nicht signifikant gewertet werden müssen.



0 100 200 300 400 Meter

**Abbildung 6.15: Differenzmodell Softplotter-
Phoenics-Höhenmodell**



0 100 200 300 400 Meter

**Abbildung 6.16: Differenzmodell Softplotter-
RASCOR-Höhenmodell**

6.3.5 Statistische Analyse des Gesamtgebietes

Die Höhen des Referenzmodells werden hier als Sollwerte betrachtet und die Werte der Höhenmodelle als Istwerte. Die Abweichungen beziehen sich nur auf den Bereich des Untersuchungsgebietes. Sie sind in dieser Form nicht auf andere Bereiche zu übertragen und können bei den bestehenden Höhenmodellen auch nicht als Genauigkeiten für das gesamte Modell angesetzt werden. Die bereits bestehenden Höhenmodelle wurden in dieser Untersuchung auf eine Pixelgröße von einem Meter interpoliert. Auf diese interpolierten Höhenmodelle beziehen sich auch die statistischen Angaben zu den jeweiligen Modellen. Diese statistischen Angaben zu den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Höhenmodellen werden in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Höhenmodell	Maximale negative Abweichung	Maximale positive Abweichung	Mittlere Abweichung	Stdabw. der Abweichungen.
	Δh_{\min} [m]	Δh_{\max} [m]	h_{mittel} [m]	s_{mw} [m]
DGM5	-9,92	4,69	0,82	2,01
DGM25	-11,14	3,99	-0,77	1,77
DHM M745	-10,88	5,48	0,45	2,24
MONA Pro	-10,37	5,16	0,01	1,95
LISA (RAS)	-7,23	6,78	0,23	1,17
LISA (Pho)	-10,36	7,79	0,43	1,06
OrthoMAX (RAS)	-9,44	5,62	-0,29	1,18
OrthoMAX (Pho)	-3,65	5,36	-0,03	0,29
Softplotter (RAS)	-11,38	3,11	-0,26	1,18
Softplotter (Pho)	-3,27	5,31	0,08	0,36

Tabelle 6.4: Statistische Untersuchung der Höhenmodelle

Die jeweiligen maximalen Abweichungen sind für die Höhenmodelle nicht aussagekräftig. Anhand dieser Extremwerte kann nicht unterschieden werden, ob es sich bei diesen Werten um einzelne Pixel handelt, welche als grobe Ausreißer auftreten, oder ob es ganze Bereiche gibt, in welchen diese Abweichungen auftreten. Die mittlere Abweichung ist ein Wert, anhand dem eventuell auftretende systematische Fehler im Höhenmodell erkannt werden können. Diese treten bei den in dieser Arbeit untersuchten Höhenmodellen nicht auf. Allerdings entsteht bei der Betrachtung der mittleren Abweichung das Problem, dass sich teilweise die positiven und negativen Abweichungen eliminieren und so beispielsweise für das Höhenmodell MONA Pro eine mittlere Abweichung von 0,01 m auftritt. Dies bedeutet nicht, dass das Höhenmodell MONA Pro von den untersuchenden Höhenmodellen das genaueste ist. Es gleichen sich nur zufällig die positiven und die negativen Abweichungen aus, sodass diese optimale mittlere Abweichung zustande kommt. Für eine Bewertung der Höhenmodelle muss die Standardabweichung der Höhenabweichung herangezogen werden (vgl. letzte Spalte in Tabelle 6.4). Dieser Wert gibt einen Überblick über die Streuung der Abweichungen.

Durch die Betrachtung der Standardabweichungen können die Höhenmodelle grob in drei Gruppen eingeteilt werden (vgl. Tabelle 6.5). Dies sind die bereits bestehenden Höhenmodelle (Gruppe 1), die neu generierten Höhenmodelle, welche mit dem Programm RASCOR reduziert wurden (Gruppe 2) und die neu generierten Höhenmodelle, welche mit dem Phoenix-Verfahren reduziert wurden (Gruppe 3). Das LISA-Phoenix-Höhenmodell

muss allerdings, von der Standardabweichung her, der Gruppe 2 – der mit dem Programm RASCOR generierten Höhenmodelle – zugeordnet werden. Dies liegt an der Tatsache, dass das LISA-Oberflächenmodell bereits einen relativ hohen Rauschanteil besitzt. Dadurch funktioniert das Phoenix-Verfahren nicht so gut und liefert keine so guten Ergebnisse.

Gruppen	Höhenmodelle	Mittlere Standardabweichung der Abweichungen s_{mittel} [m]
Gruppe 1	DGM5 DGM25 DHM M745 Mona Pro	1,99
Gruppe 2	LISA (Ras) LISA (Pho) OrthoMAX (Ras) Softplotter (Pho)	1,15
Gruppe 3	OrthoMAX (Pho) Softplotter (Pho)	0,33

Tabelle 6.5: Einteilung der Höhenmodelle in Gruppen nach der Standardabweichung der Abweichungen

Die Abkürzungen Ras und Pho stehen für die eingesetzten Filtermethoden zur Höhenmodellgenerierung. Die Abkürzung Ras steht für den Einsatz des Programms RASCOR und die Abkürzung Pho für den Einsatz des Phoenix-Verfahrens.

In Abbildung 6.17 wird die prozentuale Verteilung der Beträge der Abweichungen aller untersuchten Höhenmodelle dargestellt. Die der Abbildung zugrundeliegende Tabelle ist Anhang 3 aufgeführt. Dabei werden positive Abweichungen in der gleichen Form bewertet wie negative Abweichungen. Anhand der Abbildung lassen sich die unterschiedlichen Modelle deutlich in Gruppen einteilen. Zunächst können die vier bestehenden Höhenmodelle zusammengefasst werden. Bei diesen Modellen sind die Abweichungen der Höhenmodelle vom Referenzmodell gleichmäßig über das abgebildete Spektrum verteilt. Die Abweichungen größer als fünf Meter beruhen, ebenso wie bei dem mit dem Programm RASCOR erstellten Höhenmodellen, auf dem Fehlen des Eisenbahndammes. Bei den beiden LISA-Höhenmodellen sind die Abweichungen größer als fünf Meter nicht so ausgeprägt. Das liegt an der Tatsache, dass der Eisenbahndamm nur in Teilen fehlt. Bei den beiden Höhenmodellen

OrthoMAX-Phoenics und Softplotter-Phoenics liegt der Großteil der Punkte – fast 95 % – bei einer Abweichung deutlich unter einem Meter.

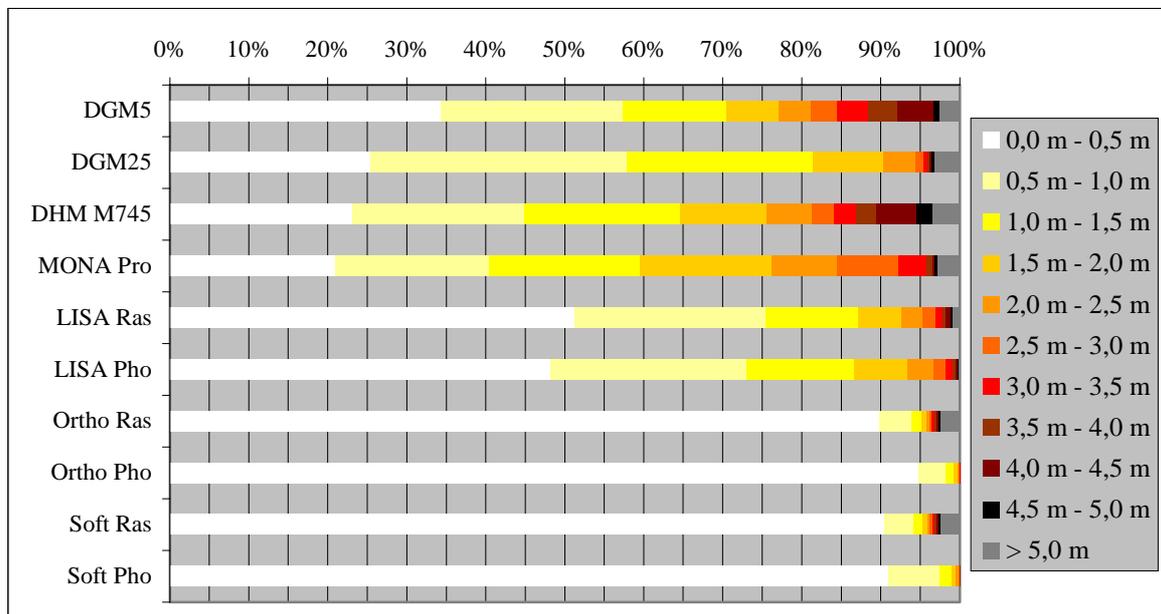


Abbildung 6.17: Prozentuale Verteilung der Abweichungen

Jede Höhenmodellgenerierung besitzt einen gewissen Fehleranteil. In dieser Untersuchung wurde dieser Fehleranteil auf 5 % gesetzt. Dies bedeutet, dass 5 % der Werte in der folgenden statistischen Untersuchung nicht berücksichtigt werden. Dabei werden entsprechend die extremen Ausreißer nicht mit einbezogen. Der Anteil von 5 % ist ein Standardwert, welcher sich in verschiedenen Quellen wiederfindet. Dieser Wert wird auch bei der Höhenmodellgenerierung der Firma Phoenics GmbH angesetzt. Das Ergebnis dieser statistischen Untersuchung der Höhenmodelle mit der Berücksichtigung des Fehleranteils von 5 % der Höhenwerte wird in der folgenden Tabelle (vgl. Tabelle 6.6) der von den jeweiligen Herstellern oder Verkäufern angegebenen Genauigkeit gegenübergestellt.

Höhenmodell	Maximale Abweichung $\Delta h_{\max 100\%}$ [m]	95 % Kriterium $\Delta h_{\max 95\%}$ [m]	Angegebene Genauigkeit Δh [m]
DGM5	9,9	4,3	0,5
DGM25	11,1	2,7	5
DHM M745	10,9	4,6	12 - 20
Mona Pro	10,4	3,3	3,5 - 5
LISA (Ras)	7,2	2,5	-
LISA (Pho)	10,4	2,2	-
OrthoMAX (Ras)	9,4	1,4	-
OrthoMAX (Pho)	5,4	0,6	0,3
Softplotter (Ras)	11,4	1,4	-
Softplotter (Pho)	5,3	0,7	0,3

Tabelle 6.6: Maximale Abweichungen der Höhenmodelle mit und ohne Berücksichtigung eines Fehleranteils von 5 % sowie der angegebenen Genauigkeit der jeweiligen Hersteller

Durch den Ausschluss von 5% der Punkte werden die extremen Abweichungen eliminiert. Dies sind in den meisten Fällen die Fehler, die im Bereich des Eisenbahndammes entstanden sind. Die bereits bestehenden Höhenmodelle des Untersuchungsgebietes erfüllen alle, bis auf das DGM5, die von den Herstellern angegebenen Genauigkeiten (vgl. 4.Spalte in Tabelle 6.6). Die angegebene Genauigkeit des DGM5 von 0,5 m wurde in dieser Untersuchung deutlich überschritten. Die Problematik mit dem DGM5 – Alter der Daten – wurde bereits angesprochen. Bei den neu generierten Höhenmodellen zeigt sich an dieser Stelle, dass die Genauigkeit der Höhenmodellgenerierung nicht allein von der Methode zur Oberflächengenerierung abhängt. Es kommt bei der Betrachtung der Ergebnisse deutlich zum Vorschein, dass sowohl die Oberflächengenerierung wie auch die gewählte Methode zur Filterung des Oberflächenmodells das jeweilige Ergebnis entscheidend beeinflussen. Da das Oberflächenmodell die Grundlage für die Filterung darstellt, ist dieser Arbeitsschritt allerdings der Entscheidendere. Wie bei den beiden LISA-Höhenmodellen zu sehen ist, kann auf der Grundlage eines verrauschten Oberflächenmodells mit keinem der beiden Filterungsverfahren ein gutes Ergebnis erzielt werden.

Bei den beiden Höhenmodellen – OrthoMAX-Phoenix und Softplotter-Phoenix – sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Fehler im Referenzmodell – durch die Interpolation des Referenzmodells – durchaus mehrere dm groß werden können. Somit ist es durchaus

möglich, dass die beiden hier untersuchten Modelle auch die angegebene Genauigkeit aufweisen. Jedoch konnte dies in dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden.

6.3.6 Statistische Analyse einzelner Gebiete mit spezieller Topographie

Bereiche mit spezieller Topographie sind Bereiche, in denen Bruchkanten, wie beispielsweise Brücken oder Dämme, vorhanden sind. Diese Bereiche stellen bei der Bearbeitung die Problembereiche dar, in welchen Fehler auftreten können. Aus diesem Grund werden diese Bereiche hier noch einmal gesondert untersucht. Es soll zum einen untersucht werden, inwieweit diese Bereiche noch vorhanden sind, oder ob sie komplett eliminiert wurden. Weiterhin soll, falls sie noch vorhanden sind, untersucht werden, inwieweit sie geglättet wurden. Die Ergebnisse der Untersuchung der Problembereiche sind in Tabelle 6.7 zusammengefasst.

Höhenmodell	Eisenbahndamm	Bumerang-Erhebung	Fluss	Erhebung im rechten unteren Bereich
LISA-Phoenix	mit Lücken - 1,5 m	mit Lücken - 1,5 m	mit Lücken + 2,0 m	vorhanden
LISA-RASCOR	mit Lücken - 6,0 m	eliminiert - 2,5 m	eliminiert + 2,5 m	geglättet - 1,0 m
OrthoMAX-Phoenix	vorhanden	+ 2,0 m	vorhanden	vorhanden
OrthoMAX-RASCOR	eliminiert - 7,5 m	eliminiert - 6,0 m	geglättet + 1,0 m	eliminiert - 6,5 m
Softplotter-Phoenix	vorhanden	+ 2,0 m	vorhanden	vorhanden
Softplotter-RASCOR	eliminiert - 7,5 m	eliminiert - 6,0 m	geglättet + 1,0 m	eliminiert - 6,5 m

Tabelle 6.7: Untersuchung der Problembereiche in den Höhenmodellen

Die Untersuchung der Problembereiche der beiden LISA-Höhenmodellen spiegelt die bereits angesprochene unruhige Struktur des zugrundeliegenden Oberflächenmodells wieder. Die Problembereiche in diesen beiden Höhenmodellen sind meist nicht ganz eliminiert worden,

sind aber auch nicht ganz erhalten geblieben. Sie weisen teilweise deutliche Unterbrechungen in der Struktur auf. Das OrthoMAX-RASCOR- und das Softplotter-RASCOR-Höhenmodell weisen in den Problembereichen die bereits in den Differenzmodellen deutlich zu erkennenden Mängel auf. Der Eisenbahndamm, die Bumerang-Erhebung und die Erhebung im rechten unteren Bereich wurden komplett eliminiert und so kommen auch die Abweichungen im Bereich von sechs bis sieben Metern zustande. Der Fluss wurde bei diesen beiden Höhenmodellen zwar nicht eliminiert. Allerdings wurde er doch deutlich ausgerundet, sodass es in diesem Bereich zu einer Abweichung von etwa einem Meter kommt. Das OrthoMAX-Phoenix- und das Softplotter-Phoenix-Höhenmodell weisen in drei der vier untersuchten Problembereiche nicht signifikante Abweichungen auf. Im Bereich der Bumerang-Erhebung liegen sie allerdings etwa zwei Meter zu hoch. Dies ist auf eine Abhängigkeit des Phoenix-Verfahrens zurück zu führen. Wie bereits erwähnt, werden bei dem Phoenix-Verfahren teilweise Bereiche von der Filterung ausgeschlossen, wie beispielsweise die Bumerang-Erhebung. Die Höhenwerte werden somit nahezu unverändert aus dem Oberflächenmodell übernommen. Da die Bumerang-Erhebung allerdings komplett mit Bäumen bedeckt ist, sind die im Oberflächenmodell enthaltenen Höhen nicht die Geländehöhen, sondern die Höhen der Baumspitzen und somit kommt es in diesem Bereich zu einer Abweichung von etwa zwei Metern. Allerdings kann die wahre Geländehöhe in diesem Fall nicht ohne Sekundärinformationen aus dem Oberflächenmodell bestimmt werden.

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die neu generierten Höhenmodelle, welche auf der Grundlage des OrthoMAX- und des Softplotter-Oberflächenmodells erzeugt wurden, in dieser Untersuchung den gewünschten Anforderungen entsprechen. Allerdings muss deutlich zwischen den beiden Filterungsverfahren unterschieden werden. Die Ergebnisse der Phoenix-Filterung sind deutlich besser als die der RASCOR-Filterung. Dies hängt allerdings nicht so sehr von den beiden Verfahren ab, sondern vielmehr an der Tatsache, dass bei dem Phoenix-Verfahren die Problembereiche von der Filterung ausgeschlossen werden.

Das Phoenix-Verfahren wird, da es sich um einen semi-automatischen Ansatz handelt, größtenteils vom Operateur gesteuert. Der RASCOR-Ansatz ist dagegen ein vollautomatisches Verfahren, welches vom Operateur außer der Auswahl des Datensatzes keine weitere Interaktion erfordert. Eventuell können die Ergebnisse der RASCOR Filterung durch die Variation der Berechnungsparameter noch verbessert werden, jedoch wurde an

dieser Stelle bewusst darauf verzichtet, um die Ergebnisse eines vollautomatischen Filterungsverfahrens zu überprüfen. Neben der Filterungsmethode ist die Oberflächenmodellgenerierung ein entscheidender Arbeitsschritt. Aus einem verrauschten Oberflächenmodell – wie beispielsweise dem LISA-Oberflächenmodell – lässt sich mit keinem der beiden Filterungsverfahren ein gutes Ergebnis erzielen.

Die bestehenden Höhenmodelle liefern – bis auf das DGM5 – gute Ergebnisse. Die angegebenen Genauigkeiten werden in diesem Untersuchungsgebiet eingehalten. Bei der Berücksichtigung eines Fehleranteils von fünf Prozent sogar deutlich unterschritten. Allerdings muss erwähnt werden, dass bei der Nicht-Berücksichtigung der fünf Prozent die Fehler im Bereich des Eisenbahndammes bei diesen Höhenmodellen nicht mit in die Bestimmung der Genauigkeit einfließen. Das DGM5 erfüllt in diesem Untersuchungsgebiet die angegebene Genauigkeit von 0,5 m bei weitem nicht. Anhand der Struktur der Abweichungen im zugehörigen Differenzmodell kann allerdings vermutet werden, dass das zur damaligen Zeit vorliegende Gelände nicht mehr mit dem heutigen Stand übereinstimmt. Die Ursache dafür kann eventuell bei den Bodensenkungen durch den Bergbau im Bereich des Untersuchungsgebietes liegen. Dies kann aber an dieser Stelle nicht weiter untersucht werden.

7 Analyse der Orthophotos und Orthophotomosaike

7.1 Allgemeines

Wie bereits bei der Erläuterung des Ablaufs der Orthophotogenerierung (vgl. Abschnitt 3.4) aufgeführt wurde, stellt die automatische Orthophotogenerierung kein Problem dar. Auch das automatische Mosaikieren der Orthophotos zu Orthophotomosaiken kann vollautomatisch durchgeführt werden. In diesem Abschnitt wird zum einen untersucht, inwieweit sich die Höhenfehler aus den eingesetzten Höhenmodellen in der Orthophotos wiederfinden (vgl. Abschnitt 7.2). Und zum anderen wird der Punkt der automatischen Mosaikierung der Orthophotos näher untersucht und auf die entstehende Problematik eingegangen (vgl. Abschnitt 7.3).

Für diese Untersuchung wurden auf der Grundlage aller in der vorliegenden Arbeit untersuchten Höhenmodelle die entsprechenden Orthophotos generiert und mosaikiert. Die Mosaikierung wurde sowohl über manuelle als auch über automatische Schnittkanten durchgeführt.

7.2 Lagefehler im Orthophoto durch Höhenfehler im Höhenmodell

Wie bereits angesprochen wirken sich die Höhenfehler in den Höhenmodellen als Lagefehler in den Orthophotos aus. Jedoch ist die Größenordnung der Lageverschiebung in den Orthophotos nicht nur von dem Höhenfehler im Höhenmodell abhängig. Es kommt auch auf die Position des Höhenfehlers in Bezug zum Projektionszentrum des jeweiligen Orthophotos an. In Abbildung 7.1 wird diese Thematik schematisch dargestellt. Die roten Linien stellen dabei die Höhenfehler des Höhenmodells dar. Die entsprechend aus den Höhenfehlern resultierenden Lagefehler im Orthophoto sind gekennzeichnet. Die Abbildung ist übertrieben dargestellt. Sie soll allerdings nur die Problematik der Position des Höhenfehlers in Bezug zum Projektionszentrum veranschaulichen.

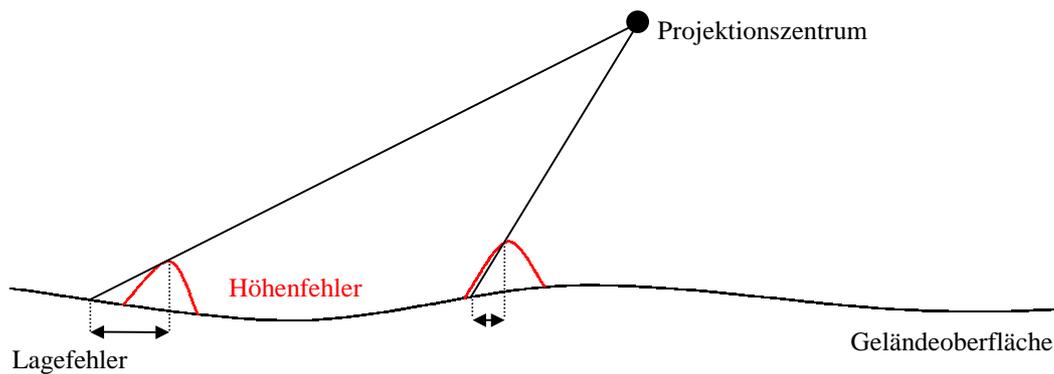


Abbildung 7.1: Zusammenhang zwischen Lagefehler und Position des Fehlers im Orthophoto in Bezug zum Projektionszentrum

In den weiteren Unterabschnitten werden anhand von Beispielen diese möglichen Lagefehler aufgezeigt.

7.2.1 Eisenbahndamm

Dieser Damm ist wegen seiner Größe und Ausdehnung von besonderem Interesse. Aufgrund seiner Struktur stellt er im Untersuchungsgebiet neben der Siedlung den wichtigsten Bereich dar. Wie bereits in Abschnitt 6.3 aufgeführt wurde, ist er in vielen der untersuchten Höhenmodelle nicht vorhanden. In Abbildung 7.2 ist ein Ausschnitt des LISA-RASCOR-Differenzmodells dargestellt. Der blaue Bereich in diesem Differenzmodell stellt den Höhenfehler des LISA-RASCOR-Höhenmodells dar, welcher durch das Fehlen des Dammes verursacht wurde. In diesem Bereich liegt das LISA-RASCOR-Höhenmodell etwa 5,50 m unterhalb des Referenzmodells. Anhand Abbildung 7.3 wird der Lagefehler im Orthophoto im Bereich des Eisenbahndammes, der durch den angesprochenen Höhenfehler verursacht wird, dargestellt. In dieser Abbildung wurden zwei Orthophotos entlang der rot markierten Schnittkante mosaikiert. Beide Orthophotos wurden aus dem gleichen Luftbild generiert, allerdings auf der Grundlage unterschiedlicher

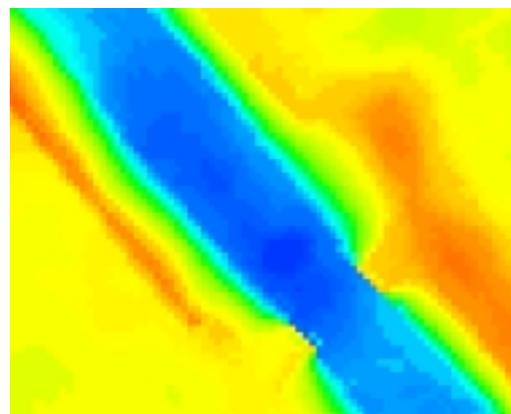


Abbildung 7.2: Ausschnitt des Differenzmodells LISA RASCOR

Höhenmodelle. Das eine wurde mittels des Referenzmodells erstellt – obere Hälfte des Mosaiks – und das andere auf der Grundlage des LISA-RASCOR-Höhenmodells. An der Stelle des LISA-RASCOR-Höhenmodells hätte auch jedes andere Höhenmodell genutzt werden können, in dem die Struktur des Eisenbahndammes eliminiert wurde oder überhaupt nicht vorhanden war. Der Höhenfehler von etwa 5,5 m im Höhenmodell hat bei dieser Konstellation einen Lagefehler von etwa zwei Metern verursacht. Die abgebildete Strasse – parallel zum Eisenbahndamm – weist dagegen keine Lagefehler auf. In diesen Bereichen treten im zugrundeliegenden Höhenmodell keine großen Differenzen zum Referenzmodell auf. Dieser Bereich ist im Differenzmodell gelb dargestellt und weist daher nur Abweichungen im Bereich bis zu 0,25 m auf (vgl. Abbildung 7.2).

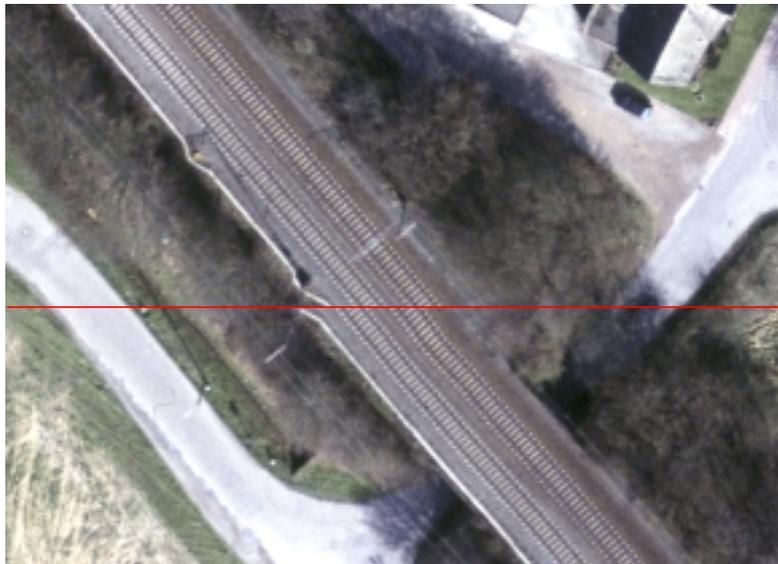


Abbildung 7.3: Lagefehler im Bereich des Eisenbahndammes durch Höhenfehler

Der abgebildete Lagefehler ist – wie bereits erwähnt – prinzipiell in allen Orthophotos vorhanden, welche auf der Grundlage von Höhenmodellen erstellt wurden, welche die Struktur des Eisenbahndammes nicht enthalten. Die Größenordnung und Richtung des Lagefehlers ist dabei jedoch wiederum abhängig von der Betrachtung. Also je nachdem welches Orthophoto für diesen Bereich genutzt wird und wie weit das Projektionszentrum von dem jeweiligen Bereich des Dammes entfernt ist und in welcher Richtung das Projektionszentrum liegt. In Abbildung 7.4 wird ein solches Beispiel dargestellt. Dort wurden zwei Orthophotos mosaikiert, welche auf dem gleichen Höhenmodell basieren. In dem zugrundeliegenden Höhenmodell – das LISA-RASCOR-Höhenmodell – ist der Eisenbahndamm nicht enthalten. Das Projektionszentrum des Orthophotos in der oberen Hälfte der Abbildung liegt vom Eisenbahndamm aus gesehen rechts oben, das der unteren

Hälfte links unten. Bei der Mosaikierung dieser beiden Orthophotos tritt folgendes Problem auf. Es ist zu klären, welche der beiden abgebildeten Positionen des Eisenbahndammes die wahre Position darstellt. Die Lagedifferenz des Dammes in diesen beiden Orthophotos beträgt an dieser Stelle etwa 3,5 m. Ohne weitere Informationen, wie beispielsweise Passpunkte, kann die Frage nach der wahren Position des Eisenbahndammes nicht geklärt werden.



Abbildung 7.4: Unterschiedliche Lagefehler in verschiedenen Orthophotos

In manchen Höhenmodellen, speziell den auf dem LISA-Oberflächenmodell basierenden, ist die Struktur des Eisenbahndammes nur in Teilen enthalten, weist also markante Unterbrechungen auf. Die Lageverschiebungen treten somit nicht konstant auf und es kommt zu einem unruhigen Verlauf des Dammes (vgl. Abbildung 7.5). Dieses Problem entsteht allerdings nur, wenn der Damm im Höhenmodell teilweise vorhanden ist und teilweise eliminiert wurde. Im Fall der LISA-Höhenmodelle ist die Struktur nicht erst durch die Filterung unterbrochen worden. Die Unregelmäßigkeiten sind bereits im LISA-Oberflächenmodell vorhanden.



Abbildung 7.5: „Krumme“ Gleise durch unterbrochene Struktur im Höhenmodell

7.2.2 Siedlung

Das Siedlungsgebiet stellt für die meisten Einsatzgebiete von Höhenmodellen und Orthophotos den Hauptteil dar. So muss besonders darauf geachtet werden, dass in diesen Bereichen keine Fehler auftreten. Für den Bereich der Funknetzplanung sind fast nur Siedlungsflächen von Interesse, da nur für diese Gebiete die gewünschten Pläne benötigt werden.

In Abbildung 7.6 und Abbildung 7.7 wird anhand eines Beispiels eine mögliche Lageverschiebung aufgezeigt. In den beiden Abbildungen sind zusätzlich zu den Orthophotos die digitalisierten Vektoren abgebildet. In diesem Bereich weist das DGM5 Höhenmodell eine Höhenabweichung von etwa zwei Metern gegenüber dem Referenzmodell auf. Die daraus resultierende Lageverschiebung innerhalb des DGM5-Orthophotos beträgt an dieser Stelle etwa einen Meter. Dabei kommt es aber auch darauf an, welches Orthophoto für die Digitalisierung genutzt wird. Wenn ein Orthophoto genutzt wird, in welchem das Projektionszentrum nicht weit von der zu digitalisierenden Stelle entfernt ist, tritt dieser Fehler nicht so stark auf, als wenn das Projektionszentrum weiter entfernt liegt. Das hier gewählte Beispiel liegt relativ weit am Rand eines Orthophotos, sodass die resultierende Lageverschiebung auch relativ groß ist.



**Abbildung 7.6: Ausschnitt eines DGM5
Orthophotos mit Vektoren**



**Abbildung 7.7: Ausschnitt eines Referenz-
Orthophotos mit Vektoren**

Generell ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass der Bereich der Siedlung in allen Höhenmodellen nur geringe Abweichungen aufweist und in den generierten Orthophotos im Bereich der Siedlung deshalb nur selten signifikante Lagefehler auftreten.

7.3 Problematik der Schnittkanten

Auch das Mosaikieren der Orthophotos kann – wie bereits erwähnt – vollautomatisch durchgeführt werden. Jedoch treten bei einem automatischen Setzen der Schnittkanten zwischen zwei Orthophotos häufig markante Übergänge auf, welche aufgrund radiometrischer Unterschiede zwischen den beiden Orthophotos oder durch die Struktur des Gebietes im Bereich der Schnittkante zustande kommen. Aus diesen Gründen werden die Schnittkanten meistens manuell gesetzt. Dabei legt der Operateur die Schnittkanten entlang von topologischen Linien oder Kanten, wie beispielsweise entlang von Straßen, sodass optisch keine „harten“ Übergänge zwischen den beiden Orthophotos entstehen. Dadurch werden die radiometrischen Unterschiede zwischen zwei benachbarten Orthophotos zwar nicht eliminiert, aber sie stören den Eindruck nicht mehr in dieser Form. In Abbildung 7.8 wird ein Haus dargestellt, welches durch die Schnittkante zum „Einstürzen“ gebracht wird. Geometrisch liegt in dieser Abbildung kein Fehler vor. Es ist mehr ein optischer Aspekt. Durch ein „geschicktes“ Setzen der Schnittkanten, beispielsweise entlang von Straßenzügen, entsteht ein homogenes Orthophotomosaik, in dem die Übergänge zwischen den einzelnen Orthophotos nicht mehr zu erkennen sind. Dies erleichtert die Arbeit beim 2D-Digitalisieren oder anderen Analysen, die auf der Grundlage der Orthophotomosaik durchgeführt werden.



Abbildung 7.8: „Einstürzendes“ Haus durch Schnittkante

7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in den Orthophotos entstehenden Lagefehler, welche auf den Höhenfehlern in den zugrundeliegenden Höhenmodellen basieren, hängen nicht nur von der Größenordnung des Höhenfehlers ab. Entscheidende Faktoren sind weiterhin die Entfernung der Position des Höhenfehlers vom Projektionszentrum des Orthophotos und weiterhin die Neigung des Geländes an dieser Stelle.

Die in dieser Arbeit erzeugten Orthophotos weisen im Bereich der Siedlung kaum signifikante Lagefehler auf. Dies liegt an der Tatsache, dass die zugrundeliegenden Höhenmodelle im Bereich der Siedlung keine oder kaum markante Höhenfehler aufzeigen. Im Bereich des Eisenbahndammes kommt es dagegen bei den verschiedenen Höhenmodellen zu deutlichen Lageverschiebungen in der Größenordnung von zwei bis drei Metern. Die Höhenfehler in den Höhenmodellen liegen in diesem Bereich allerdings auch bei fünf bis sechs Meter.

In den Orthophotos, die mit dem OrthoMAX-Phoenix-Höhenmodell und dem Softplotter-Phoenix-Höhenmodell erstellt wurden, treten keine sichtbaren Lageverschiebungen gegenüber den Orthophotos, welche mit dem Referenzmodell erzeugt wurden, auf. Dies belegt das Ergebnis der Analyse der Höhenmodelle. Diese beiden angesprochenen Höhenmodelle liefern in dieser Untersuchung in allen Bereichen optimale Ergebnisse.

8 Vergleich und Bewertung der Ergebnisse

8.1 Allgemeines

Der Vergleich der erzielten Ergebnisse muss differenziert betrachtet werden. So können die Ergebnisse nicht ohne weiteres miteinander in Beziehung gesetzt werden, da die einzelnen zugrundeliegenden Höhenmodelle teilweise nicht für den Einsatz im Bereich der Orthophotogenerierung gedacht sind. Sie weisen auch nicht die benötigte Punktdichte auf. Es ist allerdings möglich, dass auch diese Höhenmodelle in Bereichen mit nicht so großen Höhendifferenzen zu ausreichenden Ergebnissen führen. Bei Projekten, in denen die Genauigkeitsansprüche nicht so hoch angesetzt werden, liefern auch die in dieser Arbeit untersuchten bereits bestehenden Höhenmodelle zufriedenstellende Ergebnisse.

In der vorliegenden Arbeit stehen zwei Faktoren im Mittelpunkt der Untersuchung. Zum einen der Bereich der Höhenmodellgenerierung und zum anderen der Bereich der Erstellung von Orthophotomosaiken. Im Bereich der Höhenmodellgenerierung wurden die beiden Arbeitsschritte – Oberflächenmodellgenerierung und Filterung – näher untersucht. Bei der Orthophotomosaikierung stand die Untersuchung der durch die Höhenfehler in den zugrundeliegenden Höhenmodellen verursachten Lagefehler im Orthophoto im Mittelpunkt.

8.2 Bestehende Höhenmodelle

Bei den bestehenden Höhenmodelle (DGM5, DGM25, DHM/M745 und MONA-Pro) kann zusammenfassend gesagt werden, dass sie als Datengrundlage für den Einsatz in diesem Maßstabbereich (1:3500) nicht geeignet sind. Eine Rasterweite von 25 m und größer enthält einfach nicht die Informationen, welche im Bereich der Flächenversieglungskartierung oder Funknetzplanung benötigt werden. Diese Höhenmodelle haben ihren Anwendungsbereich in kleinmaßstäbigeren Bereichen. Besonders zu erwähnen ist hier das DGM5 vom Landesvermessungsamt NRW. Mit einer Rasterweite von 10 m hätte es eventuell noch für diesen Anwendungsbereich von Nutzen sein können, jedoch ist die Quelle der zugrundeliegenden Daten fraglich, da die Struktur des DGM5 wesentlich weniger Informationen preisgibt als beispielsweise die Struktur des DGM25 des Landesvermessungsamtes NRW. Eventuell ist aber auch die Datengrundlage dieses Modells

zu alt, und durch die Einflüsse der Bergsenkungen in dem Bereich von Oer-Erkenschwick gibt das DGM5 derzeit nicht mehr die wahre Geländeoberfläche wieder.

Als Datengrundlage für den Einsatz im Bereich der Orthophotogenerierung sind die bestehenden Höhenmodelle nur bedingt geeignet. Es kann, wie große Teile des Untersuchungsgebietes zeigen, zu guten Ergebnissen kommen. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit von Fehlern durch die ungenauen Höhenwerte innerhalb der Modelle recht groß. Dies sieht man beispielsweise in Abbildung 7.3. Das Orthophoto wurde auf der Grundlage eines Höhenmodells erzeugt, in welchem die Struktur des Eisenbahndammes nicht enthalten ist.

8.3 Generierte Höhenmodelle

8.3.1 Oberflächenmodellgenerierung

Die in dieser Untersuchung neu generierten Oberflächenmodelle müssen in zwei Gruppen geteilt werden. Diese Einteilung beruht auf den zugrundeliegenden Programmen. Die Oberflächenmodelle, die mit den beiden Programmen Softplotter und OrthoMAX erstellt wurden, zeigen die gewünschte Struktur. In ihnen sind die Gebäude und sonstige Erhebungen klar vom Gelände abgesetzt. Sie bieten somit eine gute Datengrundlage für die Filterung der Oberflächenmodelle zu Höhenmodellen. Das mit dem Programm LISA generierte Oberflächenmodell beinhaltet wesentlich mehr Rauschen als die anderen beiden Oberflächenmodelle. In diesem Oberflächenmodell kommt die Struktur des Gebietes nicht so deutlich zum Vorschein. So werden Gebäude beispielsweise nicht als „Blöcke“ dargestellt, sondern haben in diesem Höhenmodell mehr die Struktur von Hügeln. Die Höhendifferenzen, die beim Übergang vom Gelände zum Gebäude auftreten, sind in dem LISA-Oberflächenmodell nicht so groß, dass sie bei der Filterung als geeignetes Kriterium genutzt werden können. Da beide eingesetzten Filterungsmethoden allerdings prinzipiell an diesen Höhendifferenzen benachbarter Punkte ansetzen, ist das schlechte Ergebnis der Filterung des LISA-Oberflächenmodells auch zu erklären.

Allerdings muss an dieser Stelle gesagt werden, dass sich das Programmpaket LISA in ständiger Entwicklung befindet. Die in dieser Arbeit eingesetzte Version des Moduls LISA-Foto stammt vom 01.11.2000. Das Programm wird ständig weiterentwickelt und zurzeit etwa vier mal pro Monat aktualisiert. So kann es sein, dass die in dieser Untersuchung aufgetretenen Probleme in den nächsten Versionen bereits nicht mehr existieren.

8.3.2 Filterung mit dem Phoenics-Verfahren

Die Filterung mit dem Phoenics-Verfahren brachte bei den Oberflächenmodellen, welche mit den beiden Programmen Softplotter und OrthoMAX generiert wurden, die erwarteten guten Ergebnisse. Das Ergebnis der Filterung des LISA-Oberflächenmodells ist nicht so gut. Dies liegt allerdings nicht an dem zugrundeliegenden Filterungsverfahren, sondern vielmehr an dem bereits angesprochenen Rauschen innerhalb des LISA-Oberflächenmodells.

Das Phoenics-Verfahren weist durch die Kontrollen nach jedem durchgeführten Iterationsdurchlauf und Vergleiche mit Passpunktinformation wie beispielsweise Kanaldeckeln eine hohe Zuverlässigkeit auf. Allerdings muss die Filterung von Oberflächenmodellen mit dem Phoenics-Verfahren von einem erfahrenen Operateur durchgeführt werden, da die manuellen Eingriffe zum Füllen der Lücken den wichtigsten Punkt bei diesem Verfahren darstellen. Dieser Arbeitsschritt ist auch der Grund für den hohen zeitlichen Aufwand.

Die Ergebnisse des Phoenics-Verfahrens sind in allen Bereichen zufriedenstellend. Die Gebäude und Vegetation werden korrekt eliminiert, und die Dämme und anderen lokalen Erhebungen bleiben im entstehenden Höhenmodell erhalten. Die in dieser Untersuchung berechnete Genauigkeit der Modelle ist unter dem Aspekt zu bewerten, dass in dem für die Berechnung zugrundeliegenden Referenzmodell bereits Fehler im Bereich mehrerer dm vorhanden sein können.

8.3.3 Filterung mit dem Programm RASCOR

Die Ergebnisse der Filterung der Oberflächenmodelle mit dem Programm RASCOR zeigen bei den drei zu filternden Oberflächenmodellen ebenfalls die Unterschiede zwischen dem LISA-Oberflächenmodell und den anderen beiden Modellen auf. Wie bereits in Abschnitt 8.3.2 erwähnt, liegt der Grund dafür allerdings beim Rauschen innerhalb des LISA-Oberflächenmodells.

Das Programm RASCOR filtert die Oberflächenmodelle vollautomatisch, was einen enormen zeitlichen und manuellen Aufwand einspart, denn der Operateur ist nur am Anfang der Verarbeitung für die Einstellung der Berechnungsparameter zuständig. Diese werden bereits vom Programm vorgeschlagen und müssen nur übernommen werden. Somit muss auch nicht, wie bei der Filterung mit dem Phoenics-Verfahren, ein erfahrener Operateur diese Bearbeitung durchführen. Die automatisch vom Programm vorgegebenen Parameter brachten bereits gute Ergebnisse. Allerdings kann man mit den hier erzielten Ergebnissen nicht vollends zufrieden sein. Die Gebäude wurden zwar korrekt eliminiert, jedoch wurden im

gleichen Maße auch Erhebungen, wie beispielsweise der Eisenbahndamm oder andere lokale Erhebungen, geglättet.

Auch das Programm RASCOR befindet sich in ständiger Entwicklung. Die eingesetzte Version ist vom November 2000. Die Problematik der „Nicht-Berücksichtigung“ von Strukturen, wie beispielsweise des Eisenbahndammes ist bekannt, und die Lösung dieses Problems stellt zurzeit einen Schwerpunkt im Bereich der Weiterentwicklung des Programms dar.

8.4 Orthophotomosaik

Bei den Orthophotomosaiken treten in dieser Untersuchung in allen Gebieten keine allzu großen Abweichungen auf. Dies liegt allerdings mehr an der Tatsache, dass das Untersuchungsgebiet mit einer Luftbildkamera mit einer Kammerkonstanten von 30 cm aufgenommen wurde. Wenn beispielsweise Bilder einer Kamera mit einer Kammerkonstanten von 15 cm genutzt werden, sind die Lageverschiebungen entsprechend der flacheren Projektionswinkel größer. In den meisten Fällen werden die Lageverschiebungen durch die Bildung von Orthophotomosaiken minimiert, denn bei der Bildung dieser Mosaik werden die äußeren Bereiche der Orthophotos meist nicht genutzt. An diese Stelle treten die Informationen des benachbarten Orthophotos. Da an den äußeren Bereichen die Lageverschiebungen durch Höhenfehler am größten sind, werden diese meist eliminiert.

Allerdings kann dies nicht mit Gewissheit gesagt werden. Es kann auch dazu kommen, dass Lageverschiebungen im Meterbereich auftreten und dadurch die Orthophotomosaik als Datengrundlage für beispielsweise eine 2D-Digitalisierung unbrauchbar sind.

8.5 Zusammenfassung

Wenn die Höhenmodelle als solche eingesetzt werden sollen, liefern die hier untersuchten bestehenden Höhenmodelle keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Zumindest nicht, wenn die Höhengenaugigkeit unter einem Meter liegen soll. Wenn nur Höhengenaugigkeiten von mehreren Metern gefordert sind, liefern auch diese Modelle gute Ergebnisse. Bei einer geforderten Höhengenaugigkeit unter einem Meter, etwa im Bereich kleiner 50 cm, sollten neu generierte Höhenmodelle oder bestehende Höhenmodelle mit einer Rasterweite deutlich kleiner als der hier untersuchten genutzt werden. Wenn neu generierte Höhenmodelle zum Einsatz kommen, ist es auch entscheidend mit welchen Programmen sie erzeugt wurden. Die

beiden hier untersuchten Programme OrthoMAX und Softplotter liefern sehr gute Oberflächenmodelle, wohingegen das Oberflächenmodell, welches mit dem Programm LISA generiert wurde, für eine geforderte Höhengenaugkeit in diesem Bereich nicht geeignet ist.

Die Methode der Filterung ist hingegen auch sehr wichtig. So liefern beide hier untersuchten Verfahren innerhalb der Siedlungsfläche gute Ergebnisse. Bei der Bearbeitung von Bereichen mit Brücken, Dämmen oder anderen Erhebungen ist das Phoenix-Verfahren zu bevorzugen. Dieses liefert in allen Bereichen gute Ergebnisse, wohingegen das Programm RASCOR in Bereichen von Brücken und Dämmen große Probleme aufweist. Dies liegt an der Tatsache, dass bei dem Phoenix-Verfahren diese Bereiche von der Filterung ausgeschlossen werden und bei der hier benutzten Version des Programms RASCOR keine Gebiete von der Filterung ausgeschlossen werden können. Allerdings wurde in der Zwischenzeit das Programm RASCOR um die Option erweitert, dass bei der Filterung Bereiche ausgeschlossen werden können. Diese neue Version des Programms RASCOR konnte allerdings aus zeitlichen Gründen nicht mehr in diese Untersuchung mit einbezogen werden.

Die Orthophotogenerierung muss ebenfalls differenziert betrachtet werden. Wenn die Orthophotos nur als Übersichten dienen, reichen die hier untersuchten bestehenden Höhenmodelle als Grundlage vollends aus. Wenn die Orthophotos dagegen als Grundlage für eine 2D-Digitalisierung zum Einsatz kommen, sollten Orthophotos genutzt werden, welche auf der Grundlage von den hier untersuchten neu generierten Höhenmodellen entstanden sind. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kombination von den Programmen Softplotter und OrthoMAX mit der Filterung durch das Phoenix-Verfahren in dieser Untersuchung die besten Ergebnisse liefert. Die maximalen Abweichungen in den entstandenen Höhenmodellen liegen etwas über 50 cm, und in den erstellten Orthophotos sind keine Lageverschiebungen zu erkennen.

9 Vergleich der Kosten

9.1 Allgemeines

Neben der Analyse der Genauigkeit der jeweiligen Höhenmodelle ist für den operationellen Einsatz dieser Methoden auch der wirtschaftliche Aspekt von enormen Interesse. An dieser Stelle sollen zum einen die Anschaffungskosten der Daten sowie die Kosten, welche bei der Auswertung anfallen in Beziehung zu der erreichten Genauigkeit gesetzt werden. Die hier zugrundeliegenden Kosten gehen von der aktuellen Preislage und einer problemlosen Auswertung aus. Die Zahlen können je nach beauftragtem Unternehmen und Wirtschaftslage stark variieren und sind dabei ohne jegliche Gewährleistung zu verstehen. Die in dieser Arbeit aufgeführten Kosten für die einzelnen Arbeitsschritte – außer den Kosten für die bestehenden Höhenmodelle – wurden von der Firma Phoenics GmbH zusammengestellt.

Die Preise in den einzelnen Tabellen sind größtenteils pro Luftbild angegeben. In Abschnitt 9.5 werden die Kosten pro Luftbild auf km² umgerechnet (vgl. Tabelle 9.5) und anhand von Beispielen in der Tabelle 9.6 aufgeführt.

9.2 Kosten der Vorverarbeitungsschritte

In diesem Abschnitt wird auf die Kosten für die notwendigen Vorverarbeitungsschritte eingegangen. Eine Zusammenstellung dieser Kosten befindet sich in Tabelle 9.1. Dies sind die Preise für den Bildflug, die Bereitstellung von terrestrischen Passpunkten, das Scannen der analogen Luftbilder und die Triangulation der Bilder.

Arbeitsschritt	Preis pro Bild in DM
Bildflug	60.-
Passpunkte	25.-
Scannen	40.-
Aerotriangulation	60.-

Tabelle 9.1: Preise für Vorverarbeitungsschritte nach Phoenics GmbH (Stand: 24.11.2000)

Die in Tabelle 9.1 aufgeführten Preise wurden von der Firma Phoenics GmbH zusammengestellt. Sie gelten sowohl für den Maßstab 1:4000 als auch für den Maßstab 1:15000. Die angegebenen Preise sind ohne jegliche Gewähr anzusehen. Für eine spätere Generierung von Orthophotomosaiken ist es an dieser Stelle nicht entscheidend, mit welchem Höhenmodell die Orthophotomosaike erzeugt werden. Die Kosten für die angesprochenen Vorverarbeitungsschritte fallen generell bei der Orthophotoherstellung an und sind unabhängig von dem eingesetzten Höhenmodell.

9.3 Kosten der einzelnen Höhenmodelle

9.3.1 Bestehende Höhenmodelle

Die Kosten für die Beschaffung der Höhenmodelle beinhalten an dieser Stelle nur die Kosten für den Kauf der Daten. Eine eventuell durchzuführende Anpassung der Daten für eine Weiterverarbeitung ist in den Preisen für die Höhenmodelle in Tabelle 9.2 nicht berücksichtigt. In den meisten Fällen werden die Daten allerdings zu den aufgeführten Preisen abgegeben. Auf die besonderen Spezifikationen der Höhenmodelle wurde bereits in Abschnitt 5.2 eingegangen, sodass in diesem Abschnitt nur die Kosten aufgeführt werden. Die angegebenen Preise sind ohne jegliche Gewähr.

Höhenmodell	Preis pro Einheit
DGM5 (LVA NRW)	60.- DM / km ²
DGM25 (LVA NRW)	3.- DM / km ²
DHM/M745 (BKG)	3.- DM / km ²
Mona Pro	etwa 1.- DM / km ²

Tabelle 9.2: Preise für bestehende Höhenmodelle (Stand: 05.11.2000)

Es gibt beim Kauf der Höhenmodelle des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen diverse Ermäßigungen für beispielsweise Wiederverkäufer, Endverbraucher oder für den Einsatz in der Wissenschaft oder zur Aus- und Fortbildung. Die entsprechenden Ermäßigungen können bei großen Stückzahlen durchaus 50 % betragen. Die Daten des Höhenmodells DGM25 können nicht pro km² erworben werden. Es müssen stets die entsprechenden gesamten Blätter gekauft werden. Ein solches Blatt deckt eine Fläche von vier km² ab. Dies stellt auch die kleinste mögliche Abgabemenge der Daten dar. Die Kosten für

die Daten des DHM/M745 liegen bei den ersten 5 000 km² bei 3.- DM pro km², bis 25 000 km² bei 2.- DM pro km², bis 50 000 km² bei 1.- DM pro km² und für jeden weiteren km² bei 0,50 DM. Der Preis für das DHM/M745 liegt für den Bereich Gesamtdeutschlands bei etwa 223 500.- DM. Dazu kommen eventuell anfallende Kosten für die Aufbereitung der Daten in das gewünschte Format. Der Preis für den Ausschnitt des Höhenmodells MONA Pro ist ein fiktiver Preis. Die kleinste mögliche Abgabe der Daten erfolgt in Blöcken mit einer Ausdehnung von 0,5° x 0,5°. Bei diesen Blöcken liegen die Kosten bei etwa 2500.- DM. Der in Tabelle 9.2 angegebene Preis wurde zum besseren Vergleich aus diesem Preis pro Block berechnet. Auch bei dem MONA Pro Höhenmodell gibt es beim Kauf größerer Ausschnitte diverse Ermäßigungen. So kostet beispielsweise das Höhenmodell für die Gesamtfläche Deutschlands etwa 65 000.- DM. Dazu kommt jeweils noch der gültige Mehrwertsteuersatz und eventuell anfallende Kosten für die Aufbereitung der Daten in das gewünschte Format. Für genaue Preise und Ermäßigungen müssen die im Literaturverzeichnis angegebenen Bezugsquellen kontaktiert werden.

9.3.2 Generierte Höhenmodelle

In diesem Abschnitt können nur die Kosten für das Oberflächenmodell, welches mit dem Programm Softplotter generiert wurde und für das entsprechende Höhenmodell welches auf der Grundlage des Softplotter-Oberflächenmodells mit dem Phoenix-Verfahren gefiltert wurde, aufgeführt werden. Für die Ergebnisse des Einsatzes der Programme LISA Foto und RASCOR stehen bei dieser Untersuchung keine Kostenübersichten zur Verfügung.

Die in Tabelle 9.3 aufgeführten Kosten beziehen sich auf die Kombination „Softplotter-Phoenix-Verfahren“ und wurden von der Firma Phoenix GmbH zusammengestellt. Ein Oberflächenmodell (Softplotter) kostet somit 400,- DM pro Bild und ein Höhenmodell (Softplotter-Phoenix) kostet 600.- DM pro Bild.

Arbeitsschritt	Preis pro Luftbild in DM
Oberflächenmodell (Softplotter)	400.-
Filterung mit Phoenix-Verfahren	200.-
Höhenmodell (Softplotter-Phoenix-Verfahren)	600.-

Tabelle 9.3: Kosten der Oberflächen- und Höhenmodellgenerierung nach Phoenix GmbH

(Stand: 24.11.2000)

9.4 Kosten der Orthophotogenerierung (Orthophotomosaik)

Die Kosten für die reine Orthophotogenerierung sind für alle Modelle gleich anzusetzen, da der Arbeitsablauf bei allen Modellen der Gleiche ist. In manchen Fällen sind die Programme für die Oberflächenmodellgenerierung und die Orthophotogenerierung zwei verschiedene und werden getrennt nacheinander durchgeführt. Wenn die Auswertung dagegen in einem Komplettsystem durchgeführt wird, können Kosten für die Einrichtung des Blockes und Vorverarbeitungsschritte eingespart werden. Bei den Kombinationen der Programme OrthoMAX und OrthoBASE bzw. Softplotter und OrthoBASE können die eingerichteten Blöcke – die Vorverarbeitungsergebnisse – direkt übergeben werden, sodass bei diesen Kombinationen durch die Arbeit mit zwei verschiedenen Programmen keine zusätzlichen Kosten entstehen.

Die angegebenen Kosten (vgl. Tabelle 9.4) für die Orthophotogenerierung mit automatischen und mit manuellen Schnittkanten wurden von der Firma Phoenics GmbH zusammengestellt. Diese Kosten sind nicht davon abhängig, welches Höhenmodell als Grundlage für die Orthophotogenerierung genutzt wird.

Orthophotogenerierung mit OrthoBASE	Preis pro Bild (Orthophoto) in DM
automatische Schnittkante	50.-
manuelle Schnittkante	150.-

Tabelle 9.4: Kosten der Orthophotogenerierung

(Stand: 24.11.2000)

Die Preise für die beiden Verfahren unterscheiden sich doch recht deutlich, allerdings kann man den Nutzen des manuellen Setzens der Schnittkanten zwischen zwei Orthophotos anhand der Abbildung 7.8 auf Seite 84 nachvollziehen. Die Genauigkeit der Orthophotos bzw. des Orthophotomosaiks ist bei beiden Verfahren allerdings gleich anzusetzen.

9.5 Zusammenstellung der Kosten

In den bisher in diesem Abschnitt aufgeführten Tabellen sind die Kosten pro Luftbild aufgeführt. Um eine bessere Übersicht über die Kosten zu bekommen, werden diese in km² umgerechnet. Dabei wurden die beiden – im Bereich der Luftbildauswertung – gängigsten Maßstäbe angesetzt. Dies sind die beiden Maßstäbe 1 : 4 000 und 1 : 15 000. Bei der

Umrechnung auf der Grundlage des Maßstabs 1 : 4 000 wird der Faktor 5 angesetzt, also davon ausgegangen, dass etwa 0,2 km² pro Luftbild für das Ergebnis genutzt werden. Die wahre Fläche des Luftbildes ist wesentlich größer, jedoch muss aufgrund von Längs- und Querüberdeckungen diese reduzierte Fläche für die Umrechnung angesetzt werden. Bei der Umrechnung auf der Grundlage des Maßstabs 1 : 15 000 wird der Faktor 0,4 angesetzt. Dies bedeutet, dass etwa 2,5 km² pro Luftbild genutzt werden. In Tabelle 9.5 werden die entsprechenden Kosten mit den Umrechnungen zusammengestellt.

Arbeitsschritt	Preis pro Luftbild in DM	Maßstab 1 : 15 000 Preis pro km ² in DM	Maßstab 1 : 4 000 Preis pro km ² in DM
Bildflug	60.-	24.-	300.-
Passpunkte	25.-	10.-	125.-
Scannen	40.-	16.-	200.-
Aerotriangulation	60.-	24.-	300.-
Oberflächenmodell	400.-	160.-	2000.-
Höhenmodell	200.-	80.-	1000.-
Orthomosaik (auto.)	50.-	20.-	250.-
Orthomosaik (manuell)	150.-	60.-	750.-

Tabelle 9.5: Gesamtkostenübersicht (pro Bild und pro km²) nach Phoenics GmbH

(Stand: 24.11.2000)

Die in Tabelle 9.5 aufgeführten Kosten für die einzelnen Arbeitsschritte beziehen sich auf die Auswertung bei der Firma Phoenics GmbH. Um einen Überblick über die Kosten und Qualität möglicher Ergebnisse und Kombinationen mit anderen Höhenmodellen zu bekommen, wurden die Kosten für einige dieser Kombinationen mit anderen bereits bestehenden Höhenmodellen in der Tabelle 9.6 zusammengestellt. Die Werte für die Kosten der Vorverarbeitungsschritte und der Orthophotomosaikgenerierung wurden in dieser Tabelle auf der Grundlage der Auswertung bei der Firma Phoenics GmbH angesetzt. Die in der Tabelle angegebenen maximalen Abweichungen der einzelnen Höhenmodelle sind unter der Berücksichtigung eines Fehleranteils von 5% in dieser Untersuchung berechnet worden (vgl. Abschnitt 6.3.5). Sie beziehen sich dementsprechend nur auf das vorliegende Untersuchungsgebiet und können nicht ohne Weiteres auf andere Gebiete übertragen werden. Weiterhin wurden in der Tabelle die Kosten für die Vorverarbeitungsschritte zusammengezogen, da diese für alle Kombinationen gleich anzusetzen sind.

Arbeitsschritt	Phoenics GmbH (1 : 4 000)	DGM 5 (1 : 4 000)	DGM25 (1 : 4 000)	Phoenics GmbH (1 : 15 000)	DHM/M745 (1 : 15 000)
Vorverarbeitung	925.-	925.-	925.-	74.-	74.-
Oberflächenmodell	2 000.-	-	-	160.-	-
Höhenmodell	1 000.-	60.-	3.-	80.-	3.-
Orthom. (auto)	-	-	-	-	-
Orthom. (manuell)	750.-	750.-	750.-	60.-	60.-
Gesamt	4 675.-	1 735.-	1 678.-	374.-	137.-
Stdabw. der Abweichungen im Höhenmodell (berechnet)	(0,3 m)	(2,0 m)	1,8 m	-	-
95 %-Kriterium im Höhenmodell (berechnet)	(0,7 m)	(4,3 m)	2,7 m	-	-
Genauigkeit im Höhenmodell (angegeben)	< 0,3 m	0,5 m	5 m	-	-

Tabelle 9.6: Beispiele für Gesamtkosten pro km² in DM (Stand: 24.11.2000)

Die schlechten Ergebnisse des Höhenmodells DGM5 sind – wie bereits angesprochen – eventuell auf das Alter der Daten zurückzuführen. Da in dem Untersuchungsgebiet seit dem Zeitpunkt der Erstellung der DGM5-Daten möglicherweise Bodensenkungen aufgetreten sind, können diese großen Abweichungen eventuell damit erklärt werden. Eine genaue Ursache konnte in dieser Untersuchung allerdings nicht bestimmt werden. Aufgrund der Struktur des Höhenmodell ist es jedoch eher unwahrscheinlich, dass das Höhenmodell DGM5 eine Genauigkeit von 0,5 m aufweist. Bei einer Rasterweite von zehn Metern können viele kleinere Strukturen, wie beispielweise Dämme, Flüsse oder andere lokale Senken oder Erhebungen nicht erfasst werden. An den Stützpunkten kann es sehr wohl sein, dass diese eine Höhengenaugigkeit von 0,5 m aufweisen. Jedoch sind die Stützpunkte nur alle zehn Meter vorhanden und auf dieser Grundlage – zehn Meter Rasterweite – kann dann das Höhenmodell nicht für die angesprochenen Einsatzgebiete, wie beispielsweise Flächenversieglungs-

kartierung oder Funknetzplanung, genutzt werden. In diesen Bereichen werden Höhenmodelle mit einer Rasterweite von maximal fünf Metern benötigt.

Bei der Betrachtung der Genauigkeit der Phoenix-Höhenmodelle tritt das Problem auf, dass die berechneten Abweichungen auch durch die Ungenauigkeiten im Referenzmodell hervorgerufen werden können (vgl. Abschnitt 5.5 auf Seite 56). Da das Referenzmodell mit einer Rasterweite von 16 Metern gemessen und danach auf eine Rasterweite von einem Meter interpoliert wurde, kann es zwischen den einzelnen gemessenen Rasterpunkten im interpolierten Referenzmodell durchaus zu Abweichungen im Bereich bis zu 50 cm kommen. Aufgrund dieser Tatsache muss die angegebene berechnete statistischen Werte dieser Höhenmodelle auch betrachtet werden. Das bedeutet, dass die Höhenmodelle durchaus die von der Firma Phoenix GmbH angegebene Genauigkeit besitzen können. Dies konnte jedoch in dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden.

Für die durch die Höhenfehler verursachten Lagefehler in den Orthophotomosaiken können keine genauen Werte angegeben werden (vgl. Abschnitt 7.2), da die Lagefehler neben dem Höhenfehler auch noch durch andere Faktoren beeinflusst werden.

Generell muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass ein Höhenmodell für den Einsatz im Bereich der Orthophotogenerierung über die gesamte Fläche eine hohe Genauigkeit aufweisen muss. Wenn bestehende Höhenmodelle genutzt werden sollen, müssen diese meist auf eine geringere Rasterweite interpoliert werden. Dabei entstehen durch die Interpolation Ungenauigkeiten zwischen den ursprünglichen Rasterpunkten. Ein Höhenmodell, welches dagegen direkt mit der gewünschten Rasterweite generiert wurde, enthält diese Ungenauigkeiten nicht und liefert damit wahrscheinlich über die gesamte Fläche gesehen, bessere Ergebnisse.

10 Schlussbetrachtung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Ansätze zur Erzeugung von Höhenmodellen, welche mehr oder weniger automatisch ablaufen, untersucht. Die Erzeugung der Oberflächenmodelle ist in großen Bereichen automatisch möglich. Sie liefert, beim Einsatz von Programmen höchster Genauigkeit, wie beispielsweise der beiden Programme OrthoMAX und Softplotter, gute Ergebnisse. Das Problem im Bereich der Höhenmodellgenerierung liegt bei der Filterung der Oberflächenmodelle zu Höhenmodellen. In der vorliegenden Arbeit wurden in diesem Zusammenhang das Programm RASCOR und das von der Firma Phoenix GmbH entwickelte Verfahren untersucht. Durch das Phoenix-Verfahren wird dieses Problem zwar nahezu optimal gelöst, jedoch handelt es sich bei dieser Methode um ein semi-automatisches Verfahren. Der Einsatz eines geübten Operators ist bei diesem Verfahren von entscheidendem Einfluss. Er wird nicht nur im Bereich der Kontrolle der Ergebnisse benötigt, sondern muss während der Filterung aktiv in den Prozess eingreifen, was eine gewisse Erfahrung voraussetzt. Zusammenfassend muss allerdings gesagt werden, dass der Einsatz des Phoenix-Verfahrens in dieser Untersuchung die besten Ergebnisse lieferte.

Das Programm RASCOR stellt dagegen ein vollautomatisches Programm zur Filterung von Oberflächenmodellen dar. Es basiert auf der Methode der linearen Prädiktion. Der Operator ist bei diesem Programm im eigentlichen Sinne nur für die Kontrolle der Ergebnisse notwendig. Die Berechnungsparameter werden direkt vom Programm, speziell für das jeweilige Gebiet, vorgeschlagen und müssen nur übernommen werden. In diesem Untersuchungsgebiet brachte das Programm in großen Bereichen ebenfalls sehr gute Ergebnisse. Allerdings wurden durch das Programm auch Bereiche gefiltert, welche im Höhenmodell enthalten sein müssten, wie beispielsweise der Eisenbahndamm. Somit kann das Ergebnis der Filterung mit dem Programm RASCOR in der in dieser Arbeit genutzten Version nicht als zufriedenstellendes Ergebnis bezeichnet werden. In der Zwischenzeit wurde das Programm RASCOR jedoch um die Option erweitert, dass – ebenso wie beim Phoenix-Verfahren – Bereiche von der Filterung ausgeschlossen werden können. Mit dieser Option sind dann ähnlich gute Ergebnisse wie beim Phoenix-Verfahren zu erwarten. Jedoch handelt es sich dann nicht mehr um ein vollautomatisches Verfahren, sondern ebenfalls um ein semi-

automatisches Verfahren, wenn auch nicht mit dem großen manuellen Eingriff wie er beim Phoenix-Verfahren notwendig ist.

Derzeitige Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der automatischen Objekterkennung. Wenn diese Erkennung von Gebäuden und Vegetation funktioniert, könnten diese Bereiche direkt aus dem Oberflächenmodell eliminiert und die entstandenen Lücken über Interpolationsverfahren geschlossen werden. Es würde damit direkt ein Höhenmodell entstehen. Dies wäre ein optimales Ergebnis, da die Eliminierung nicht mehr nur von den Grauwertdifferenzen abhängt, sondern anhand von extrahierten Merkmalen durchgeführt wird. Der Operateur wäre somit nur noch für die Kontrolle der Ergebnisse verantwortlich. Diese Verfahren liefern in den aufgeführten Testgebieten meist auch sehr gute Ergebnisse. Allerdings sind die Testgebiete meist spezielle Gebiete, welche nicht die Struktur des Großteils der Einsatzgebiete der Filterung darstellen. Die Filterung wird meist in Bereichen dichter Bebauung benötigt, und für diesen Anwendungsbereich gibt es zurzeit keine operationell einsetzbaren vollautomatischen Verfahren. Die Ergebnisse der vollautomatischen Filterungsverfahren müssten derzeit noch mit einem hohen manuellen Nachbearbeitungsaufwand verbessert werden. Somit ist es momentan für die meisten Anwendungen wirtschaftlicher auf semi-automatische Verfahren, wie beispielsweise das Phoenix-Verfahren, zurückzugreifen.

Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. (1991):** *Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Eine Einführung in die Fernerkundung.* Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt.
- ALBERTZ, J.; KREILING, W. (1989):** *Photogrammetrisches Taschenbuch.* 4.Auflage, Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- AUTOMETRIC (1999A):** *Softplotter 2.0, Technical Guide.* Autometric, Incorporated, Bangor, Maine.
- AUTOMETRIC (1999B):** *Softplotter 2.0, User's Guide.* Autometric Incorporated, Bangor, Maine.
- BÄHR, H.-P.; VÖGTLE, T. (1998):** *Digitale Bildverarbeitung, Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung.* 3.Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- BARTELME, N. (2000):** *Geoinformatik. Modelle, Strukturen, Funktionen.* 3.Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- BILL, R. (1999A):** *Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Band 1, Hardware, Software und Daten.* 4.Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- BILL, R. (1999B):** *Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Band 2, Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen.* 2.Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- BKG (1997):** *Digitales Höhenmodell M745 – DHM/M745.* Informationsbroschüre, Stand: 01.07.1997, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie Frankfurt am Main.
- ENGLISCH, A.; HEIPKE, C.(1998):** *Erfassung und Aktualisierung topographischer Geo-Daten mit Hilfe analoger und digitaler Luftbilder.* In PFG, Heft 3, Jahrgang 1998, S. 133-149.
- ERDAS (1998):** *IMAGINE OrthoMAX V8.3, User's Guide.* ERDAS Incorporated, Atlanta, Georgia.
- ERDAS (1999):** *IMAGINE OrthoBASE 8.4, User's Guide.* ERDAS Incorporated, Atlanta, Georgia.
- FISCHER, C. (1994):** *Anforderungen an digitale Geländemodelle zur Lösung hydrologischer und ökologischer Fragestellungen im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung geplanter Abbaue der Ruhrkohle AG und Bearbeitung mit dem Geo-Informationssystem ARC/INFO. Einsatz von Verfahren zur automatischen*

- Höhenmodellgenerierung durch Methoden der digitalen Bildverarbeitung.* Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Hannover und am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung der Universität Hannover, Oktober 1994.
- HAALA, N. (1999):** *Oberflächenrekonstruktion – Digitale Höhenmodelle.* IFP, in Tutorium Phowo '99, Algorithmen und ihre Automatisierung in der photogrammetrischen Datenauswertung.
- HAKE, G. (1982):** *Kartographie I.* 6. Auflage, Sammlung Göschen, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- HAKE, G. (1985):** *Kartographie II.* 3. Auflage, Sammlung Göschen, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- HAKE, G.; GRÜNREICH, D. (1994):** *Kartographie, 7. Auflage.* Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York
- HEIPKE, C. (1999):** *Vorlesungsskript Bildanalyse I.* Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover.
- HEIPKE, C. (2000):** *Vorlesungsskript Bildanalyse II.* Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover.
- HÖPCKE, W. (1980):** *Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung.* Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- JACOBSEN, K. (1998):** *Vorlesungsskript Photogrammetrie III.* Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover.
- JACOBSEN, K. (1999):** *Vorlesungsskript Photogrammetrie IV.* Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover.
- JACOBSEN, K. (2000A):** *Manual DTMCOR.* Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover, März 2000.
- JACOBSEN, K. (2000B):** *Manual BLAN.* Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover, April 2000.
- JACOBSEN, K. (2000C):** *Manual RASCOR.* Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover, September 2000.
- KAHMEN, K. (1993):** *Vermessungskunde, 18. Auflage.* Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- KOCH, A. (1999):** *Analyse und Aufbereitung von Laser-Scanner-Aufnahmen.* Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung, Universität Hannover, Mai 1999.
- KONECNY, G.; LEHMANN, G. (1984):** *Photogrammetrie.* 4. Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York.

- KRAUS, K. (2000):** *Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme.* Dümmler Verlag, Verlag H. Stam GmbH, Köln.
- KRAUS, K. MIT BEITRÄGEN VON JANSKA, J. UND KAGER, H. (1996):** *Photogrammetrie, Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen.* 3.Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- KRAUS, K. MIT BEITRÄGEN VON JANSKA, J. UND SCHNEIDER, W. (1990):** *Fernerkundung, Band 2, Auswertung photographischer und digitaler Bilder.* Dümmler Verlag, Bonn.
- KRAUS, K. MIT BEITRÄGEN VON WALDHÄUSL, P. (1994):** *Photogrammetrie, Band 1, Grundlagen und Standardverfahren.* 6.Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- LINDER, W. (1999):** *Geo-Informationssysteme.* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- LINDER, W. (2000A):** *Programmbeschreibung LISA, Modul BASIS, Version 2.1.*
- LINDER, W. (2000B):** *Programmbeschreibung LISA, Modul FOTO, Version 2.1.*
- LUHMANN, T. (2000):** *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen.* Wichmann Verlag, Heidelberg.
- SASSE, V. (1994):** *Beiträge zur digitalen Entzerrung auf Grund von Oberflächenrekonstruktion.* Dissertation, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover.

Internetseiten

Autometric, Inc.: Internet: <http://www.autometric.com>, u.a. Programm Softplotter.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG): Internet: <http://www.ifag.de>, u.a. Vertrieb des DHM/M745 Höhenmodells.

ERDAS, Inc.: Internet: <http://www.erdas.com>, Programm ERDAS Imagine, OrthoMAX, OrthoBASE und Softplotter.

GAF mbH: Internet: <http://www.gaf.de>, u.a. Vertrieb des MONA Pro Höhenmodell für Deutschland.

Geosystems GmbH: Internet: <http://www.geosystems.de>, u.a. Vertrieb für ERDAS-Produkte in Deutschland.

Landesvermessung + Geobasisinformationen Niedersachsen (LGN): Internet: <http://www.lgn.de>, u.a. Vertrieb von Digitalen Höhenmodellen für Niedersachsen.

Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen: Internet: <http://www.lverma.nrw.de>, u.a. Vertrieb von Digitalen Höhenmodellen für Nordrhein-Westfalen.

Phoenics GmbH: Internet: <http://www.phoenics.de>, u.a. Vertrieb des Höhenmodells DHM/M745 und Neuerfassung und Aufbereitung von Höhenmodellen.

Universität Düsseldorf Geographisches Institut: Internet: <http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/MathNat/Geo/Lisa>, u.a. Programmpaket LISA.

Universität Hannover Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung: Internet <http://www.ipi.uni-hannover.de>,

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Übersicht Ruhrgebiet mit Untersuchungsgebiet (schwarzes Quadrat).....	6
Abbildung 2.2: Orthophotomosaik des Untersuchungsgebietes Oer-Erkenschwick.....	7
Abbildung 2.3: Bildmittenübersicht des Befliegungsgebietes Oer-Erkenschwick mit den Grenzen des Auswertgebietes (Untersuchungsgebiet rot umrandet).....	9
Abbildung 3.1: Grundidee der automatischen Oberflächenmodellgenerierung nach [AUTOMETRIC 1999B]	13
Abbildung 3.2: Area Based Matching nach [AUTOMETRIC 1999B].....	16
Abbildung 3.3: Epipolargeometrie nach [AUTOMETRIC 1999B].....	20
Abbildung 3.4: Korrelatorprinzip nach [LINDER 2000B]	21
Abbildung 3.5: Ablaufschema des „Phoenics-Verfahrens“	26
Abbildung 3.6: Trend- und Geländeoberfläche sowie Stützpunkte P_i	27
Abbildung 3.7: Kovarianzfunktion.....	29
Abbildung 3.8: Prinzip der Orthophotogenerierung.....	31
Abbildung 4.1: Oberflächenmodell (2.5D und 3D-Ansicht) [Quelle: Phoenics GmbH]	41
Abbildung 4.2: Höhenmodell (2.5D und 3D-Ansicht) [Quelle: Phoenics GmbH]	42
Abbildung 5.1: Ausschnitt aus dem DGM5 des LVA NRW	46
Abbildung 5.2: Ausschnitt aus dem DGM25 des LVA NRW	46
Abbildung 5.3: Ausschnitt aus dem DHM/M745 des BKG.....	47
Abbildung 5.4: Ausschnitt aus dem Höhenmodell MONA Pro	48
Abbildung 5.5: LISA-Oberflächenmodell.....	50
Abbildung 5.6: OrthoMAX-Oberflächenmodell	51
Abbildung 5.7: Softplotter-Oberflächenmodell (Area Based Matching)	52
Abbildung 5.8: Softplotter-Oberflächenmodell (Epipolargeometrie)	52
Abbildung 5.9: LISA-Phoenics-Höhenmodell	54
Abbildung 5.10: LISA-RASCOR-Höhenmodell.....	54
Abbildung 5.11: OrthoMAX-Phoenics-Höhenmodell.....	55
Abbildung 5.12: OrthoMAX-RASCOR-Höhenmodell	55
Abbildung 5.13: Softplotter-Phoenics-Höhenmodell.....	56
Abbildung 5.14: Softplotter-RASCOR-Höhenmodell	56
Abbildung 5.15: Übersicht des Referenzmodells mit Raster und Bruchkanten	57

Abbildung 5.16: Interpoliertes Referenzmodell (Rasterdatensatz)	58
Abbildung 6.1: Zwischenergebnis LISA-Oberflächenmodell (RASCOR)	63
Abbildung 6.2: Zwischenergebnis OrthoMAX-Oberflächenmodell (RASCOR)	63
Abbildung 6.3: Zwischenergebnis Softplotter-Oberflächenmodell (RASCOR)	63
Abbildung 6.4: Zwischenergebnis LISA-Oberflächenmodell (Phoenix-Verfahren)	64
Abbildung 6.5: Zwischenergebnis OrthoMAX-Oberflächenmodell (Phoenix-Verfahren)	64
Abbildung 6.6: Zwischenergebnis Softplotter-Oberflächenmodell (Phoenix-Verfahren)	64
Abbildung 6.7: Differenzmodell DGM5	67
Abbildung 6.8: Differenzmodell DGM25	68
Abbildung 6.9: Differenzmodell DHM/M745.....	68
Abbildung 6.10: Differenzmodell Mona Pro.....	68
Abbildung 6.11: Differenzmodell LISA-Phoenix-Höhenmodell.....	69
Abbildung 6.12: Differenzmodell LISA-RASCOR-Höhenmodell	69
Abbildung 6.13: Differenzmodell OrthoMAX-Phoenix-Höhenmodell	70
Abbildung 6.14: Differenzmodell OrthoMAX-RASCOR-Höhenmodell.....	70
Abbildung 6.15: Differenzmodell Softplotter-Phoenix-Höhenmodell.....	71
Abbildung 6.16: Differenzmodell Softplotter-RASCOR-Höhenmodell	71
Abbildung 6.17: Prozentuale Verteilung der Abweichungen.....	74
Abbildung 7.1: Zusammenhang zwischen Lagefehler und Position des Fehlers im Orthophoto in Bezug zum Projektionszentrum.....	80
Abbildung 7.2: Ausschnitt des Differenzmodells LISA RASCOR.....	80
Abbildung 7.3: Lagefehler im Bereich des Eisenbahndammes durch Höhenfehler.....	81
Abbildung 7.4: Unterschiedliche Lagefehler in verschiedenen Orthophotos.....	82
Abbildung 7.5: „Krumme“ Gleise durch unterbrochene Struktur im Höhenmodell	82
Abbildung 7.6: Ausschnitt eines DGM5 Orthophotos mit Vektoren	83
Abbildung 7.7: Ausschnitt eines Referenz-Orthophotos mit Vektoren.....	83
Abbildung 7.8: „Einstürzendes“ Haus durch Schnittkante.....	84

Für die beiden Abbildungen –Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 – gilt:

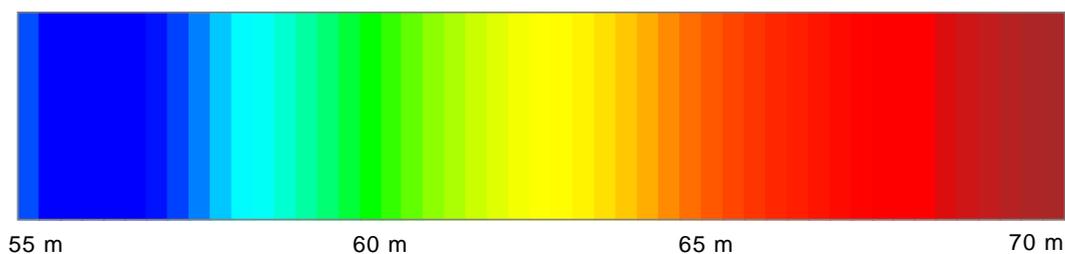
Darstellung auf der Grundlage des Digitalen Geländemodells DGM5 bzw. DGM25 des Landes NRW mit Genehmigung des Landesvermessungsamtes NRW vom 12.04.2000, Az.: S 1070/2000.

Tabellenverzeichnis

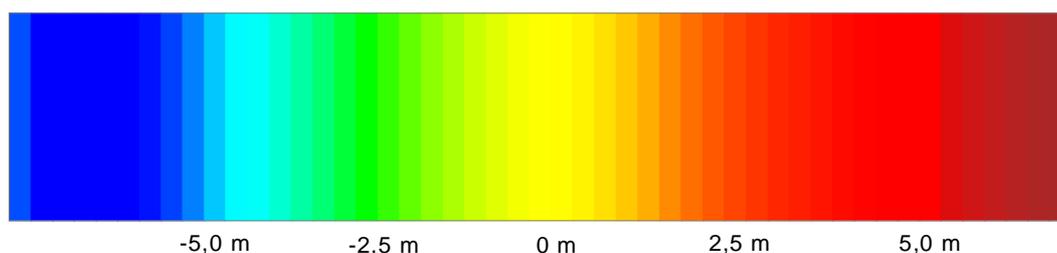
Tabelle 2.1: Rahmenmarken Soll-Koordinaten in [mm]	8
Tabelle 2.2: Informationen zum Bildflug	9
Tabelle 2.3: Orientierungsparameter der sieben Luftbilder.....	11
Tabelle 3.1: Vor- und Nachteile der Kreuzkorrelation nach [HAALA 1999]	15
Tabelle 3.2: Vor- und Nachteile des Least-Squares Matching nach [HAALA 1999]	16
Tabelle 4.1: Parameter für die Oberflächenmodellgenerierung (Programm Softplotter).....	39
Tabelle 4.2: Berechnungsparameter für das Programm RASCOR nach [JACOBSEN 2000c].....	40
Tabelle 5.1: Spezifikationen der Höhenmodelle DGM5 und DGM25 nach LVA NRW.....	46
Tabelle 5.2: Spezifikationen des Höhenmodells DHM/M745 nach [BKG 1997].....	47
Tabelle 5.3: Spezifikationen des Höhenmodells MONA Pro nach Internet GAF mbH.....	48
Tabelle 5.4: Parameter für die Oberflächenmodellgenerierung (Programm LISA Foto).....	50
Tabelle 6.1: Übersicht der Ergebnisse der RASCOR-Filterung.....	61
Tabelle 6.2: Aufschlüsselung der Kriterien für die Eliminierung von Punkten durch das Programm RASCOR	62
Tabelle 6.3: Automatische Höheneingrenzung durch das Programm RASCOR	62
Tabelle 6.4: Statistische Untersuchung der Höhenmodelle.....	72
Tabelle 6.5: Einteilung der Höhenmodelle in Gruppen nach der Standardabweichung der Abweichungen	73
Tabelle 6.6: Maximale Abweichungen der Höhenmodelle mit und ohne Berücksichtigung eines Fehleranteils von 5 % sowie der angegebenen Genauigkeit der jeweiligen Hersteller	75
Tabelle 6.7: Untersuchung der Problembereiche in den Höhenmodellen	76
Tabelle 9.1: Preise für Vorverarbeitungsschritte nach Phoenix GmbH (Stand: 24.11.2000) .	91
Tabelle 9.2: Preise für bestehende Höhenmodelle (Stand: 05.11.2000)	92
Tabelle 9.3: Kosten der Oberflächen- und Höhenmodellgenerierung nach Phoenix GmbH (Stand: 24.11.2000)	93
Tabelle 9.4: Kosten der Orthophotogenerierung (Stand: 24.11.2000)	94
Tabelle 9.5: Gesamtkostenübersicht (pro Bild und pro km ²) nach Phoenix GmbH (Stand: 24.11.2000).....	95
Tabelle 9.6: Beispiele für Gesamtkosten pro km ² in DM (Stand: 24.11.2000).....	96

Anhang

Anhang 1: Farbskala für die Oberflächen- und Höhenmodelle



Anhang 2: Farbskala für die Differenzmodelle



Anhang 3: Tabelle der Punkte, sortiert nach den Beträgen der Abweichungen der untersuchten Höhenmodelle

Abweichung	DGM5	DGM25	DHM/ M745	MONA Pro	LISA Rascor	LISA Phonics	Ortho. Rascor	Ortho. Phonics	Soft. Rascor	Soft. Phonics
0,0 m - 0,5 m	302952	224988	204734	184839	452774	425646	794255	838234	799534	804046
0,5 m - 1,0 m	203651	286014	191544	171647	213985	220121	34927	29744	32028	57006
1,0 m - 1,5 m	116534	209025	174337	169868	103549	119651	12091	9331	10533	13748
1,5 m - 2,0 m	58121	78236	97129	147026	48376	60275	5332	4000	5099	5220
2,0 m - 2,5 m	36580	36724	50825	73719	23855	28229	3348	1624	3311	2237
2,5 m - 3,0 m	28452	8878	25021	68788	13857	14364	2871	675	2626	1061
3,0 m - 3,5 m	35569	3627	23956	30545	7670	7303	2588	186	2480	307
3,5 m - 4,0 m	32165	2942	23286	6888	4348	3704	2335	32	2499	148
4,0 m - 4,5 m	40704	2481	44352	2838	4897	2098	2227	6	2501	44
4,5 m - 5,0 m	6363	2358	17993	2665	3049	1284	2369	7	2489	18
> 5,0 m	22752	28570	30666	25020	7483	1168	21500	4	20743	8