

Laser-Profilmessungen
zur topographischen Geländeaufnahme

Von der
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
vorgelegt von

Dipl.-Ing. Joachim Lindemberger
geboren in Ludwigsburg

München 1993

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION

D-8000 MÜNCHEN 22 • Marstallplatz

Telefon (089) 23 031 113 • Telefax (089) 23 031 240

Telex 5 213 550 dgfi d

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.techn.h.c. F. Ackermann

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Ph. Hartl

Tag der Einreichung: 25. 6. 1991

Tag der mündlichen Prüfung: 22. 5. 1992

© 1993 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet, die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Summary | 7 |
| I. Einführung und Zielsetzung | 9 |
| 1. Methoden der topographischen Geländeaufnahme | 9 |
| 2. Prinzip eines Laser-Profilmeßsystems | 10 |
| 3. Überblick über existierende Laser-Profilmeßsysteme | 11 |
| 4. Aufgabenstellung | 13 |
| 5. Überblick | 14 |
| II. Komponenten des Laser-Profilmeßsystems und Konzepte zur Auswertung von Laser-Profilmessungen | 15 |
| 1. Überblick | 15 |
| 2. Eigenschaften und Meßprinzip von Lasersensoren zur Laser-Profilmessung | 16 |
| 2.1 Vorbemerkungen | 16 |
| 2.2 Grundlagen der Lasertechnik | 16 |
| 2.2.1 Physikalische Eigenschaften | 16 |
| 2.2.2 Wechselwirkung Laser - Materie | 18 |
| 2.2.3 Reichweite der Laserdistanzmessung | 19 |
| 2.3 Komponenten eines Laserdistanzmessers | 21 |
| 2.4 Genauigkeit der Laserdistanzmessung | 23 |
| 2.5 Ergebnis | 24 |
| 3. Komponenten des Laser-Profilmeßsystems | 25 |
| 3.1 Einführung | 25 |
| 3.2 Methoden der Sensororientierung | 25 |
| 3.2.1 Direkte Bestimmung der Sensororientierungsparameter | 26 |
| 3.2.2 Indirekte Bestimmung der Sensororientierungsparameter | 27 |
| 3.3 Kombinierte, direkte Sensororientierung mit GPS und INS | 27 |
| 3.3.1 Systembeschreibung NAVSTAR GPS | 28 |
| 3.3.2 Beobachtungsprinzip bei kinematischen Anwendungen | 28 |
| 3.3.3 Genauigkeitspotential der Positionsbestimmung mit GPS | 29 |
| 3.3.4 Neigungsbestimmung mit INS | 30 |
| 3.3.5 Genauigkeitsanforderungen an GPS und INS für die Laser-Profilmessung | 30 |
| 3.3.6 Folgerungen für die Koordinatenbestimmung aus Laser-Profilmessungen | 31 |
| 3.4 Zusätzliche Systemkomponenten | 32 |
| 3.4.1 Bordcomputer | 33 |
| 3.4.2 Zeitsynchronisation | 33 |
| 3.4.3 Spotting-Kamera | 33 |
| 3.4.4 Navigationssystem für die Profilbefliegung | 34 |
| 3.5 Ergebnis | 34 |
| 4. Koordinaten der Laserpunkte | 35 |
| 4.1 Überblick | 35 |
| 4.2 Koordinatensysteme | 35 |
| 4.2.1 Laser-Koordinatensystem | 35 |
| 4.2.2 Flugzeugfestes Koordinatensystem | 35 |
| 4.2.3 Lokales, astronomisches Horizontsystem | 36 |
| 4.2.4 World Geodetic System 1984 - WGS84 | 36 |
| 4.2.5 Koordinatensystem der Landesvermessung | 36 |
| 4.3 Meßgrößen und Parameter des Laser-Profilmeßsystems | 38 |
| 4.3.1 Meßgrößen | 38 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 4.3.2 | Parameter zur Korrektur systematischer Fehler | 38 |
| 4.3.3 | Kalibrierungsparameter | 38 |
| 4.4 | Beziehungen zwischen den Koordinatensystemen | 39 |
| 4.4.1 | Vom Laser-Koordinatensystem zum flugzeugfesten Koordinatensystem | 39 |
| 4.4.2 | Vom flugzeugfesten Koordinatensystem zum lokalen, astronomischen Horizontsystem | 39 |
| 4.4.3 | Vom lokalen, astronomischen Horizontsystem zu WGS84 | 40 |
| 4.4.4 | Von WGS84 zum Koordinatensystem der Landesvermessung | 40 |
| 4.5 | Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte in WGS84 | 41 |
| 5. | Systemkalibrierung | 42 |
| 5.1 | Problemstellung | 42 |
| 5.2 | Laborkalibrierung | 43 |
| 5.2.1 | Lasersensor | 43 |
| 5.2.2 | GPS und INS | 44 |
| 5.2.3 | Beziehung zwischen Laser-Koordinatensystem und flugzeugfestem Koordinatensystem | 44 |
| 5.2.4 | Beziehung zwischen Lasersensor und Spotting-Kamera | 45 |
| 5.3 | Kalibrierungsflug | 45 |
| 5.3.1 | Topographische Paßpunkte | 45 |
| 5.3.2 | Zu kalibrierende Parameter | 46 |
| 5.3.3 | Bestimmbarkeit der Parameter | 47 |
| 5.4 | Ausgleichungsansatz zur Systemkalibrierung | 50 |
| 5.4.1 | Vorbemerkungen | 50 |
| 5.4.2 | Ausgleichungsansatz mit erweitertem Gauß-Markov-Modell | 51 |
| 5.4.3 | Diskussion des Ausgleichungsmodells | 53 |
| 5.5 | Ergebnis | 54 |
| III. | Mathematische Modellierung von Laserprofilen | 55 |
| 1. | Einführung | 55 |
| 1.1. | Aufgabenstellung | 55 |
| 1.2 | Gebäuchliche Methoden zur Modellierung von Geländeflächen | 56 |
| 1.3. | Begriffe und Voraussetzungen | 57 |
| 1.4 | Überblick über Teil III | 58 |
| 2. | Stochastische Prozesse als mathematisches Modell für Geländeprofile | 59 |
| 2.1 | Vorbemerkungen | 59 |
| 2.2 | Definitionen und Eigenschaften stochastischer Prozesse | 59 |
| 2.3 | Zeitreihenanalyse stationärer Prozesse | 61 |
| 2.3.1 | Aufgabe der Zeitreihenanalyse | 61 |
| 2.3.2 | Zeitreihenanalyse mit linearen Modellen | 62 |
| 2.3.3 | Eigenschaften autoregressiver Prozesse | 63 |
| 2.3.4 | Identifikation autoregressiver Prozesse | 64 |
| 2.4 | Nicht-stationäre Zeitreihen | 65 |
| 2.5 | Beobachtete Zeitreihen | 65 |
| 2.6 | Robuste Zeitreihenanalyse | 68 |
| 3. | Mathematische Morphologie | 71 |
| 3.1 | Einführung | 71 |
| 3.2 | Objekt und Strukturelement | 71 |
| 3.3 | Mathematisch morphologische Operatoren | 72 |
| 3.4 | Geometrische Interpretation | 73 |
| 3.5 | Selektion der Bodenpunkte | 74 |
| 4. | Bearbeitung der Laserprofile | 76 |
| 4.1 | Einleitung | 76 |
| 4.2 | Modellierung von Geländeprofilen mit ARI-Prozessen | 76 |
| 4.3 | Vom Laserprofil zum Geländeprofil | 78 |
| 4.4 | Exemplarisches Beispiel zur Auswertung von Laserprofilen | 79 |
| 4.5 | Ergebnis | 83 |

| | |
|--|-----------|
| IV. Empirische Untersuchungen | 85 |
| 1. Grundlagen der empirischen Untersuchungen | 85 |
| 1.1 Überblick | 85 |
| 1.2 Beschreibung des Laser-Profilmeßsystems | 86 |
| 1.3 Beschreibung der Befliegungen | 87 |
| 1.3.1 Gammertingen | 88 |
| 1.3.2 Hambach | 89 |
| 1.3.3 Rotterdam | 90 |
| 1.3.4 Harz | 90 |
| 1.3.5 Lachendorf | 91 |
| 1.4 Datenauswertung | 92 |
| 2. Untersuchung verschiedener Eigenschaften der Lasermessungen | 93 |
| 2.1 Reflexionsverhalten | 93 |
| 2.1.1 Erfolgsrate | 93 |
| 2.1.2 Erfolgsrate bei normaler Fluglage | 93 |
| 2.1.3 Erfolgsrate in Abhängigkeit von der Flughöhe | 94 |
| 2.1.4 Erfolgsrate in Abhängigkeit von der Strahlneigung | 95 |
| 2.1.5 Ergebnis | 96 |
| 2.2 Durchdringungsverhalten in Waldgebieten | 96 |
| 2.2.1 Durchdringungsrate | 96 |
| 2.2.2 Durchdringungsraten bei durchschnittlichen Flughöhen von 300m | 96 |
| 2.2.3 Durchdringungsrate in Abhängigkeit von der Flughöhe | 97 |
| 2.2.4 Verteilung der Bodenpunkte im Profil | 98 |
| 2.2.5 Überprüfung der automatischen Identifikation der Bodenpunkte | 99 |
| 2.2.6 Ergebnis | 101 |
| 2.3 Streckenmeßgenauigkeit des Lasersensors | 102 |
| 3. Genauigkeitsanalyse der Laser-Profilmessung | 103 |
| 3.1 Einführung | 103 |
| 3.2 Genauigkeit der Transformation vom WGS84 in Landeskoordinaten | 103 |
| 3.3 Systemkalibrierung | 104 |
| 3.3.1 Voraussetzungen | 104 |
| 3.3.2 Parameterschätzung | 105 |
| 3.3.3 Stochastische Eigenschaften der Kalibrierungsparameter | 106 |
| 3.3.4 Ergebnis | 108 |
| 3.4 Photogrammetrische Überprüfung der Höhengenaugigkeit der Laserpunkte | 108 |
| 3.4.1 Photogrammetrische Kontrollmessungen | 108 |
| 3.4.2 Genauigkeit der Geländehöhen | 108 |
| 3.4.3 Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung | 109 |
| 3.4.4 Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit von der Geländeneigung | 110 |
| 3.4.5 Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit von der Flugrichtung | 110 |
| 3.4.6 Zeitliche Abhängigkeit der Höhengenaugigkeit | 111 |
| 3.5 Tachymetrische Überprüfung der Höhengenaugigkeit der Laserpunkte | 111 |
| 3.5.1 Terrestrische Kontrollmesungen | 111 |
| 3.5.2 Höhengenaugigkeit in Feldlage | 112 |
| 3.5.3 Höhengenaugigkeit im Waldgebiet | 113 |
| 3.6 Ergebnis | 113 |
| 4. Digitales Höhenmodell aus Laser-Profilmessungen | 114 |
| 4.1 Vorbemerkungen | 114 |
| 4.2 DHM aus der Laser-Profilbefliegung im Harz 1989 | 115 |
| 4.2.1 Beschreibung der Eingabedaten | 115 |
| 4.2.2 Berechnung des DHM | 116 |
| 4.3 Genauigkeitsuntersuchung des Digitalen Höhenmodells | 119 |
| 4.3.1 Kontrollmessungen | 119 |
| 4.3.2 DHM aus Laser-Profilmessungen | 119 |

| | |
|---|------------|
| 4.3.3 Genauigkeitsuntersuchung des DHM mit zusätzlich gemessenen Strukturlinien | 121 |
| 4.4 Ergebnis | 123 |
| V. Zusammenfassung | 124 |
| Literaturverzeichnis | 126 |
| Lebenslauf | 131 |
| | |
| Verzeichnis der Abbildungen | |
| I.2.1 Prinzip der Laser-Profilmessung | 10 |
| II.2.1 Signalformen des Lasers | 17 |
| II.2.2 Mehrfache Signalreflexion an einem Baum | 18 |
| II.2.3 Letzte Reflexionen von Laserimpulsen über Waldgebiet | 19 |
| II.2.4 Abhängigkeiten der Reichweite des Laser | 20 |
| II.2.5 Prinzipieller Aufbau eines Laserdistanzmessers | 21 |
| II.5.1 Topographische Paßpunkte | 46 |
| II.5.2 Einfluß der Kalibrierungsparameter d_r und d_p | 47 |
| II.5.3 Einfluß der Translationsparameter $[d_{tx}, d_{ty}, d_{tz}]_w^T$ | 48 |
| II.5.4 Einfluß der Rotationsparameter (α, β, γ) | 49 |
| III.2.1 Beobachtete Zeitreihe mit "groben Fehlern" | 69 |
| III.2.2 Ergebnis der nicht-robusten Zeitreihenanalyse | 70 |
| III.2.3 Ergebnis der robusten Zeitreihenanalyse | 70 |
| III.3.1 Laserprofil über Waldgebiet | 73 |
| III.3.2 Morphologische Operatoren Dilation (oben) und Erosion (unten) | 74 |
| III.3.3 Morphologische Operatoren Öffnen (unten) und Schließen (oben) | 74 |
| III.3.4 Band um untere Umhüllende (Bandbreite 2m) | 75 |
| III.3.5 Selektierte Bodenpunkte | 75 |
| III.4.1 Laserprofil über Waldgebiet | 79 |
| III.4.2 Morphologischer Operator Öffnen | 80 |
| III.4.3 Selektierte Bodenpunkte nach morphologischem Öffnen | 80 |
| III.4.4 Geländeprofil aus der ARI-Modellierung | 81 |
| III.4.5 Reduziertes Geländeprofil | 82 |
| III.4.6 Bodenpunkte nach ARI-Modellierung | 82 |
| III.4.7 Manuell identifizierte Bodenpunkte | 83 |
| IV.1.1 Ausschnitt aus topographischer Karte Befliegungsgebiet Gammertingen | 88 |
| IV.1.2 Ein Laserprofil aus der Befliegung Gammertingen | 88 |
| IV.1.3 Braunkohlentagebau Hambach | 89 |
| IV.1.4 Laserprofil der Befliegung Hambach | 89 |
| IV.1.5 Flugweg Rotterdam | 90 |
| IV.1.6 Topographische Karte des Befliegungsgebiets Harz | 91 |
| IV.1.7 Laserprofil der Befliegung Harz | 91 |
| IV.2.1 Durchdringung in Nadel- und Laubwald | 98 |
| IV.2.2 Laserprofil über Fichtenschonung | 101 |
| IV.3.1 Verteilung der topographischen Paßpunkte zur Systemkalibrierung | 105 |
| IV.3.2 Zeitliche Abhängigkeit der Differenzen | 111 |
| IV.4.1 Eingabedaten für DHM-Berechnung Geländeprofile der Befliegungen im Harz | 117 |
| IV.4.2 Höhenlinienplan DHM aus Laser-Profilbefliegung im Harz | 118 |
| IV.4.3 Extreme Höhendifferenzen $> 5.0m$ an den Kontrollpunkten | 120 |
| IV.4.4 Höhengenaugigkeit des DHM in Abhängigkeit von Geländeneigung | 121 |
| IV.4.5 Zusätzlich photogrammetrisch gemessene Strukturlinien | 122 |

Summary

Airborne laser profiling is a new approach for topographic terrain survey. The airborne laser profiling system is characterized by a laser rangefinder rigidly mounted at the bottom of an aircraft measuring the spatial distance to the ground. The coordinates of the laser beam's target points on ground can be computed, if the complete spatial orientation - position and attitude - of the laser sensor is known. The positioning is done with help of the Global Positioning System GPS and the attitude is determined by an inertial navigation system INS.

Airborne laser profiling provides the height information for topographic mapping in a fully digital manner. With reference to the experimental investigations described in the thesis, some applications shall be mentioned, where airborne laser profiling can be the method of first choice. Forest areas, where no sight to the ground is available in aerial photographs, and where terrestrial surveying is too expensive, whilst the laser is able to penetrate the forest canopy to measure directly on the ground. Coastline and wetland control, where the poor texture in aerial photographs and unfavorable geometrical conditions (strip adjustment along the sea side) cause difficulties by the photogrammetric evaluation. Opencast exploitation of mineral sources, where the result of the surveying shall be submitted within short time. Tracing of streets, railroads, pipelines, electrical power lines, where a digital terrain model is requested along the planned line only.

The thesis is subdivided into four main parts and a final summary. Part I introduces the principles of airborne laser profiling and place the method in relation to the conventional photogrammetric and tacheometric approach for topographic terrain survey.

Part II is dedicated to the hardware components of the airborne laser profiling system and to the conception of the data evaluation for determining the coordinates of the laser points. At first, the problem of airborne laser range finding and airborne sensor orientation is analyzed. The presented solution demonstrates that a laser profiling system can be realized with already existing hardware components. Part II also describes the computation of the coordinates of the laser points. Finally a method for the calibration of the complete system is presented.

Part III deals with the modelling of the laser profiles, in order to derive a digital elevation model. There are two tasks: the first is to separate the topographically utilizable laser points on the ground from the laser points referring to topographically not-relevant objects like buildings or vegetation. The second task is the derivation of terrain profiles with equidistant ground points. Two mathematical theories are applied to cope with this tasks: mathematical morphology and stochastic processes. The theory of stochastic processes is adapted to the requirements of modelling terrain profiles. Thus, observed non-stationary time series can be analyzed and processed even by robust estimation technique.

Part IV presents empirical investigations from 5 airborne laser profiling projects carried out between 1988 and 1990. The main results are summarized here in a few words. The laser beam was successfully reflected from various kinds of ground materials and ground covers. There are practically no restrictions for topographic terrain survey by airborne laser profiling. The penetration of the laser onto the ground of forest areas under summer conditions was between 16% and 39% dependant on the type of the trees. The accuracy of the terrain heights was estimated to $\sigma_h=0.15\text{m}$ in the project Harz 1989. This high accuracy was verified by a large number of photogrammetric and tacheometric measurements. The high accuracy qualifies airborne laser profiling, amongst photogrammetry and tacheometry, as a method for high precision topographic terrain survey.

I. Einführung und Zielsetzung

1. Methoden der topographischen Geländeaufnahme

Topographische Vermessungen haben die Herstellung und Fortführung von topographischen Karten zum Ziel. Der Inhalt topographischer Karten umfaßt die Situation, die Geländeoberfläche, thematische und administrative Sachverhalte, einschließlich des Namensguts. Unter der Situation wird die lagemäßige Darstellung der topographischen Gegenstände verstanden. Darunter fallen die Siedlungen, die Gewässer und die Verkehrswege. Das Problem der Darstellung der räumlichen Geländeoberfläche in einer zweidimensionalen Kartenebene führte zu vielfältigen kartographischen Lösungen, die sich unter den Aspekten der Anschaulichkeit und geometrischen Genauigkeit beurteilen lassen (s.z.B. Imhof 1965). Heutzutage wird eine geometrisch genaue Darstellung des Geländes durch Höhenpunkte, Höhenlinien und Höhenschichten bevorzugt. Der Begriff der topographischen Karte assoziiert die Vorstellung eines aus Papier bestehenden Kartenblattes. Im Zeitalter der Computertechnik ist dies aber nur eine mögliche Form; es ist abzusehen, daß die digitale Bearbeitung und Speicherung des Karteninhaltes in raumbezogenen Informationssystemen (z.B. LIS, GIS) sich zum allgemeinen Standard entwickeln wird. Auf dem Teilbereich der Geländeinformation wurde dieser Schritt bereits weitestgehend vollzogen: das Ergebnis der topographischen Vermessungen des Geländes wird als Digitales Geländemodell (DGM) aufbereitet, wobei das DGM unabhängig von einem Kartenwerk als eigenständiges Produkt angesehen werden kann.

Die Entwicklung des Vermessungswesens führte dazu, daß die Situation und die Geländeoberfläche getrennt bearbeitet wird. Für beide Aufgabenstellungen haben sich spezialisierte Vermessungsverfahren herausgebildet. Die vermessungstechnische Erfassung der Geländeoberfläche wird mit den Methoden der topographischen Geländeaufnahme vorgenommen. In der Praxis eingeführte und seit langem bewährte Methoden sind die Tachymetrie und die Luftbildphotogrammetrie. Bei der Tachymetrie, als terrestrisches Vermessungsverfahren, werden die Messungen direkt am Objekt, das heißt unmittelbar an der Erdoberfläche vorgenommen. Der personelle Aufwand ist erheblich, so daß diese Methode nur zur Aufnahme von kleinen Flächen eingesetzt wird. Die Messungen der Photogrammetrie werden in Luftbildern durchgeführt, sie beziehen sich somit auf Abbildungen des Objektes. Die spezifischen Merkmale der Photogrammetrie, im Hinblick auf die topographische Geländeaufnahme, sind eine hohe Flächenleistung bei relativ geringem Personaleinsatz und eine homogene Genauigkeitsverteilung der Meßergebnisse. Die Grenzen des Einsatzes der Luftbildphotogrammetrie sind dort zu finden, wo keine Abbildung der Erdoberfläche möglich ist, beispielsweise wenn durch Vegetation oder Bebauung die Sicht auf die Erdoberfläche verdeckt ist.

In den letzten Jahren haben sich durch die Entwicklung neuartiger Sensoren neue Perspektiven für die topographische Geländeaufnahme ergeben. Die Beschäftigung mit neuen Sensoren hat im wesentlichen zwei Zielsetzungen. Zum einen soll in den Gebieten, namentlich in Waldgebieten, von denen keine photogrammetrische Geländeaufnahme möglich ist, ein Verfahren bereitgestellt werden können, das durch sein Meßprinzip die unmittelbare Aufnahme der Erdoberfläche gestattet. Zum anderen läßt sich durch einen weitestgehend automatisierten Meßvorgang und die sich anschließend vollständig digitale Auswertung der Meßdaten ein gegenüber der Photogrammetrie beschleunigter Verfahrensablauf bei geringem Personaleinsatz erzielen. Insbesondere im Bereich der Fernerkundung wird die Entwicklung neuartiger Sensoren betrieben, deren Einsatz auch für die topographische Geländeaufnahme von Flugzeugen aus in Frage kommen kann. Zu nennen sind die auf Mikrowellen- und Lasertechnik basierenden Sensoren, die das Gelände im sogenannten Ranging-Verfahren aktiv abtasten, und die passiven Sensoren, die die von der Erdoberfläche abgegebene Strahlung oder reflektiertes Sonnenlicht empfangen, wie zum Beispiel Multispektralsensoren.

In dieser Arbeit wird die Laser-Profilmessung vom Flugzeug aus als ein neues Verfahren zur topographischen Geländeaufnahme behandelt. Die Motivation, sich mit dieser Methode zu beschäftigen, entsprang ursprünglich der Suche nach modernen Alternativen zur topographischen Geländeaufnahme in Waldgebieten. Der Einsatz dieser Methode vom Flugzeug aus verspricht eine Durchdringung der Vegetationsschichten, um Messungen direkt am Waldboden vornehmen zu können. Gegenüber Mikrowellenverfahren kann eine hohe Genauigkeit des Meßergebnisses erwartet werden.

2. Prinzip eines Laser-Profilmeßsystems

Die wesentlichen Prinzipien der Laser-Profilmessung sollen einführend kurz erläutert werden. Dabei beschränkt sich dieser Abschnitt auf eine schematische Darstellung; Einzelheiten werden in Teil II behandelt.

Das charakterisierende Meßinstrument eines Laser-Profilmeßsystems ist ein Laserdistanzmesser, der in einem Flugzeug installiert ist und reflektorlos die Strecke zur Erdoberfläche mißt. Um die Koordinaten des Laserpunktes - das ist der Zielpunkt des Laserstrahls auf der Erdoberfläche - berechnen zu können, muß die Position des Flugzeuges und die Neigung des Laserstrahls gegenüber einem erdfesten Koordinatensystem bekannt sein. Die Punktbestimmung durch Laser-Profilmessungen besteht somit aus zwei Teilproblemen: die reflektorlose Streckenmessung mit Laserdistanzmesser vom Flugzeug aus und die Sensororientierung.

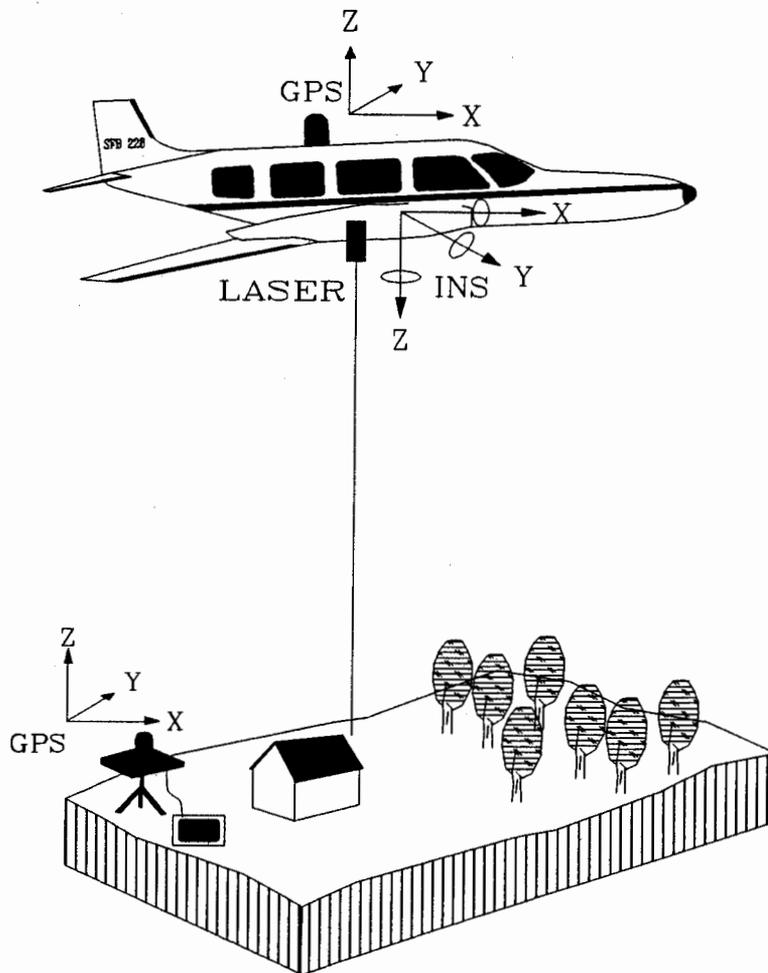


Abb. I.2.1 Prinzip der Laser-Profilmessung

Die für die topographische Geländeaufnahme erforderliche Flächendeckung wird durch Befliegen des aufzunehmenden Geländes in mehreren, in der Regel parallel ausgerichteten Profilen erreicht. Dies gilt sowohl für die in dieser Arbeit ausschließlich behandelte Laser-Profilmessung, bei der die Messungen nur punktwise entlang des geflogenen Profiles vorgenommen werden, als auch für scannende Lasermeßsysteme, die bei einem Überflug jeweils einen gewissen Geländestreifen entlang der Flugrichtung aufnehmen können. Der Abstand der Profile richtet sich nach der erforderlichen und gewünschten Genauigkeit des Endproduktes in Abhängigkeit von der morphologischen Bewegtheit des Geländes. Vor der Laser-Profilbefliegung müssen diese Faktoren abgeschätzt werden, um sie in der Flugplanung zu berücksichtigen.

Die prinzipiellen Merkmale der topographischen Geländeaufnahme durch Laser-Profilmessung sollen im Vergleich zum photogrammetrischen und tachymetrischen Verfahren kurz aufgezeigt werden. Gegenüber der Photogrammetrie zeichnet sich die Laser-Profilmessung durch ihre Anwendbarkeit in drei Bereichen aus, in denen photogrammetrische Messungen nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen durchführbar sind:

- Gebiete, in denen durch Vegetation keine Sicht auf die Erdoberfläche gegeben ist (Waldgebiete)
- Gebiete, in denen mangels Textur in den Luftbildern keine oder nur schwer eine Stereomessung vorgenommen werden kann (z.B. Sandflächen, Watt, Schnee- und Eisflächen)
- Gebiete, in denen eine Aerotriangulation durch problematische Blockgeometrie nur erschwert oder nicht durchführbar ist. Hier ist vor allem an die Befliegung von Küstenregionen zu denken.

Allerdings ist ein gegenüber der Luftbildphotogrammetrie erhöhter Flugaufwand erforderlich, um eine hohe Genauigkeit der Geländeaufnahme zu erreichen. Photogrammetrie und Laser-Profilmessung heben sich gegen die Tachymetrie ab durch die hohe Flächenleistung bei geringem Personaleinsatz und die Möglichkeit, terrestrisch schwer zugängliches Gelände (z.B. Gebirgslandschaft oder tropischer Regenwald) vom Flugzeug aus aufzunehmen.

Die vollständig digitale Datenerfassung und die damit ermöglichte vollautomatische Datenauswertung stellen wesentliche Eigenschaften dar, die die Laser-Profilmessung zu einer modernen Methode mit Zukunftsperspektive macht. Die Laser-Profilmessung erhebt zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht den Anspruch, die photogrammetrischen und tachymetrischen Methoden der topographischen Geländeaufnahme in der Genauigkeit des Endproduktes zu übertreffen. Die heute schon erreichbare Genauigkeit wird aber in derselben Größenordnung wie diese Verfahren liegen (s. Teil IV).

3. Überblick über existierende Laser-Profilmeßsysteme

Vom Standpunkt der Photogrammetrie aus betrachtet hat sich die Laser-Profilmessung als eigenständige Methode zur topographischen Geländeaufnahme aus der Aerotriangulation mit Laser-Airborne Profile Recorder (Laser-APR) entwickelt. Bereits Zarzycki (1972) weist auf die Dualität der Laser-Profilmessungen hin, die einerseits als zusätzliche Parameter zur Sensororientierung in der Aerotriangulation dienen, andererseits zur Ableitung von Geländeprofilen herangezogen werden können. Die topographische Geländeaufnahme von Waldgebieten war der Ausgangspunkt für die wissenschaftliche Beschäftigung mit Laser-Profilmessungen an der Universität Stuttgart. Ackermann (1973) postuliert die Verwendung von hochauflösenden Laser-APR Messungen in Verbindung mit der gemeinsamen Blockausgleichung als Lösung der problematischen Höhenerfassung in Waldgebieten für die topographischen Karten der Maßstäbe 1:25000 und 1:50000 (evtl. sogar für die Deutsche Grundkarte 1:5000) zu gegebener Zeit zu prüfen. In den USA und in Australien standen dagegen Aufgabenstellungen, die dem hydrographischen und geowissenschaftlichen Bereich zuzurechnen sind, mehr im Mittelpunkt des Interesses. Beispielhaft werden hier die Arbeiten des NASA Goddard Space Flight Center (Hoge et al. 1980) und der Royal Australian Navy (Myres 1983) genannt, die sich mit ozeanographischen Fragestellungen, mit der Bathymetrie und der Küstenlinienüberwachung beschäftigen, sowie die Entwicklungen des US Geological Survey in Zusammenarbeit mit dem Charles Stark Draper Laboratory für die Flußbett-Kartierung und für geologische Untersuchungen (Starr und Chapman 1983, Chapman 1986, Chapman et al. 1988).

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann mit dem Begriff Laser-Profilmessung nicht von einem festumrissenen System ausgegangen werden. Die an den verschiedenen Institutionen realisierten Systeme unterscheiden sich alle sowohl in den verwendeten Systemkomponenten als auch in den zugrundeliegenden Aufgabenstellungen. Jedoch führen sowohl die für topographische als auch für hydrographische und andere Anwendungen konzipierten Systeme zu Entwicklungen, denen ein gemeinsames Meßprinzip zugrunde liegt, und die sich deshalb unter dem Begriff der Laser-Profilmessung einordnen lassen.

Die Lösung des Orientierungsproblems stellte bei der Realisierung eines hochgenauen Laser-Profilmeßsystems bislang stets das größte Hindernis dar. So litten die ersten experimentellen Entwicklungen in den 70er Jahren unter dem hohen technischen Aufwand, den die Sensororientierung erforderte, und der trotz allem nur zu einer geringen absoluten Genauigkeit der Laserpunkte führte. Erst mit dem NAVSTAR Global Positioning System (GPS) steht weltweit ein Hilfsmittel zur Verfügung, mit dem auch die Positionen im Flugzeug hochgenau bestimmt werden können. Damit kann von einer Laser-Profilbefliegung ein wirtschaftlich und qualitativ zufriedenstellendes Ergebnis erwartet werden.

In Tabelle I.3.1 sind einige realisierte Laser-Profilmeßsysteme zusammengefaßt. Die Tabelle erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, aufgeführt sind lediglich die dem Autor bekannt gewordenen Systeme. Auf Einzelheiten soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da im Laufe der Arbeit auf einzelne Aspekte Bezug genommen wird. Bei dem in der letzten Tabellenspalte angegebenen System handelt es sich um die Systemkonfiguration auf die sich die in dieser Arbeit vorgestellten empirischen Untersuchungen (s. Teil IV) beziehen. Diese Experimente konnten im Rahmen des DFG Sonderforschungsbereichs 228 "Hochgenaue Navigation - Integration geodätischer und navigatorischer Methoden" der Universität Stuttgart durchgeführt werden.

Generell kann festgestellt werden, daß die aufgeführten Systeme entweder lediglich zu einzelnen Versuchen dienen, das Experimentierstadium also nicht verlassen haben, oder als Prototypen anzusehen sind, die speziell auf die Bedürfnisse einzelner Firmen und Institutionen zugeschnitten sind und nicht ohne weiteres übertragbar sind. Die für viele Anwendungsbereiche sehr erfolgversprechende Laser-Profilmessung ist somit zum Stadium eines routinemäßigen, praktischen Einsatzes bislang noch nicht vorgedrungen. Weiter fällt auf,

| | | | | | | | |
|--------------------|--|--|--|---|--|--|---|
| Institution | NASA Goddard Space Flight Center | US Geological Survey, Charles Stark Drapper Lab. | Mc Elhanney Geosurvey LTD | Nortech Surveys, Calgary Canada | University of British Columbia, Vancouver Canada | Royal Australian Navy, Thorn EMI Electronics | Uni Stuttgart, Inst. f. Photogrammetrie |
| Name | AOL Airborne Oceanographic Lidar | APTS Aerial Profiling of Terrain System | MAPR | ALPTS II Airborne Laser Terrain Profiling System II | Airborne Laser System | LADS Laser Airborne Depth Sounder | ALPS Airborne Laser Profiling System |
| Aufgabe | Ozeanographie, Bathymetrie, Topographie, Forstwissenschaft | Geologie, Topographie, Flußbett-Kartierung | Trassierung von Straßen, Pipelines, u.a. | Topographische Aufnahme in Waldgebieten | topographische Geländeaufnahme | Hydrographie bis 30m Wassertiefe | topographische Geländeaufnahme |
| Lasersensor | Eigenentwicklung Zweifarben-Laserscanner | gepulster GaAs-Laser | Holometrix LRY-1000 | Optech Model 501 oder ACCI PRAM III | ACCI | Zweifarbener NdYAG Laser | Optech Model 501 |
| Sensororientierung | Litton LTN-51 | INS, Lasertriangulation | Litton Auto-Surveyer DASH II, Trimble 4000 SX | Ferranti FILS II | Litton LTN-51 | Cubic Western ARGO DM54 | Sercel TR55-B, Honeywell Lasernav I |
| Plattform | versch. Flugzeuge der NASA | deHavilland Twin Otter | Flugzeug oder Helikopter | Bell 2068 Helikopter | DC-3 | Fokker F27 | Dornier Do 128 TU Braunschweig |
| Besonderheiten | 35mm-Filmkamera | Kalibrierung mit im Gelände aufgestellten Reflektoren, hohe absolute Genauigkeiten | Hasselblad 70mm Spotting-Kamera, versch. Projekte weltweit | Horizontierung des Laserstrahls über INS | Photogrammetrische Überprüfung mit Wild RC-10 | regelmäßige Überfliegung von 6 Kontrollpunkten | Kalibrierung über topographische Punkte |
| Literatur | Krabill et al. 1984, Krabill und Swift 1987 | Hursh 1977, Mammou und Rogers 1986, Chapman et al. 1988 | Blair et al. 1990, Blair und McLellan 1984 | Engler 1983, Leclair und Crago 1986 | Schreier et al. 1984 | Calder 1980, Myres 1983 | Lindenberger 1989, vorliegende Arbeit |

Tab. I.3.1 Überblick über realisierte Laser-Profilmeßsysteme

daß bei vielen realisierten Systemen ein schlüssiges Konzept zur Auswertung der Laser-Profilmessungen fehlt, das alle Phasen bis zur Ableitung eines Digitalen Geländemodells umfaßt. Im Widerspruch zur voll-digitalen Systemkonzeption wird häufig eine manuelle Analyse der gemessenen Laserpunkte vorausgesetzt.

4. Aufgabenstellung

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist eine geschlossene Darstellung der Laser-Profilmessung zur topographischen Geländeaufnahme. Dabei sollen sowohl die technischen Voraussetzungen zur Realisierung eines Laser-Profilmeßsystems untersucht werden, als auch ein vollständiges Konzept zur Auswertung und Analyse der Meßdaten erstellt werden.

Der Anwendungsbereich der Laser-Profilmessung wird in dieser Arbeit auf die topographische Geländeaufnahme beschränkt. Das Ergebnis einer Befliegung und ihrer Auswertung soll in der Form eines Digitalen Höhenmodells vorgelegt werden. Spezielle Anwendungen, die sich durch geringfügige Modifikationen des Systemkonzeptes ergeben könnten, werden hier nicht berücksichtigt (z.B. hydrographische Anwendungen durch den Einsatz eines Mehrfarbenlasers oder Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Fernerkundung durch Spektralanalyse des reflektierten Laserlichts). Daneben beschränkt sich die Arbeit ausschließlich auf die profilweise, entlang des Flugweges aufzunehmenden Messungen, obwohl an verschiedenen Stellen Laserscanner entwickelt und auch in Flugzeugen erprobt werden. Zur Verwirklichung der Zielsetzung können einzelne Teilaufgaben formuliert werden:

1. Systemintegration

Bei der Erläuterung des Prinzips der Laser-Profilmessung in 1.2 wurden zwei Problemkreise erkannt: die reflektorlose Distanzmessung mit einem Lasermessinstrument vom Flugzeug aus und die vollständige Sensororientierung, das heißt Positions- und Neigungsbestimmung des Laserstrahls im Raum. Für beide Aufgaben können heute von der Geräteindustrie Lösungen zur Verfügung gestellt werden. Instrumente zur Laserdistanzmessung werden bereits speziell für die Bedürfnisse der Laser-Profilmessung von einigen Herstellern angeboten. Zur Sensororientierung wird in dieser Arbeit das NAVSTAR Global Positioning System zur Positionsbestimmung und ein Inertiales Navigationssystem (INS) zur Neigungsbestimmung herangezogen. Beide Systeme können in Flugzeugen eingesetzt werden und haben ihre Leistungsfähigkeit in anderen Anwendungsbereichen bewiesen. Das in dieser Arbeit zu entwickelnde Systemkonzept kann sich somit auf allgemein zugängliche Systemkomponenten stützen und grenzt sich dadurch von Systemen ab, die Eigenentwicklungen und Prototypen als Systemkomponenten erproben.

Die Aufgabe der Systemintegration ist es nun, die einzelnen Systemkomponenten zu einem Laser-Profilmeßsystem zusammenzuführen. Dabei spielen neben den Meßfunktionen der erwähnten Meßinstrumente die Steuerung des Meßprozesses und die Datenaufzeichnung eine wesentliche Rolle.

2. Systemkalibrierung

Die Notwendigkeit der Systemkalibrierung ergibt sich durch die Verwendung mehrerer Meßinstrumente, deren Meßgrößen in einen gegenseitigen Bezug gesetzt werden müssen. Die Kalibrierung eines aus mehreren Komponenten bestehenden Meßsystems stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Bei der Laser-Profilmessung wird die Aufgabe dadurch erschwert, daß die Kalibrierung nicht vollständig unter kontrollierbaren Laborbedingungen durchgeführt werden kann, sondern auch die Auswertung einer Befliegung notwendig macht. Die Genauigkeit und letztendlich auch die Leistungsfähigkeit der Laser-Profilmessung wird entscheidend davon abhängen, ob es gelingt, ein in der Praxis ausführbares und durchgreifendes Konzept zur Systemkalibrierung zu entwickeln.

3. Datenauswertung

Die Datenauswertung umfaßt die Aufbereitung der Meßwerte der einzelnen Systemkomponenten und die Berechnung der Koordinaten der gemessenen Laserpunkte in einem vom Benutzer definierten Koordinatensystem. Die Aufgabe besteht im wesentlichen in der Beschreibung der Beziehungen zwischen den beteiligten Koordinatensystemen.

4. Ableitung des Digitalen Geländemodells

Ehe sie zur Berechnung des Digitalen Geländemodells herangezogen werden können, müssen die gemessenen Laserpunkte der einzelnen Flugprofile analysiert und bearbeitet werden. Ziel ist die Ableitung der

Geländeprofile, die als eindimensionale Vorstufe zum digitalen Höhenmodell anzusehen sind. Die Aufgabe besteht in der Entwicklung eines mathematischen Modells, das sich zur Bearbeitung von Laserprofilen eignet. Eine wesentliche Teilaufgabe ist dabei die Trennung der verwertbaren Laserpunkte, die sich auf die Erdoberfläche beziehen, von den nicht geeigneten Punkten auf topographisch nicht-relevanten Objekten (Vegetation, Bebauung). Dabei wird angestrebt, daß die Analyse und Modellbildung ohne manuelle Eingriffe vollautomatisch als Computerprogramm durchgeführt werden kann.

Anhand von empirischen Untersuchungen soll schließlich die Leistungsfähigkeit eines Laser-Profilmeßsystems überprüft werden. Die Anforderungen, die an das System bezüglich der Genauigkeit der topographischen Geländeaufnahme gestellt werden, sollen sich an den Vorgaben der Deutschen Grundkarte 1:5000 orientieren.

5. Überblick

Zur Bearbeitung der oben definierten Aufgabenstellung wird eine Untergliederung dieser Arbeit in drei Hauptteile vorgenommen.

In Teil II werden die Systemkomponenten eines Laser-Profilmeßsystems vorgestellt. Dabei entspricht die vorgeschlagene Systemkonfiguration dem Laser-Profilmeßsystem, das vom Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit dem Institut für Flugführung der Technischen Hochschule in Braunschweig realisiert werden konnte und mit dem erstmals im Sommer 1988 Testbefliegungen durchgeführt wurden. Die Systemkalibrierung und die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte, die sehr stark von der gewählten Systemkonfiguration abhängen, werden ebenfalls im Teil II behandelt.

In Teil III werden die weitergehenden Auswerteschritte beschrieben. Ziel dieses Abschnittes ist die Bearbeitung der gemessenen Laserpunkte bis zu ihrer Einführung in ein digitales Höhenmodell. Die Herleitung einer geeigneten mathematischen Beschreibung zur Modellierung der Geländeprofile steht im Mittelpunkt der Ausführungen dieses Teils.

Der Teil IV ist empirischen Untersuchungen gewidmet. Die Ergebnisse verschiedener Laser-Profilbefliegungen werden aufbereitet und diskutiert. Die Untersuchungen werden unter drei Gesichtspunkten durchgeführt. Zunächst wird die Eignung des Lasersensors zur topographischen Geländeaufnahme analysiert. Die Reflexionseigenschaften über verschiedenen Formen und Bodenbedeckungen der Erdoberfläche, das Verhalten über Vegetationsflächen, insbesondere die Fähigkeit Messungen auf dem Waldboden vornehmen zu können, und die Genauigkeit der Distanzmessung bilden den ersten Teil der Untersuchungen. Der zweite Teil ist der Genauigkeitsanalyse der Laserpunkte gewidmet. Neben der Bestimmung der Höhenmeßgenauigkeit wird hier die Genauigkeit der Systemkalibrierung untersucht. Schließlich wird aus den Daten einer Laser-Profilbefliegung ein Digitales Höhenmodell abgeleitet und untersucht.

Im abschließenden Teil V werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefaßt.

II. Komponenten des Laser-Profilmeßsystems und Konzepte zur Auswertung von Laser-Profilmessungen

1. Überblick

Dieser Teil der Arbeit befaßt sich mit der Konzeption eines Laser-Profilmeßsystems. Die notwendigen Systemkomponenten werden vorgestellt und die Methoden zur Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte werden entwickelt. Entsprechend der in I.4 formulierten Aufgabenstellung werden in diesem Teil die Systemintegration, die Systemkalibrierung und die Datenauswertung behandelt. Die gemeinsame Behandlung von Hardware-Aspekten und Auswerteverfahren in einem Teil ergibt sich aus der engen Koppelung der Koordinatenberechnung mit den verwendeten Systemkomponenten.

Unter den möglichen Ansätzen zur Realisierung eines Laser-Profilmeßsystems wird ein ingenieurgemäßer Weg gewählt, der von der technischen Realisierbarkeit des Systems mit derzeit verfügbaren Systemkomponenten ausgeht. Die in Betracht kommenden Systemkomponenten werden unter folgenden Bedingungen ausgewählt:

- die Möglichkeit zur vollständigen technischen Integration der einzelnen Systemkomponente in das Gesamtsystem muß gewährleistet sein
- hohe Meßgenauigkeit
- hohe mechanische Belastbarkeit für den Einsatz im Flugzeug
- vollautomatisch ablaufender Meßprozeß
- digitale Registrierung aller Meßwerte.

Die in diesem Teil zu bearbeitende Aufgabenstellung wird in vier Teilaufgaben untergliedert. Die erste, speziellere Aufgabe beschäftigt sich mit der reflektorlosen Distanzmessung vom Flugzeug zur Erdoberfläche mittels eines Laserdistanzmessers. Die zweite, wesentlich komplexere Aufgabe ist die Beschaffung der Orientierung des Laserstrahls, um zusammen mit den Laserdistanzmessungen die Koordinaten der Laserpunkte ableiten zu können. Die mathematische Integration der Meßgrößen der einzelnen Systemkomponenten zur Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte stellt die dritte Aufgabe dar. Die vierte Teilaufgabe befaßt sich mit der Systemkalibrierung. Die Gliederung dieses Teiles II folgt entsprechend diesen vier Problemkreisen.

Der Lasersensor wird, seiner Bedeutung für die Laser-Profilmessung entsprechend, im folgenden Kapitel 2 losgelöst von den übrigen Systemkomponenten eingehender behandelt. Es werden die Eigenschaften von flugzeugtauglichen Lasersensoren beschrieben und ihr Meßprinzip erläutert.

Kapitel 3 ist den übrigen Systemkomponenten des Laser-Profilmeßsystems gewidmet. Zuerst werden die Komponenten zur Sensororientierung behandelt. Durch die Kombination von zwei verschiedenen modernen Navigationsverfahren (GPS zur Positionsbestimmung und INS zur Neigungsbestimmung) können die notwendigen Parameter der Sensororientierung direkt gemessen werden und lassen ein hochgenaues Ergebnis erwarten. Zu einem kompletten Laser-Profilmeßsystem gehören eine Reihe weiterer Komponenten, die nicht direkt mit der Ableitung von Koordinaten der Laserpunkte in Zusammenhang stehen. So werden spezielle Hilfsmittel für die Navigation des Flugzeuges benötigt. Andere Geräte, wie zum Beispiel eine Videokamera, unterstützen die Auswertung der Messungen.

Jede Systemkomponente liefert Meßwerte, die sich auf ein spezielles Koordinatensystem beziehen. Zur Auswertung der Meßwerte müssen die einzelnen Koordinatensysteme definiert werden. Die Beziehungen zwischen den Koordinatensystemen werden durch räumliche Transformationen beschrieben, deren Transformationsparameter entweder gerätespezifischer Natur sind oder sich aus geodätischen Definitionen ergeben. In Kapitel 4 werden die Koordinatensysteme eingeführt und ihre gegenseitigen Relationen formuliert. Das Ergebnis der Ausführungen des Kapitels 4 ist die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte in einem übergeordneten Bezugssystem (z.B. im System der Landesvermessung).

Das abschließende Kapitel 5 dieses Teils II der Arbeit beschäftigt sich mit der Systemkalibrierung. Es wird eine Methode entwickelt, um die in Kapitel 4 zur Berechnung der Laserpunktkoordinaten formal eingeführten Kalibrierungsparameter zu bestimmen. Dabei wird in direkt meßbare Kalibrierungsparameter und in indirekt, mit Hilfe eines Kalibrierungsfluges zu bestimmende Parameter (vergleichbar mit der Selbstkalibrie-

rung in der Aerotriangulation) unterschieden. Die indirekte Bestimmung der Kalibrierungsparameter führt zu einem Ausgleichungsansatz, der in Kapitel 5 entwickelt und diskutiert wird.

2. Eigenschaften und Meßprinzip von Lasersensoren zur Laser-Profilmessung

2.1 Vorbemerkungen

Der Begriff Laser ist ein englisches Akronym für "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission) und weist auf die Entstehung des Laserlichts hin. Seit dem ersten Vorschlag von A.L. Schawlow und C.H. Townes im Jahre 1958 und dem ersten Bau eines Rubin-Lasers im Jahre 1960 durch T. Maiman setzte eine stürmische Entwicklung dieser Technologie ein, die sich ständig neue Anwendungsbereiche erschließt. Dabei konnten zahlreiche Wissenschaften von dieser neuen Technik profitieren und sich wesentlich weiterentwickeln. Unmittelbar nach der Entwicklung der ersten Laser wurde ihre Anwendung in den Geowissenschaften erprobt. Aus dem Bereich der Fernerkundung mit Laser berichten Fiocco und Smullin (1963) von der Untersuchung der Erdatmosphäre in 60 bis 140 km Höhe. Ebenfalls 1963 begannen die Untersuchungen bei Aero Service Corporation und Spectra-Physics Incorporated zur Entwicklung eines Laser-Altimeters, das in der Aerotriangulation den bis dahin verwendeten Radar-Airborne Profile Recorder (Radar-APR) ersetzen und ein höheres Genauigkeitsniveau bringen konnte. Ruddock (1965) und Schwieder (1968) berichten über die ersten Laser-APR Flüge mit diesem System.

Die Distanzmessung von Flugzeugen aus zur topographischen Geländeaufnahme stellt eine Reihe von Anforderungen an das zu verwendende Meßinstrument, die damit begründet sind, daß die Distanzmessung vom relativ schnell bewegten Flugzeug aus reflektorlos an natürlichen Oberflächen mit sehr unterschiedlichen Reflexions- und Streuungseigenschaften durchgeführt werden muß. Durch ihre spezifischen Eigenschaften ist die auf Lasertechnik basierende Distanzmessung zur Lösung dieser Aufgabe in hervorragender Weise geeignet. Zu den wesentlichen Merkmalen, die Lasersensoren auszeichnen, zählen die hohe zu erbringende Lichtenergie, die kurze Impulsdauer, die hohe Meßrate und die kleine Divergenz des Laserstrahls. Im Vergleich zu Mikrowellenverfahren zeichnet sich die Lasertechnik durch die gute Definition des Reflexionsortes (kein Eindringen in die Vegetation oder in die Erdoberfläche) und durch die hohe Genauigkeit, mit der die Distanzmessung durchgeführt werden kann, aus.

In diesem Kapitel werden einige Eigenschaften der Lasertechnik im Hinblick auf den Einsatz in einem Laser-Profilmeßsystem angesprochen und das Meßprinzip der Laserdistanzmessung erläutert. Auf eine tiefere Darstellung der Lasertechnik kann jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden; sowohl was die Grundlagen als auch spezielle Anwendungen der Laser betrifft, kann auf eine umfangreiche Literatur zurückgegriffen werden. Einen Einstieg in die Thematik gibt z.B. Tradowsky (1979).

Die folgenden Abschnitte sollen zum Verständnis der für die Laser-Profilmessung wichtigen Prinzipien beitragen. Abschnitt 2.2 beschreibt einige Grundlagen der Lasertechnik, spricht die Wechselwirkungen an, die beim Auftreffen von Laserlicht auf Materie zu beobachten sind, und beschäftigt sich mit den Faktoren, die den Einsatzbereich der Laserdistanzmessung bestimmen. In Abschnitt 2.3 werden die Komponenten eines Laserdistanzmessers zur Laser-Profilmessung vorgestellt. Der abschließende Abschnitt 2.4 untersucht die erreichbare Genauigkeit von Laserdistanzmessungen.

2.2 Grundlagen der Lasertechnik

2.2.1 Physikalische Eigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften des Laserlichts unterscheiden sich wesentlich von konventionellen Lichtquellen. Zu diesen Eigenschaften zählen die spektrale Reinheit, die kleine Strahldivergenz, die hohe zeitliche und räumliche Kohärenz und die hohe Intensität des Laserlichts. Ausgehend von den ersten Rubin-Lasern und den danach entdeckten Helium-Neon-Lasern (HeNe-Laser) sind heutzutage eine große Anzahl von Materialien bekannt, die zur Erzeugung von Laserlicht angeregt werden können. Das verwendete

Material bestimmt die Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten des Lasers weitgehend. Man untergliedert die Laser nach der Art des aktivierten Materials in Gaslaser (z.B. HeNe), Flüssigkeitslaser, Festkörperlaser (z.B. Rubin, Nd-YAG) und Halbleiterlaser (z.B. Gallium-Arsenid). Für praktische Anwendungen spielt die Art und Weise, wie der Laser betrieben werden kann, eine wichtige Rolle. So können Gaslaser das Licht kontinuierlich abgeben; man spricht dann von einem CW-Laser (Continuous Wave Laser). Festkörper- und Flüssigkeitslaser arbeiten im Impulsbetrieb. Halbleiterlaser können das Laserlicht sowohl kontinuierlich oder gepulst erzeugen. Maximale Spitzenleistungen werden bei Festkörperlaser durch das sogenannte Q-switching erzielt (Riesenimpuls), einem speziellem Verfahren zur Erzeugung von nicht-symmetrischen Impulsen. In Abbildung II.2.1 sind die verschiedenen Signalformen dargestellt.

Anhand von zwei Lasertypen, dem Nd-YAG und Gallium-Arsenid (GaAs) Laser, die hauptsächlich zur Distanzmessung aus Flugzeugen eingesetzt werden, sollen einige charakteristischen Eigenschaften aufgezeigt werden. Technische Daten sind den Produktbeschreibungen und technischen Handbüchern der Herstellerfirmen entnommen (z.B. Holometrix, Cambridge Massachusetts und Optech, Downsview Ontario).

Der Nd-YAG Laser gehört zu der Klasse der Festkörperlaser. Das aktive Material Neodymium (Nd) befindet sich in einem Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) Kristall als Trägermaterial. Die Wellenlänge des emittierten Lichtes liegt mit 1064nm im nahen Infrarot. Mittels Q-switching lassen sich hohe Leistungen bis maximal 50MW erzeugen, die in einem 10 bis 35ns weiten Impuls abgegeben werden. Zur Laser-Profilmessung wird der Nd-YAG Laser mit wesentlich geringerer Leistung betrieben; dennoch lassen sich bei den kommerziell erhältlichen Geräten maximale Reichweiten von bis zu 10km erzielen, womit nahezu sämtliche Anwendungen vom Flugzeug aus durchführbar sind. Lediglich die relativ geringe Pulswiederholungsrate von 10 bis 20Hz kann eine gewisse Einschränkung für die Anwendung bedeuten.

Gallium-Arsenid ist ein Halbleitermaterial, das zur Lichterzeugung angeregt wird. Halbleiterlaser unterscheiden sich generell sowohl in ihrer Konstruktion und Funktionsweise als auch in den Eigenschaften des erzeugten Lichtes von den sonstigen Lasertypen. Die Größe und das Aussehen eines Halbleiterlasers ist vergleichbar mit anderen Halbleitererzeugnissen (zum Beispiel Transistoren). Die kompakte Bauweise und die günstigen Herstellungskosten bei Massenproduktion sind sicher wesentliche Gründe, daß Halbleiterlaser eine immer größere Verbreitung mit vielfältigen Anwendungen finden. Das Licht der Halbleiterlaser hat nicht die hohe spektrale Reinheit der anderen Lasertypen. Während zum Beispiel bei HeNe-Lasern die spektrale Bandbreite 0.001nm beträgt, liegt sie bei Halbleiterlasern bei 2-3nm. Dabei kann das Halbleitermaterial in einem relativ großen Spektralbereich zur Strahlung angeregt werden, der bei Gallium-Arsenid von 845 bis 905nm reichen kann. Weitere Unterschiede zu anderen Lasertypen bestehen in der wesentlich geringeren Ausgangsleistung, die maximal etwa 200W erreichen kann, und in der großen Strahldivergenz, die einige Grad betragen kann. Derzeit wird in allen Laserdistanzmeßgeräten, die mit Halbleiterlasern arbeiten, Gallium-Arsenid als Halbleitermaterial verwendet. Zur Laser-Profilmessung werden Laser hergestellt, die mit einer Wellenlänge von 904nm arbeiten. Bei einer Impulsleistung von 150W kann eine maximale Reichweite von 500 bis 600m erreicht werden. Die Impulsdauer beträgt bei diesen Lasern 15ns. Im Gegensatz zum Nd-YAG Laser kann mit einer sehr hohen Impulswiederholungsrate bis zu 4kHz gearbeitet werden.

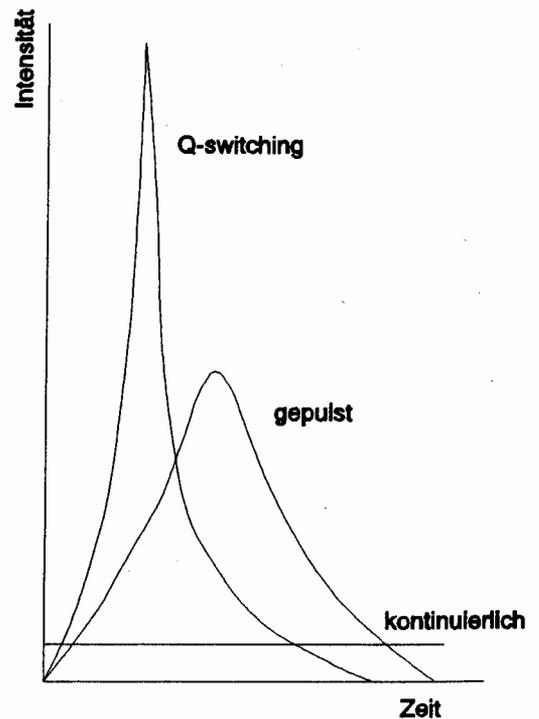


Abb. II.2.1 Signalformen des Lasers

2.2.2 Wechselwirkung Laser - Materie

Beim Auftreffen von Laserstrahlung auf Materie können verschiedenartige Wechselwirkungen beobachtet werden, die sowohl von den Materialeigenschaften als auch von der Wellenlänge und Energie der Laserstrahlung abhängen. Die Wechselwirkungen können unter dem energetischen und geometrisch-optischen Aspekt betrachtet werden. Hochenergetische Wechselwirkungen, die beispielsweise in der Medizin oder im Maschinenbau zum Schneiden von Materialien zum Tragen kommen, sollen hier nicht betrachtet werden.

Die energetischen Wechselwirkungen teilen sich in die elastische und unelastische Streuung. Bei elastischer Streuung findet kein Energieaustausch mit der Materie statt. Darunter fällt die Streuung des Laserlichts an der molekularen Struktur der Atmosphäre (Rayleigh- und Mie-Streuung). Bei unelastischer Streuung (Ramanstreuung) nimmt das bestrahlte Material die Energie der Strahlung auf. Hier unterscheidet man wiederum Absorption und Fluoreszenz. Die bei Absorption vom Objektmaterial zurückkommende Strahlung ist stark gedämpft; bei totaler Absorption kommt keine Strahlung zurück. Bei Fluoreszenz wird die Strahlung zeitlich verzögert mit einer veränderten, niedrigeren Frequenz zurückgegeben. Für das jeweilige Objektmaterial kann eine charakteristische Frequenzverschiebung beobachtet werden, die in der Laser-Fernerkundung (Laser Remote Sensing) mittels Spektralanalyse untersucht wird (z.B. Measures 1984).

Für die Laserdistanzmessung ist die Beeinflussung der Laserstrahlung durch die Erdatmosphäre von Interesse. Die atmosphärische Absorption wird hauptsächlich durch die Streuung des Laserlichts an Staubpartikeln und Wasserdampf verursacht. Die Energie der Laserstrahlung wird dadurch abgeschwächt und die maximale Reichweite des Laserinstruments beschränkt. Die Energieabschwächung folgt in Abhängigkeit von der zurückgelegten Entfernung einer Exponentialfunktion. Temperatur, Luftdruck, und Partialdruck des Wasserdampfes sind quantifizierbare Größen, die die Energieabschwächung beeinflussen. Darüberhinaus verändern diese Größen den Brechungsindex der Erdatmosphäre, wodurch die geradlinige Ausbreitung des Lichtes gestört wird (Refraktion).

Die Reflexion des Laserstrahls zählt zu den geometrisch-optischen Wechselwirkungen. Der auf die Erdoberfläche auftreffende Laserstrahl wird in der Regel diffus reflektiert, das bedeutet, daß der auftreffende Laserstrahl nicht gerichtet, sondern über den Raum verteilt zurückgestrahlt wird. Gerichtete Reflexion kann über Flächen (z.B. Glas- oder Metallflächen) auftreten, die wie Spiegelflächen wirken.

Die diffuse Reflexion kann neben dem geometrischen auch unter dem energetischen Gesichtspunkt betrachtet werden, da die räumliche Verteilung der reflektierten Strahlung auch eine Verteilung der Energie bewirkt. Dieser Effekt ist abhängig von der Richtcharakteristik der jeweiligen Oberfläche und wird durch die Reflexivität (oder Reflexionsgrad) ρ ausgedrückt. Die Reflexivität von natürlichen Oberflächen variiert in einem großen Bereich von 10% - 30% für Sand, 30% - 50% für Vegetationsflächen und 50% - 80% für Schnee- und Eisflächen. Über Wasserflächen ist die Reflexivität von der Bewegtheit der Wasseroberfläche abhängig: von weniger als 1% bei sehr ruhigen Oberflächen bis zu 20% bei sehr bewegten Wasserflächen.

Für die topographische Geländeaufnahme durch Laser-Profilmessung spielt die Reflexion über bewaldeten Gebieten eine besondere Rolle. Da die hauptsächlich eingesetzten Nd-YAG und GaAs Laser nahes Infrarotlicht emittieren, findet beim Auftreffen auf feste Materie keine Durchdringung des Materials statt (im Gegensatz zu Mikrowellen). Wird bei der Laser-Profilmessung trotzdem von Durchdringung bei der Befliegung von Waldgebieten gesprochen, dann ist damit die Fähigkeit des Lasers gemeint, durch Lücken in den Vegetationsschichten bis auf den Waldboden vordringen zu können. Dabei können von einem einzelnen Laserimpuls mehrfache Signalreflexionen beobachtet werden, wenn Teile der Lichtenergie an verschiedenen Stellen der

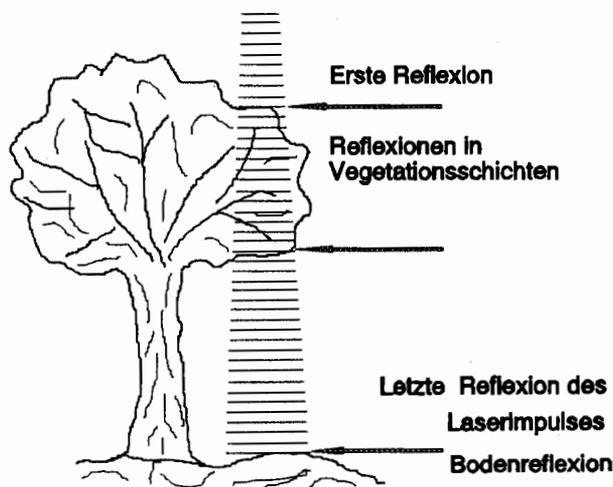


Abb. II.2.2 Mehrfache Signalreflexion an einem Baum

Vegetationsschicht reflektieren und andere Teile bis zur Erdoberfläche vordringen. Von einem ausgesandten Laserimpuls werden dann mehrere, zeitlich nacheinander eintreffende Signale im Empfänger registriert. Abbildung II.2.2 veranschaulicht die Mehrfachreflexion an einem Baum. Der Laserdistanzmesser muß so ausgelegt werden, daß in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung wahlweise die Distanzmessung mit der ersten oder letzten Reflexion des Laserimpulses durchgeführt werden kann.

Zur topographischen Geländeaufnahme wird stets die letzte Reflexion eines Laserimpulses ausgewertet. Es kann aber nicht davon ausgegangen werden, daß die letzte Reflexion als Bodenreflexion auf der Erdoberfläche erfolgt. Bei dichter Vegetation kann sie innerhalb der Vegetationsschicht liegen, wenn kein Teil des Laserimpulses bis auf die Erdoberfläche durchdringen kann. Abbildung II.2.3 zeigt eine Reihe von gemessenen Laserpunkten - jeweils die letzte im Empfänger eintreffende Reflexion - über einem Waldgebiet. Deutlich können in diesem Beispiel die Bodenreflexionen von den Reflexionen in den Vegetationsschichten unterschieden werden. Der Ort der letzten Reflexion ist nicht vorhersehbar; die Aufteilung nach Bodenreflexionen und Reflexionen in Vegetationsschichten erfolgt zufällig, je nach der örtlichen Dichte der Vegetationsbedeckung. Der Anteil der Bodenreflexionen kann nur durch ein statistisches Maß erfaßt werden und wird mit der empirisch bestimmten Durchdringungsrates zum Ausdruck gebracht (s. IV.2.2 Durchdringungsverhalten in Waldgebieten). Intensive Studien zum Reflexionsverhalten des Lasers über Waldgebieten, auch unter forstwissenschaftlichen Aspekten, wurden am NASA Goddard Space Flight Center durchgeführt; stellvertretend soll auf die Arbeiten von Nelson et al. (1984) und Nelson et al. (1988) hingewiesen werden.

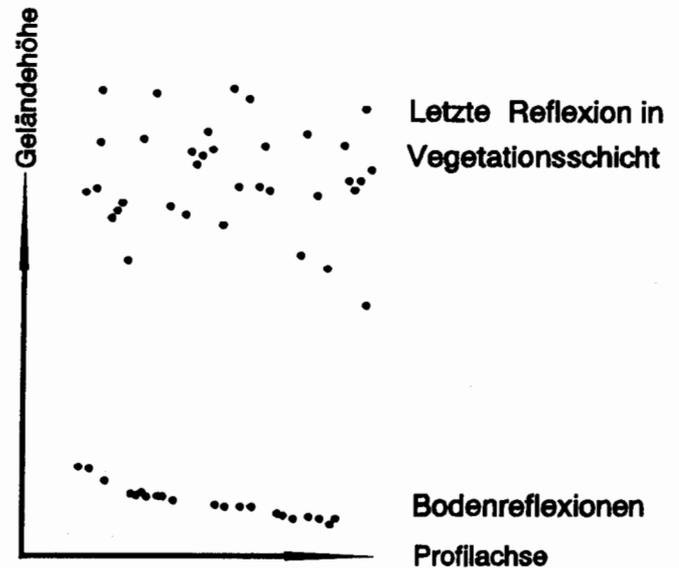


Abb. II.2.3 Letzte Reflexionen von Laserimpulsen über Waldgebiet

2.2.3 Reichweite der Laserdistanzmessung

Die Reichweite eines Laserdistanzmessers wird von der abgegebenen Leistung des Lasers, den Energieverlusten in der Atmosphäre und bei der Reflexion an der Zieloberfläche, und der Sensitivität des Empfangsteils bestimmt. Entscheidend ist, ob die vom Objekt zurückreflektierte und auf die Detektorfläche eintreffende Energie ausreicht um die Distanzmessung auszulösen. Beeinflusst wird die Reichweite im wesentlichen durch drei Faktoren, die die Energie auf dem Weg vom Laser über das Zielobjekt zum Empfangsteil abschwächen: die atmosphärische Absorption, die Reflexivität der Zieloberfläche und die geometrisch-optischen Strahlungsgesetze. Die im Empfänger eintreffende Energie P_r kann aus der vom Laser abgegebenen Energie P_t durch Anwendung der geometrischen Strahlungsgesetze, unter Berücksichtigung der atmosphärischen Abschwächung und der Reflexivität ρ der Zieloberfläche berechnet werden. Wird angenommen, daß für die Zieloberfläche die Lambertschen Strahlungsgesetze gelten, und daß sowohl die Achse der Sende- als auch der Empfangsoptik senkrecht auf der Zieloberfläche stehen, dann berechnet sich die im Empfänger eintreffende Energie zu (Tradowsky 1979):

$$P_r = P_t \cdot e^{-2\mu s} \cdot \rho \cdot A_r \cdot \frac{1}{s^2} \quad (\text{II.2.1})$$

| | | | |
|------|---------------|-------------------|----------------------------------|
| mit: | P_r | [W] | im Empfänger ankommende Leistung |
| | P_t | [W] | abgegebene Leistung des Lasers |
| | $e^{-2\mu s}$ | [-] | atmosphärische Abschwächung |
| | s | [m] | Entfernung Laser-Zielpunkt |
| | ρ | [-] | Reflexivität der Zieloberfläche |
| | A_r | [m ²] | wirksame Fläche des Empfängers |

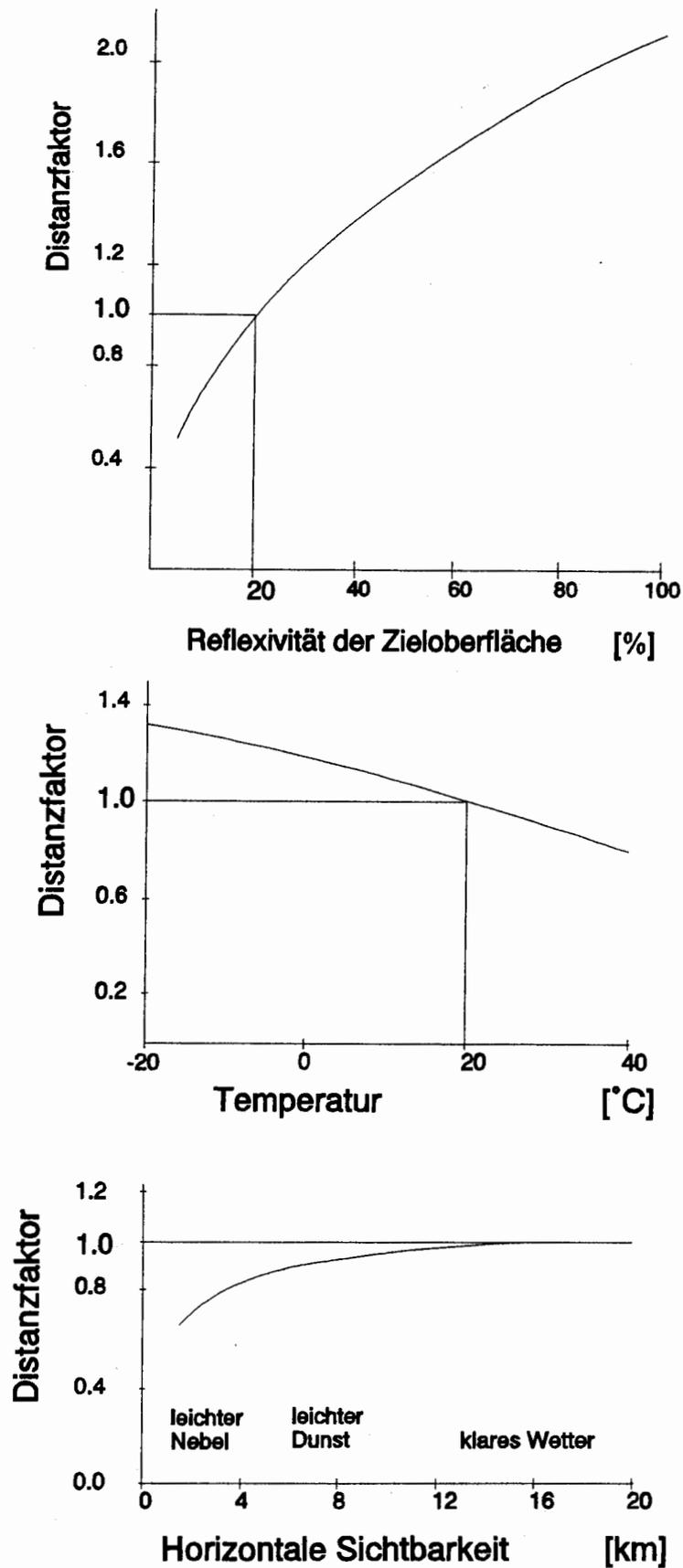


Abb. II.2.4 Reichweite des Laser in Abhängigkeit von der Reflexivität der Zielfläche, der Umgebungstemperatur und der horizontalen Sichtbarkeit

Die atmosphärische Abschwächung und die Reflexivität der Zieloberfläche sind Faktoren, die sich praktisch sehr schlecht erfassen lassen. Der Einfluß der atmosphärischen Absorption kann ersatzweise durch Messen der Umgebungstemperatur und Bestimmung der horizontalen Sichtbarkeit abgeschätzt werden. In den Diagrammen der Abbildung II.2.4 wird gezeigt, wie diese Faktoren die Reichweite der Laserdistanzmessung beeinflussen. Der Einfluß wird in der Form eines Distanzfaktors wiedergegeben. Dabei wird davon ausgegangen, daß die nominelle Reichweite eines Laserdistanzmessers (dies entspricht dem Distanzfaktor 1.0) bei 20% Reflexivität der Zieloberfläche, 20°C Umgebungstemperatur und 20km horizontaler Sichtweite 500m beträgt. Die Diagramme wurden entsprechend den Angaben in Optech (1987) angefertigt.

Das erste Diagramm in Abb. II.2.4 zeigt die Abhängigkeit der Reichweite von der Reflexivität der Zieloberfläche. Die starke Abhängigkeit der Reichweite von der Reflexivität zeigt sich im Distanzfaktor, der sich im Bereich von 0.5 bis 2.1 bewegt. Das zweite Diagramm gibt den Einfluß der Umgebungstemperatur im Bereich von -20°C bis +40°C wieder. Der Distanzfaktor variiert in diesem Bereich von 1.3 bis 0.8. Das dritte Diagramm zeigt den Einfluß der atmosphärischen Streuung als Funktion von der horizontalen Sichtbarkeit.

2.3 Komponenten eines Laserdistanzmessers

Die Distanzmessung vom Flugzeug aus für topographische Anwendungen wird bei allen bekannt gewordenen und in der Praxis erprobten Systemen nach der Methode der 2-Wege-Laufzeitmessung mit gepulsten Lasern durchgeführt. Gemessen wird die Zeit, die ein vom Laser ausgesandter und vom Objekt zurückgestrahlter Lichtimpuls für die Strecke Laser-Objekt-Empfänger benötigt. Bei bekannter Lichtgeschwindigkeit kann damit die Entfernung direkt berechnet werden. Prinzipiell kann jedoch auch das von der terrestrischen, elektrooptischen Distanzmessung bekannte Phasenmeßverfahren mit kontinuierlich emittierenden Lasern (CW-Laser) in Betracht kommen. Wehr (1989) stellt einen auf diesem Verfahren basierenden hochgenauen CW-Laser-Scanner im Experimentierstadium vor, der für topographische Aufgaben angewendet werden könnte. Trotz des höheren Genauigkeitspotentials des Phasenmeßverfahrens wird hier nur die Methode der Laufzeitmessung näher beschrieben, da nur diese die für die topographischen Aufnahme wesentliche Fähigkeit besitzt, in einfacher Weise die Mehrfachreflexionen über Vegetation zu verarbeiten.

Der schematische Aufbau eines für die Laser-Profilmessung geeigneten Laserdistanzmessers soll im weiteren kurz aufgezeigt werden. Die wesentlichen Komponenten und ihre gegenseitige Verknüpfungen sind in Abbildung II.2.5 skizziert. Die Instrumente bestehen in der Regel aus zwei getrennten Komponenten, der Sensor- und der Kontrolleinheit. Dies hat den Vorteil, daß die Sensoreinheit außen am Flugzeugrumpf installiert wird, während die Kontrolleinheit an Bord bedient werden kann.

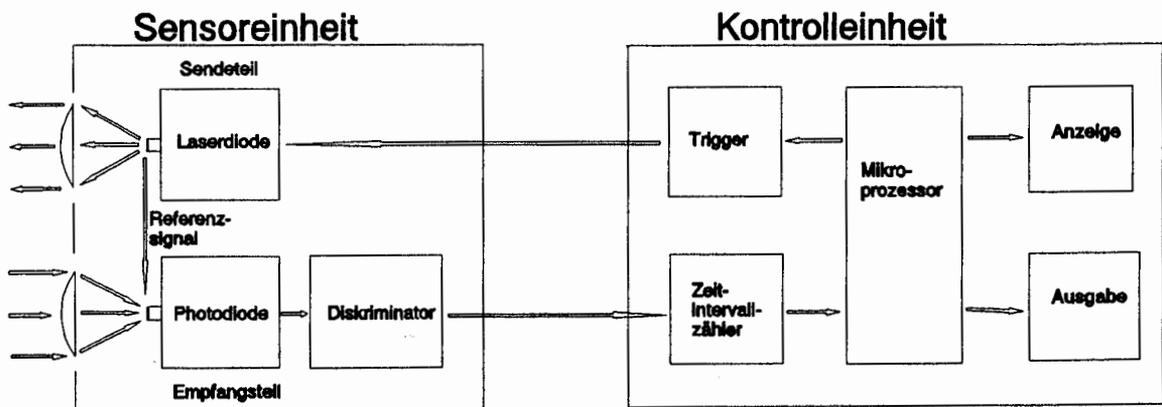


Abb. II.2.5 Prinzipieller Aufbau eines Laserdistanzmessers

(1) Sendeteil

Der Sendeteil besteht im wesentlichen aus dem eigentlichen Laser, der die Lichtimpulse generiert. Die Impulse werden in einer vom Benutzer vorgewählten Meßfrequenz abgegeben. Diese Meßfrequenz wird

vom eingebauten Trigger als elektrisches Signal erzeugt, das dann den Nd-YAG beziehungsweise GaAs-Laser auslöst. Daneben besteht die Möglichkeit, den Laser unter Umgehung des internen Triggers durch ein externes Signal direkt auszulösen. Diese Möglichkeit wird genutzt, um die Meßfrequenz des Laserdistanzmessers mit den übrigen Komponenten des Laser-Profilmeßsystems abzustimmen.

(2) Optik

Die in Flugzeugen einsetzbaren Laserdistanzmesser werden in der Regel als zweiäugige Systeme, mit getrennter Sende- und Empfangsoptik, angeboten; einäugige Systeme werden hauptsächlich für terrestrisch genutzte Instrumente eingesetzt. Die optischen Achsen der getrennten Sende- und Empfangsoptik sind parallel ausgerichtet. Die vom Laser erzeugte Strahlung wird durch die Sendeoptik abgegeben. Die optische Auslegung der Sendeoptik bestimmt die Größe des Lichtkegels auf der Erdoberfläche. Im Gegensatz zu sonstigen Laseranwendungen, wo zumeist eine möglichst kleine Divergenz des Strahlenkegels angestrebt wird, ist für die topographische Geländeaufnahme eine bestrahlte Fläche von ca. 1m Durchmesser auf der Erdoberfläche durchaus erwünscht. Dadurch wird eine gewisse Mittelung der lokalen Oberflächenrauigkeit erzielt.

Die Empfangsoptik ist so ausgelegt, daß die einfallende Strahlung auf den Empfangsteil fokussiert wird. Zwischen Empfangsoptik und Empfangsteil wird ein optisches Filter eingebaut, das nur für Licht mit der ausgestrahlten Wellenlänge in einer schmalen Bandbreite durchlässig ist. Dadurch können störende, nicht vom Laser kommende Strahlungen effektiv ausgeschaltet werden.

(3) Empfangsteil

Die durch die Empfangsoptik eintreffenden optischen Impulse werden durch einen Photodetektor (z.B. Avalanche Photodiode) in elektrische Signale umgewandelt. Mit dem Photodetektor direkt verbunden ist ein elektrischer Verstärker, der auf hohe Dynamik und hohe Geschwindigkeit ausgelegt sein muß. Photodetektor und Verstärker bilden einen eigenen Regelkreis, um die Empfindlichkeit des Systems laufend anzupassen. Dazu wird das vom Photodetektor ständig beobachtete, vom Umgebungslicht verursachte Rauschen zur Berechnung eines Schwellwertes herangezogen. Nur Signale, die diesen Schwellwert übersteigen, werden zur Auswertung an die nachfolgende Systemkomponente weitergeleitet. Damit und in Kombination mit dem optischen Filter wird gewährleistet, daß nur Signale ausgewertet werden, die tatsächlich von einem ausgesandten Laserimpuls stammen.

Das ursprünglich vom Laser erzeugte Signal wird auf dem Weg zum Zielpunkt und zurück in seiner Form verändert. Diese Variationen in der Amplitude und Signalform werden durch die atmosphärische Absorption und die Turbulenzen der Luftschichten (Scintillation) sowie durch die Reflexivität und Orientierung der Zieloberfläche verursacht. Der an den Ausgang des Verstärkers angeschlossene Diskriminator stellt sicher, daß immer an derselben Phasenstelle des eintreffenden Impulses die Zeitmessung vorgenommen wird, und löst die Zeitmessung aus. Die Zeitmessung wird in der Regel an der aufsteigenden Signalflanke vorgenommen (näheres bei Hursh et al. 1977).

(4) Laufzeitmessung

Die Laufzeit des Laserimpulses wird durch Zeitintervallmessung vorgenommen, indem die Signale eines hochfrequent schwingenden Oszillators digital gezählt werden. Die Zeitintervallmessung wird durch ein Referenzsignal gestartet. Dazu wird ein kleiner Teil des erzeugten Laserimpulses durch eine direkte Kopplung vom Sendeteil in den Empfangsteil optisch übertragen. Die Zeitintervallmessung wird vom Diskriminator gestoppt. Zusätzlich kann die Zeitintervallmessung durch ein generiertes Stoppsignal beendet werden, wenn innerhalb einer gewissen Zeit, die der maximalen Reichweite entspricht, kein Laserimpuls empfangen wird. Dadurch wird sichergestellt, daß vor der Auslösung eines neuen Laserimpulses die digitale Zeitintervallzählung wieder initialisiert wird.

Um eine Streckenauflösung von 0.1 m zu gewährleisten, müßte die Zeitmessung mit einer Frequenz von 1.5 GHz vorgenommen werden. Tatsächlich wird jedoch mit einer wesentlich geringeren Frequenz gearbeitet. Instrumente für den stationären Einsatz, wo eine Mittelbildung über mehrere Messungen möglich ist, werden in der Regel mit 15 MHz betrieben. Durch die Anwendung von speziellen Interpolationsmethoden (Vernier-Interpolation) kann die Meßgenauigkeit auch bei einfach gemessenen Entfernungen bei niedrigen Frequenzen wesentlich gesteigert werden (s. Price und Uren 1989).

Eine spezielle Auslegung des Moduls zur Laufzeitmessung ist erforderlich, um Mehrfachreflexionen unterscheiden zu können und um zu gewährleisten, daß die letzte Reflexion eines Laserimpulses abgespeichert werden kann. Je nach Aufgabenstellung soll vom Anwender gewählt werden können, ob die Laufzeitmes-

sung zur ersten oder letzten eintreffenden Reflexion durchgeführt werden soll. Bei Hursh et al. (1977) werden verschiedene Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Verwendung eines einzigen Zeitintervallzählers wird gegenüber einer Lösung mit mehreren Zählern bevorzugt. Mit Hilfe von Signalverarbeitungstechniken wird dann der Zeitpunkt zur Beendigung der Zeitintervallmessung ermittelt (Optech 1987). Eine spezielle Lösung zur Untersuchung gewisser Aufgabenstellungen wurde beim NASA Airborne Oceanographic Lidar (Krabill et al. 1984) realisiert. Dort werden 36 einzelne Zählerzellen zeitlich hintereinander geschaltet, um eine räumliche Auflösung des Laserimpulses zu erhalten.

(5) Mikroprozessor

Vom Zeitmeßmodul wird das gemessene Zeitintervall in digitaler Form an den Mikroprozessor übertragen, welcher die einfache Entfernung Laser-Zielobjekt berechnet. Dazu wird eine Konstante für die Lichtgeschwindigkeit verwendet, die für eine Standardatmosphäre bestimmt wurde. Die berechnete Entfernung wird für die verschiedenen zur Verfügung stehenden Ausgänge (ASCII seriell, parallel, analog, LCD-Anzeige) formatiert. Bei sehr hohen Meßraten kann es zu Beschränkungen bei weniger leistungsfähigen Ausgängen kommen.

2.4 Genauigkeit der Laserdistanzmessung

(1) Aus der von der Zeitintervallmessung bestimmten Laufzeit t für die doppelte Entfernung und der Lichtgeschwindigkeit c berechnet sich die Laserstrecke s :

$$s = \frac{c \cdot t}{2} \quad (\text{II.2.2})$$

Die Einflüsse durch eine fehlerhafte Annahme über die Lichtgeschwindigkeit dc und durch eine fehlerhafte Zeitintervallmessung dt lassen sich aus dem totalen Differential ds abschätzen:

$$ds = \frac{1}{2} (c \cdot dt + t \cdot dc) \quad (\text{II.2.3})$$

Die Fehler der Zeitintervallmessung dt haben im wesentlichen gerätespezifische Ursachen und wirken sich unabhängig von der Größe der gemessenen Distanz aus. Dagegen wird die fehlerhafte Lichtgeschwindigkeit dc geräteunabhängig durch die Atmosphäre verursacht. Ihr Einfluß zeigt sich proportional zum Zeitintervall t und damit auch zur Streckenlänge s . Die beiden Fehlerkomponenten sollen im folgenden näher betrachtet werden.

(2) Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_0 von elektromagnetischen Wellen im Vakuum ergibt sich als Lösung der Maxwell'schen Gleichungen mit der Dielektrizitätskonstante ϵ_0 und der Permeabilität μ_0 (Jordan/Eggert/Kneißl 1966):

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad (\text{II.2.4})$$

In einem Medium mit relativer Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r > 1$ und ohne magnetische Eigenschaften (relative Permeabilität $\mu_r = 1$) berechnet sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit c :

$$c = c_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{II.2.5})$$

In der Optik wird anstatt der Dielektrizitätskonstanten, als Begriff aus der Theorie der elektromagnetischen Wellen, der Brechungsindex $n = \sqrt{\epsilon_r}$ verwendet. Zur Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Erdatmosphäre muß der Brechungsindex n bestimmt werden, der von den zum Meßzeitpunkt entlang des Signalweges herrschenden atmosphärischen Bedingungen abhängt. Bei Lichtwellen muß aber auch eine zusätzliche Abhängigkeit von der Wellenlänge angenommen werden. Die Genauigkeit der Laserdistanzmessung hängt somit von der Genauigkeit ab, mit der der Brechungsindex bestimmt werden kann. Auf Modelle

zur Berechnung des Brechungsindex soll hier nicht eingegangen werden; sie sind in der einschlägigen Literatur zu finden (u.a. Jordan/Eggert/Kneißl 1966, Rahnmooon 1988).

Zur Berechnung der Laserstrecke wird von einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit ausgegangen, wobei der Brechungsindex für die Bedingungen einer Standardatmosphäre angesetzt wird. Price und Uren (1989) gehen davon aus, daß die Abweichung der tatsächlich herrschenden Atmosphäre von der Standardatmosphäre die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-5}$ verändert. Dies entspricht einem Streckenfehler von 0.01 m auf einer Strecke von 1000 m. Für die Distanzmessung aus dem Flugzeug ist diese Abschätzung sogar als eher zu pessimistisch anzusehen, da sie von terrestrischen Anwendungen mit vorwiegend horizontalen Visuren ausgeht. Die Größenordnung des von der Atmosphäre verursachten Streckenmeßfehlers erlaubt die Vernachlässigung von verfeinerten Modellansätzen und berechtigt, ausschließlich die Parameter einer Standardatmosphäre für die Laser-Profilmessung zu verwenden.

(3) Den betragsmäßig größeren Einfluß auf die Genauigkeit der Distanzmessung üben die elektronischen Bauelemente aus. Da die Zeitintervallmessung über die hochfrequente Schwingung eines Oszillators vorgenommen wird, der Oszillator somit das Zeitnormal bestimmt, hängt die Genauigkeit von der Stabilität der Oszillatorfrequenz ab. Um diese Stabilität zu erreichen, müssen von der Gerätetechnik Vorkehrungen getroffen werden, wie zum Beispiel die Einhaltung einer konstanten Betriebstemperatur.

Gerätespezifische Fehler, die sich systematisch auf die Distanzmessung auswirken, können effektiv durch die Berücksichtigung einer Additionskonstanten und eines Maßstabfaktors reduziert werden. Diese Parameter lassen sich durch Kalibrierungsmessungen bestimmen und werden dann als Korrekturwerte an die vom Instrument ermittelten Entfernungen rechnerisch angebracht.

Bereits erwähnt wurde die Aufgabe des Diskriminators, der aus den empfangenen, in der Regel verwaschenen Signalformen den Moment zur Auslösung des Stoppsignals für die Zeitintervallmessung ermittelt. Die erzielbare Genauigkeit eines Laufzeitentfernungsmessers hängt ganz entscheidend von der Qualität des Diskriminators ab. Mamon und Rogers (1986) präsentieren ein spezielles System für topographische Anwendungen, wobei der Diskriminator wahlweise an der aufsteigenden oder abfallenden Signalflanke die Zeitmessung auslösen kann. Diese Betriebsweise hat Vorteile bei niederen Vegetationsarten (Buschwerk, Wiesen, Ackerbepflanzung, u.ä.), da der von diesen Objekten zurückkommende Laserimpuls durch die gleichzeitige Bodenreflektion eine Spreizung der Signalform erfährt. Die Verwendung der abfallenden Signalflanke wirkt sich dann günstig auf die Genauigkeit aus, wenn die Bodenreflektion gemessen werden soll.

(4) Die Herstellerfirmen geben typischerweise eine Streckenmeßgenauigkeit für Laserdistanzmesser mit Laufzeitmeßverfahren von 0.2 m an. Diese Angabe bezieht sich auf den bei der Laser-Profilmessung gegebenen Fall, daß jede Strecke nur einmalig gemessen werden kann. Dagegen kann im stationären Betrieb, nach einer vielfach wiederholten Messung und anschließender Mittelbildung, eine Streckenmeßgenauigkeit von 5 mm erreicht werden (Price und Uren 1989). Empirische Untersuchungen zeigen, daß auch in Anwendungen aus dem Flugzeug eine die Herstellerangaben wesentlich übertreffende Genauigkeit, in der Größenordnung von ≤ 0.1 m, zu erzielen ist. Ergebnisse empirischer Untersuchungen werden in Abschnitt IV.2.3 präsentiert; die Streckenmeßgenauigkeit wird dort zu ≤ 8 cm geschätzt. In diesem Zusammenhang soll erwähnt werden, daß die Laserdistanzmessung mit CW-Laser im Phasenmeßverfahren, auch bei Anwendungen vom Flugzeug aus, ein wesentlich höheres Genauigkeitsniveau erzielt. So schätzt Wehr (1990) die Streckenmeßgenauigkeit des von ihm vorgeschlagenen Lasermeßgerätes im Bereich von 1-5mm ab, in Abhängigkeit von der Laserleistung und der Wellenlänge des dem Laserlichts aufmodulierten Meßtones.

2.5 Ergebnis

Seit mehreren Jahren werden von einigen Herstellerfirmen Laserdistanzmesser auf dem Markt angeboten, die Eigenschaften besitzen, die sie zum Einsatz für die Laser-Profilmessung befähigen. Die wesentlichen Kriterien wurden angesprochen: hohe Laserleistung, um reflektorlose Distanzmessung vom Flugzeug aus durchführen zu können, und die Fähigkeit des Empfangsteils, Mehrfachreflexionen an Vegetation verarbeiten zu können. Beide Kriterien können von gepulsten Lasern erfüllt werden. Die im Laufzeitmeßverfahren erreichbare Genauigkeit von etwa 1dm ist für die topographische Geländeaufnahme ausreichend.

Neben der Genauigkeit ist die Reichweite der Laserdistanzmesser ein für die Anwendung wesentlicher Faktor. Die maximale Reichweite bestimmt in direkter Weise die Planung einer Laser-Profilbefliegung. So muß bei geringer Reichweite und stark bewegtem Geländeverlauf die Flughöhe dem Gelände angepaßt werden; unter Umständen wird dadurch auch die Wahl des Flugzeuges eingeschränkt. Die von den Herstellerfirmen derzeit produzierten Laserdistanzmesser, die für die Laser-Profilmessung einsetzbar sind, werden in zwei Kategorien angeboten. Zum einen relativ preisgünstige Instrumente, mit GaAs-Halbleiterlaser, die eine Reichweite von etwa 500m bis 700m liefern. Die Instrumente der zweiten Gruppe sind mit leistungsstärkeren Nd-YAG-Festkörperlasern ausgestattet, die einen Einsatz bis zu 10km Reichweite ermöglichen.

Die Betriebssicherheit, insbesondere die Augensicherheit, ist bei allen Instrumenten während des Einsatzes, das heißt während der Befliegung gewährleistet. Sicherheitsvorkehrungen müssen dagegen im stationären Betrieb, zum Beispiel bei Kalibrierungsuntersuchungen, getroffen werden.

Die Laserdistanzmessung liefert eine gemessene Distanz s_0 , die zur Registrierung an den Bordcomputer des Laser-Profilmeßsystems übergeben wird. In die Auswertung der Laser-Profilmessungen zur Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte geht die Meßgröße s_L ein, die aus der registrierten Distanz s_0 nach Anbringen von Kalibrierungsparametern hervorgeht. Die Bestimmung der Kalibrierungsparameter (Additionskonstante und Maßstabsfaktor) wird im Abschnitt 5.2.1 besprochen.

3. Komponenten des Laser-Profilmeßsystems

3.1 Einführung

Dieses Kapitel befaßt sich mit dem Problem der Sensororientierung und der damit verbundenen Integration der Komponenten des Laser-Profilmeßsystems. Nachdem im vorhergehenden Kapitel die Distanzmessung vom Flugzeug aus zur Erdoberfläche behandelt wurde, werden nun die Positionen und Neigungen des Lasersensors benötigt, um die Koordinaten der Laserzielpunkte ableiten zu können. Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Systemkomponenten kann für die Laser-Profilmessung nur genutzt werden, wenn ihre Integration in ein Gesamtsystem gelingt und die zeitliche Synchronisation der Meßprozesse hergestellt wird. Diese Aufgabe wird im wesentlichen von einem Bordcomputer gelöst, der die Meßprozesse der einzelnen Komponenten steuert. Eine weitere Voraussetzung ist die Kalibrierung des Laser-Profilmeßsystems, die in einem eigenen Kapitel II.5 behandelt wird.

In diesem Kapitel werden alle Komponenten des Laser-Profilmeßsystems, abgesehen von dem bereits besprochenen Lasersensor, vorgestellt. Dabei wird eine Unterteilung in Komponenten zur Sensororientierung und in zusätzliche Instrumente, die zur Sensororientierung nicht beitragen, vorgenommen. Der folgende Abschnitt untersucht zunächst die grundsätzlichen Möglichkeiten der Sensororientierung. Das Problem der Sensororientierung kann in einem allgemeineren Zusammenhang gesehen werden, da es unabhängig von der Laser-Profilmessung bei anderen Sensoren der topographischen Geländeaufnahme (Radarabtaster oder photogrammetrische Kameras) oder der Fernerkundung (Multispektralsensoren) in gleicher Weise auftritt.

Für die Laser-Profilmessung wird die Sensororientierung mit einer Kombination von NAVSTAR Global Positioning System und einem inertialen Navigationssystem vorgeschlagen. Eine tiefergehende Untersuchung dieser Systemkomponenten kann im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen; ebenfalls kann auf die Auswertemethoden nicht eingegangen werden. In Abschnitt 3.3 werden lediglich die Voraussetzungen für den Einsatz dieser Meßverfahren in einem Laser-Profilmeßsystem beschrieben. Der Lasersensor und die Systemkomponenten zur Sensororientierung genügen, um die Koordinaten der Laserpunkte im Gelände ableiten zu können. Zur vollständigen Ausstattung eines Laser-Profilmeßsystems sind jedoch noch zusätzliche Komponenten erforderlich, die im abschließenden Abschnitt 3.4 behandelt werden.

3.2 Methoden der Sensororientierung

Das Problem der Sensororientierung besteht in der Bestimmung der Position und der Neigungsorientierung des Sensors in einem übergeordneten, von den Bewegungen des Flugzeuges unabhängigen Koordinaten-

system. Die mathematische Formulierung erfolgt üblicherweise durch 6 unabhängige Parameter, wobei ein dreidimensionaler Koordinatenvektor die Sensorposition und drei Rotationsparameter die Neigungsorientierung des Sensors beschreiben. Die technischen Lösungen unterscheiden direkte und indirekte Methoden der Sensororientierung. Der folgenden Überblick stellt einige Verfahren vor, die unter dynamischen Bedingungen, das heißt auf Plattformen in Luftfahrzeugen einsetzbar sind und in der Praxis im Zusammenhang mit der Laser-Profilmessung erprobt wurden.

3.2.1 Direkte Bestimmung der Sensororientierungsparameter

Hierbei handelt es sich um Verfahren, bei denen die Orientierungsparameter mittels geeigneter Messungen, die in einem direkten funktionalen Zusammenhang zu ihnen stehen, bestimmt werden. Nahezu alle Verfahren in dieser Kategorie sind aus Entwicklungen von Ortungsverfahren in der Flugnavigation hervorgegangen. Das früheste Experiment zur Sensororientierung mit direkt bestimmten Parametern ist das AN/USQ-28 Projekt (DiCarlo und Eakin 1965). Durch die Integration einer Vielzahl von Meßsystemen konnten die Orientierungsparameter einer photogrammetrischen Kamera in Echtzeit während des Fluges bestimmt werden. Das System konnte sich jedoch wegen der hohen Kosten nicht durchsetzen. Die in den darauffolgenden Jahren bekannt gewordenen Entwicklungen litten unter der begrenzten Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Orientierungsverfahren oder unter dem hohen technischen Aufwand. Erst mit Hilfe von satellitengestützten Techniken kann die Sensororientierung kostengünstig und hochgenau durchgeführt werden.

Die zur Laser-Profilmessung eingesetzten Methoden der direkten Bestimmung der Sensororientierung können unter dem Gesichtspunkt ihrer jeweiligen Einsatzmöglichkeiten in drei Gruppen eingeteilt werden:

- autonome Verfahren

Diese Verfahren benötigen zur Sensororientierung keinerlei zusätzlichen Hilfsmittel. In diese Gruppe gehören die Inertialen Navigationssysteme (INS). Vereinfacht dargestellt besteht ein INS aus drei Beschleunigungsmessern und drei Kreiseln, die jeweils zueinander orthogonal angeordnet sind. Die Position des Sensors erhält man, von einem Ausgangspunkt ausgehend, nach zweifacher Integration der gemessenen Beschleunigungen. Die Neigungsorientierung des Sensors wird direkt aus den Kreismessungen abgeleitet. Abhängig vom Typ der verwendeten Beschleunigungsmesser und Kreisel und der mechanischen Realisierung ergeben sich verschiedene Arbeitsweisen und Genauigkeitsklassen. Beispiele von realisierten Laser-Profilmeßsystemen, deren Sensororientierung sich ausschließlich auf INS-Messungen stützt, sind beispielsweise bei Engler (1983), Leclair und Crago (1986), Schreier et al. (1984), Thyer et al. (1989) zu finden. Wegen der systematischen Fehler der INS - die Positionen driften in der Größenordnung von 1.8 km pro Stunde - können für hochgenaue Anwendungen die INS nur in Hubschraubern eingesetzt werden, die innerhalb regelmäßiger Abstände (z. B. alle 10 Minuten) landen können um das INS zu stützen. Ein effektiver Einsatz der Laser-Profilmessung wird dadurch fraglich. Eine Lösung dieses Problems bietet sich durch die Hinzunahme eines weiteren Navigationssystems zur Positionsbestimmung in einem kombinierten Verfahren. Dagegen werden bei allen bislang realisierten Laser-Profilmeßsystemen die Neigungsorientierung des Sensors durch die Neigungsmessungen mittels INS bestimmt.

- Kombinierte, regional begrenzte Verfahren

Durch die Einbeziehung von terrestrisch gebundenen Methoden zur Positionsbestimmung des Sensors sind die Verfahren dieser Gruppe in ihrem Einsatzbereich regional begrenzt. Hierunter fallen Navigationssysteme, die auf Trilaterationsverfahren aufbauen. Innerhalb der Reichweite der jeweiligen Systeme werden auf Paßpunkten Empfangsstationen aufgebaut, deren Entfernung zum Flugzeug laufend gemessen wird. Derartige Systeme wurden unter den Namen Shoran, Hiran, Aerodist, Autotype, u.a. bekannt. Wegen der begrenzten Genauigkeit der auf verschiedenen Trägerwellen beruhenden Systeme, die mit einigen Metern für die Flugnavigation hinreichend sein mag, für genaue topographische Vermessungen jedoch nicht ausreichend ist, fanden diese Systeme bei modernen Laser-Profilmeßsystemen keine weitere Verbreitung. Als einziges Beispiel wird das System WRELADS I (Calder 1980, Myres 1983) erwähnt, das für hydrographische Anwendungen entwickelt wurde. Eine deutliche Genauigkeitssteigerung läßt sich erzielen, wenn das Trilaterationsverfahren auf Laserdistanzmessungen aufbauen kann. Ein so arbeitendes Laser-Profilmeßsystem stellt das von Charles Stark Draper Laboratory für das US Geological Survey entwickelte "Aerial Profiling of Terrain System APTS" dar (Starr und Chapman 1983, Mammon und Rogers 1986). Die Laser-Profilmessung mit dem APTS ist mit einem erheblichen

technischen Aufwand verbunden, um die Laserdistanzmessungen vom Flugzeug aus zu den im Gelände aufgestellten Reflektoren durchführen zu können. Zusätzlich müssen die Koordinaten der Reflektoren bestimmt werden. Aus diesen Gründen blieb wohl die Entwicklung des APTS singulär.

- Kombinierte, global verfügbare Orientierungsverfahren
Unter diese Kategorie fallen alle satellitengestützten Navigationssysteme. Das modernste und die höchste Genauigkeit versprechende System stellt das derzeit noch im Aufbau befindliche "Navigation System with Time and Ranging Global Positioning System" (NAVSTAR GPS oder kurz GPS) dar. Wegen der großen Bedeutung von GPS für die Laser-Profilmessung werden einige Grundzüge und Meßprinzipien dieses Systems im Abschnitt 3.3 kurz skizziert. GPS ist ein System zur Positionsbestimmung, das durch simultane Messung mit mehreren Antennen aber auch zur Neigungsmessung weiterentwickelt werden kann (Hartl und Wehr 1986). Da solche Modifikationen jedoch heute noch nicht für den kinematischen Einsatz im Flugzeug zur Verfügung stehen, werden sie hier nicht weiter berücksichtigt. Derzeit wird der Einsatz von GPS zur Laser-Profilmessung an verschiedenen Stellen erprobt. Über erste Versuche und Ergebnisse berichten u.a. Chapman et al. (1988), Krabill (1989), Lindenberger (1989), Blair et al. (1990).

3.2.2 Indirekte Bestimmung der Sensororientierungsparameter

In der Photogrammetrie ist die indirekte Bestimmung der Sensororientierung die übliche Vorgehensweise; die Orientierungsparameter der Luftbildkamera werden über die Messung von Paßpunkten indirekt bestimmt. Die Entwicklung der Aerophotogrammetrie hat sich stets darauf konzentriert, die Anzahl der notwendigen Paßpunkte zu verringern, um den terrestrischen Meßaufwand reduzieren zu können. Ausgehend vom Stereobildpaar, bei dem in jedem photogrammetrischen Modell eine volle Paßpunktbesetzung erforderlich ist, über die Streifentriangulation (von Gruber 1935) als Zwischenstufe, die bis etwa 1960 im Mittelpunkt der photogrammetrischen Forschung stand, konnte sich nach den ersten theoretischen Formulierungen (H.H. Schmid 1954) und den danach einsetzenden Programmentwicklungen die Blocktriangulation, als Methode zur simultanen Bestimmung der Orientierungsparameter, durchsetzen. Damit können sehr große Gebiete mit nur wenigen Paßpunkten bearbeitet werden.

Die Verbindung der Photogrammetrie mit Profilmessungen wurde bereits sehr früh geknüpft. Die sogenannten Airborne Profile Recorder (APR) basierten zunächst auf Radaraltimetern, die später wegen der wesentlich höheren Meßgenauigkeit und der besseren Definition der Reflexionspunkte durch Laserdistanzmessung ersetzt wurden (Zarzycki 1972). Der Schwerpunkt des photogrammetrischen Interesses lag in der Beschaffung von Hilfsdaten zur Kameraorientierung. Mit der Verwendung von APR-Beobachtungen in der Aerotriangulation konnten große Distanzen ohne Höhenpaßpunkte überbrückt werden (Klein 1976). Der umgekehrte Weg, APR-Beobachtungen zur topographischen Geländeaufnahme zu nutzen und die Sensororientierung indirekt über eine Aerotriangulation vorzunehmen, wurde von Ackermann 1973 zur Diskussion gebracht. Bis heute scheitert dieser Weg einerseits am zu hohen Aufwand, der für die manuelle Punktübertragung betrieben werden muß. Andererseits kann mit den herkömmlichen photogrammetrischen Aufnahmesystemen keine hinreichend dichte Folge von Orientierungsparametern bestimmt werden. Allerdings könnte mit digitalen Bildsensoren und leistungsfähigen Speichermedien unter Anwendung der Methoden der digitalen Bildverarbeitung dieser Ansatz zur indirekten Sensororientierung wieder neu diskutiert werden.

3.3 Kombinierte, direkte Sensororientierung mit GPS und INS

Zur Orientierung des Lasersensors wird für die Laser-Profilbefliegung eine direkte Bestimmung der Orientierungsparameter mittels GPS und INS Messungen empfohlen. Eine Integration dieser Systeme, im Sinne einer gemeinsamen Auswertung, wird allerdings in dieser Arbeit nicht vorausgesetzt. Die Positionsbestimmung basiert ausschließlich auf GPS, das INS wird nur zur Neigungsbestimmung herangezogen. Wegen der vielfältigen Einsatzbereiche und Auswertemodelle für GPS-Beobachtungen sollen einige Grundlagen des Systems und die bei der Laser-Profilmessung angewendeten Beobachtungsprinzipien kurz angesprochen werden.

3.3.1 Systembeschreibung NAVSTAR GPS

Das NAVSTAR GPS ist ein satellitengestütztes Positionsbestimmungs-, Navigations- und Zeitübertragungssystem, das einer unbegrenzten Zahl von Benutzern, wetterunabhängig, zu jeder Zeit und weltweit hochgenaue dreidimensionale Positions- und Geschwindigkeitsinformationen liefern kann (Wooden 1985). Das System kann in drei Hauptkomponenten untergliedert werden:

1. Das Raumsegment wird im Endausbau der operationellen Phase aus 21 Satelliten (und 3 Reserve-satelliten) bestehen, die in ca. 20000 km Höhe die Erde in drei regelmäßig verteilten Bahnen innerhalb von 12 Stunden umkreisen. Die Satelliten übermitteln auf zwei Frequenzen ($L1 = 1575.42$ MHz und $L2 = 1227.6$ MHz) zwei verschiedene Codes (C/A-Code mit ca. 300m Wellenlänge und P-Code mit ca. 30m Wellenlänge), die der Trägerwelle aufmoduliert sind und zur Pseudoentfernungsmessung dienen. Außerdem wird die sogenannte Satellitennachricht empfangen, die u.a. die Informationen über die Satellitenbahndaten (Ephemeriden) und Satellitenuhren enthält.

Momentan befindet sich die operationelle Phase im Aufbau. Der Endausbau ist für Ende 1992 geplant. Aus der vorausgegangenen Testphase (1978 bis 1985) befinden sich 10 der 11 ursprünglich geplanten Satelliten im Orbit, die sich aber nur noch teilweise für hochgenaue Anwendungen nutzen lassen.

2. Das Kontrollsegment besteht aus fünf weltweit verteilten Beobachtungsstationen, die ständig die Satelliten überwachen und die Beobachtungsdaten zur Auswertung einer Masterstation übersenden. Dort werden die Bahndaten und sonstige Parameter (z.B. die Parameter der Satellitenuhren) berechnet und an die Satelliten als aktuelle Satellitennachricht übermittelt.
3. Das Benutzersegment wird durch die GPS-Empfänger mit den dazugehörigen Hardware- (z.B. Antennen und Empfänger) und Softwarekomponenten gebildet. Derzeit befinden sich eine große Anzahl verschiedener Empfängertypen auf dem Markt, die für die unterschiedlichen Anwendungen (Navigation, stationäre oder kinematische Benutzung) und Genauigkeitsanforderungen konzipiert sind. Man unterscheidet Empfänger, die den Satellitencode (Pseudoentfernungsmessung), die Phase der Trägerwelle oder beides kombiniert beobachten und verarbeiten können. Die zivile Nutzung des Systems schließt die Verwendung des genaueren P-Codes aus. Für hochgenaue Anwendungen stehen Zweifrequenzempfänger zur Verfügung, die Phasenmessungen auf der $L1$ und $L2$ Trägerwelle vornehmen, um die Einflüsse der Erdatmosphäre zu reduzieren.

Die Sensororientierung in Flugzeugen stellt hohe Anforderungen an die GPS-Empfänger:

- Die GPS Messungen müssen wegen der Flugbewegungen mit einer möglichst hohen Meßwiederholungsrate durchführbar sein. Derzeit sind Raten bis zu 2Hz verfügbar.
- Die in Flugzeugen auftretenden dynamischen Belastungen können erfahrungsgemäß nur von qualitativ hochwertigen, kontinuierlich beobachtenden Mehrkanalempfängern fehlerlos, d.h. ohne Phasensprünge (cycle slips), verarbeitet werden. Nach Möglichkeit soll für jeden beobachtbaren Satelliten ein eigener Kanal zur Verfügung stehen; im Endausbau werden maximal 10 Satelliten gleichzeitig zu beobachten sein.
- Eine hardwaremäßige Verbindung zu den sonstigen Komponenten des Sensorsystems muß gegeben sein. Diese für die Zeitsynchronisation wichtige Verbindung kann bei photogrammetrisch ausgelegten Empfängertypen über den sogenannten Kamerainput erfolgen. Dabei löst ein vom Bordcomputer erzeugtes Signal zu bestimmten Zeitpunkten eine Registrierung der Empfängeruhrzeit aus.

3.3.2 Beobachtungsprinzip bei kinematischen Anwendungen

Die kinematische Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern ist nur mit den Methoden der relativen Positionierung und mit Trägerphasenbeobachtungen möglich (Frieß 1990). Dabei werden von einem stationären Empfänger und dem im Flugzeug installierten, bewegten Empfänger simultan die Phasen der Trägerwellen zu denselben Satelliten beobachtet. Die Position des bewegten Empfängers wird dann relativ zum stationären Empfänger berechnet, indem die Beobachtungen beider Empfänger nach der Methode der Einfachen oder Doppelten Differenzen ausgewertet werden (s.u.a. Remondi 1984). Dadurch werden die Fehlereinflüsse, die von den Satelliten- und Empfängeruhren verursacht werden, elimi-

niert. Darüber hinaus reduzieren sich, in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen dem stationären und bewegten Empfänger, nicht-modellierte Einflüsse der Atmosphäre und der Satellitenbahndaten.

Die relative Positionsbestimmung durch GPS-Trägerphasenbeobachtungen stellt zwei Bedingungen, die erfüllt werden müssen:

- Die Satellitenkoordinaten (oder Satellitenbahndaten) müssen bekannt sein; über sie wird der Bezug zum geodätischen Datum hergestellt. Durch die Entschlüsselung der Satellitennachricht können die Satellitenkoordinaten aus den übermittelten Ephemeriden (broadcast ephemeris) berechnet werden; diese haben jedoch nur eine geringe Genauigkeit. Da in der Regel keine Echtzeitlösung angestrebt wird, können auch nachträglich von verschiedenen Institutionen präzise Bahnparameter angefordert werden (z.B. U.S. National Geodetic Survey, U.S. Geological Survey, University of Texas).
- Die Koordinaten des stationären Referenzpunktes müssen in dem von den Satellitenkoordinaten definierten Bezugssystem bekannt sein. Der Referenzpunkt kann durch geodätische Netzbeobachtungen an vorhandene Bezugspunkte im Landeskoordinatensystem angeschlossen werden.

Der Ablauf und die Auswertung der GPS-Beobachtungen für Laser-Profilbefliegungen gliedert sich in zwei nacheinander abfolgende Schritte: die Startpunktbestimmung und die relative, kinematische Positionsbestimmung während der eigentlichen Befliegung.

Die Startpunktbestimmung wird vor der Befliegung bei stehendem Flugzeug durchgeführt. Sie dient der Bestimmung der Ausgangsposition des Flugzeuges relativ zur bekannten, stationären Referenzstation (Basislinienbestimmung). Die Genauigkeit der Startpunktbestimmung hängt hauptsächlich von der Länge der Basislinie und der Beobachtungsdauer ab. Die sich anschließende relative, kinematische Positionsbestimmung basiert auf Trägerphasenbeobachtungen beider Empfänger. Die Phasenmehrdeutigkeit wird mit Hilfe der bestimmten Startpunktkoordinaten behoben. Während der Laser-Profilbefliegung sind die Möglichkeiten, die berechneten Positionen zu kontrollieren oder die Genauigkeit zu stützen, sehr eingeschränkt und aufwendig (s. II.5.3.1 Messung topographischer Paßpunkte). Es sollte deshalb strikt darauf geachtet werden, daß während der Befliegung kein Signalverlust zu den Satelliten auftritt, etwa durch Abschattung der GPS-Antenne mit den Flugzeugflügeln im Kurvenflug. Troposphärische Korrekturen werden über Modellansätze (z.B. das modifizierte Hopfield-Modell s. Remondi 1984) berücksichtigt, wozu auf der stationären Empfängerstation troposphärische Daten (Temperatur, Luftdruck, Wasserdampfdruck) beobachtet werden. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung kann erhöht werden, wenn die Troposphärendaten auch im Flugzeug laufend gemessen und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

3.3.3 Genauigkeitspotential der Positionsbestimmung mit GPS

Die folgenden Genauigkeitsangaben sind empirischen Untersuchungen von Frieß (1990) entnommen. Alle Untersuchungen wurden mit GPS-Empfänger der Marke Sercel TR5S-B durchgeführt.

Eine Genauigkeitsanalyse von stationären GPS-Beobachtungen bestätigte die theoretischen Erwartungen, die von einer Streckenmeßgenauigkeit von besser als 1% der Wellenlänge ausgehen. Die Genauigkeit von Pseudoentfernungsbeobachtungen aus C/A-Code Messungen lag im quadratischen Mittel bei 1.1 m, bei Trägerphasenbeobachtungen der L1-Trägerwelle bei 1.4 mm. Eine Korrelationsanalyse ergab, daß die ursprünglichen Beobachtungen als unkorreliert anzunehmen sind (sowohl bezüglich der Auto- als auch der Kreuzkorrelation).

Die relative kinematische Positionsbestimmung mit Trägerphasenbeobachtungen ist für Entfernungen bis ca. 45 km in Zentimetergenauigkeit (≤ 3 cm) und für Entfernungen bis 150 km mit Dezimetergenauigkeit (≤ 2.5 dm) möglich. Diese Ergebnisse wurden durch die kinematische Auswertung der Beobachtungen von zwei stationären Empfängern ermittelt. Diese hohen Genauigkeiten sind nur bei präziser Kenntnis der Koordinaten des Start- und Referenzpunktes zu erzielen, da nur in diesem Fall die Phasenmehrdeutigkeit sicher bestimmt werden kann. Eine unsicher bestimmte Phasenmehrdeutigkeit verursacht erhebliche Driften. Beim Einsatz von GPS in der Aerotriangulation können die auftretenden Driften nachträglich durch lineare Modellierung fast vollständig erfaßt werden. Ob dies bei der Laser-Profilmessung ebenfalls möglich ist, wird noch zu untersuchen sein. Unabhängig von der Startpunktbestimmung kann jede Unterbrechung der Trägerphasenbeobachtung durch kurzzeitigen Signalverlust einzelner Satelliten während des Fluges zum Problem werden.

Die Untersuchung der kinematischen Positionsbestimmung von im Flugzeug beobachteten GPS-Daten kann mit Hilfe der Aerotriangulation kontrolliert werden, indem die aus GPS bestimmten Positionen mit den aus der Aerotriangulation berechneten Kamerapositionen verglichen werden. Der Testflug Flevoland (van der Vegt 1989) wurde zu diesem Zweck konzipiert und ermöglichte eine hochgenaue Analyse der Daten und Auswertemodelle. Die Untersuchungen von Frieß (1990) erbrachten eine Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich ($\leq 4\text{cm}$). Dabei wurde streifenweise die Driften mittels linearer Regression modelliert. Diese Genauigkeiten sind nur unwesentlich schlechter als die Ergebnisse der kinematischen Auswertung von stationären Datensätzen.

Im Zusammenhang mit dem Laser-Profilmeßsystem ist zu berücksichtigen, daß die GPS-Beobachtungen in der Regel mit einer wesentlich niedrigeren Frequenz erfolgen, als dies bei den Laser- und INS-Messungen der Fall ist. Die GPS-Positionen müssen folglich auf die Zeitpunkte der Laser-Messungen interpoliert werden. Diese Interpolation ist zulässig, da die GPS-Positionen auch in kinematischen Anwendungen mit sehr hoher innerer Genauigkeit bestimmbar sind. Nachgewiesen wurde dies in Lindenberger (1989a): die Modellierung des Flugweges aus den GPS-Positionskordinaten zeigte eine Streuung der Prädiktionsfehler von $\leq 0.05\text{m}$ (die GPS-Positionen lagen alle 0.6sec vor).

3.3.4 Neigungsbestimmung mit INS

Ein Inertiales Navigationssystem ist ein autarkes Navigationssystem, das in einem definierten Bezugssystem die auf das System einwirkenden Kräfte mißt, Kenntnisse über das globale Gravitationsfeld besitzt und über die zeitliche Integration der einwirkenden Kräfte die Geschwindigkeit und Position des Systems in einem übergeordneten, von den Bewegungen des Systems unabhängigen Koordinatensystem ableiten kann (Britting 1971). Die Neigungsorientierung des Systems wird über drei senkrecht zueinander angeordneten Kreisel bestimmt. Dazu wird die physikalische Eigenschaft rotierender Kreisel genutzt, die auf ein von außen aufgebrachtes Drehmoment mit einer definierten Änderung ihrer Drehachse reagieren.

Die Neigungsorientierung wird durch drei Winkelgrößen angegeben, die - vereinfacht ausgedrückt - die Orientierung des Flugzeuges gegenüber einem von den Flugbewegungen unabhängigen Koordinatensystem beschreiben (eine exaktere Definition erfolgt in Abschnitt 4.2). Es muß allerdings davon ausgegangen werden, daß die Achsen des Koordinatensystems von ihren nominellen, geodätisch definierten Richtungen durch systematische Fehler abweichen (z.B. wegen Ausrichtfehler, day-by-day offset). Zusätzlich muß mit Driften der Achsrichtungen gerechnet werden. Bei Genauigkeitsanalysen wird deshalb die relative und absolute Genauigkeit unterschieden. Die relative Genauigkeit der INS-Neigungen kann sehr hoch angesetzt werden: in Lindenberger (1988) werden die im Flug gemessenen Neigungen von zwei verschiedenen INS untersucht und die relative Genauigkeit in der Größenordnung von 0.006 deg, beziehungsweise 0.003 deg (Litton LTN-72) abgeschätzt. Die absolute Genauigkeit unterliegt dagegen nicht-modellierten systematischen Fehlerinflüssen, die in der Form von Driftraten angegeben werden. Zuverlässige Aussagen zur absoluten Genauigkeit beziehen sich auf die empirische Auswertung konkreter Messungen und können daher kaum verallgemeinert werden.

Der Benutzer eines INS hat kaum Möglichkeiten, über den Meßablauf auf die Genauigkeit der INS-Beobachtungen Einfluß zu nehmen: die Eingabe von Startpunktkoordinaten muß nur genähert erfolgen, die Dauer der Standlaufzeit bis zum Beginn der kinematischen Messungen wird vom INS vorgegeben. Der Benutzer hat in der Regel auch keinen direkten Zugriff zu den Beobachtungen der Beschleunigungsmesser und Kreisel. Die zur Laser-Profilmessung benötigten Neigungswinkel sind also keine ursprünglichen Kreiselablesungen, sondern wurden bereits einem internen Auswerteprozess des INS unterzogen.

3.3.5 Genauigkeitsanforderungen an GPS und INS für die Laser-Profilmessung

Der Laserdistanzmesser ist das zentrale Meßinstrument eines Laser-Profilmeßsystems. Die Genauigkeit der Laserdistanzmessung sollte deshalb auch für die Genauigkeit der aus Laser-Profilmessungen abgeleiteten Höhenkoordinaten der Laserpunkte charakteristisch sein. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Sensororientierung sind deshalb so zu stellen, daß das vom Laserdistanzmesser vorgegebene Genauigkeitsniveau durch die Positionsbestimmung mit GPS und die Neigungsbestimmung mit INS nicht verschlechtert wird. Die im folgenden gemachten Abschätzungen für die Genauigkeitsanforderungen der Sensororientierung

beziehen sich auf die zufälligen Fehlerkomponenten; es wird davon ausgegangen, daß die systematischen Fehlereinflüsse weitestgehend in der Systemkalibrierung bestimmt und durch Korrekturansätze bei der Berechnung der Laserpunktkoordinaten berücksichtigt werden.

In II.2.4 wurde eine empirisch nachgewiesene Genauigkeit der Laserdistanzmessungen von 0.1m angegeben. Die Sensororientierung soll in der Höhenkoordinate diesen Wert nicht überschreiten.

(1) Anforderungen an die Positionsbestimmung

Die Genauigkeit der Sensorpositionen wird durch zwei Faktoren bestimmt: der Genauigkeit der GPS-Positionsbestimmung und der Genauigkeit der Interpolation der GPS-Positionen auf die Auslösezeitpunkte des Lasersensors. Zu beiden Faktoren liegen empirische Untersuchungen vor, die in II.3.3.3 zitiert wurden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war, daß sowohl für die GPS-Positionsbestimmung als auch für die Modellierung des Flugweges eine Genauigkeit von $\leq 5\text{cm}$ erreichbar ist. Es muß allerdings die Meßrate des GPS-Empfängers berücksichtigt werden (alle 0.6sec bei den durchgeführten Untersuchungen). Die Anforderungen an die Genauigkeit in der Höhenkomponente von $\leq 10\text{cm}$ kann somit von GPS erfüllt werden.

(2) Anforderungen an die Neigungsbestimmung

Fehler in den Neigungsmessungen wirken sich in erster Linie auf die Lagekoordinaten der Laserpunkte aus. Über die Geländeneigung übertragen sich die Fehler auf die Höhenkoordinate. Die Genauigkeitsanforderungen der Lageorientierung bezüglich der Horizontebene sind wesentlich höher als das Azimut (Kurswinkel gegen Nordrichtung), weshalb eine Unterscheidung der drei gemessenen Winkelgrößen getroffen wird.

Die Genauigkeit des Azimuts ist abhängig von der horizontalen Exzentrizität zwischen der GPS-Antenne und dem Lasersensor im Flugzeug. Im Idealfall stehen beide Instrumente senkrecht übereinander, dann hat ein Azimutfehler keine Auswirkung auf die Punktbestimmung. Bei einer angenommenen Exzentrizität von 5m unterschreitet eine Genauigkeit der Azimutbestimmung von 1° die Anforderungen an die Höhengenaugigkeit ($\leq 10\text{cm}$) selbst im steilem Gelände mit Geländeneigung 45° . Die Azimutbestimmung ist somit als unkritisch anzusehen.

Die Genauigkeitsanforderung an die Lageorientierung ist von der Geländeneigung α und von der Flughöhe h abhängig. Wird ein Höhenfehler dh toleriert, dann läßt sich der maximal zulässige Fehler ϵ der Lageorientierung wie folgt berechnen:

$$\tan \epsilon = \frac{dh}{\tan \alpha (h - dh)} \quad (\text{II.3.1})$$

Für ebenes Gelände ($\alpha=0$) gilt:

$$\cos \epsilon = 1 - \frac{dh}{h} \quad (\text{II.3.2})$$

Die Anforderungen an die Genauigkeiten der Lageorientierung sind in Tabelle II.3.1 für die Flughöhen $h=300\text{m}$ und $h=1000\text{m}$ und für vier Geländeneigungen ($\alpha=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ und 45°) unter der Voraussetzung, daß eine Höhengenaugigkeit $\leq 10\text{cm}$ erreicht werden soll, angegeben.

In steilem Gelände muß berücksichtigt werden, daß dort von der Anwenderseite oftmals nicht so hohe Höhengenaugigkeiten gefordert werden.

| Geländeneigung α | | Flughöhe | |
|-------------------------|--------|-----------------|------------------|
| $[\circ]$ | $[\%]$ | $h=300\text{m}$ | $h=1000\text{m}$ |
| 0° | 0% | 1.5° | 0.8° |
| 10° | 18% | 0.1° | 0.03° |
| 20° | 36% | 0.05° | 0.02° |
| 45° | 100% | 0.02° | 0.01° |

Tab. II.3.1 Genauigkeitsanforderung an Lageorientierung für Höhengenaugigkeit $\leq 10\text{cm}$

3.3.6 Folgerungen für die Koordinatenbestimmung aus Laser-Profilmessungen

Die Nutzung von GPS und INS in einem Laser-Profilmeßsystem führt zu Konsequenzen, die sich auf die Auswertung der Laser-Profilmessungen, das heißt auf die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte,

auswirken. Im folgenden sollen die von diesen Systemen zur Sensororientierung abgeleiteten Meßgrößen und die Behandlung systematischer Fehlereinflüsse eingeführt werden. Dazu werden in diesem Abschnitt Koordinatensysteme genannt, deren Definition erst in Abschnitt 4.2 im Zusammenhang mit allen anderen bei der Laser-Profilmessung benötigten Koordinatensystemen gegeben wird.

(1) Meßgrößen des GPS

Durch die relative kinematische Positionsbestimmung werden die Koordinaten der auf dem Flugzeug montierten GPS-Antenne im Koordinatensystem WGS84 bestimmt. Im weiteren wird die Position der Flugzeugantenne als Ortsvektor $\mathbf{r}_{AW} = [x_A, y_A, z_A]_W^T$ dargestellt.

(2) Systematische Fehler des GPS

Die mit GPS bestimmten Positionskoordinaten beziehen sich auf das geodätische Datum, das von den Satellitenkoordinaten vorgegeben wird. Durch unterschiedliche Satellitenkonfigurationen und nicht berücksichtigte systematische Fehler, kann bei Beobachtungen in mehreren Epochen nicht unbedingt von einem einheitlichen, geodätischen Datum ausgegangen werden. Streng genommen müßte deshalb die Bestimmung der Datumstransformationsparameter gleichzeitig mit der Laser-Profilbefliegung erfolgen. Dazu wären mindestens drei stationäre GPS-Empfänger im zu befliegenden Gebiet erforderlich. Wird die Befliegung jedoch mit nur einem stationären GPS-Empfänger als minimale Ausstattung durchgeführt, dann muß mit verbleibenden Unsicherheiten der Datumstransformation gerechnet werden, die durch Korrekturparameter modelliert werden können. Im Hinblick auf die lokal begrenzte Ausdehnung von Laser-Profilbefliegungen genügt allerdings ein reduzierter Ansatz, der lediglich die Translationsparameter berücksichtigt. Zusätzlich verbleibende Driften könnten durch eine zeitliche Abhängigkeit der Translationsparameter modelliert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird aber davon ausgegangen, daß die zeitabhängigen Drifteinflüsse gering sind, so daß innerhalb gewisser Zeitabschnitte ein konstanter Parametersatz angesetzt werden kann.

In die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte wird ein im System WGS84 definierter, konstanter Vektor eingeführt mit den Elementen $[dtx, dty, dtz]_W^T$. Mit diesem Parametersatz, der eine Translation der Positionen in WGS84 bewirkt, werden die von GPS verursachten, systematischen Fehlereinflüsse modelliert. Im weiteren werden die Parameter dieses Vektors als Translationsparameter bezeichnet. Die Werte der Translationsparameter werden im Zusammenhang mit der Systemkalibrierung bestimmt.

(3) Meßgrößen des INS

Unabhängig von der tatsächlichen Plattformrealisierung des INS (die neueren Systeme arbeiten in der Regel nach dem Strapdown-Prinzip) kann davon ausgegangen werden, daß das INS drei Meßgrößen zur Neigungsorientierung liefert, die als Neigungswinkel (ϕ, θ, ψ) bezeichnet werden. Diese Meßgrößen beschreiben - vorbehaltlich einer Berücksichtigung von systematischen Fehlern - die Rotation des flugzeugfesten Koordinatensystems gegenüber dem lokalen, astronomischen Horizontsystem (s. Gleichung II.4.2).

(4) Systematische Fehler des INS

Die vom INS ausgegebenen Neigungswinkel (ϕ, θ, ψ) unterscheiden sich von den Rotationen zwischen dem flugzeugfesten Koordinatensystemen und dem lokalen, astronomischen Horizontsystem um die systematischen Fehler des INS. Zu berücksichtigen sind hier insbesondere die Ausrichtfehler der Kreiselachsen und die Kreiseldriften. Wegen der zeitlichen Abhängigkeit der systematischen INS-Fehler müßte ein Korrekturansatz als Funktion der Zeit formuliert werden. Wie auch bei den von GPS verursachten systematischen Fehler, die durch konstante Translationsparameter beschrieben werden, wird für die weitere Bearbeitung angenommen, daß eine zeitunabhängige Modellierung der systematischen INS-Fehler für ein gewisses Zeitintervall genügt. Die Qualität des verwendeten INS bestimmt das Zeitintervall, in dem diese Vereinfachung ohne gravierenden Genauigkeitsverlust toleriert werden kann. Die systematischen Fehler werden durch zusätzliche Rotationsparameter (α, β, γ) berücksichtigt.

3.4 Zusätzliche Systemkomponenten

Die bislang besprochenen Systemkomponenten Lasersensor, GPS, INS liefern Meßgrößen, die der Berechnung von Koordinaten der Laserpunkte dienen. Diese Einzelkomponenten werden aber nur dann zu einem Gesamtsystem integriert, wenn eine Verbindung zwischen ihnen hergestellt werden kann. Die Verbindung wird über die Zeitsynchronisation hergestellt und vom Bordcomputer kontrolliert. Zwei weitere System-

komponenten vervollständigen das Laser-Profilmeßsystem: die sogenannte Spotting-Kamera zur Aufzeichnung der geflogenen Profile und ein System zur Navigation des Flugzeuges.

3.4.1 Bordcomputer

Bei der Laser-Profilmessung wird im Normalfall nicht von einer Echtzeitauswertung ausgegangen. Dem Bordcomputer kommt deshalb im wesentlichen die Aufgabe zu, die Meßinstrumente zu steuern und die anfallenden Meßdaten zu registrieren. Obwohl die Meßinstrumente autark betrieben werden können, ist es im Hinblick auf einen einheitlichen, gemeinsamen Zeitbezug aller Meßdaten notwendig, möglichst alle Instrumente vom Bordcomputer aus anzusteuern. Auf dem Bordcomputer wird ein Meßdatenerfassungsprogramm betrieben, das in einem gewissen Zeittakt die Messungen der einzelnen Systemkomponenten auslöst.

Nach der Durchführung der Messung im Meßinstrument werden die Meßdaten über Datenschnittstellen in gerätespezifischen Formaten an den Bordcomputer übertragen. Das Meßdatenerfassungsprogramm decodiert diese Daten und wandelt sie für die Registrierung in ein einheitliches Datenformat um.

Bei der Wahl des Bordcomputers muß die Leistungsfähigkeit der Datenübertragung und Datenaufzeichnung beachtet werden. Bei der großen Menge der zu registrierenden Daten bestimmt der Datendurchsatz des Bordcomputers die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Die möglichen, hohen Meßfrequenzen einzelner Systemkomponenten (z.B. Lasersensor bis zu 4kHz) können unter Umständen nicht genutzt werden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß die im Flugzeug eingebauten Instrumente teilweise sehr hohen dynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Die Registriereinheit des Bordcomputers muß deshalb auch unter diesen Bedingungen eine zuverlässige Datenaufzeichnung gewährleisten.

3.4.2 Zeitsynchronisation

Die zentrale Zeitskala wird entweder vom Bordcomputer definiert oder über eine externe Uhr dem Bordcomputer zur Verfügung gestellt. Über die Zeitsynchronisation werden die Registrierungen der verschiedenen Meßinstrumente verknüpft. Als Beispiel sei hier die Verbindung von GPS-Beobachtungen und der Lasermessungen erwähnt, deren Meßfrequenzen sich am meisten unterscheiden (z.B. 2Hz bei GPS, bis zu mehreren kHz bei Lasermessungen). Die technische Realisierung der Zeitsynchronisation muß im Einzelfall gelöst werden. Die Genauigkeit der verwendeten Uhr ist unkritisch - auch wenn bei mehrstündigen Befliegungen deutlich systematische Fehler festgestellt werden - da die Zeit an sich keine Meßgröße darstellt, sondern nur als Hilfe für die Zuordnung der Meßgrößen dient.

3.4.3 Spotting-Kamera

Der Bezug der gemessenen Laserpunkte zum beflogenen Gelände wird bei der Laser-Profilmessung lediglich über Koordinaten hergestellt. Um eine unabhängige Kontrolle zu ermöglichen, wird im Systemkonzept eine Spotting-Kamera vorgesehen. Sie nimmt die nähere Umgebung eines Laserpunktes auf und stellt somit eine für den Menschen anschauliche Beziehung zwischen den Laser-Profilmessungen und dem Gelände her. Der Einsatz von Spotting-Kameras ist schon von photogrammetrischen Bildflügen mit Radar- oder Laser-APR bekannt. Dort unterstützten sie die Identifizierung und Übertragung der APR-Punkte in das Luftbild, wo dann die Koordinatenmessung vorgenommen wird. Auch bei der Laser-Profilmessungen werden in den Bildern der Spotting-Kamera selbst keine Messungen vorgenommen, sie dienen lediglich zur visuellen Kontrolle der abgeleiteten Koordinaten der Laserpunkte und zur Identifizierung von topographischen Paßpunkten (s. II.5.3.1). In den Bildern der Spotting-Kamera werden vom Operateur charakteristische Details der Laserprofile identifiziert und dem Gelände zugeordnet. So können beispielsweise Kanten im Laserprofil Bauwerken zugeordnet werden. Die eigentlichen Kontrollmessungen erfolgen nach der Punktidentifizierung in Luftbildern oder in geeigneten Karten.

Bei der relativ niederen Aufnahme Frequenz früherer APR-Messungen konnte die Auswahl des Speichermediums für die Spotting-Kamera relativ frei gewählt werden. Dagegen muß bei der Laser-Profilmessung die hohe Aufnahme Frequenz beachtet werden. Als ein in der Handhabung sehr flexibles System hat sich die

Video-Technik erwiesen. Die für den Einsatz im Flugzeug benötigte hohe Auflösung bei möglichst niedriger Belichtungszeit (z.B. 1/1000 Sekunde) kann bereits von semi-professionellen Systemen erreicht werden. Zur Auswertung der Video-Aufzeichnungen ist eine im Bild eingeblendete Zeitskala notwendig, über die die Verbindung zum Laserprofil hergestellt wird.

3.4.4 Navigationssystem für die Profilbefliegung

Eine flächendeckende topographische Geländeaufnahme mit Laser-Profilmessungen erfordert die Befliegung des Geländes durch mehrere, parallel verlaufende Flugprofile. Dem Piloten muß zur Bewältigung dieser Aufgabe ein Hilfsmittel zur Verfügung gestellt werden, um das Flugzeug auf den geplanten Flugprofilen navigieren zu können.

Eine Möglichkeit, die ohne technische Hilfsmittel im Flugzeug auskommt, stellt die Sichtnavigation dar. Zur Erzielung hoher Genauigkeiten ist sie jedoch mit einem erheblichen Aufwand im Gelände verbunden, da die gewünschten Profile mit Fesselballonen oder anderen gut sichtbaren Signalen markiert werden müssen. Krabill et al. (1980) berichten von einer Navigationsgenauigkeit mit dieser Methode von 20 bis 30m.

Eine weitaus effizientere Methode bietet die Echtzeit-Navigation mit GPS. Da ein GPS-Empfänger bereits für die Sensororientierung im Flugzeug installiert ist, muß lediglich gewährleistet werden, daß dem Piloten die aus der Positionsbestimmung berechnete aktuelle Abweichung vom geplanten Flugweg in einer geeigneten Weise zugänglich gemacht wird. Bei einem vollautomatischen System werden die mit GPS bestimmten Positionen direkt in das Autopilotensystem eingegeben.

Im Vergleich zur Sensororientierung stellt die Navigation keine sehr hohen Genauigkeitsanforderungen an die GPS-Positionsbestimmung. Beispielsweise sollte bei einem Profilabstand von 50 m die Navigationsgenauigkeit im Bereich von 5 bis 10 m liegen. Auf die in Echtzeit unter Umständen problematische Auswertung von Trägerphasenbeobachtungen kann deshalb verzichtet werden. Ausreichend hohe Genauigkeiten lassen sich durch die Auswertung des C/A-Codes nach der Methode der relativen Positionsbestimmung erzielen. Ein nach diesem Prinzip arbeitendes System wurde beim Institut für Flugführung der TU Braunschweig entwickelt und bei den in Teil IV beschriebenen Laser-Profilbefliegungen zur Navigation eingesetzt. Die Meßwerte der stationären Referenzstation werden laufend über eine Telemetrieanlage in das Flugzeug übertragen, wo sie vom Bordcomputer zusammen mit den Meßwerten des bewegten GPS-Empfängers ausgewertet werden. Dem Pilot wird die Querabweichung vom geplanten Flugprofil im Cockpit angezeigt. Die mit diesem System erreichbaren Navigationsgenauigkeiten (ohne Autopilotensystem) liegen im Bereich von wenigen Metern (s. Tab. IV.4.2). Im Gegensatz zur hochgenauen Navigation wird man im Normalfall auf die relative Positionsbestimmung verzichten können und nur die Beobachtung eines einzigen Empfängers im Flugzeug zur Navigation heranziehen.

3.5 Ergebnis

In diesem Kapitel wurden die Komponenten des Laser-Profilmeßsystems vorgestellt. Das Problem der Sensororientierung wird durch eine Kombination von GPS und INS gelöst. Eine kombinierte Auswertung der GPS- und INS-Messungen wird jedoch nicht vorgesehen, so daß ausschließlich GPS zur Positionsbestimmung und INS zur Neigungsorientierung dient. Bei beiden Systemen muß mit systematischen Fehlern gerechnet werden. In der Auswertung wird durch die Einführung zusätzlicher Translations- und Rotationsparameter eine Korrektur der systematischen Fehler vorgenommen.

Die Integration der einzelnen Komponenten zu einem Gesamtsystem wird durch die Zeitsynchronisation, die Systemkalibrierung und dem zentralen Bordrechner gewährleistet. Sämtliche Systemkomponenten werden als Einzelinstrumente von verschiedenen Herstellern angeboten, so daß bei der Realisierung des Laser-Profilmeßsystems keine Hardwareentwicklungen notwendig sind. Lediglich die auf dem Bordrechner laufenden Programme zur Datenerfassung, Steuerung der Meßinstrumente und Echtzeit-Navigation müssen unter Umständen entwickelt werden.

4. Koordinaten der Laserpunkte

4.1 Überblick

Die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte erfolgt durch eine Reihe von Koordinatentransformationen, wodurch die gemessenen Laserstrecken als Vektoren, die sich auf das bewegte Flugzeug beziehen, in ein übergeordnetes, erdfestes Bezugssystem überführt werden. Als Laserpunkt wird im folgenden immer der Reflexionspunkt des Laserstrahls bezeichnet, auf den sich die Streckenmessung bezieht.

Bevor die Berechnung der Laserpunktkoordinaten abgeleitet wird, sollen zunächst in 4.2 die einzelnen Koordinatensysteme definiert werden. Dann werden in 4.3 die Meßgrößen, Kalibrierungs- und Korrekturparameter des Laser-Profilmeßsystems zusammengestellt. Diese Parameter beschreiben die Beziehungen zwischen den Koordinatensystemen (4.4), woraus schließlich die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte in 4.5 abgeleitet wird.

4.2 Koordinatensysteme

Zur Auswertung einer Laser-Profilmessung werden zwei Gruppen von Koordinatensystemen herangezogen. Die bewegten Systeme sind mit dem Flugzeug verbunden und bewegen sich mit dem Flugzeug gegenüber der Erdoberfläche. Dagegen sind die erdfesten Systeme unabhängig von der Flugzeugbewegung. Im folgenden werden 5 Koordinatensysteme eingeführt und in Tabelle II.4.1 zusammengestellt. Ihre Notwendigkeit ergibt sich aus den verwendeten Systemkomponenten.

4.2.1 Laser-Koordinatensystem

Das Laser-Koordinatensystem ist das Bezugssystem des Lasersensors. Sein Ursprung befindet sich im Nullpunkt der Laserdistanzmessung, die Z-Achse wird durch den Laserstrahl gebildet. Die Definition der X- und Y-Achse ist an und für sich beliebig; sie wurde so gewählt, daß diese Achsen durch möglichst kleine Rotationen parallel zu den X- und Y-Achsen des flugzeugfesten Koordinatensystems (4.2.2) ausgerichtet werden können.

Die Einführung des Laser-Koordinatensystems könnte entbehrlich sein. Da der Lasersensor während des Fluges fest mit dem Flugzeug verbunden ist, können die Laserbeobachtungen direkt auf das flugzeugfeste Koordinatensystem bezogen werden. Die allgemeinere Formulierung mit dem Konzept des Laser-Koordinatensystems hält jedoch die Möglichkeit von Systemerweiterungen offen, wie etwa die Verwendung von scannenden Lasersensoren oder den Einbau des Lasersensors auf einer stabilisierten Plattform.

4.2.2 Flugzeugfestes Koordinatensystem

Das flugzeugfeste Koordinatensystem ist ein mit der Flugzeugstruktur fest verbundenes Koordinatensystem, das mit dem Flugzeug bewegt wird. Da alle im Flugzeug fest eingebauten Meßinstrumente in diesem System ihre gegenseitige Position und Orientierung beibehalten, erhält das flugzeugfeste Koordinatensystem eine zentrale Bedeutung (von auftretenden Strukturverformungen unter dynamischen Belastungen kann dabei abgesehen werden). Die im Flugzeugbau übliche Definition des flugzeugfesten Koordinatensystems mit Hilfe der Hauptträgheitsachsen des Flugzeugs und dem Schwerpunkt als Koordinatenursprung muß hier nicht erfolgen; die Wahl des Systems ist im Prinzip frei. Hier werden die Achsenrichtungen durch das eingebaute INS festgelegt; die Neigungsmessungen beziehen sich auf das flugzeugfeste Koordinatensystem. Der Ursprung des Koordinatensystems wird in den Bezugspunkt der GPS-Messungen, also in die auf dem Flugzeug sich befindende GPS-Antenne, gelegt.

Die Achsenrichtungen werden in Anlehnung an die Luftfahrtnorm LN 9300 wie folgt ausgerichtet: die X-Achse ist die in Flugrichtung nach vorne weisende Längsachse, die dazu senkrecht stehende Y-Achse (die

Querachse) weist nach Steuerbord (rechts) und die Z-Achse bildet mit der X- und Y-Achse ein rechtwinkliges kartesisches Koordinatensystem und weist in normaler Fluglage nach unten in Richtung Erdoberfläche.

Für die notwendige gegenseitige Einmessung der Instrumente im Rahmen der Systemkalibrierung müssen die Koordinatenachsen tatsächlich realisiert sein, das heißt, daß über definierte Paßpunkte an der Flugzeugstruktur im flugzeugfesten Koordinatensystem Messungen vorgenommen werden können.

4.2.3 Lokales, astronomisches Horizontsystem

Die Einführung des lokalen, astronomischen Horizontsystems wird durch die Verwendung des INS notwendig. Der Ursprung des lokalen, astronomischen Horizontsystems wird wie beim flugzeugfesten System in den Bezugspunkt der GPS-Messungen (GPS-Antenne) gelegt. Die Z-Achse wird durch die lokale Lotrichtung gebildet und weist nach unten. Die nach Norden gerichtete X-Achse liegt in der lokalen, astronomischen Meridianebene, das heißt in einer Ebene mit der Rotationsachse der Erde, und steht senkrecht auf der Z-Achse. Mit der nach Osten weisenden Y-Achse wird ein rechtshändiges, kartesisches Koordinatensystem vervollständigt.

4.2.4 World Geodetic System 1984 - WGS84

Die GPS-Beobachtungen beziehen sich auf das World Geodetic System 1984 (WGS84). Das WGS84 beschreibt die Erde in geometrischer, geodätischer und geophysikalischer Hinsicht: neben dem geozentrischen Koordinatensystem schließt die Definition des WGS84 ein Erdellipsoid, ein Erdschweremodell und ein Geoid mit ein. Das WGS84 wurde von der Defense Mapping Agency der U.S.A. definiert und ist zum Beispiel bei Decker (1986) beschrieben. Die Realisierung des WGS84 erfolgt über mehr als 1500 Doppler-Stationen. Die Parameter des WGS84-Ellipsoids wurden von dem von der IUGG empfohlenen Geodetic Reference System 1980 (Moritz 1980) übernommen.

Das WGS84-Koordinatensystem ist ein erdfestes, rechtshändiges, kartesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung im Massenzentrum der Erde. Die Achsendefinitionen stehen in enger Beziehung zum System des Conventional International Origin (CIO) des Bureau International de l'Heure (BIH). Die Z-Achse liegt parallel zu der Richtung des vom BIH definierten CIO-Pols. Der WGS-Referenzmeridian liegt parallel zum BIH-Nullmeridian, der von den BIH-Stationen definiert wird. Die X-Achse entsteht als Schnittgerade des WGS-Referenzmeridians mit der Äquatorebene des CIO. Die Y-Achse geht aus der X-Achse durch eine Drehung um 90 Grad in der Äquatorebene in Richtung Osten hervor.

4.2.5 Koordinatensystem der Landesvermessung

Das Koordinatensystem der Landesvermessung steht eigentlich außerhalb der bislang aufgeführten Systeme, da es zur Auswertung der Laser-Profilmessungen nicht notwendigerweise eingeführt werden muß. Da jedoch die Ergebnisse einer Befliegung in der Regel nicht in WGS84-Koordinaten, sondern im jeweiligen System der Landesvermessung vorliegen sollen, kommt diesem System eine praktische Bedeutung zu.

Die Bezugssysteme der Landesvermessungen beziehen sich in der Regel auf konventionell definierte Erdellipsoide. Diese Ellipsoide wurden aus Gradmessungen im 19. Jahrhundert bestimmt. Sie sind nicht notwendigerweise geophysikalisch begründet. Damit muß der Ursprung des Bezugssystems nicht das Geozentrum sein und die kleine Halbachse des Ellipsoids muß nicht mit der mittleren Rotationsachse der Erde zusammenfallen. Den Landesvermessungen der Bundesrepublik Deutschland liegt das Bessel-Ellipsoid mit Datum Rauenberg zugrunde; das Koordinatensystem wird über die Punkte des Deutschen Hauptdreiecksnetzes realisiert.

Aus Gründen der Anschaulichkeit und praktischen Gebrauchsfähigkeit werden die Ergebnisse der topographischen Geländeaufnahme nicht mit geographischen oder kartesischen Koordinaten bezüglich des Bessel-ellipsoids aufbereitet. Zunächst erfolgt eine Trennung zwischen einer zweidimensionalen Parametrisierung auf der Ellipsoidoberfläche und der entlang der Ellipsoidnormalen gemessenen ellipsoidischen Höhe. Die Ellipsoidoberfläche wird mit der Gaußschen konformen Abbildung in Gauß-Krüger Koordinaten abgebildet

| Bezeichnung | Zeichen | Typ | Ursprung | Achsendefinition |
|--|---------|---|--|---|
| Laser-Koordinatensystem Bezugssystem der Laserdistanzmessungen | L | mit Flugzeug bewegt, rechtshändig, kartesisch | Nullpunkt der Laserdistanzmessung | X_L senkrecht zu Y_L und Z_L Y_L in der von Y_F und Z_F aufgespannten Ebene Z_L in Richtung des Laserstrahls auf die Erdoberfläche weisend |
| Flugzeugfestes Koordinatensystem Hauptträgheitsachsensystem des Flugzeugs | F | mit Flugzeug bewegt, rechtshändig, kartesisch | GPS-Antenne des Flugzeugs | X_F Längsachse des Flugzeugs, in Flugrichtung nach vorn weisend Y_F Querachse, nach Steuerbord weisend Z_F Hochachse, mit X_F und Y_F ein orthogonales System bildend, nach unten weisend |
| Lokales, astronomisches Horizontsystem Bezugssystem des INS | H | topozentrisch, rechtshändig, kartesisch | GPS-Antenne des Flugzeugs | X_H in lokaler, astronomischer Meridianebene nach Norden weisend Y_H mit X_H und Z_H ein orthogonales System bildend, nach Osten weisend Z_H lokale Lotrichtung, in Richtung Erdmittelpunkt |
| World Geodetic System 1984 - WGS84 Bezugssystem der GPS-Messungen | W | geozentrisch, rechtshändig, kartesisch | Massenzentrum der Erde | X_W Schnitt von WGS84-Nullmeridian mit Äquatorebene des CIO-Pols, parallel zu BIH-Nullmeridian Y_W mit X_W und Z_W ein orthogonales System bildend, in Äquatorebene nach Osten weisend Z_W parallel zum vom BIH definierten CIO-Pol nach Norden gerichtet |
| Koordinatensystem der Landesvermessung | B | erdfest | In Deutschland Ursprung des Besselellipsoids | Definition nach Konvention |

Tab. II.4.1 Koordinatensysteme

(Großmann 1976). Die rein geometrisch definierten ellipsoidischen Höhen eignen sich nicht als Gebrauchshöhen. Um ein Bergaufließen des Wassers zu vermeiden, orientiert sich das amtliche Höhensystem am Erdschwerefeld. Zur Diskussion geophysikalisch begründeter Höhensysteme wird auf Heiskanen und Moritz (1967) verwiesen. Das Deutsche Haupthöhennetz der amtlichen Vermessung in der Bundesrepublik Deutschland beruht auf sphäroidisch-orthometrischen Höhen (Heck 1987). Zum Übergang von geometrisch-ellipsoidischen Höhen auf das amtliche Höhensystem werden Geoidmodelle herangezogen. Mit den Modellen von Lelgemann et al. (1981) und Denker (1989) stehen heute sehr leistungsfähige Modelle zur Verfügung, die

eine relative Genauigkeit im Bereich von wenigen Zentimetern versprechen (Denker), beziehungsweise 10...20 cm bei Lelgemann.

4.3 Meßgrößen und Parameter des Laser-Profilmeßsystems

An dieser Stelle sollen die bereits in den vorhergehenden Kapiteln eingeführten Meßgrößen und Parameter zur Korrektur der systematischen Fehler zusammengestellt werden. Zur Beschreibung der Beziehungen zwischen den Koordinatensystemen und zur Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte werden dann noch zwei zusätzliche Typen von konstanten Kalibrierungsparameter benötigt, die die Exzentrizität und Winkelorientierung des Laser-Koordinatensystems gegenüber dem flugzeugfesten System (Lasereinbauwinkel und Exzentrizitätsparameter) beschreiben.

4.3.1 Meßgrößen

(1) Laserstrecke s_L

Die Laserstrecke ist die räumliche Distanz zwischen dem Ursprung des Laser-Koordinatensystems und dem Zielpunkt der Lasermessung (Laserpunkt). Es wird vorausgesetzt, daß es sich bei der Laserstrecke s_L um eine kalibrierte Meßgröße handelt, die aus der ursprünglich vom Lasersensor gemessenen Distanz s_0 durch Anbringen einer eventuell notwendigen Additionskonstanten und eines Maßstabfaktors hervorgeht.

(2) Antennenposition $[x_A, y_A, z_A]^T_w$

Durch die relative, kinematische Positionsbestimmung mit GPS wird die Position $[x_A, y_A, z_A]^T_w$ der GPS-Antenne auf dem Flugzeug im Koordinatensystem WGS84 bestimmt.

(3) Neigungswinkel (ϕ, θ, ψ)

Die Neigungswinkel (ϕ, θ, ψ) sind die Meßgrößen des INS. Sie beschreiben die Winkelorientierung des flugzeugfesten Koordinatensystems gegenüber dem lokalen, astronomischen Koordinatensystem.

4.3.2 Parameter zur Korrektur systematischer Fehler

(1) Translationsparameter $[dtx, dty, dtz]^T_w$

Die Translationsparameter $[dtx, dty, dtz]^T_w$ beschreiben die translatorisch wirkenden systematischen Fehler der Positionsbestimmung mit GPS.

(2) Rotationsparameter (α, β, γ)

Die Rotationsparameter (α, β, γ) bewirken eine zusätzliche Rotation zur Korrektur der systematischen Fehler des INS. Die einzelnen Parameter können nicht direkt zur Korrektur den jeweiligen, vom INS gemessenen Neigungswinkel zugeordnet werden.

4.3.3 Kalibrierungsparameter

Kalibrierungsparameter werden benötigt, um die Position und Orientierung des Lasersensors gegenüber dem flugzeugfesten Koordinatensystem zu beschreiben. Die Einführung dieser Kalibrierungsparameter (wie auch der Parameter zur Korrektur systematischer Fehler in 4.3.2) erfolgt hier in formaler Weise, da sie zur Berechnung der Laserpunktkoordinaten erforderlich sind. Die Methoden zur Bestimmung dieser Parameter werden in Kapitel 5 beschrieben.

Die Kalibrierungsparameter sind im flugzeugfesten Koordinatensystem konstante Größen, denen bei jeder Befliegung unveränderte Werte zugeordnet werden können; sie sind also spezifische Parameter des jeweiligen Laser-Profilmeßsystems, im Gegensatz zu den Parametern zur Korrektur systematischer Fehler, die bei jeder Befliegung aktuelle Werte annehmen und somit jeweils wieder neu zu bestimmen sind.

(1) Lasereinbauwinkel dr, dp

Die Kalibrierungsparameter dr und dp beschreiben die Einbauwinkel des Lasersensors gegenüber der Flugzeugstruktur - sie beschreiben die gedrehte Lage des Laser-Koordinatensystems gegenüber dem flugzeug-

festen Koordinatensystem. Beim Einbau des Lasersensors in das Flugzeug wird darauf geachtet, daß der Laserstrahl in normaler Fluglage möglichst senkrecht auf die Erdoberfläche trifft. Der Einbauwinkel dp wird deshalb in der Größe des mittleren Anstellwinkels des Flugzeugs vorgewählt, beispielsweise $dp=5^\circ$ und $dr=0^\circ$.

(2) Exzentrizitätsparameter $[x_L, y_L, z_L]_F^T$

Durch die Exzentrizitätsparameter $[x_L, y_L, z_L]_F^T$ werden die unterschiedlichen Positionen von GPS-Antenne auf dem Dach des Flugzeuges und dem Lasersensor an der Unterseite berücksichtigt. Die Komponenten des Vektors $[x_L, y_L, z_L]_F^T$ beschreiben den Ursprung des Laser-Koordinatensystems im flugzeugfesten Koordinatensystem.

4.4 Beziehungen zwischen den Koordinatensystemen

Zwischen den Koordinatensystemen bestehen Beziehungen, die sich durch räumliche Transformationen beschreiben lassen. Die Transformationsparameter werden durch Meßgrößen und Kalibrierungsparameter realisiert. Im folgenden werden Rotationsmatrizen $R(a,b,c)$ verwendet, die sich stets in der kardanischen Form aus den Elementardrehmatrizen $R_1(a)$, $R_2(b)$, $R_3(c)$ zusammensetzen:

$$R(a,b,c) = R_3(c) \cdot R_2(b) \cdot R_1(a)$$

Eine positive Drehrichtung ist gegeben, wenn in Richtung der Drehachse betrachtet sich die beiden anderen Achsen im Uhrzeigersinn drehen.

4.4.1 Vom Laser-Koordinatensystem zum flugzeugfesten Koordinatensystem

Ein im Laser-Koordinatensystem gegebener Ortsvektor $r_L = [x, y, z]_L^T$ (Vektor zum Laserpunkt) wird durch eine räumliche Transformation in den Ortsvektor $r_F = [x, y, z]_F^T$ im flugzeugfesten Koordinatensystem mit den in 4.3.3 eingeführten Kalibrierungsparameter als Transformationsparameter überführt. Zunächst wird eine Rotation um die 1. und 2. Achse durchgeführt; eine Rotation um die 3. Achse ist bei nicht-scannenden Lasersystemen ohne Bedeutung. Die Rotationsparameter sind die Lasereinbauwinkel dr und dp . Anschließend erfolgt eine Translation vom Ursprung des Laser-Koordinatensystems in den Ursprung des flugzeugfesten Systems entlang der Achsenrichtungen des flugzeugfesten Systems. Der Betrag der Translation wird durch den Vektor der Exzentrizitätsparameter $[x_L, y_L, z_L]_F^T$ bestimmt.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_F = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix}_F + R(dr, dp, 0) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_L \quad (\text{II.4.1})$$

4.4.2 Vom flugzeugfesten Koordinatensystem zum lokalen, astronomischen Horizontsystem

Ein Ortsvektor r_F im flugzeugfesten Koordinatensystem wird durch eine Rotation um alle 3 Achsen in einen Ortsvektor r_H im lokalen, astronomischen Horizontsystem überführt. Durch den gemeinsamen Ursprung beider Koordinatensystem wird eine Translation entbehrlich. Werden die vom INS gemessenen Neigungswinkel (ϕ, θ, ψ) als frei von systematischen Fehlern angenommen, dann entsprechen diese Neigungswinkel den benötigten Rotationsparametern.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_H = R(\phi, \theta, \psi) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_F$$

Zur Korrektur systematischer Fehler des INS wird eine weitere Rotation mit den Parametern (α, β, γ) abgeschlossen.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_H = R(\alpha, \beta, \gamma) \cdot R(\phi, \theta, \psi) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_F \quad (\text{II.4.2})$$

4.4.3 Vom lokalen, astronomischen Horizontsystem zu WGS84

Die Relation zwischen dem lokalen, astronomischen Horizontsystem und dem WGS84 verbindet ein lokal definiertes mit einem global definierten Koordinatensystem. Die Koordinaten des Ursprungs des lokalen, astronomischen Horizontsystems müssen im System WGS84 bekannt sein; sie werden als $[x_0, y_0, z_0]^T_w$ bezeichnet, mit ellipsoidischer Breite B_0 und Länge L_0 bezüglich des WGS84-Ellipsoids. Da sich das Horizontsystem an der lokalen Lotrichtung orientiert müssen beim Übergang von der astronomischen Länge Λ_0 und Breite Φ_0 die Lotabweichungskomponenten η und ξ berücksichtigt werden. Gegenüber den systematischen Fehlern der INS Neigungsmessung kann jedoch angenommen werden, daß die Lotabweichungskomponenten einen kleinen Betrag annehmen und für die praktische Anwendung der Laser-Profilmessung zur topographischen Geländeaufnahme vernachlässigt werden kann.

Die Transformation eines Ortsvektors r_H vom lokalen, astronomischen Horizontsystem in den Ortsvektor r_w in WGS84 berechnet sich dann unter dieser Einschränkung zu:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_w = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}_w + R_3(-L_0) \cdot R_2\left(\frac{\pi}{2} + B_0\right) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_H$$

Im konkreten Fall der Laser-Profilmessung wird der Ursprung des lokalen, astronomischen Horizontsystems in die GPS-Antenne des Flugzeugs gelegt. Die Transformation wird bezüglich der Antennenposition $[x_A, y_A, z_A]^T_w$ mit Länge L_A und Breite B_A durchgeführt. Dabei werden zur Korrektur der systematischen Fehler der GPS-Positionen die Translationsparameter $[dtx, dty, dtz]^T_w$ berücksichtigt. Damit ergibt sich die Beziehung zwischen dem lokalen, astronomischen Horizontsystem und dem WGS84 zu:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_w = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix}_w + \begin{bmatrix} dtx \\ dty \\ dtz \end{bmatrix}_w + R_3(-L_A) \cdot R_2\left(\frac{\pi}{2} + B_A\right) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_H \quad (\text{II.4.3})$$

4.4.4 Von WGS84 zum Koordinatensystem der Landesvermessung

Die Aufgabenstellung, Koordinaten der Laserpunkte zu bestimmen, ist mit der Berechnung im Koordinatensystem WGS84 allgemein gelöst. Der Übergang auf ein Bezugssystem der Landesvermessung ist von der Definition dieses Bezugssystems abhängig. In den folgenden Ausführungen werden deshalb nur die grundsätzlichen Schritte für Berechnungen innerhalb der Bundesrepublik Deutschland angesprochen.

Die Transformation von Koordinaten im geozentrischen WGS84 in das Bezugssystem der Landesvermessung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst erfolgt die Transformation des Ortsvektors r_w von WGS84 auf den geozentrischen Ortsvektor r_B bezüglich des Bessel-Ellipsoids durch eine räumliche 7-Parameter-Transformation mit den Translationsparametern dx, dy, dz , den Rotationsparametern a, b, c und dem Maßstabsfaktor m :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}_B + m \cdot R(a,b,c) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_w \quad (\text{II.4.4})$$

Im zweiten Schritt wird zunächst die kartesische Darstellung des Ortsvektors \mathbf{r}_B in geographische Koordinaten $[B,L,H]_B$ überführt. Dabei erfolgt die Trennung zwischen der zweidimensionalen Parametrisierung auf der Ellipsoidoberfläche durch die geographische Länge L und Breite B , und der entlang der Ellipsoidnormalen gemessenen ellipsoidischen Höhe H . Die Formulierung dieses Schrittes erfolgt hier nur symbolisch; die Formeln finden sich in den Lehrbüchern zur Landesvermessung (z.B. Großmann 1976, Heck 1987).

$$\begin{bmatrix} B \\ L \\ H \end{bmatrix}_B \leftarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B \quad (\text{II.4.5})$$

Die geographischen Koordinaten B und L auf der Ellipsoidfläche werden dann mit der Gaußschen konformen Abbildung in eine Kartenebene abgebildet und nach den Konventionen der Landesvermessung als Hoch- und Rechtswert dargestellt.

$$\begin{bmatrix} \text{HOCH} \\ \text{RECHTS} \end{bmatrix}_{GK} \leftarrow \begin{bmatrix} B \\ L \end{bmatrix}_B \quad (\text{II.4.6})$$

Die ellipsoidische Höhen H werden durch Subtraktion einer Geoidundulation N , die sich z.B. nach dem Geoidprogramm von Denker (1989) berechnen lassen, in orthometrische Höhen h des amtlichen Höhen-systems überführt (Torge 1975 S.156 Bezeichnungen H bzw. h wurden hier vertauscht).

$$h_{NN} = H_B - N \quad (\text{II.4.7})$$

4.5 Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte in WGS84

Aus den Beziehungen zwischen den Koordinatensystemen kann die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte im System WGS84 abgeleitet werden. Im Laser-Koordinatensystem L erhält ein mit der Laserstrecke s_L gemessener Laserpunkt die Koordinaten:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_L = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_L \end{bmatrix}_L \quad (\text{II.4.8})$$

Mit Hilfe der Kalibrierungsparameter, das sind die Exzentrizitätsparameter $[x_L, y_L, z_L]_F^T$ und die Lasereinbauwinkeln dr, dp , können die Koordinaten des Laserpunktes in das flugzeugfeste Koordinatensystem überführt werden:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_F = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix}_F + R(dr, dp, 0) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_L \end{bmatrix}_L \quad (\text{II.4.9})$$

Durch die gemessenen Neigungswinkel des INS (ϕ, θ, ψ) und den Rotationsparametern (α, β, γ) zur Korrektur systematischer Fehler werden die Koordinaten des Laserpunktes im lokalen, astronomischen Horizontsystem berechnet:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_H = R(\alpha, \beta, \gamma) \cdot R(\phi, \theta, \psi) \cdot \left[\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix}_F + R(dr, dp, 0) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_L \end{bmatrix}_L \right] \quad (\text{II.4.10})$$

Daraus berechnen sich die Koordinaten des Laserpunktes im System WGS84 mit der in (II.4.3) angegebenen Beziehung:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_w = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix}_w + \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}_w + R_3(-L_A) \cdot R_2\left(\frac{\pi}{2} + B_A\right) \cdot R(\alpha, \beta, \gamma) \cdot R(\phi, \theta, \psi) \cdot \left[\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix}_F + R(dr, dp, 0) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_L \end{bmatrix}_L \right] \quad (\text{II.4.11})$$

Die Überführung der Koordinaten $[x, y, z]_w^T$ der Laserpunkte von WGS84 in das Bezugssystem der Landesvermessung (Rechts, Hoch, orthometrische Höhe) erfolgt analog zu II.4.4.4 und braucht hier nicht explizit angegeben werden.

5. Systemkalibrierung

5.1 Problemstellung

Der Systemkalibrierung kommt eine entscheidende Bedeutung bei der Auswertung von Laser-Profilmessungen zu, da nur bei einem kalibrierten Meßsystem ein hochgenaues Ergebnis, frei von systematischen Fehlerinflüssen erwartet werden darf. Schon beim Entwurf eines Laser-Profilmeßsystems müssen Bedingungen, die von der Systemkalibrierung vorgegeben werden, berücksichtigt werden. Ebenso muß die Flugplanung mit den Erfordernisse der Systemkalibrierung abgestimmt werden. Ziel dieses Kapitels ist es, die Methoden der Systemkalibrierung zu beschreiben und die an das Laser-Profilmeßsystem gestellten Voraussetzungen zu definieren.

Die Notwendigkeit der Systemkalibrierung ergibt sich daraus, daß bei einem Laser-Profilmeßsystem Messungen von mehreren Instrumenten zur Auswertung herangezogen werden. Die Systemkalibrierung bearbeitet drei verschiedene Teilaufgaben:

1. Individuelle Kalibrierung

Jedes einzelne Meßinstrument muß individuell kalibriert werden, das heißt der Bezugspunkt oder die Bezugsrichtung, auf die sich die Messungen beziehen, muß festgelegt werden und die Maßeinheit muß normiert werden. Bei der Auswertung von Laser-Profilmessungen müssen die drei, zur Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte verwendeten Meßinstrumente (Lasersensor, GPS, INS) einer individuellen Kalibrierung unterzogen werden.

2. Gegenseitige Beziehungen

Die Systemkalibrierung beschreibt die gegenseitigen Beziehungen der Instrumente im Gesamtsystem. So wurden in II.4.3.3 Kalibrierungsparameter (Exzentrizitätsparameter und Einbauwinkel des Lasers) eingeführt, die die Position und Orientierung des Lasersensors gegenüber dem durch GPS und INS festgelegten, flugzeugfesten Koordinatensystem beschreiben.

3. Korrektur systematischer Fehler

Neben der individuellen und gegenseitigen Kalibrierung werden bei der Systemkalibrierung eines Laser-Profilmeßsystems auch die Parameter zur Korrektur systematischer Fehler des INS und GPS bestimmt (s. II.4.3.2). Diese Parameter müssen, im Gegensatz zu den als fest angesehenen Kalibrierungsparameter, bei jeder Befliegung neu bestimmt werden. Somit wird die Durchführung der Systemkalibrierung, beziehungsweise einzelner Teile derselben, bei jeder Befliegung notwendig.

Prinzipiell kann die Systemkalibrierung in direkter oder indirekter Weise durchgeführt werden. Bei der direkten Methode erfolgt die Kalibrierung durch eine Justierung des Instruments oder durch direkte Messung der Kalibrierungsparameter. Dagegen werden bei der indirekten Methode die Kalibrierungsparameter in einem Ausgleichungsverfahren über unabhängige Kontrollmessungen geschätzt.

Schon eine einfache Überlegung zeigt, daß sich die Kalibrierungsparameter eines Laser-Profilmeßsystems nicht in einem gemeinsamen Ansatz direkt oder indirekt bestimmen lassen, da zu viele Parameter eine gleichartige Wirkung haben, das heißt hochgradig miteinander korreliert sind. So wirken zum Beispiel in der Vertikalrichtung unter anderem der Exzentrizitätsparameter z_{LF} , der Translationsparameter dtz_w , sowie die Additionskonstante und der Maßstabsfaktor der Laserdistanzmessung in gleicher Weise. Zur Lösung des Kalibrierungsproblems, das heißt zur Trennung der einzelnen Effekte, werden deshalb mehrere Teilprobleme gebildet, die mit unterschiedlichen Methoden bearbeitet werden. Die zugrundeliegende Zielvorstellung ist die Realisierbarkeit der Systemkalibrierung mit einer in der Praxis durchführbaren Methode. Dabei ist ein wesentlicher Ansatzpunkt für die Lösung, daß sich die zu bestimmenden Kalibrierungsparameter in drei Kategorien einteilen lassen:

1. Parameter, die nur einmalig bestimmt werden müssen und deren Bestimmung in einer Laborkalibrierung erfolgen kann. Das bedeutet, daß die Kalibrierung dieser Parameter unabhängig von einem Meßflug stationär durchgeführt werden kann. Unter diese Kategorie fallen die Additionskonstante und der Maßstabsfaktor des Laserdistanzmessers und die Exzentrizitätsparameter $[x_L, y_L, z_L]_F^T$.
2. Parameter, die nur einmalig bestimmt werden müssen, deren Kalibrierung jedoch durch Auswertung eines Kalibrierungsfluges erfolgt. Hierunter fallen die Einbauwinkel des Lasersensors dr und dp .
3. Parameter, die bei jeder Laser-Profilbefliegung neu bestimmt werden müssen. Hierzu zählen die Parameter zur Korrektur systematischer Fehler von INS und GPS, d.h. die Translationsparameter $[dtx, dty, dtz]_w^T$ und die Rotationsparameter (α, β, γ) .

Die Bestimmung der Kalibrierungsparameter innerhalb dieser drei Kategorien soll im folgenden beschrieben werden. Der Abschnitt 5.2 widmet sich der Laborkalibrierung. In Abschnitt 5.3 werden die Voraussetzungen für die indirekte Systemkalibrierung im Rahmen eines Kalibrierungsfluges behandelt. Der Kalibrierungsflug muß dabei nicht als spezielle Befliegung durchgeführt werden; die Erfordernisse der Systemkalibrierung können auch im Rahmen einer normalen Laser-Profilbefliegung berücksichtigt werden. Die algorithmische, indirekte Bestimmung der Kalibrierungsparameter durch die Auswertung des Kalibrierungsfluges wird in Abschnitt 5.4 abgeleitet.

5.2 Laborkalibrierung

5.2.1 Lasersensor

Die Kalibrierung des Lasersensors hat die Aufgabe:

1. den Nullpunkt der Lasermessungen zu bestimmen und ihn als mechanischen Bezugspunkt am Gerät festzulegen,
2. den Maßstab der Längenmeßeinheit zu bestimmen,

3. die Sende- und Empfangsoptik gegenseitig aufeinander auszurichten.

Während die Ausrichtung der Laseroptik nur durch eine direkte Justierung am Gerät vorgenommen werden kann, können Nullpunkt und Maßstab der Lasermessungen in der Form einer Additionskonstanten a_L und eines Maßstabfaktors m_L rechnerisch berücksichtigt werden. Die vom Lasersensor ausgegebene Strecke s_0 wird dann zur Strecke s_L korrigiert mit:

$$s_L = a_L + m_L \cdot s_0$$

Die Bestimmung der Additionskonstanten und des Maßstabfaktors bedient sich der Methoden, die von der terrestrischen, elektrooptischen Distanzmessung bekannt sind. Die gesuchten Kalibrierungsparameter lassen sich aus den Differenzen von mindestens zwei gemessenen Strecken mit ihren jeweiligen Sollstrecken berechnen. Bei der reflektorlosen Distanzmessung ist zu beachten, daß als Zielpunkte Oberflächen mit einer hohen Reflexivität verwendet werden und der Kegel des Laserstrahles nicht gestört wird. Als Zielobjekte sind helle Wände von Bauwerken geeignet. Da die Wahl des Zielpunktes unter diesen Umständen zu Schwierigkeiten führen kann, wird in der Regel von verschiedenen Standpunkten die Distanzmessung zu einem Zielpunkt durchgeführt. Der erste Standpunkt ist in einer Entfernung von ca. 30 bis 50 m zu wählen. Der zweite Standpunkt soll nach Möglichkeit in der maximalen Reichweite des Lasers gewählt werden. Die Abweichungen der während der Kalibrierungsmessung herrschenden atmosphärischen Bedingungen von der Standardatmosphäre müssen bei der Berechnung des Maßstabfaktors über entsprechende Korrekturformeln berücksichtigt werden.

Obwohl die Additionskonstante und der Maßstabfaktor zu der Gruppe der einmalig zu bestimmenden Kalibrierungsparameter zählen, sollte die Kalibrierung von Zeit zu Zeit überprüft werden.

5.2.2 GPS und INS

Die Kalibrierung von komplexen Meßsystemen, wie GPS-Empfänger und INS, kann auf mehreren Ebenen erfolgen, der Benutzer kann jedoch in der Regel nur einen begrenzten Einfluß auf die im Gerät ablaufenden Prozesse nehmen. So führen die meisten Systeme automatisch eine Selbstkalibrierung vor der eigentlichen Messung durch, wobei die elektronischen Bauelemente überprüft und aufeinander abgestimmt werden. Dem Benutzer bleibt die Möglichkeit, durch spezielle Korrekturparameter die GPS- und INS-Messungen extern für die Auswertung zu kalibrieren. Die in II.4.3 eingeführten Parameter zur Korrektur systematischer Fehler werden jedoch indirekt über den Kalibrierungsflug bestimmt.

Zur Laborkalibrierung von GPS-Messungen gehört die mechanische Festlegung des Bezugspunktes der GPS-Messungen innerhalb der GPS-Antenne. Diese Kalibrierung wird in der Regel vom Antennenhersteller angegeben.

Das INS wird im Laser-Profilmeßsystem lediglich zur Neigungsmessung herangezogen. Die Kalibrierung des INS beschränkt sich deshalb auf die für die Neigungsmessung relevanten Parameter. Die Laborkalibrierung des INS erfolgt in einem Bewegungssimulator und dient zur Bestimmung des Nullpunktes des INS-Bezugssystems und der Festlegung der Meßachsen, die am Gerät markiert werden. Beim Einbau des INS in das Flugzeug muß ein eindeutiger Bezug zwischen den Meßachsen des INS und der Flugzeugstruktur hergestellt werden. Vor jeder Meßkampagne wird vom INS ein Selbstausrichteprozess durchgeführt. Dabei wird das INS-Bezugssystem auf die lokale Lot- und Meridianrichtung am Startort ausgerichtet. Auf diesen für die Genauigkeit der Auswertung wesentlichen Prozess hat der Benutzer in der Regel keinen Einfluß, da die Dauer und Genauigkeit des Ausrichtvorganges, in Abhängigkeit von der geographischen Breite des Startortes, vom INS selbst bestimmt werden.

5.2.3 Beziehung zwischen Laser-Koordinatensystem und flugzeugfestem Koordinatensystem

Die Exzentrizitätsparameter $[x_L, y_L, z_L]_F^T$ beschreiben den Ort des Nullpunktes der Laserdistanzmessung in Bezug auf das flugzeugfeste Koordinatensystem mit der GPS-Antenne als Ursprung. Diese Parameter werden in der Laborkalibrierung direkt bestimmt. Da sich die GPS-Antenne und in der Regel auch der Laser-

sensor an der Außenseite der Flugzeugstruktur befinden, können diese Instrumente als von außen gut zugängliche Zielpunkte für terrestrische Einmessungen dienen. Die Bestimmung des Kalibrierungsvektors muß im flugzeugfesten Koordinatensystem vorgenommen werden. Die sichere Übertragung der Orientierung dieses Systems wird durch die Messung definierter Paßpunkte an der Flugzeugstruktur gewährleistet.

Die Einbauwinkel des Lasersensors gegenüber dem flugzeugfesten Koordinatensystem, ausgedrückt durch die Kalibrierungsparameter d_r und d_p , könnten prinzipiell ebenfalls durch direkte Messungen bestimmt werden. Die praktische Durchführung würde aber auf erhebliche Schwierigkeiten stoßen. Die Bestimmung wird deshalb indirekt durch die Auswertung eines Kalibrierungsfluges vorgenommen.

5.2.4 Beziehung zwischen Lasersensor und Spotting-Kamera

Die gegenseitige Kalibrierung des Lasersensors und der Spotting-Kamera (Video-Kamera) ist für die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte nicht notwendig. Für die Interpretation der Laserpunkte kann es aber hilfreich sein, wenn der Laserpunkt in den Aufzeichnungen der Spotting-Kamera auffindbar ist und im Geländeprofil verfolgt werden kann. Dazu müssen die Achsen der Spotting-Kamera möglichst parallel zum Laserstrahl ausgerichtet werden. Die gegenseitige Kalibrierung von Lasersensor und der Spotting-Kamera ist nur als direkte Justierung sinnvoll.

Voraussetzung für die Kalibrierung ist der feste Einbau des Lasersensors und der Spotting-Kamera auf einer gemeinsamen Montageeinheit, so daß die gesamte Einheit zur Kalibrierung aus dem Flugzeug ausgebaut werden kann. Zur Durchführung der Kalibrierung wird ein Infrarotsichtgerät benötigt, mit dessen Hilfe der Laserzielpunkt sichtbar gemacht werden kann. Dieser Punkt wird markiert, so daß die Spotting-Kamera zentrisch auf diesen Punkt ausgerichtet werden kann. Die Justierung der Achsen wird in mindestens zwei Entfernungen zur reflektierenden Fläche wiederholt.

Neben der Justierung der Achsen muß ein zeitlicher Bezug zwischen den Lasermessungen und den Aufzeichnungen der Spotting-Kamera geschaffen werden. Voraussetzung hierfür ist die Einblendung einer Zeitmarke in das Bild der Spotting-Kamera. Während des Fluges kann beim Überfliegen von Gebäuden oder anderen 3-dimensionalen Objekten durch Vergleich mit den Laserregistrierungen die eindeutige zeitliche Zuordnung überprüft werden.

5.3 Kalibrierungsflug

5.3.1 Topographische Paßpunkte

Eine wichtige Voraussetzung für die rechnerische Systemkalibrierung mit Hilfe eines Kalibrierungsfluges ist das Vorhandensein von topographischen Paßpunkten. Wie in der Photogrammetrie werden Geländepunkte als Paßpunkte bezeichnet, deren Koordinaten bekannt sind, die vom aufnehmenden Sensor gemessen wurden und die in die Auswertung einbezogen werden können. Unter topographischen Paßpunkten werden in der Laser-Profilmessung markante Punkte des Laserprofils verstanden, die sich eindeutig charakteristischen Geländemerkmale oder Kunstbauten zuordnen lassen, die aber nicht speziell signalisiert sind. Die Identifizierung der topographischen Paßpunkte wird durch die Aufzeichnungen der Spotting-Kamera unterstützt. Topographische Paßpunkte finden sich beispielsweise beim Überfliegen von Ortschaften, wo einzelne Sprünge im Laserprofil als Gebäudeteile identifiziert werden. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung II.5.1.

Nach der Identifizierung und Zuordnung der topographischen Paßpunkte werden ihre Koordinaten einer Karte, einem orientierten Luftbildpaar oder einer Datenbank, wo in digitaler Form die Gebäudeformen gespeichert sind, entnommen. Die Genauigkeit der Koordinaten topographischer Paßpunkte kann in den einzelnen Koordinatenkomponenten sehr unterschiedlich sein. Während die Höhenkomponente sehr gut identifizierbar und meßbar ist, hängt die Genauigkeit der in Flugrichtung weisenden Koordinatenkomponente direkt mit der Meßrate, beziehungsweise dem Abstand zwischen den Laserpunkten ab. Schwierigkeiten kann die Festlegung der quer zur Flugrichtung weisenden Koordinatenrichtung bereiten. Zur Identifizierung und Messung müssen dazu die Nachbarschaftsbeziehungen mehrerer Laserpunkte in Betracht gezogen werden.

Die Qualität der Systemkalibrierung hängt in direkter Weise von der Genauigkeit ab, mit der die topographischen Paßpunkte identifiziert und gemessen wurden. Da sich die Genauigkeit der Punktidentifizierung nicht beliebig steigern läßt, wird es darauf ankommen, durch eine möglichst hohe Anzahl von topographischen Paßpunkten die Qualität der Systemkalibrierung zu sichern.

Die Identifizierung und Messung der topographischen Paßpunkte wird im Bezugssystem der Landesvermessung vorgenommen. Diese Koordinaten müssen dann in das System WGS84 überführt werden, da der Ausgleichungsansatz nach II.5.4 im WGS84 formuliert wird. Dabei wird die in II.4.4.4 angegebene Vorgehensweise in umgekehrter Reihenfolge ausgeführt.

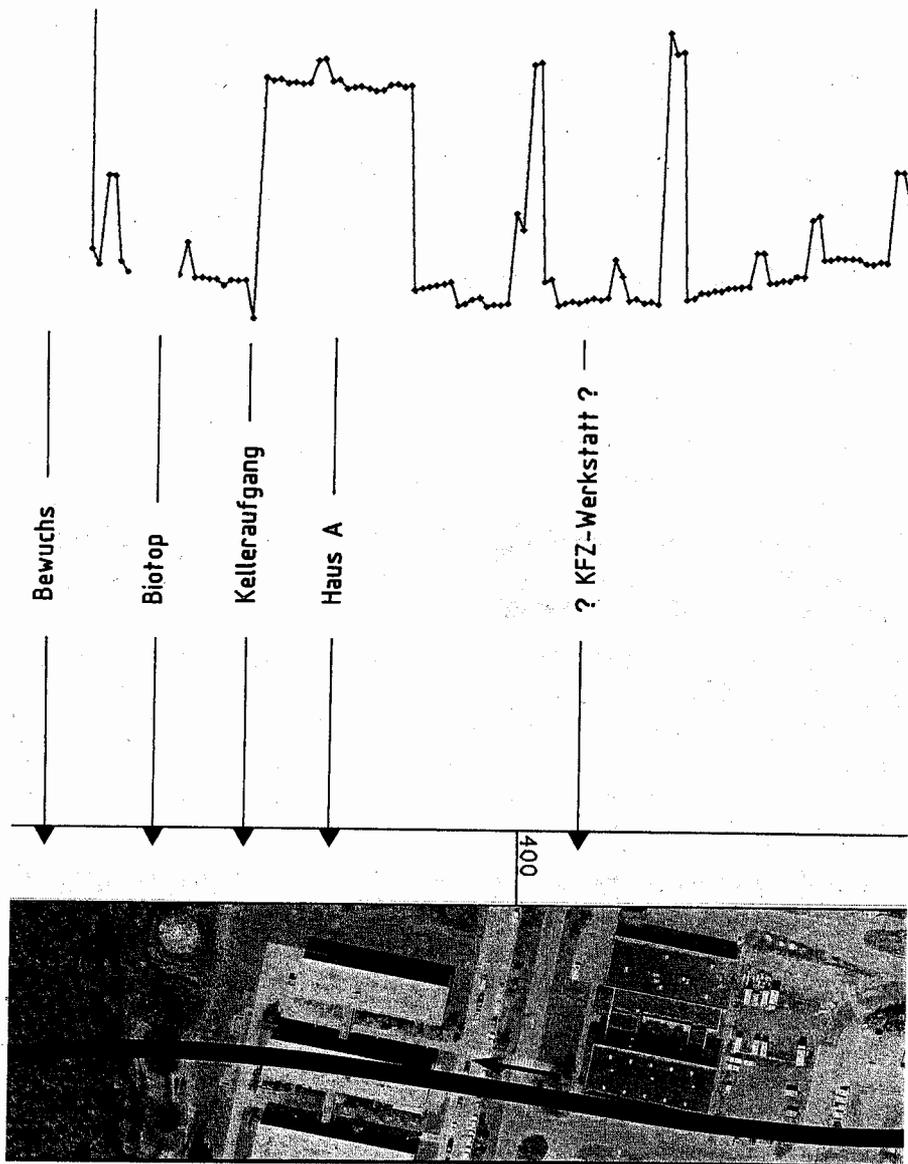


Abb. II.5.1 Topographische Paßpunkte

5.3.2 Zu kalibrierende Parameter

Nach der durchgeführten Laborkalibrierung verbleiben noch 3 Gruppen von Parametern mit insgesamt 8 Komponenten, die über die Messung von topographischen Paßpunkten indirekt bestimmt werden müssen:

- 2 Kalibrierungsparameter d_r und d_p (Einbauwinkel des Lasersensors)
- 3 Translationsparameter $[d_{tx}, d_{ty}, d_{tz}]_w^T$ zur Korrektur systematischer Fehler der GPS-Positionsbestimmung
- 3 Rotationsparameter (α, β, γ) zur Korrektur systematischer Fehler der INS-Neigungsmessung.

Die Kalibrierungsparameter d_r und d_p sind feste Parameter, die für jedes Laser-Profilmeßsystem prinzipiell nur einmal bestimmt werden müssen. Da die Schätzung durch Auswertung eines Kalibrierungsfluges, jedoch nur im Zusammenhang mit den übrigen 6 Parametern durchgeführt werden kann, wird im weiteren keine Unterscheidung in feste und veränderliche Parameter getroffen.

Die Translationsparameter $[d_{tx}, d_{ty}, d_{tz}]_w^T$ modellieren systematische Fehler der aus GPS-Messungen bestimmten Positionskoordinaten. Die Wirkung der Translationsparameter unterscheidet nicht nach den Ursachen der systematischen Fehler (Unsicherheiten in der geodätischen Datumstransformation, systematische Fehler in der Auswertung der GPS-Beobachtungen durch nicht-modellierte Effekte). Die Korrektur systematischer Fehler müßte im Prinzip als eine zeitabhängige Funktion angesetzt werden. Wie schon in

II.3.3.6 ausgeführt wurde, wird aber auf den zeitabhängigen Ansatz verzichtet; es wird lediglich angenommen, daß der konstante Parametersatz für einen gewissen Zeitraum einer hinreichenden Genauigkeit genügt. Nach den Genauigkeitsanforderungen in II.3.3.5 ist eine Genauigkeit der Positionen von $\leq 10\text{cm}$ einzuhalten. Das Vorgehen wird mit rein praktischen Erwägungen begründet. Die sichere Bestimmung zeitabhängiger Parameter würde eine große Zahl topographischer Paßpunkte erfordern, die über die Befliegungsdauer möglichst gleichmäßig verteilt überflogen werden. Diese Bedingung würde den praktischen Einsatz der Laser-Profilmessung unter Umständen stark einschränken.

Die Vorgehensweise zur Kalibrierung der vom INS gemessenen Neigungen erfolgt analog zu den Positionen aus GPS. Durch den Ansatz einer Rotationsmatrix mit den Rotationsparametern (α, β, γ) sollen alle verbleibenden systematischen Fehler in der Neigungsbestimmung korrigiert werden. Die Rotationsparameter (α, β, γ) können dann nicht mehr direkt den ursprünglich INS-Messungen (ϕ, θ, ψ) zugeordnet werden. Auch hier wird angenommen, daß für einen bestimmten Zeitraum eine zeitunabhängige Modellierung mit einem festen Parametersatz angesetzt werden darf. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Neigungsbestimmung sind in Tabelle II.3.1 dargelegt.

5.3.3 Bestimmbarkeit der Parameter

Bevor der Ausgleichungsansatz zur indirekten Bestimmung der Lasereinbauwinkel, Translations- und Rotationsparameter hergeleitet wird, soll in diesem Abschnitt die Bestimmbarkeit der Parameter diskutiert werden. Dabei ist zu klären, ob sich die Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Koordinaten der topographischen Paßpunkte voneinander trennen lassen. Mit Hilfe der folgenden Abbildungen soll diese Frage untersucht werden.

In den Abbildungen II.5.2, II.5.3 und II.5.4 werden jeweils 4 topographische Paßpunkte, die in den Ecken eines quadratischen Befliegungsgebietes angeordnet seien, überflogen. Die Überlegungen werden in einem topozentrischen Horizontsystem durchgeführt, das in Punkt 1 gelagert ist. Vereinfachend wird angenommen, daß die 4 topographischen Paßpunkte in einer horizontalen Ebene liegen, und daß die Achsen des flugzeugfesten Koordinatensystems parallel zu den Achsen des topozentrischen Horizontsystems verlaufen, der Laserstrahl also vertikal nach unten weist - abgesehen von den Einflüssen der simulierten Kalibrierungsparameter. Die Befliegung soll von Punkt 1 nach 2 und nach einer Wendeschleife in entgegengesetzter Richtung von 3 nach 4 erfolgen. Die Befliegung wird zweifach, in unterschiedlichen Flughöhen durchgeführt. Die

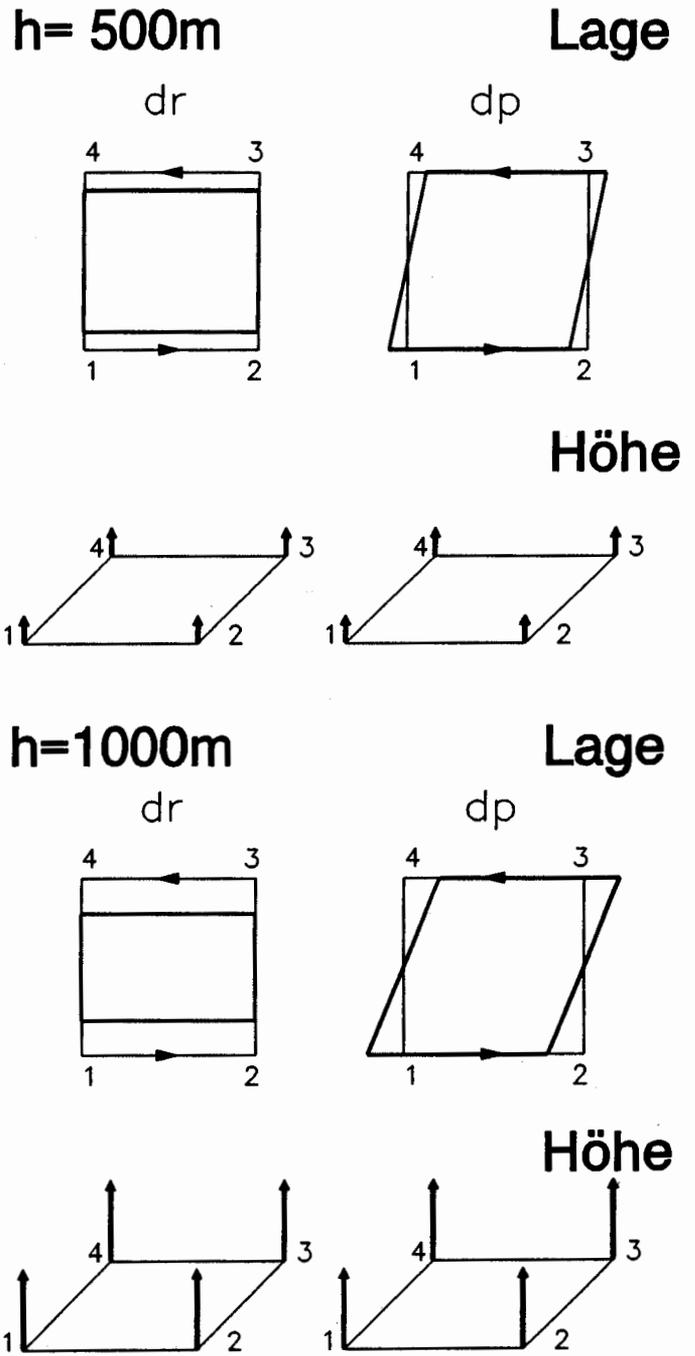
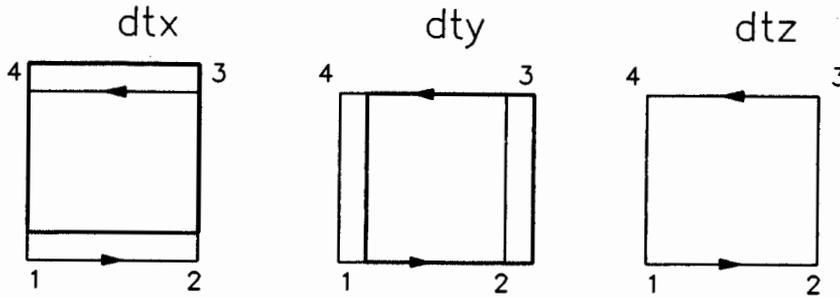
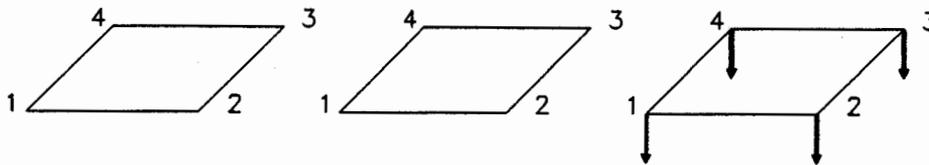
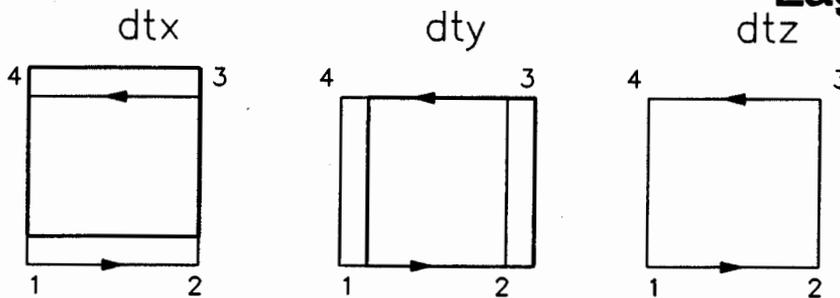
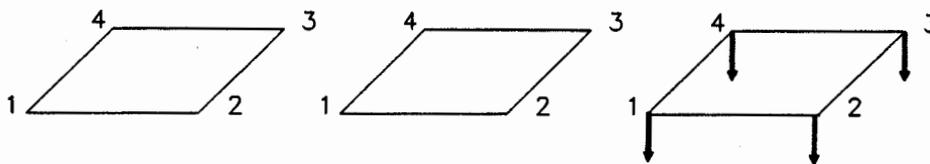


Abb. II.5.2 Einfluß der Kalibrierungsparameter dr und dp

h= 500m**Lage****Höhe****h=1000m****Lage****Höhe**Abb. II.5.3 Einfluß der Translationsparameter $[dtx, dty, dtz]_w^T$

Wirkungen der einzelnen Parameter auf die Lagekoordinaten der Paßpunkte wird in den Abbildungen durch dick eingezeichnete Linien, auf die Höhe durch Pfeile in der Vertikalachse dargestellt. Die auftretenden Koordinatendifferenzen werden lediglich schematisch, das heißt nicht maßstäblich, dargestellt; insbesondere sind die Wirkungen in der Vertikalrichtung gegenüber den Lagekoordinaten stark überhöht.

Abbildung II.5.2 zeigt den Einfluß der Kalibrierungsparameter dr und dp auf die Koordinaten der Laserpunkte. Der Parameter dr verursacht eine Ablage quer zur Flugrichtung, die vom Flugzeug aus betrachtet immer in dieselbe Richtung weist. Der Parameter dp wirkt in Flugrichtung. Bezogen auf das topozentrische Horizontsystem wechselt der Einfluß von dr und dp mit der Flugrichtung. Die Größe der von den Kalibrie-

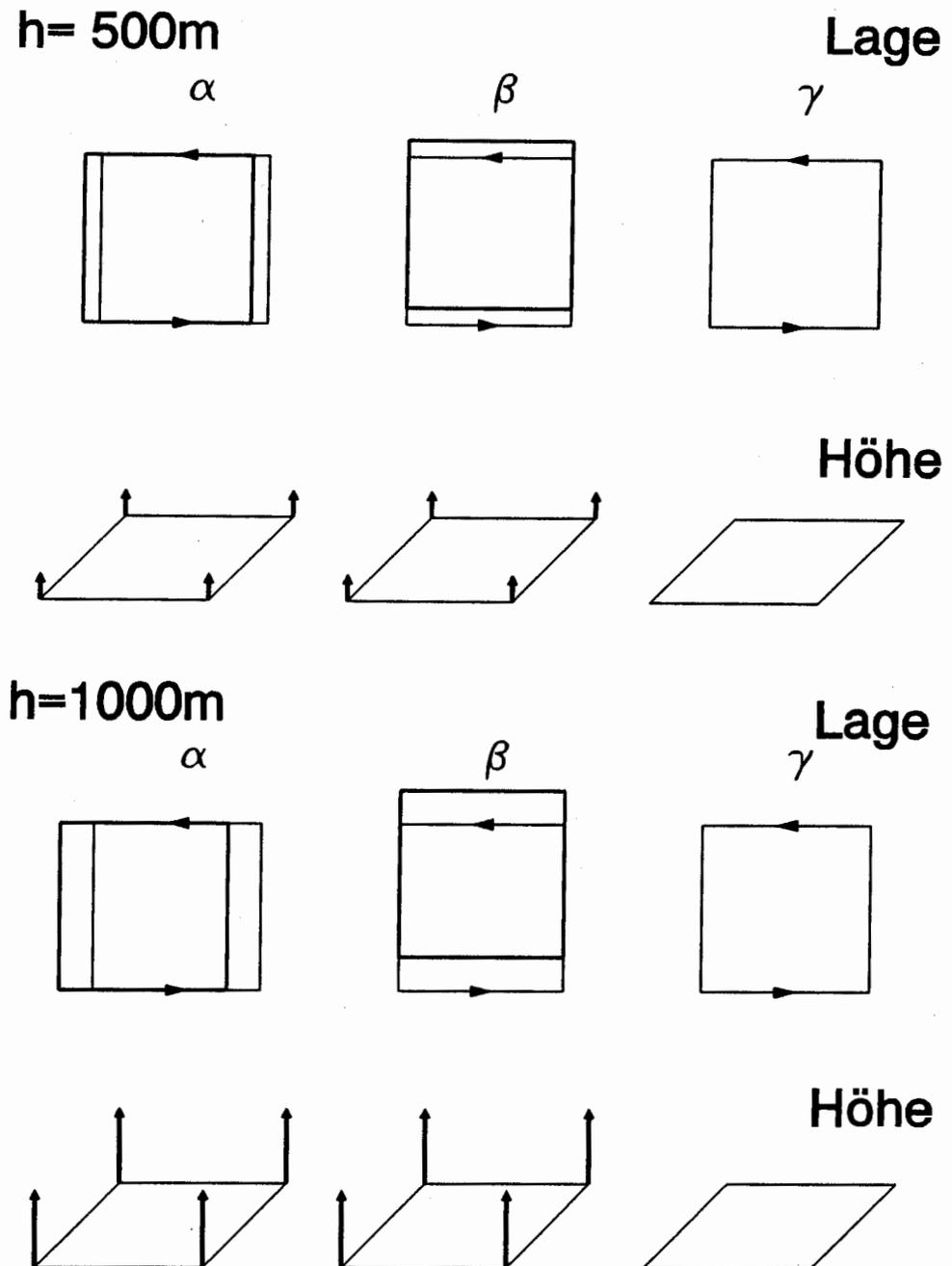


Abb. II.5.4 Einfluß der Rotationsparameter (α, β, γ)

rungsparametern verursachten Koordinatendifferenzen ist proportional zur Flughöhe. Der Einfluß der Kalibrierungsparameter auf die Höhe ist bei der in Frage kommenden Größe der Lasereinbauwinkel ($< 10^\circ$) maximal ein zehntel des Einflusses auf die Lagekoordinaten.

In Abbildung II.5.3 sind die Wirkungen der Translationsparameter $[dx, dy, dz]_w^T$ dargestellt. Der Einfluß dieser Parameter ist in Richtung und Betrag für alle Punkte derselbe, unabhängig von der Flugrichtung und der Flughöhe. Es muß beachtet werden, daß sich die Translationsparameter für diese Überlegung auf das topozentrische Horizontsystem beziehen, sonst aber im globalen Koordinatensystem WGS84 definiert

werden. In WGS84 würden sich die einzelnen Parameter nicht den jeweiligen Koordinatenrichtungen zuordnen lassen.

Abbildung II.5.4 zeigt schließlich die Wirkung der Rotationsparameter (α, β, γ) . Die Rotationsparameter sind im lokalen, astronomischen Horizontsystem definiert. Dadurch wirken die Rotationsparameter unabhängig von der Flugrichtung auf alle Punkte in gleicher Richtung. Da die Rotationsparameter den Ursprung des lokalen, astronomischen Horizontsystems (die GPS-Antenne des Flugzeugs) als Drehzentrum haben und um die gemessene Laserstrecke rotiert wird, ist der Einfluß der Rotationsparameter auf die Koordinaten der Laserpunkte proportional zur Flughöhe. Bei einem nicht gegen das topozentrische Horizontsystem geneigten Laserstrahl und einem Einbau der GPS-Antenne senkrecht über dem Lasersensor hat der Rotationsparameter γ keinen Einfluß auf die Koordinaten.

Aus den Überlegungen anhand der Abbildungen kann die Schlußfolgerung gezogen werden, daß die durch einen Kalibrierungsflug zu bestimmenden Parameter trennbar sind und in einem gemeinsamen Ansatz durch Messung ihrer Einflüsse an den Koordinaten topographischer Paßpunkte bestimmt werden können. Voraussetzung hierfür ist die Befliegung von topographischen Paßpunkten in entgegengesetzten Flugrichtungen und in mindestens zwei Flughöhen. Die Befliegung in verschiedenen Flughöhen kann auch alternativ durch topographische Paßpunkte in verschiedenen Geländehöhen ersetzt werden. Werden diese Bedingungen erfüllt, dann zeigen die zu bestimmenden Parameter charakteristische Auswirkungen auf die Lagekoordinaten. Durch zusätzliche Befliegung der topographischen Paßpunkte quer zu den ursprünglichen Richtungen kann die Sicherheit der Parameterschätzung erhöht werden; an der Bestimmbarkeit und Trennbarkeit der Parameter ändert sich aber grundsätzlich nichts.

5.4 Ausgleichungsansatz zur Systemkalibrierung

5.4.1 Vorbemerkungen

Die bei jeder Meßkampagne zu bestimmenden Parameter zur Korrektur systematischer Fehler - Translationsparameter $[dt_x, dt_y, dt_z]_w^T$ und Rotationsparameter (α, β, γ) - werden indirekt, das heißt auf rechnerischem Wege über die Messung topographischer Paßpunkte ermittelt. Da in der Regel wesentlich mehr Paßpunkte zur Verfügung stehen als zur Berechnung der Parameter unbedingt benötigt werden, kann eine Schätzung in einem Ausgleichungsansatz nach der Methode der kleinsten Quadrate erfolgen. In diesem Ausgleichungsansatz werden auch die einmalig zu schätzenden Kalibrierungsparameter d_r und d_p berücksichtigt. Die Notwendigkeit des gemeinsamen Ansatzes ergibt sich daraus, daß diese Parameter durch einen Kalibrierungsflug bestimmt werden sollen, wobei gleichzeitig die systematischen Korrekturparameter als Unbekannte anfallen.

Die Ausgleichungsaufgabe besteht in der Schätzung der Kalibrierungs- und Korrekturparameter, so daß die Differenzen zwischen den aus den Beobachtungen des Laser-Profilmeßsystems abgeleiteten Koordinaten der topographischen Paßpunkte und ihren unabhängig bestimmten Sollkoordinaten minimiert werden. Zur Lösung des Ausgleichungsproblems können mehrere Ausgleichungsmodelle in Betracht gezogen werden. Entscheidend für den funktionalen Ansatz ist die Frage nach den unbekanntem, den stochastischen und den konstanten Parametern des mathematischen Modells. Speziell zur Systemkalibrierung des Laser-Profilmeßsystems muß auf eine möglichst flexible Handhabung des stochastischen Ansatzes geachtet werden. Zunächst werden die Meßgrößen des Laser-Profilmeßsystems mit ihren a priori bekannten Meßgenauigkeiten im stochastischen Teil des Ausgleichungsansatzes berücksichtigt. Dann sollen die "Soll"-Koordinaten der topographischen Paßpunkte als stochastische Größen eingeführt werden können, um den Unsicherheiten in ihrer Identifizierung und Messung Rechnung zu tragen. Besondere Aufmerksamkeit ist aber auch auf den Ansatz der unbekanntem Kalibrierungsparameter zu richten, da eventuell vorhandene Vorinformationen berücksichtigt werden sollen.

Der funktionale Ansatz zur Lösung des Ausgleichungsproblems kann zunächst in der Form von Bedingungsgleichungen mit Unbekanntem (Standardproblem IV nach Tienstra) formuliert werden. Die Bedingung besteht in der Identität der aus den Laser-Profilmessungen abgeleiteten Koordinaten und den Sollkoordinaten der topographischen Paßpunkte. Unter diesen Bedingungen sollen die unbekanntem Kalibrierungsparameter

geschätzt werden. Die Formulierung dieses Ausgleichungsansatzes führt auf das Gauß-Helmert-Modell, das allgemeine Modell der klassischen Ausgleichungsrechnung (Wolf 1978).

Dagegen schlagen H.H. Schmid und E. Schmid (1965) für die Auswertung und speziell für die Kalibrierung integrierter Meßsysteme eine Ausgleichung mit Bedingungsgleichungen vor (Standardproblem I). Bei diesem Ansatz würden auch die unbekanntenen Kalibrierungsparameter als Beobachtungen mit zugehörigem Gewicht eingeführt, womit sich stochastische Vorinformationen sehr flexibel handhaben lassen. Die rechentechnischen Probleme, die bei der Lösung großer Ausgleichungsprobleme nach Bedingungsgleichungen auftreten, spielen bei Schmid und Schmid eine untergeordnete Rolle.

In dieser Arbeit wird jedoch ein Weg gegangen, der die theoretischen Arbeiten von Ebner (1973) und Schroth (1986) zur Grundlage nimmt und in einer Erweiterung des klassischen Gauß-Markov-Modells durch zusätzliche Fehlergleichungen besteht.

5.4.2 Ausgleichungsansatz mit erweitertem Gauß-Markov-Modell

Als Bezugssystem für den Ausgleichungsansatz wird das Koordinatensystem WGS84 gewählt. In dieses System lassen sich die Koordinaten der topographischen Paßpunkte unabhängig von der Laser-Profilbefliegung transformieren. Die Schätzung der Kalibrierungsparameter geschieht in einem Gauß-Markov-Modell, das sich aus drei Gruppen von Fehlergleichungen zusammensetzt. Der erste Gleichungstyp beschreibt in seinem Funktionalteil die Identitätsbedingungen der Paßpunktkoordinaten. Dazu werden die unabhängig vom Laser-Profilmeßsystem ermittelten Sollkoordinaten der topographischen Paßpunkte als Beobachtungen für entsprechende Fehlergleichungen eingeführt. Die Struktur dieser Fehlergleichungen entspricht der Gleichung (II.4.11) zur Berechnung der Koordinaten in WGS84. Die Meßgrößen des Laser-Profilmeßsystems und die Kalibrierungsparameter werden als Unbekannte im Sinne der Ausgleichung behandelt. Im stochastischen Teil werden die Genauigkeiten der unabhängig von der Laser-Profilmessung bestimmten Paßpunktkoordinaten eingeführt.

Der zweite Typ von Fehlergleichungen wird in das Ausgleichungsmodell eingeführt, um die Meßgrößen des Laser-Profilmeßsystems mit ihren stochastischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Dabei werden im Funktionalteil den unbekanntenen Meßgrößen die tatsächlich gemessenen Meßwerte zugeordnet; ihre Genauigkeitsparameter finden sich im stochastischen Teil dieser Gruppe.

Der dritte Typ von Fehlergleichungen läßt in gleicher Weise eine Modellierung von funktionaler und stochastischer Vorinformation über die eigentlich zu schätzenden Kalibrierungs- und Korrekturparameter zu.

Das erweiterte Gauß-Markov-Modell stellt sich dann wie folgt dar:

1. Typ von Fehlergleichungen (Identitätsbeziehung der Paßpunktkoordinaten):

$$\begin{aligned}
 E \left\{ \begin{bmatrix} x_{TP} \\ y_{TP} \\ z_{TP} \end{bmatrix}_w \right\} &= \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix}_w + \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}_w + R_3(-L_A) \cdot R_2\left(\frac{\pi}{2} + B_A\right) \cdot R(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \\
 &\cdot R(\phi, \theta, \psi) \cdot \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix}_F + R(dr, dp, 0) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_L \end{bmatrix}_L \quad (II.5.1) \\
 D \left\{ \begin{bmatrix} x_{TP} \\ y_{TP} \\ z_{TP} \end{bmatrix}_w \right\} &= C_{TP}
 \end{aligned}$$

2. Typ von Fehlergleichungen (Meßgrößen des Laser-Profilmeßsystems):

$$E \left\{ \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix}_w \right\} = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix}_w \quad D \left\{ \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix}_w \right\} = C_{pos}$$

$$E \{ \phi \} = \phi \quad D \{ \phi, \theta, \psi \} = C_{att} \quad (II.5.2)$$

$$E \{ \theta \} = \theta$$

$$E \{ \psi \} = \psi$$

$$E \{ s_L \} = s_L \quad D \{ s_L \} = \sigma_i^2$$

3. Typ von Fehlergleichungen (Stochastische Vorinformation über unbekannte Kalibrierungsparameter):

$$E \left\{ \begin{bmatrix} dtx \\ dty \\ dtz \end{bmatrix}_w \right\} = \begin{bmatrix} dtx \\ dty \\ dtz \end{bmatrix}_w \quad D \left\{ \begin{bmatrix} dtx \\ dty \\ dtz \end{bmatrix}_w \right\} = C_{ct}$$

$$E \{ \alpha \} = \alpha \quad D \{ \alpha, \beta, \gamma \} = C_{cr} \quad (II.5.3)$$

$$E \{ \beta \} = \beta$$

$$E \{ \gamma \} = \gamma$$

$$E \{ dp \} = dp \quad D \{ dp, dr \} = C_{cl}$$

$$E \{ dr \} = dr$$

Bezeichnungen:

| | |
|--------------|---------------------------|
| $E\{\dots\}$ | : Erwartungswert |
| $D\{\dots\}$ | : Dispersion |
| C | : Varianz-Kovarianzmatrix |

Topographische Paßpunkte

| | |
|--------------------------------|--|
| $[x_{TP}, y_{TP}, z_{TP}]_w^T$ | : Koordinaten der topographischen Paßpunkte in WGS84 unabhängig von der Laser-Profilmessung bestimmt |
|--------------------------------|--|

Beobachtungen des Laser-Profilmeßsystems

| | |
|------------------------|---|
| $[x_A, y_A, z_A]_w^T$ | : Positionskoordinaten der GPS-Antenne in WGS84 |
| (ϕ, θ, ψ) | : Neigungswinkel aus INS-Messungen |
| s_L | : Laserstrecke |

Kalibrierungs- und Korrekturparameter

| | |
|---------------------------|--|
| dp, dr | : Kalibrierungsparameter für Lasereinbauwinkel |
| $[dtx, dty, dtz]_w^T$ | : Translationsparameter für GPS |
| (α, β, γ) | : Rotationsparameter für INS |

Stochastischer Teil

| | |
|--------------|---|
| C_{TP} | : Varianz-Kovarianzmatrix der topographischen Paßpunkte |
| C_{pos} | : Varianz-Kovarianzmatrix der GPS-Positionskordinaten |
| C_{att} | : Varianz-Kovarianzmatrix der INS-Neigungsmessungen |
| σ_l^2 | : Varianz der Laserdistanzmessung |
| C_{cl} | : stochastische Vorinformation für Kalibrierungsparameter |
| C_{ct} | : stochastische Vorinformation für Translationsvektor |
| C_{cr} | : stochastische Vorinformation für Rotationsparameter |

Einen besseren Überblick über die Struktur der Fehlergleichungen des erweiterten Gauß-Markov-Modells liefert eine komprimierte Darstellung in linearisierter Form:

$$\begin{aligned}
 l_{TP} + v_{TP} &= A \cdot x_{beo} + B \cdot x_{cal} \\
 l_{beo} + v_{beo} &= I \cdot x_{beo} \\
 l_{cal} + v_{cal} &= I \cdot x_{cal}
 \end{aligned} \tag{II.5.4}$$

Stochastische Eigenschaften:

$$\begin{bmatrix} l_{TP} \\ l_{beo} \\ l_{cal} \end{bmatrix} \sim \left\{ \begin{bmatrix} A x_{beo} + B x_{cal} \\ I x_{beo} \\ I x_{cal} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} C_{TP} & & \\ & C_{beo} & \\ & & C_{cal} \end{bmatrix} \right\} \tag{II.5.5}$$

Bezeichnungen

| | |
|-------|---|
| $l..$ | : Zufallsvektor der Beobachtungen |
| $x..$ | : Vektor der Unbekannte im Sinne der Ausgleichung |
| $v..$ | : Zufallsvektor der Verbesserungen |
| $C..$ | : Varianz-Kovarianzmatrix |
| TP | : Koordinaten der topographischen Paßpunkte |
| beo | : Meßgrößen des Laser-Profilmeßsystems |
| cal | : Kalibrierungs- und Korrekturparameter |

Die Lösung des Ausgleichungsproblems folgt standardisierten Algorithmen, die hier nicht weiter ausgeführt werden müssen.

5.4.3 Diskussion des Ausgleichungsmodells

Das vorgestellte erweiterte Gauß-Markov-Modell stellt ein sehr flexibel zu handhabendes Instrument zur Schätzung der Kalibrierungs- und Korrekturparameter dar. Dies ist vor allem damit begründet, daß allen tatsächlich ausgeführten Beobachtungen als auch den eigentlich unbekanntem Parametern eine stochastische Eigenschaft zugeordnet werden kann. Die Verbindung zu dem von Schmid und Schmid (1965) vorgeschlagenen Ansatz läßt sich leicht herstellen (s. Gleichung II.5.4): durch Einsetzen der zweiten und dritten Gruppe von Fehlergleichungen in die erste Gruppe, werden die Unbekannten x_{beo} und x_{cal} eliminiert und das erweiterte Gauß-Markov-Modell geht in eine Ausgleichung mit Bedingungsgleichungen (Standardproblem I) über. Die Begründung für die Wahl des erweiterten Gauß-Markov-Modells liegt in der einfachen rechen-technischen Realisierbarkeit und in der numerischen Stabilität dieses Ansatzes. Das Aufstellen und Lösen der Normalgleichungen, sowie die Beurteilung der Ausgleichungsergebnisse kann mit dem am weitesten verbreiteten Ausgleichungsmodell bearbeitet werden. Die programmtechnische Umsetzung kann sich somit ausgereifter Programmpakete bedienen.

Im stochastischen Teil der ersten Gruppe von Fehlergleichungen wird die Genauigkeit der Paßpunktinformation eingeführt. Damit können die Unsicherheiten in der Punktidentifizierung berücksichtigt werden. Durch

eine individuelle Gewichtung der Paßpunkte können in einem robusten Ausgleichungsansatz auch falsch identifizierte Paßpunkte eliminiert werden.

Der funktionale und stochastische Teil der zweiten Gruppe dient zum Einbringen der tatsächlich durchgeführten Beobachtungen des Laser-Profilmeßsystems einschließlich ihrer stochastischen Eigenschaften.

Die Fehlergleichungen der dritten Gruppe werden, im Gegensatz zu den zwei anderen Gruppen, nicht für jeden Paßpunkt, sondern für jede Systemkalibrierung einmalig angesetzt. Über den Funktionalteil können Näherungswerte für die Kalibrierungsparameter d_r und d_p eingegeben werden, insbesondere falls die Lasereinbauwinkel bei früheren Befliegungen bereits bestimmt wurden. Für die Parameter zur Korrektur systematischer Fehler (Translations- und Rotationsparameter) werden in der Regel keine Vorinformationen zur Verfügung stehen. Die Einführung ihrer Erwartungswerte mit kleiner Gewichtung trägt jedoch zur Stabilität des Normalgleichungssystemes bei. Die Erwartungswerte dieser fiktiven Beobachtungen werden alle zu 0 angenommen.

Die Lösung des Ausgleichungsproblems liefert neben den unbekanntem Kalibrierungs- und Korrekturparametern wichtige stochastische Informationen. So kann beispielsweise aus den Koordinatenverbesserungen der topographischen Paßpunkte die Genauigkeit geschätzt werden, mit der die Messungen des Laser-Profilmeßsystems auf die Koordinaten der topographischen Paßpunkte eingepaßt werden können. Bei einer fehlerfrei angenommenen Identifikation und Messung der topographischen Paßpunkte kann dieser Wert als die absolute Genauigkeit der Laserpunkte (in allen Koordinatenrichtungen) interpretiert werden.

Aus der inversen Normalgleichungsmatrix können Aussagen über die Genauigkeit und Bestimmbarkeit der geschätzten Kalibrierungs- und Korrekturparameter abgeleitet werden. Die Vorüberlegungen zur Bestimmbarkeit der Parameter in Abschnitt 5.3 wurden der Einfachheit halber auf der Basis von Horizontkoordinaten durchgeführt. Da der Ausgleichungsansatz die Schätzung der Parameter im globalen Koordinatensystem WGS84 formuliert, treten in der inversen Normalgleichungsmatrix zwischen den Translations- und Rotationsparametern Korrelationen auf, deren Art und Größe von der globalen Lage des Meßgebietes abhängig sind.

5.5 Ergebnis

Die Aufgabe der Systemkalibrierung wurde durch die Aufteilung in die stationär durchzuführende Laborkalibrierung und die Auswertung eines Kalibrierungsfluges gelöst. Diese Trennung erfolgt unter dem Gesichtspunkt, möglichst viele Parameter durch die Laborkalibrierung direkt zu bestimmen, um nur die nicht anders bestimmbaren Parameter indirekt mittels topographischer Paßpunkte schätzen zu müssen.

In der Laborkalibrierung werden Methoden herangezogen, die in der Vermessungstechnik in gleicher oder ähnlicher Weise eingeführt sind. Es müssen somit keine grundlegend neuen Verfahren oder technische Hilfsmittel entwickelt werden.

Zur indirekten Systemkalibrierung durch Auswerten eines Kalibrierungsfluges werden die Koordinaten topographischer Paßpunkte benötigt. Es wird im Einzelfall zu entscheiden sein, ob innerhalb des eigentlichen Meßgebietes eine genügende Anzahl topographischer Paßpunkte gefunden werden kann oder ob für die Systemkalibrierung eine zusätzliche Befliegung in einem räumlich getrennten Gelände vorgenommen werden muß. Durch empirische Untersuchungen muß die für die praktische Einsatzmöglichkeit der Laser-Profilmessung wichtige Frage geklärt werden, in welchem räumlichen Zusammenhang das Meßgebiet und das Gebiet eines speziellen Kalibrierungsfluges stehen müssen.

Die Parameterschätzung zur indirekten Systemkalibrierung erfolgt mit einem erweiterten Gauß-Markov-Modell. Im Ausgleichungsansatz wurden die Parameter zur Korrektur systematischer Fehler von GPS und INS (Translations- und Rotationsparameter) nur als Konstante angesetzt, obwohl bereits bei der Einführung dieser Korrekturparameter in II.3 auf die zeitabhängige Charakteristik der systematischen Fehler hingewiesen wurde. Es wird somit vorausgesetzt, daß für einen gewissen Zeitabschnitt die tatsächlichen Gegebenheiten mit hinreichender Genauigkeit durch konstante Parameter modelliert werden können. Empirische Untersuchungen müssen zeigen, in welchen Zeiträumen dieser vereinfachte Ansatz angenommen werden darf, ohne einen Genauigkeitsverlust in Kauf nehmen zu müssen.

III. Mathematische Modellierung von Laserprofilen

1. Einführung

1.1. Aufgabenstellung

Bislang wurde die Laser-Profilmessung unter überwiegend technischen Gesichtspunkten als ein neues Vermessungsverfahren betrachtet. Das Ergebnis der Ausführungen von Teil II sind Koordinaten gemessener Laserpunkte in einem Bezugssystem der Landesvermessung. Die Ableitung von Koordinaten ist eine allgemeine Voraussetzung, die von jedem Vermessungsverfahren erfüllt werden muß. Der nächste Auswerteschritt ist durch die spezifischen Eigenschaften der Aufnahmemethode bei der Laser-Profilmessung bedingt. Wie bereits im einführenden Kapitel I.1 dargelegt wurde, ist das Ziel der topographischen Geländeaufnahme die Darstellung der Erdoberfläche in einer topographischen Karte oder in einem raumbezogenen Informationssystem; die Form der Darstellung, in herkömmlicher analog-graphischer Weise in Form von Höhenlinien oder als DHM in einem digitalen Informationssystem, spielt keine Rolle. In diesem Teil wird die Analyse der gemessenen Laserpunkte und ihre Einführung in ein Digitales Höhenmodell (DHM) beschrieben. Die dazu notwendigen mathematische Modelle zur Bearbeitung der Laserprofile werden in den folgenden Kapiteln hergeleitet.

Nach Wild (1983), der sich begrifflich schärfer als andere mit der topographischen Geländeaufnahme auseinandergesetzt hat, wird bei den herkömmlichen, manuellen Verfahren der Tachymetrie und Photogrammetrie vom Topograph bzw. photogrammetrischen Operateur vor dem eigentlichen Meßvorgang eine Abstraktion und Idealisierung der physikalischen Erdoberfläche vorgenommen. Wird die physikalische Erdoberfläche als Übergang vom festen Erdkörper zur gasförmigen Atmosphäre definiert, dann wird für die topographische Geländeaufnahme implizit von einem erweiterten Begriff der Erdoberfläche ausgegangen, der bereits gewisse Modellvorstellungen beinhaltet. So werden beispielsweise Vegetation und Gebäude nicht der Erdoberfläche zugerechnet. Durch die Abstraktion und Idealisierung wird einerseits eine Generalisierung der Oberflächenrauigkeit und der Kleinstformen des Geländes vorgenommen und andererseits eine Auswahl dahingehend getroffen, daß Punkte auf der Vegetation, auf Gebäuden und anderen hier nicht-relevanten Objekten bei der Aufnahme nicht gemessen werden. Mit den Begriffen Idealisierung und Abstraktion wird die manuell vorgenommene Auswahl der zu messenden Punkte beschrieben. Dagegen kann bei der Laser-Profilmessung, wie bei allen automatisch ablaufenden Meßverfahren, nicht ohne weiteres eine Auswahl der zu messenden Punkte erfolgen; die Messung wird hier entlang des Flugweges nach einem vorgegebenen Zeittakt durchgeführt. Die Eingriffsmöglichkeiten beschränken sich auf die Wahl der Profilstände und der Vorgabe der Meßrate. Die gemessenen Laserprofile enthalten damit Laserpunkte, die über "offenem" Gelände auf der topographisch aufzunehmenden Erdoberfläche liegen, darüber hinaus aber Punkte auf den für das DHM nicht-relevanten Objekten (Vegetation, Bebauung). Einige Beispiele haben diese Situation bereits verdeutlicht, so zeigen die Abbildungen II.2.3 und II.5.1 Ausschnitte von Laserprofilen über einem Waldgebiet und über Gebäuden.

Neben der Unterscheidung in manuelle und automatische Meßverfahren hinsichtlich der Möglichkeit der Auswahl der zu messenden Punkte muß die sich aus den physikalisch technischen Grundlagen der jeweiligen Meßverfahren ergebende Definition des Meßpunktes berücksichtigt werden. Bei terrestrischen Meßverfahren wird nach der Idealisierung und Abstraktion am offensichtlichsten eine Messung direkt auf der Erdoberfläche vorgenommen. Bei allen anderen Meßmethoden kann das Ergebnis der Messung dagegen nicht so eindeutig der Erdoberfläche zugeordnet werden. So werden bei allen manuellen oder automatischen Verfahren, die die Aufnahmen eines abbildenden Sensors heranziehen, wie beispielsweise bei der Photogrammetrie, die Messungen auf den abgebildeten Vegetationsschichten vorgenommen und bei niederem Bodenbewuchs (z.B. Gras, landwirtschaftliche Anbaufläche) der Erdoberfläche gleichgesetzt. Als weiteres Beispiel seien Mikrowellenverfahren erwähnt, die unter Umständen in die Erdoberfläche eindringen können. Demgegenüber sind die Reflexionseigenschaften von Lasersensoren beim Auftreffen auf feste Materie eindeutig, die Eindringtiefe der einzelnen Laserstreckenmessungen ist über Vegetation jedoch im einzelnen nicht vorhersehbar (s. II.2.2).

Aus diesen Überlegungen ergibt sich als erste Aufgabe für die Bearbeitung der Laserprofilpunkte eine Trennung der gewünschten Laserpunkte auf der Erdoberfläche von den nicht verwertbaren Punkten, die auf

nicht-relevanten Objekten liegen. Dadurch wird die Idealisierung und Abstraktion des Geländes, im Gegensatz zu den manuellen Meßverfahren, zeitlich gesehen nach der Messung vorgenommen. Diese Aufgabe muß entsprechend der vollständig digitalen Konzeption der Laser-Profilmessung durch ein automatisch ablaufendes, digitales Verfahren gelöst werden.

Die daran anschließende zweite Aufgabenstellung ist nicht speziell mit der Laser-Profilmessung verbunden, sondern stellt sich für alle Verfahren der topographischen Geländeaufnahme in ähnlicher Weise: die Modellierung der mathematischen Geländefläche als DHM aus den gemessenen Punkten der Erdoberfläche. Während die Erdoberfläche physikalisch vorhanden ist, liegt der Geländefläche eine Modellvorstellung zugrunde, die sich mathematisch beschreiben läßt. Die mathematische Modellierung hat zwei wesentliche Aspekte. Zunächst müssen die spezifischen Einflüsse des Meßvorgangs weitestgehend reduziert werden. Die zufälligen Meßfehler, mit denen bei jedem Meßverfahren zu rechnen ist, werden durch einen entsprechenden Ansatz im mathematischen Modell berücksichtigt und reduziert. Danach wird die Geländeoberfläche durch eine Interpolation mathematisch modelliert und üblicherweise in der Form von regelmäßig verteilten Rasterpunkten digital dargestellt. Die Notwendigkeit der Modellierung durch Interpolation ist bei der Laser-Profilmessung augenfällig: die Verteilung der auf der Erdoberfläche gemessenen Laserpunkte ist innerhalb der Profile ungleichmäßig. Über offenen Flächen findet sich eine sehr hohe Punktdichte, dagegen trifft man über Waldflächen eine sehr unregelmäßige Verteilung an. Im übrigen sind zwischen den Profilen in der Regel keine Meßpunkte vorhanden.

In dieser Arbeit soll ein mathematisches Modell für Geländeprofile entwickelt werden, mit dessen Hilfe die formulierten Aufgabenstellungen gelöst werden können. Angestrebt wird eine sowohl die Filterung als auch die Interpolation integrierende Lösung, so daß ein einziger mathematischer Ansatz zur Bearbeitung von Laserprofilen genügt. Die in den folgenden Abschnitten vorgestellten Methoden der Geländemodellierung haben die Bearbeitung des Profils zum Gegenstand. Der Übergang vom Profil auf die Fläche wird zwar auch durchgeführt, aber nicht näher untersucht. Dazu wird für die Berechnung Digitaler Höhenmodelle aus Geländeprofilen auf konventionelle Verfahren zurückgegriffen.

1.2 Gebräuchliche Methoden zur Modellierung von Geländeflächen

Die Anzahl der vorgeschlagenen und realisierten Methoden zur Modellierung von Geländeflächen läßt sich kaum mehr überblicken. In der Literatur finden sich Zusammenstellungen und auch Ansätze von vergleichenden Bewertungen, so zum Beispiel bei Schut (1976) oder Stanger (1982). Diese Literaturstellen sind allerdings durch inzwischen neu vorgeschlagene Modelle nicht auf dem neuesten Stand der Forschung. Es soll im folgenden nicht auf einzelne Modelle eingegangen werden oder der Versuch eines wertenden Vergleiches gemacht werden, sondern es soll ein kurzer Überblick gegeben werden, um das im folgenden Kapitel zur Auswertung der Laser-Profilmessung vorgeschlagene mathematische Modell einordnen zu können.

Theoretische Untersuchungen zur mathematischen Modellierung von Geländeflächen wurden in der Photogrammetrie zunächst unter dem Aspekt der Interpolation von digitalen Geländemodellen bearbeitet. Als mathematisches Modell wird dabei die verwendete Interpolationsmethode angesehen, mit der die Geländehöhen von Stützpunkten auf lagemäßig vorgegebene, meistens regelmäßig verteilte Interpolationspunkte interpoliert werden. Ein anderer Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen war die Bestimmung eines hinreichenden Punktabstandes bei der photogrammetrischen Datenerfassung in Abhängigkeit von der Repräsentationsgenauigkeit digitaler Geländemodelle (z.B. Fritsch 1988). Diese Aufgabe gab Anlaß zu weiteren theoretischen Arbeiten zur mathematischen Geländemodellierung, die über die reinen Interpolationsverfahren hinaus reichen. Die theoretische Bearbeitung von digitalen Geländemodellen zur Auswertung photogrammetrischer und auch terrestrischer Geländeaufnahmen kann im wesentlichen als abgeschlossen angesehen werden.

Die Methoden zur mathematischen Modellierung von Geländeflächen können in drei Gruppen eingeteilt werden. Die Modelle der ersten Gruppe lassen sich aus der Approximationstheorie ableiten. Eine Approximation beschreibt die Geländefläche durch die Annäherung mittels mathematischer Funktionen. Als Beispiele seien Polynom-, Exponential- oder trigonometrische Approximationen erwähnt. Leistungsfähige Verfahren ergeben sich einerseits durch die Kombination verschiedener Funktionen und andererseits durch

die lokale Beschränkung der Funktion (Segmentierung) mit einer speziellen Bearbeitung der Segmentübergänge (z.B. durch die Bedingungen der Stetigkeit und Differenzierbarkeit). Die Beurteilung der Approximation erfolgt durch Kriterien, die eine Zielfunktion optimieren, z.B. Gaußsche Approximation (L_2 -Norm) oder Tschebyscheff Approximation (L_∞ -Norm). Schut (1976) und Stanger (1982) stellen einige auf der Approximationstheorie beruhende Ansätze zur Modellierung von Geländeflächen vor.

Die Methoden der zweiten Gruppe basieren auf einer stochastischen Beschreibung des Geländes. Die diskretisierten Geländepunkte werden als stochastische Variable angesehen, woraus das Geländemodell mit den Methoden der Filterung oder Prädiktion geschätzt wird. Häufig wird ein Zweiphasenverfahren angewendet, wobei zunächst großräumig, mit Hilfe von funktionalen Modellen aus der Approximationstheorie, eine Trendfläche bestimmt wird. Im zweiten Schritt werden dann die verbleibenden Residuen durch einen stochastischen Ansatz modelliert. Die stochastische Modellierung kann mit der Theorie stochastischer Prozesse beschrieben werden. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Art und Weise, wie die stochastischen Eigenschaften modelliert werden: im Funktionalteil oder im stochastischen Teil des Ansatzes. Zur Gruppe der funktional modellierenden Ansätze zählt die von Ebner (1979) auf stationären Gauß-Markov-Prozessen basierende Interpolationsmethode. Zur Modellierung von Laserprofilen wird im folgenden Kapitel ein aus der Theorie der autoregressiven Prozesse entwickeltes Modell eingeführt, das eine Verallgemeinerung des von Ebner vorgeschlagenen Ansatzes darstellt. Im Gegensatz zu diesen funktional modellierenden Ansätzen wird bei der Methode der linearen Prädiktion (Kraus 1972) und ihrer Weiterentwicklung, der Prädiktion mit Gewichtsfunktionen (Wild 1983), im stochastischen Teil die Varianz-Kovarianzmatrix modelliert.

Bei der dritten Gruppe von Geländemodellen wird die ursprünglich in einem räumlichen Koordinatensystem vorliegende Geländefläche in eine zweite Darstellungsform transformiert. Dazu zählen die Spektraldarstellung (Makarovič 1973, Tempfli 1982) oder die Variogrammethode (Frederiksen et al. 1984), um nur die zwei verbreitetsten Verfahren zu nennen. Die transformierte Geländefläche läßt sich dann durch einfache funktionale Modelle beschreiben. Auch in dieser Gruppe werden die Ansätze mit trendbestimmenden Approximationen kombiniert.

Neue Rahmenbedingungen für die Geländemodellierung ergeben sich durch moderne Techniken der topographischen Geländeaufnahme, wie bei der hier behandelten Laser-Profilmessung als auch bei der Geländeaufnahme mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung (z.B. Ebner et al. 1987, Hahn 1989, Wrobel 1987). Beiden Techniken ist gemeinsam, daß die Erfassung der Geländefläche automatisch erfolgt, ohne vorab eine Auswahl der zu messenden Punkte vorzunehmen. Ebenfalls wird bei beiden Techniken, im Vergleich zu den traditionellen Verfahren, eine wesentlich größere Anzahl von Punkten gemessen. Die Aufgabe der mathematischen Geländemodellierung besteht dann zum einen in der Entdeckung und Elimination der Punkte, die nicht auf der Erdoberfläche gemessen wurden, und zum anderen in der Reduktion der Punktzahl auf die für die Beschreibung der Geländefläche notwendige Information. Es kann somit von einer Umkehrung der Interpolationsaufgabe gesprochen werden.

Die in Frage kommenden mathematischen Modelle müssen unter dem Aspekt der Robustheit gegenüber den topographisch nicht-relevanten Geländeinformationen einer kritischen Überprüfung unterzogen werden. In der Photogrammetrie werden robuste Verfahren zur Parameterschätzung als Erweiterung der klassischen Methode der Kleinsten Quadrate seit Mitte der 70er Jahre angewendet (z.B. Klein und Förstner 1984, Krarup et al. 1980, Werner 1984), um grobe Meßfehler, die das Ergebnis der Ausgleichung gravierend beeinträchtigen, aufzudecken und zu eliminieren. Der Begriff grober Meßfehler verbindet die Herkunft dieser Fehler mit dem Meßprozeß. In Bezug auf die Modellierung von Geländeprofilen kann aber auch eine fehlerhafte Idealisierung des Geländes zu Fehlern führen, die dann wie grobe Meßfehler behandelt werden können. Dies ist der Fall, wenn Objekte, die nicht der Erdoberfläche angehören, fälschlicherweise dieser zugeordnet werden. Bei einer automatischen Datenerfassung, wie bei der Laser-Profilbefliegungen, muß mit derartigen groben Fehlern in erheblicher Anzahl gerechnet werden. Die Modellbildung muß deshalb Algorithmen zur Behandlung grober Fehler beinhalten.

1.3. Begriffe und Voraussetzungen

Bevor das mathematische Modell zur Auswertung von Laser-Profilmessungen entwickelt wird, sollen einige Begriffe und Voraussetzungen geklärt werden.

In Teil II wurde die Berechnung der Koordinaten von Laserpunkten aus den Messungen des Laser-Profilmeßsystems abgeleitet. Die anschließende mathematische Modellierung der Profile baut auf diesen Koordinaten auf und greift nicht mehr auf die originalen Beobachtungsdaten zurück. Jeder Profilpunkt wird durch Koordinaten in einem geodätischen Landessystem dargestellt, dabei wird eine traditionelle Trennung zwischen Lage- und Höhenkoordinaten vorgenommen. Durch die mathematische Modellierung werden ausschließlich die Höhenkoordinaten der Laserpunkte bearbeitet und verändert; die Lagekoordinaten werden unverändert übernommen; sie sind nur Ortsparameter für die Höhenmodellierung.

Begrifflich werden drei Kategorien von Punkten unterschieden:

- **Laserpunkt**
Die Laserpunkte sind alle vom Laser-Profilmeßsystem gemessenen Punkte, deren Koordinaten nach den in Teil II beschriebenen Verfahren abgeleitet sind. Der Laserpunkt liegt entweder direkt auf der Erdoberfläche oder auf topographisch nicht-relevanten Objekten (Vegetation, Bebauung).
- **Bodenpunkt**
Der Bodenpunkt gehört zur Menge der Laserpunkte. Ihn zeichnet aus, daß er auf der topographischen Erdoberfläche liegt.
- **Geländepunkt**
Der Geländepunkt ist Element der mathematischen Geländefläche, bzw. hier der Geländeprofile. Er geht aus den Laserpunkten als Ergebnis der mathematischen Modellierung hervor, das heißt seine Höhenkoordinate wurde verändert.

Über den Punkten wird als nächste, höhere Gliederungsstruktur der Begriff des Profils verwendet. Das Profil wird als die Menge der Punkte definiert, die in einer räumlich geordneten Reihenfolge zueinander stehen. So ist das Laserprofil die Menge räumlich geordneter Laserpunkte. Entsprechend wird das Geländeprofil aus den Geländepunkten gebildet.

Zur Entwicklung des mathematischen Modells wird davon ausgegangen, daß die Laserpunkte mit einer konstanten Meßfrequenz aufgenommen wurden und die Lagekoordinaten der Laserpunkte als gleichabständig behandelt werden können. Das Laserprofil kann dann alternativ über der Zeit, über einer Lagekoordinate oder über einem Zählwert dargestellt werden. Im mathematischen Sinn wird das Laserprofil als diskrete Funktion angesprochen. Die Modellbildung kann sich ausschließlich auf die diskrete Modellvorstellung konzentrieren. Eine kontinuierliche Formulierung des mathematischen Modells ist nicht erforderlich.

1.4 Überblick über Teil III

Im folgenden Kapitel II.2 wird das mathematische Modell zur Modellierung von Geländeprofilen entwickelt. Das Modell wird aus der Theorie der Zeitreihenanalyse mit stochastischen Prozessen abgeleitet. Die wesentlichen Eigenschaften autoregressiver Prozesse, einer speziellen Klasse von stochastischen Prozessen, werden vorgestellt und deren Theorie dahingehend aufbereitet und weiterentwickelt, daß sie als Modell für die Bearbeitung von Laserprofilen geeignet sind.

Die Anwendung eines einzigen mathematischen Ansatzes, wie er unter III.1.1 angestrebt wurde, kann nicht ganz erreicht werden. Da in Waldgebieten in der Regel nur ein kleiner Teil der Laserpunkte auf der Erdoberfläche liegt, sich dagegen der größere Teil auf die Vegetation bezieht, wird ein rein stochastischer Ansatz in der Modellierung des Geländeprofiles versagen, es sei denn, daß dem Algorithmus Näherungswerte für das Geländeprofil vorgegeben werden können. In Kapitel III.3 werden einige Operatoren aus der Theorie der mathematischen Morphologie herangezogen, die sich durch ihre Robustheit auszeichnen und sich somit zur automatischen Identifikation der Bodenpunkte anbieten. Die identifizierten Bodenpunkte werden anschließend in die Modellierung des Geländeprofiles eingeführt.

Das abschließende Kapitel III.4 faßt die einzelnen Schritte zusammen und stellt den Verfahrensablauf vor. Die theoretischen Ansätze werden anhand von Beispielen empirisch überprüft.

2. Stochastische Prozesse als mathematisches Modell für Geländeprofile

2.1 Vorbemerkungen

In diesem Kapitel wird die Theorie der stochastischen Prozesse soweit entwickelt, daß sie als mathematisches Modell für Geländeprofile dienen kann. Im folgenden Abschnitt 2.2 werden einige Begriffe aus der Theorie stochastischer Prozesse eingeführt. Die zum Teil sehr theoretischen Begriffe werden in einer beschreibenden Darstellung präsentiert; die exakten mathematischen Definitionen finden sich in den Lehrbüchern zur Theorie stochastischer Prozesse (z.B. Anderson 1971, Box und Jenkins 1976, Brockwell und Davis 1987, Fahrmeir et al. 1981). Abschnitt 2.3 befaßt sich mit der Zeitreihenanalyse stationärer Prozesse. Als mögliche Lösung des Problems der Zeitreihenanalyse wird die Klasse der autoregressiven Prozesse (AR-Prozesse) eingeführt. Einige Eigenschaften der AR-Prozesse werden vorgestellt und Methoden zur Identifizierung dieser Prozesse angesprochen. Dieser Prozeßtyp wird in den folgenden Abschnitten für die Modellierung von Geländeprofilen weiterentwickelt. In Abschnitt 2.4 wird die Modellierung nicht-stationärer Zeitreihen bearbeitet, Abschnitt 2.5 befaßt sich mit beobachteten Zeitreihen, und in 2.6 wird schließlich die robuste Zeitreihenanalyse behandelt.

Das in den Abschnitten 2.2 und 2.3 vermittelte Wissen wurde weitestgehend aus den oben zitierten Lehrbüchern zur Theorie stochastischer Prozesse aufbereitet. Die relativ ausführliche Behandlung der grundlegenden Begriffe wird als notwendig angesehen, um das Verständnis für die eigenen theoretischen Weiterentwicklungen der Zeitreihenanalyse in den Abschnitten 2.5 und 2.6 zu schaffen. Durch diese Weiterentwicklung kann die Theorie autoregressiver Prozesse zur Modellierung von Laserprofilen herangezogen werden.

2.2 Definitionen und Eigenschaften stochastischer Prozesse

(1) Stochastischer Prozeß und Zeitreihe

Zeitlich oder räumlich nacheinander ablaufende Vorgänge, die zumindest teilweise zufälliger Natur sind, sich also nicht vollständig deterministisch beschreiben lassen, werden als stochastische Prozesse bezeichnet. Der stochastische Prozeß kann als Zufallsfunktion $X(t)$ gedeutet werden, wobei das Argument t einen reellen, nichtzufälligen Wert aus einem endlichen oder unendlichen Wertebereich T annehmen kann. Die Zufallsgröße X kann jedoch nur mit Mitteln der Wahrscheinlichkeitstheorie beschrieben werden. In der klassischen Theorie der stochastischen Prozesse werden die Argumente t als aufeinanderfolgende Zeitpunkte angesehen. In geodätischen und vorallem auch in geophysikalischen Anwendungen werden stochastische Prozesse auch als zufällige Ortsfunktionen $X(r)$ mit Ortsvektoren r als Argumenten definiert.

Liegt die Zufallsfunktion $X(t)$ als kontinuierliche Funktion vor, dann spricht man von einem kontinuierlichen, stochastischen Prozeß. Um einen diskreten, stochastischen Prozeß handelt es sich, wenn die Zufallsfunktion nur zu den diskreten Zeitpunkten $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$ vorliegt. Ein diskreter Prozeß kann durch Abtasten (Sampling), das heißt die Entnahme von Stichproben zu diskreten Zeitpunkten, oder durch Akkumulation, das ist die Aufsummierung der Zufallsvariable über bestimmte Zeitabschnitte, aus einem kontinuierlichen Prozeß abgeleitet werden. Im weiteren werden hier stets diskrete, stochastische Prozesse vorausgesetzt, wenn auch die in diesem Abschnitt einzuführenden Begriffe für beide Prozeßtypen die gleiche Bedeutung haben.

Wird ein Experiment durchgeführt, dann umfaßt der Begriff stochastischer Prozeß die Gesamtheit aller möglichen Ergebnisse des Experiments; dagegen wird jedes einzelne Ergebnis des Experiments als Zeitreihe bezeichnet. Bei der Modellierung von Geländeprofilen wird jedes konkret vorliegende Geländeprofil als Zeitreihe angesehen.

(2) Stochastische Beschreibung eines stochastischen Prozesses

Die stochastischen Eigenschaften einer Zufallsvariablen $X(t)$ werden durch ihre Verteilungsfunktion $F(x_i)$ vollständig beschrieben. Bezeichnet P die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses $X(t) \leq x_i$, dann ist die Verteilungsfunktion wie folgt definiert:

$$F(x_i) = P(X(t_i) \leq x_i) \quad (\text{III.2.1a})$$

Hierbei werden keine Hypothesen über den zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsmechanismus benötigt (entsprechend der Definition der Wahrscheinlichkeit über die Kolmogorowschen Axiome). Aus der Definition der Verteilungsfunktion für eine einzelne Zufallsvariable läßt sich die n-dimensionale Verteilungsfunktion eines stochastischen Prozesses ableiten:

$$F_{t_1, \dots, t_n}(x_1, \dots, x_n) = P(X(t_1) \leq x_1, \dots, X(t_n) \leq x_n) \quad (\text{III.2.1b})$$

wobei $(t_1, \dots, t_n) \in T^n$ mit $t_1 < \dots < t_n$.

Ob bei einer gegebenen Verteilungsfunktion ein stochastischer Prozeß zugrunde gelegt werden kann, kann im Einzelfall nicht immer zweifelsfrei entschieden werden. Da bei den meisten Anwendungen die Verteilungsfunktion nicht vollständig bestimmbar sein wird, wird in diesen Fällen ein zugrundeliegender stochastischer Prozeß angenommen und vorausgesetzt.

Neben der Verteilungsfunktion werden die statistischen Momente eines stochastischen Prozesses zu seiner Beschreibung herangezogen. Dabei sind im allgemeinen die Momente zeitabhängige Funktionen im gemeinsamen Wertebereich T. Eine besondere Bedeutung kommen den Momenten 1. und 2. Ordnung zu, d.h. der Mittelwertfunktion und der Autokovarianzfunktion, die wie folgt definiert sind:

Mittelwertfunktion $m_x(t)$ eines stochastischen Prozesses $X(t)$:

$$m_x(t) = E \{X(t)\} \quad (\text{III.2.2a})$$

Autokovarianzfunktion $\text{cov}_{xx}(t,s)$ eines stochastischen Prozesses $X(t)$:

$$\text{cov}_{xx}(t,s) = E \{(X(t) - m_x(t)) (X(s) - m_x(s))\} \quad (\text{III.2.2b})$$

Die Varianzfunktion des stochastischen Prozesses ergibt sich aus der Autokovarianzfunktion für $t=s$ zu $\sigma_x^2(t) = \text{cov}_{xx}(t,t)$.

Liegt dem stochastischen Prozeß eine Verteilungsfunktion zugrunde, die der Gaußschen Normalverteilung folgt, dann werden die stochastischen Eigenschaften des Prozesses vollständig durch die Momente 1. und 2. Ordnung beschrieben. Ein derartiger Prozeß wird als Gauß-Prozeß bezeichnet.

(3) Stationarität und Ergodizität

Für die praktische Anwendung der Theorie stochastischer Prozesse in der Zeitreihenanalyse stellen Stationarität und Ergodizität die wichtigsten Eigenschaften dar. Mit diesen Eigenschaften können Aussagen über das Verhalten stochastischer Prozesse unabhängig von der Zeit getroffen werden. Die Stationarität eines stochastischen Prozesses ist gegeben, wenn zu jedem Zeitpunkt und für jede Realisierung dieselben stochastischen Eigenschaften erwartet werden können. Das bedeutet, daß die Verteilungsfunktion des stationären stochastischen Prozesses zu jedem Zeitpunkt identisch ist, also nicht mehr zeitabhängig ist. Die Definition der Stationarität über die Zeitunabhängigkeit der Verteilungsfunktion wird als strenge Stationarität bezeichnet. Wegen der Schwierigkeiten der Bestimmung der gesamten Verteilungsfunktion in praktischen Anwendungen wird ein weiterer Stationaritätsbegriff eingeführt, der sich auf die Untersuchung der 1. und 2. Momente der Verteilungsfunktion stützt. In der Literatur sind dafür mehrere synonyme Begriffe gebräuchlich, wie schwache Stationarität, Stationarität von 2. Ordnung oder Kovarianzstationarität.

Ein stochastischer Prozeß wird als schwach stationär bezeichnet, wenn für alle $t \in T$ gilt:

1. der Prozeß hat einen endlichen Erwartungswert:

$$E \{|X(t)|\} < \infty \quad (\text{III.2.3a})$$

2. der Erwartungswert des Prozesses ist über die Zeit konstant:

$$E \{X(t)\} = m \quad (\text{III.2.3b})$$

3. die Autokovarianzfunktion hängt nur vom Betrag der Zeitdifferenz $k = |t-s|$ ab:

$$\text{cov}_{xx}(t,s) = \text{cov}_{xx}(|t-s|) = \text{cov}_{xx}(k) \quad (\text{III.2.3c})$$

Bei Gauß-Prozessen folgt aus der schwachen Stationarität unmittelbar auch die strenge Stationarität, da die 1. und 2. Momente die Verteilungsfunktion vollständig beschreiben.

Innerhalb der Klasse der stationären Prozesse spielen die ergodischen Prozesse die wichtigste Rolle. Bei praktischen Anwendungen steht in vielen Fällen nur eine einzige Realisierung für die Untersuchung zur Verfügung. Für die Berechnung der charakteristischen Eigenschaften wird jedoch die Integration über eine Vielzahl von Realisierungen des stochastischen Prozesses benötigt. Hier hilft nun der Begriff der Ergodizität weiter. Er sagt aus, daß aus jeder einzelnen Realisierung des Prozesses bei hinreichend langer Beobachtungsdauer sämtliche stochastische Eigenschaften abgeleitet werden können. Zur Bestimmung der statistischen Momente muß beim Vorliegen eines ergodischen Prozesses nicht über die Anzahl der Realisierungen pro Zeitpunkt integriert werden, sondern es genügt eine einzige Zeitreihe über alle Zeitpunkte zu integrieren.

Ein schwach stationärer Prozeß heißt ergodisch wenn gilt :

$$E\{X(t)\} = \int_{-T}^{+T} x(t) dt = m$$

$$\text{cov}_{xx}(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} (x(t)-m)(x(t+k)-m) dt \quad (\text{III.2.4})$$

Im Einzelfall wird die Frage, ob die Ergodizität eines stochastischen Prozesses vorliegt, nicht bewiesen werden können. Sie wird deshalb vorausgesetzt, um überhaupt aus einzelnen Zeitreihen Ergebnisse ableiten zu können.

(4) Weißer Rauschprozeß

Weißer Rauschprozesse stellen eine spezielle Klasse stochastischer Prozesse dar, die sich durch die stochastische Unabhängigkeit der einzelnen Zufallsvariablen auszeichnen. Ein Prozeß $e(t)$ heißt Weißer Rauschprozeß mit Erwartungswert 0 und Varianz σ^2 , $WR(0, \sigma^2)$ - Prozeß, wenn gilt:

$$E\{e(t)\} = 0$$

$$\text{cov}_{ee}(t,s) = \begin{cases} \sigma^2, & t = s \\ 0, & t \neq s \end{cases} \quad (\text{III.2.5})$$

2.3 Zeitreihenanalyse stationärer Prozesse

2.3.1 Aufgabe der Zeitreihenanalyse

Eine charakteristische Eigenschaft, die Zeitreihen von anderen statistischen Daten unterscheidet, ist die Tatsache, daß im allgemeinen die Zufallsvariablen einer Zeitreihe miteinander korreliert sind. Die Zufallsvariable x_t zum gegenwärtigen Zeitpunkt t ist von den Zufallsvariablen der vergangenen Zeitpunkte $t-1, t-2, t-3, \dots$ in charakteristischer Weise abhängig und korreliert wiederum mit den zukünftigen Zufallsvariablen zu den Zeitpunkten $t+1, t+2, t+3, \dots$. Die elementare Aufgabe der Zeitreihenanalyse ist die Untersuchung von Zeitreihen auf vorhandene Korrelationen der Zufallsvariablen zu verschiedenen Zeitpunkten, um daraus ein mathematisches Modell zu entwickeln, das die Korrelationsstruktur der Zeitreihe zu erklären versucht (Priestley 1988). Dabei kann sich die Zeitreihenanalyse Methoden verschiedener Ebenen bedienen; gebräuchlich sind:

- Modellierung der Zeitreihe mit linearen Modellen im Zeit- bzw. Ortsbereich
- Modellierung der Autokovarianzfunktion
- Modellierung im Spektralbereich nach Transformation der Zeitreihe

In den letzten 50 Jahren wurde die Zeitreihenanalyse intensiv erforscht und wurden zahlreiche Methoden zur Modellierung von Zeitreihen entwickelt. Den linearen Modellen kommt dabei die größte Bedeutung zu. Sie sollen im weiteren einer näheren Betrachtung unterzogen werden. Im Gegensatz zu den Ausführungen im vorhergehenden Abschnitt 2.2 beschränken sich die folgenden Herleitungen auf diskrete Zeitreihen, gekennzeichnet durch indizierte Zufallsvariablen (z.B. x_t).

2.3.2 Zeitreihenanalyse mit linearen Modellen

Ein Modell zur Beschreibung der Kovarianzstruktur führt die Zeitreihe X_t auf einen Weißen Rauschprozeß e_t zurück, indem die einzelnen Zufallsvariablen $\dots, x_{t-2}, x_{t-1}, x_t, x_{t+1}, x_{t+2}, \dots$ in eine Beziehung zueinander gesetzt werden. Mit einem allgemeinen funktionalen Ansatz im Ortsbereich kann ein Modell für die Zeitreihe X_t wie folgt formuliert werden:

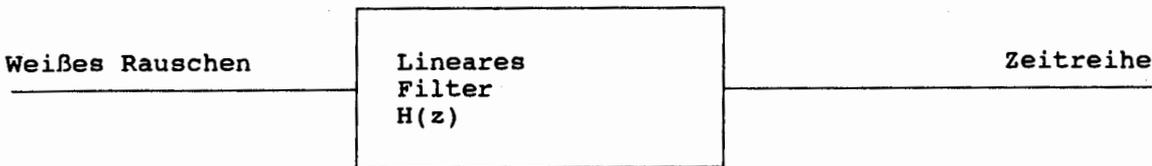
$$h(\dots, x_{t-2}, x_{t-1}, x_t, x_{t+1}, x_{t+2}, \dots) = e_t \quad (\text{III.2.6})$$

Wird die Funktion $h(\dots)$ als eine Folge von Konstanten h_k angesetzt, so erhält man den allgemeinen linearen Ansatz:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k x_{t-k} = e_t \quad (\text{III.2.7})$$

Die Zeitreihenanalyse kann nun als inverses Problem formuliert werden: Gesucht sind die konstanten Parameter h_k , die nach linearer Verknüpfung mit den Zufallsvariablen der gegebenen Zeitreihe X_t , dieselbe in einen Weißen Rauschprozeß $e_t \sim \text{WR}(0, \sigma^e)$ zurückführt.

In der Terminologie der Systemtheorie stellt sich die Zeitreihenanalyse wie folgt dar: Die Zeitreihe X_t entsteht als Ausgangssignal aus einem linearen Filter $H(z)$ mit Weißem Rauschen als Eingangssignal. Die Aufgabe der Zeitreihenanalyse besteht nun in der Bestimmung der Koeffizienten des linearen Filters. Diese Modellvorstellung wird mit folgendem Diagramm veranschaulicht:



Der in Gleichung (III.2.7) vorgeschlagene Ansatz ist für eine praktische Umsetzung ungeeignet, da zu seiner Formulierung sämtliche vergangenen und auch zukünftigen Werte der Zeitreihe verwendet werden. Eine Formulierung, die sich einseitig auf die vergangenen Zeitpunkte stützt, ergibt:

$$\sum_{k=0}^{\infty} h_k x_{t-k} = e_t \quad (\text{III.2.8})$$

Aus Gleichung (III.2.8) gehen schließlich die autoregressiven Prozesse (AR-Prozesse) als einfachstes lineares Modell einer Zeitreihe hervor, indem die unendliche Anzahl von Parametern h_k auf eine finite Anzahl p reduziert wird.

Definition: Autoregressiver Prozeß

Eine stationäre Zeitreihe X_t heißt autoregressiver Prozeß der Ordnung p (AR(p)-Prozeß), wenn für jeden Zeitpunkt t gilt:

$$\sum_{k=0}^p a_k x_{t-k} = e_t \quad (\text{III.2.9})$$

und $e_t \sim \text{WR}(0, \sigma_e^2)$. Ohne Einschränkungen wird $a_0 = 1$ gesetzt.

Die Parameter a_k werden als Prozeßparameter bezeichnet. Die Zufallsvariablen des Weißen Rauschprozesses e_t werden im Zusammenhang mit der Zeitreihenmodellierung auch als Prädiktionsfehler bezeichnet. Als charakteristisches Polynom des autoregressiven Prozesses wird der Term $A(z)$ bezeichnet:

$$A(z) = \sum_{k=0}^p a_k z^k \quad (\text{III.2.10})$$

Der lineare Ansatz zur Zeitreihenanalyse muß nicht zwangsläufig auf das autoregressive Modell führen. Wird in (III.2.8) anstatt nach einem finiten Polynom $A(z)$, nach einer gebrochen rationalen Funktion $A(z)/B(z)$ entwickelt, so erhält man das autoregressive moving-average Modell (ARMA-Modell), das die allgemeinste Form der linearen Modelle der Zeitreihenanalyse darstellt. Aus dem ARMA-Modell läßt sich das moving-average Modell (MA-Modell) ableiten, wobei das charakteristische Polynom zu $1/B(z)$ gesetzt wird. Unter der Bedingung der Kausalität und Invertibilität (s. Brockwell und Davis 1987) können die linearen Modelle (AR-, MA-, ARMA-Modell) beliebig ineinander überführt werden.

2.3.3 Eigenschaften autoregressiver Prozesse

(1) Stationarität eines AR-Prozesses

Die Stationarität eines autoregressiven Prozesses steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Lage der Nullstellen seines charakteristischen Polynoms innerhalb der komplexen Zahlenebene. Dieser Zusammenhang wird u.a. in Brockwell und Davis (1987) hergeleitet und besagt, daß alle Nullstellen des charakteristischen Polynoms außerhalb des komplexen Einheitskreises liegen müssen. Notwendige und hinreichende Bedingung für die Stationarität eines autoregressiven Prozesses ist, daß für alle $z \in \mathbb{C}$ mit $|z| \leq 1$ gilt:

$$A(z) \neq 0.$$

(2) Varianz- und Autokovarianzfunktion

Neben der empirischen Bestimmung der Autokovarianzfunktion durch Berechnen der Erwartungswerte nach (III.2.2b) geben Brockwell und Davis (1987) eine Methode an, die sich auf die Prozeßparameter a_k stützt. Dabei wird der AR(p)-Prozeß mit dem charakteristischen Polynom $A(z)$ zunächst als MA(∞)-Prozeß mit charakteristischem Polynom $\psi(z)$ dargestellt. Die Parameter ψ_j berechnen sich aus der Beziehung:

$$\psi(z) = \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j z^j = \frac{1}{A(z)} \quad (\text{III.2.11})$$

Die Autokovarianzfunktion des autoregressiven Prozesses läßt sich dann wie folgt angeben.

$$\text{cov}_{xx}(k) = \sigma_e^2 \sum_{j=0}^{\infty} \psi_j \psi_{j+|k|} \quad (\text{III.2.12})$$

Die Autokorrelationsfunktion $\rho(k)$ ergibt sich durch die Normierung mit der Varianz σ_x^2 des Prozesses:

$$\rho(k) = \frac{\text{cov}_{xx}(k)}{\text{cov}_{xx}(0)} = \frac{\text{cov}_{xx}(k)}{\sigma_x^2} \quad (\text{III.2.13})$$

Die Autokorrelationsfunktion erfüllt die Yule-Walker-Gleichungen:

$$\rho(k) = \sum_{j=0}^p a_j \rho(k-j) \quad (\text{III.2.14})$$

(3) Spektraldarstellung

Über das Leistungsspektrum lassen sich charakteristische Eigenschaften der 2. Momente stochastischer Prozesse im Frequenzbereich untersuchen. Sei $X(u) = F\{x(t)\}$ die Fouriertransformation der Zeitreihe $x(t)$, dann berechnet sich das Leistungsspektrum zu $P_x(u) = |X(u)|^2$. Das Theorem von Herglotz (Brockwell

und Davis 1987, S.115 ff) besagt, daß die Autokovarianzfunktion $\text{cov}_{xx}(k)$ und das Leistungsspektrum $P_x(u)$ eines stationären Prozesses ein Fourierpaar bilden: $P_x(u) = F\{\text{cov}_{xx}(k)\}$.

Die Spektraldarstellung eines autoregressiven Prozesses erhält man, wenn das Argument z des charakteristischen Polynoms als z -Transformation interpretiert wird. Dabei wird auf dem komplexen Einheitskreis $|z|=1$ mit $z \in \mathbb{C}$ die Fouriertransformation durchgeführt: $z = \exp(-j2\pi u)$. Das Leistungsspektrum des autoregressiven Prozesses ergibt sich dann zu (Kay und Marple 1981):

$$P_x(u) = \frac{\sigma_e^2}{|1 + \sum_{k=1}^p \exp(-j2\pi ku)|^2} \quad (\text{III.2.15})$$

2.3.4 Identifikation autoregressiver Prozesse

Aufgabe der Identifikation ist es, aus einer gegebenen Zeitreihe X_t die Prozeßparameter a_k und die Prozeßordnung p zu bestimmen. Dabei wird die Kenntnis des Modelltyps vorausgesetzt und stets davon ausgegangen, daß ein autoregressiver Prozeß vorliegt.

(1) Parameterschätzung

Eine einfache Möglichkeit der Parameterschätzung bietet die Lösung der Yule-Walker-Gleichungen (III.2.14) nach den unbekanntem Prozeßparametern a_k , falls die Autokorrelationsfunktion bekannt ist (beispielsweise durch eine empirische Bestimmung). Obwohl diese Methode in der Literatur weit verbreitet ist, hat sie doch signifikante Schwächen: das Ergebnis der Parameterschätzung wird sehr stark von der Lage der Nullstellen der charakteristischen Gleichung beeinflusst. Für Zeitreihen, deren Stationarität fraglich ist und auch bei sehr kurzen Datensätzen liefert die Lösung der Yule-Walker-Gleichungen keine zuverlässige Schätzung (Ulrych und Ooe 1979). Einen wesentlich stabileren Algorithmus, der sich insbesondere auch für die Untersuchung der Stationarität einer Zeitreihe eignet, schlagen Ulrych und Clayton (1976) vor. Bei diesem Verfahren wird das autoregressive Modell sowohl in der üblichen Weise, zeitlich vorwärts gerichtet, als auch in umgekehrter Richtung angesetzt. Die Prozeßparameter werden nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt, wobei die Summe der Quadrate der Vorwärtsprädiktionsfehler $e_{v,t}$ und der Rückwärtsprädiktionsfehler $e_{r,t}$ minimiert wird.

$$\sum_{t=p+1}^n (e_{v,t}^2 + e_{r,t}^2) \rightarrow \min \quad (\text{III.2.16})$$

mit

$$e_{v,t} = x_t + \sum_{j=1}^p a_j x_{t-j} \quad t = p+1, p+2, \dots, n$$

$$e_{r,t} = x_{t-p} + \sum_{j=1}^p a_j x_{t-p+j} \quad t = p+1, p+2, \dots, n$$

In der Terminologie der Ausgleichsrechnung werden nur die Zufallsvariablen x_t zum gegenwärtigen Zeitpunkt t als Beobachtungen bezeichnet, während die Zufallsvariablen zu den vorhergehenden Zeitpunkten $t-1, t-2, \dots$ und zu den zukünftigen Zeitpunkten $t+1, t+2, \dots$ als Konstante in die aktuelle Beobachtungsgleichung eingehen.

(2) Bestimmung der Prozeßordnung

Im allgemeinen wird die Prozeßordnung einer zu untersuchenden Zeitreihe a priori unbekannt sein. Alle bekannten Lösungsansätze zur Bestimmung der Prozeßordnung gehen von einem iterativen Verfahren aus, wobei die gegebene Zeitreihe mit autoregressiven Prozessen wachsender Ordnung modelliert wird. Zum Abbruch dieser Iteration führt einerseits die Untersuchung der Signifikanz der geschätzten Prozeßparameter, andererseits werden aus den angesetzten Modellen die resultierenden Prädiktionsfehler e_t analysiert. Beim Erreichen der optimalen Prozeßordnung folgen die Prädiktionsfehler einem Weißen Rauschprozeß mit minimaler Varianz. Die minimale Varianz der Prädiktionsfehler σ_e^2 ist für sich genommen aber kein Kriterium, da mit wachsender Prozeßordnung die Varianz theoretisch stets kleiner wird. In der Literatur werden

eine ganze Reihe von Kriterien diskutiert; allgemeine Verbreitung findet das von Akaike (1974) vorgestellte Informationskriterium AIC (Akaike Information Criterion). Die optimale Prozeßordnung minimiert die Funktion AIC:

$$AIC = \ln \sigma_e^2 + 2 \frac{p}{n} \quad (\text{III.2.17})$$

Theoretische Begründungen dieses Kriteriums sind u.a. bei Ulrych und Ooe (1979) zu finden.

2.4 Nicht-stationäre Zeitreihen

Bei der Bearbeitung von Geländeprofilen kann nicht davon ausgegangen werden, daß diese als stationäre Zeitreihen modelliert werden können. Eine Möglichkeit der Bearbeitung nicht-stationärer Zeitreihen bietet sich durch die bereits im Abschnitt III.1.2 angesprochenen zweiphasigen Verfahren, wobei Trendanteile durch möglichst einfache funktionale Ansätze vor der stochastischen Modellierung eliminiert werden. Diese sehr weit verbreitete Vorgehensweise hat den grundsätzlichen Nachteil aller mehrphasigen Verfahren, daß sie sich nicht in einer geschlossenen Form darstellen lassen; es werden zwei Modelle benötigt, eines zur Trendmodellierung und eines zur stochastischen Modellierung. Bei der Zeitreihenmodellierung mit autoregressiven Prozessen können diese Probleme durch die Einführung von integrierten Prozessen umgangen werden. Dabei wird von der Vorstellung ausgegangen, daß die gegebene, nicht-stationäre Zeitreihe y_t durch mehrfache Integration aus einer ursprünglich stationären Zeitreihe x_t hervorgegangen ist.

Definition: Autoregressiver, integrierter Prozeß

Eine nicht-stationäre Zeitreihe y_t heißt autoregressiver, integrierter Prozeß der Ordnung (p,d) (ARI(p,d)-Prozeß), wenn sie sich nach d -facher Differentiation als stationärer autoregressiver Prozeß x_t der Ordnung p darstellen läßt:

$$A'(z) y_t = A(z) (1-z)^d x_t,$$

und

$$A(z) x_t = e_t,$$

(III.2.18)

Aus dieser Beziehung geht hervor, daß das charakteristische Polynom der nicht-stationären Zeitreihe y_t durch Hinzufügen von d Nullstellen auf dem Einheitskreis ($z=1$) zu den p Nullstellen des Polynoms $A(z)$ der stationären Zeitreihe (außerhalb des Einheitskreises) entsteht. Damit läßt sich eine Strategie zur Modellierung nicht-stationärer Zeitreihen entwickeln:

1. D -fache Differentiation der nicht stationären Zeitreihe y_t . Als Ergebnis wird die stationäre Zeitreihe x_t erhalten.
2. Prozeßidentifikation der Zeitreihe x_t und Berechnung der Nullstellen des charakteristischen Polynoms $A(z)$.
3. Berechnung der Prozeßparameter der ursprünglichen Zeitreihe y_t durch Hinzufügen von d Nullstellen $z=1$ zu den Nullstellen des Polynoms von $A(z)$.

2.5 Beobachtete Zeitreihen

Die Analyse von beobachteten Zeitreihen muß davon ausgehen, daß durch den Meßprozeß die ursprüngliche Zeitreihe x_t beeinflusst wurde. Der beobachtete Prozeß z_t entsteht durch die additive Überlagerung der Zeitreihe x_t mit den Meßfehlern n_t : $z_t = x_t + n_t$. Die physikalisch begründete Modellvorstellung des Meßvorganges geht von der stochastischen Unabhängigkeit der Meßfehler n_t und des eigentlichen Signals der Zeitreihe x_t aus, das heißt $E\{n_t x_{t-h}\} = 0$ für alle h . Bevor die Zeitreihe analysiert werden kann muß das unverrauschte Signal x_t aus der beobachteten Zeitreihe z_t geschätzt werden. Die Bearbeitung beobachteter Zeitreihen beinhaltet somit neben den Aufgaben der Prozeßidentifikation die Schätzung der unverrauschten Zeitreihe x_t und die Schätzung der Varianz der Meßfehler σ_n^2 . Drei Möglichkeiten zur Lösung dieser Aufgabe sollen kurz skizziert werden.

(1) Box und Jenkins (1976) erweitern den die Zeitreihe x_t modellierenden AR(p)-Prozeß um das Meßrauschen n_t . Der beobachtete Prozeß z_t läßt sich zunächst als AR(p)-Modell darstellen:

$$A(z)(z_t - n_t) = e_t \quad (\text{III.2.19})$$

Mit der Einführung eines Moving-Average-Anteils $B(z)$ und $e_t + A(z)n_t = B(z)u_t$ läßt sich die beobachtete Zeitreihe z_t in ein ARMA(p,p)-Modell überführen.

$$A(z)z_t = B(z)u_t \quad (\text{III.2.20})$$

Bemerkenswert ist, daß der AR- und MA-Anteil die gleiche Anzahl von Prozeßparametern aufweist. Der Ansatz von Box und Jenkins kombiniert die Prädiktionsfehler e_t mit dem Meßrauschen n_t . Da jedoch die Trennung dieser Prozesse für die Analyse realer Zeitreihen von entscheidender Bedeutung ist, wird dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

(2) Schulte (1987) definiert ein erweitertes autoregressives Modell in der Form.

$$z_t = - \sum_{i=1}^p a_i x_{t-i} + e_t + n_t \quad (\text{III.2.21})$$

Dieser Ansatz läßt sich nicht in ein bekanntes Modell der Parameterschätzung, z.B. Gauß-Helmert-Modell oder das allgemeine Modell der Kollokation, eingliedern. Schulte (1987) leitet deshalb mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode einen speziellen Schätzer für die unbekanntenen Prozeßparameter a_k ab. Für die Schätzung der unbekanntenen Varianzen σ_n^2 und σ_e^2 wird ebenfalls ein neuer, auf Koch (1987) aufbauender Ansatz zur Varianzkomponentenschätzung hergeleitet. Die Bearbeitung beobachteter Prozesse mit dem Ansatz von Schulte führt auf große Normalgleichungssysteme, die zur Lösung einen erheblichen rechentechnischen Aufwand benötigen. Für die Bearbeitung sehr großer Datenmengen, wie sie bei der Auswertung von Laser-Profilmessungen anfallen, erscheint dieser Weg deshalb als nicht geeignet.

(3) Zur Lösung des Problems der beobachteten Zeitreihen wird hier ein in drei Phasen ablaufendes, iteratives Verfahren entwickelt, das im Ansatz auf Förstner (1985) zurückgeht. Der Lösungsalgorithmus wird von den von Förstner bearbeiteten ARI(0,2)-Prozessen auf allgemeine ARI(p,d)-Prozesse erweitert (s.a. Lindenberg 1987). Die drei iterativ ablaufenden Phasen sind:

1. Filterung der beobachteten Zeitreihe z_t
2. Schätzung der Varianzen σ_n^2 und σ_e^2
3. Schätzung der Prozeßparameter a_k

(3.1) Filterung

Unter der Filterung wird die Schätzung der unverrauschten Zeitreihe x_t aus der beobachteten Reihe z_t verstanden. Die Schätzung erfolgt mit einem Gauß-Markov-Modell, das sich aus zwei Beobachtungstypen zusammensetzt:

$$\begin{aligned} E\{z_t\} &= x_t & D\{z_t\} &= \sigma_n^2 & t &= 1, \dots, N \\ 0 = E\{e_t\} &= \sum_{j=0}^{p+d} a_j x_{t-j} & D\{e_t\} &= \sigma_e^2 & t &= p+d+1, \dots, N \end{aligned} \quad (\text{III.2.22})$$

Die erste Beobachtungsgleichung beschreibt den Meßvorgang: der Erwartungswert der Elemente der beobachteten Zeitreihe z_t wird den Elementen der unverrauschten Zeitreihe x_t gleichgesetzt. Die zweite Gleichung modelliert die Zeitreihe x_t als ARI(p,d)-Prozeß. Dazu werden die Erwartungswerte der Prädiktionsfehler $E\{e_t\} = 0$ als fiktive Beobachtungen eingeführt. Unbekannte im Sinne der Ausgleichung sind bei diesem Ansatz lediglich die Elemente der unverrauschten Zeitreihe x_t .

Das dreiphasige Iterationsverfahren wird notwendig, da die im Gauß-Markov-Modell (III.2.22) als bekannt vorausgesetzten Prozeßparameter a_k und die Varianzen σ_n^2 und σ_e^2 eigentlich unbekannt sind. Im Laufe des Iterationsprozesses werden dazu die nachfolgend nach (3.3) geschätzten Prozeßparameter und die nach (3.2) geschätzten Varianzen eingeführt. Die Initialisierung des Iterationsprozesses erfolgt mit einem einfachen

ARI(0,2)-Modell mit den festen Prozeßparametern $a_1 = -2$ und $a_2 = 1$ (Prozeßparameter eines zweifach integrierten Weißen Rauschprozesses). Für die Varianzen können sehr grobe Näherungswerte angenommen werden (s. (3.2)), z.B. $\sigma_n^2 = 1$ und $\sigma_e^2 = 1$.

Die gefilterte Zeitreihe x_t wird aus folgendem Ausgleichungsansatz geschätzt:

$$l + v = A x \quad ; \quad D \{l\} = C_u \quad (III.2.23)$$

mit

$$l = \begin{bmatrix} z_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad ; \quad v = \begin{bmatrix} n_t \\ e_t \end{bmatrix} \quad ; \quad A = \begin{bmatrix} I \\ A_1 \end{bmatrix} \quad ; \quad C_u = \begin{bmatrix} \sigma_n^2 I & 0 \\ 0 & \sigma_e^2 I \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & \dots & a_{p+d} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_1 & \dots & a_{p+d} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_N \end{bmatrix}$$

(3.2) Varianzkomponentenschätzung

Generell muß davon ausgegangen werden, daß die Varianzen σ_n^2 und σ_e^2 im stochastischen Teil des Gauß-Markov-Modells (III.2.23) a priori unbekannt sind. Sie müssen mit Hilfe der Varianzkomponentenschätzung ermittelt werden. Üblicherweise wird der Lösungsansatz zur Varianzkomponentenschätzung im Zeitbereich formuliert (z.B. Koch 1987). Dies führt zu sehr umfangreichen Gleichungssystemen, die mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden sind. Eine alternative Formulierung im Frequenzbereich schlägt Förstner (1985) vor und weist die Identität der Schätzer im Orts- und Frequenzbereich nach. Wegen der einfachen Spektraldarstellung autoregressiver Prozesse (s. III.2.15) ist diese Vorgehensweise besonders geeignet.

Bezeichnet $P_x(u)$ das nach Gleichung (III.2.15) berechnete Leistungsspektrum des ARI-Prozesses x_t , dann berechnet sich das Leistungsspektrum $P_z(u)$ der beobachteten Zeitreihe $z_t = x_t + n_t$ zu:

$$P_z(u) = P_x(u) + P_n(u) = P_x(u) + \sigma_n^2 \quad (III.2.24)$$

Das Leistungsspektrum $P_z(u)$ kann auf verschiedene Weisen empirisch bestimmt werden; Kay und Marple (1981) geben dazu einen Überblick über die verbreitetsten Methoden. Das empirisch geschätzte Leistungsspektrum wird mit $\hat{P}_z(u)$ bezeichnet. Der Ansatz zur Schätzung der Varianzkomponenten ergibt dann:

$$E\{\hat{P}_z(u)\} = P_x(u) + \sigma_n^2 \quad ; \quad V\{\hat{P}_z(u)\} = P_z^2(u) \quad (III.2.25)$$

Die Schätzung der Varianzfaktoren Φ_e und Φ_n , aus denen wiederum die Varianzen σ_e^2 und σ_n^2 berechnet werden können (s.u.), führt nach der Methode der kleinsten Quadrate zu folgenden Normalgleichungen:

$$\begin{bmatrix} \sum_u \frac{P_x^2(u)}{P_z^2(u)} & \sum_u \frac{P_x(u) \sigma_n^2}{P_z^2(u)} \\ \sum_u \frac{P_x(u) \sigma_n^2}{P_z^2(u)} & \sum_u \frac{\sigma_n^4}{P_z^2(u)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_e \\ \Phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_u \frac{P_x(u) \hat{P}_z(u)}{P_z^2(u)} \\ \sum_u \frac{\hat{P}_z(u) \sigma_n^2}{P_z^2(u)} \end{bmatrix} \quad (III.2.26)$$

Da das wahre Leistungsspektrum $P_z(u)$ unbekannt ist, muß die iterative Lösung mit dem empirisch bestimmten Leistungsspektrum $\hat{P}_z(u)$ gestartet werden. Mit den in der Iteration i geschätzten Varianzfaktoren $\Phi_e(i)$ und $\Phi_n(i)$ berechnen sich die Varianzen $\sigma_n^2(i+1)$ und $\sigma_e^2(i+1)$:

$$\sigma_n^2(i+1) = \sigma_n^2(i) \cdot \Phi_n(i)$$

$$\sigma_e^2(i+1) = \sigma_e^2(i) \cdot \Phi_e(i)$$

Die Wahl der Näherungswerte für die Varianzen σ_n^2 und σ_e^2 ist unkritisch, die Schätzung der Varianzen erfolgt global, unabhängig von den Näherungswerten, falls das Verfahren konvergiert (Koch 1987).

Entscheidend für die Anwendbarkeit der Varianz-Kovarianzkomponentenschätzung nach (III.2.26) ist die Bestimmbarkeit und Trennbarkeit der zu schätzenden Varianzfaktoren Φ_e und Φ_n . Förstner (1985) gibt dazu Kriterien an, die sich aus den stochastischen Eigenschaften der geschätzten Varianzfaktoren mit Hilfe der inversen Normalgleichungsmatrix aus (III.2.26) berechnen lassen.

- Die Bestimmbarkeit der Varianzen σ_n^2 und σ_e^2 wird durch die Standardabweichungen der geschätzten Varianzfaktoren σ_{Φ_e} und σ_{Φ_n} angezeigt. Die Varianzen sind gut bestimmbar, wenn σ_{Φ_e} und σ_{Φ_n} jeweils unter 20% von σ_e bzw. σ_n sind. Abhängig ist dies vom Verhältnis σ_n^2/σ_e^2 . Differiert dieses Verhältnis wesentlich von 1.0, dann kann nur die größere Varianz sicher geschätzt werden.
- Die Trennbarkeit, das heißt die Fähigkeit, Meßfehler n_i als solche und nicht fälschlicherweise als Prädiktionsfehler e_i zu interpretieren, kann mit dem Korrelationskoeffizient $\rho_{\Phi_e\Phi_n}$ der geschätzten Varianzfaktoren gemessen werden. Die Varianzen sind gut trennbar, wenn dieser Korrelationskoeffizient weniger als 0.75 beträgt.

(3.3) Prozeßparameterschätzung

Nachdem das Iterationsverfahren mit einem ARI(0,2)-Modell mit konstanten Prozeßparametern gestartet wurde, werden in den folgenden Iterationsschritten die Prozeßparameter a_k aus der nach (3.1) gefilterten Zeitreihe x_t mit dem in 2.5 aufgezeigten Algorithmus von Ulrych und Clayton (1976) geschätzt.

2.6 Robuste Zeitreihenanalyse

Im einführenden Abschnitt III.1.2 wurde bereits die Notwendigkeit eines robusten Modells angesprochen. Grobe Fehler können jede der im vorhergehenden Abschnitt unter (3.1) bis (3.3) aufgeführten Schätzungen gravierend beeinflussen. Einen Lösungsansatz bietet die Theorie der robusten Schätzer (z.B. Hampel et al. 1986). Dabei wird jeder Beobachtungsgleichung in jedem Iterationsschritt i ein individuelles Gewicht zugeordnet, das sich funktional aus der geschätzten Verbesserung der vorhergehenden Iteration v_{i-1} berechnet:

$$p_i = p_0 \cdot f(v_{i-1}) \quad (\text{III.2.27})$$

In der Literatur wird eine Vielzahl von Ansätzen für die Gewichtsfunktion f diskutiert. Ausgehend von der Dänischen Methode (Kubik 1982, Krarup und Kubik 1983) wird eine vereinfachte Gewichtsfunktion abgeleitet, die den Anforderungen der Bearbeitung von Geländeprofilen genügt:

$$f(v) = \begin{cases} 1 & \frac{|v|}{\sigma_v} < 3 \\ 0 & \frac{|v|}{\sigma_v} \geq 3 \end{cases} \quad (\text{III.2.28})$$

Dieser Ansatz kann allerdings, wie auch die Dänische Methode, im mathematischen Sinn nicht als robuste Schätzung bezeichnet werden; da mit $\Sigma(v_i; v_i; p_0 f(v_{i-1})) \rightarrow \min$ eine nicht-konvexe Funktion minimiert wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch der Begriff der robusten Schätzung auch für Schätzungen mit der vorgeschlagenen Gewichtsfunktion verwendet. Der theoretische Nachweis der Konvergenz und Eindeutigkeit einer Schätzung mit der Gewichtsfunktion (III.2.28) ist kaum durchführbar. Grobe Fehler können jedoch mit diesem Ansatz zuverlässig entdeckt und eliminiert werden (Krarup und Kubik 1983).

Die robuste Modellierung beobachteter Zeitreihen bietet zwei Ansatzpunkte, die im folgenden vorgestellt und deren Auswirkungen anhand eines Beispiels demonstriert werden.

(1) Robuste Modellierung des Meßprozesses

Wird im Gauß-Markov-Modell (III.2.22) in den ersten Typ von Beobachtungsgleichungen die Gewichtsfunktion f eingeführt, dann lassen sich grobe Fehler im Meßprozeß aufdecken und eliminieren. Der beobachtete Wert z_i nimmt an der Berechnung des Elements der gefilterten Zeitreihe x_i nicht teil, stattdessen wird der vom ARI-Modell prädierte Wert (2. Typ der Fehlergleichungen in III.2.22) in die gefilterte Zeitreihe x_i übernommen. Bei der Modellierung von Laserprofilen lassen sich mit diesem Ansatz grobe Meßfehler des Laser-Profilmeßsystems behandeln, aber auch Laserpunkte, die nicht auf der Erdoberfläche gemessen wurden (z.B. in Vegetation), können somit auf einfache Weise aufgedeckt und ausgeglichen werden.

(2) Robuste Modellierung der Zeitreihe

Durch die Einführung der Gewichtsfunktion f in den zweiten Typ der Beobachtungsgleichungen (III.2.22) können Zeitreihen, denen kein Weißes Rauschen als generierender Prozeß zugrunde liegt, mit ARI-Prozessen modelliert werden. Für die Bearbeitung von Laserprofilen bedeutet dies, daß sich auch nicht-stetige Zeitreihen bearbeiten lassen, das heißt Bruchkanten des Geländes werden nicht durch die Filterung verwaschen, sondern können im Geländeprofil als solche erhalten bleiben.

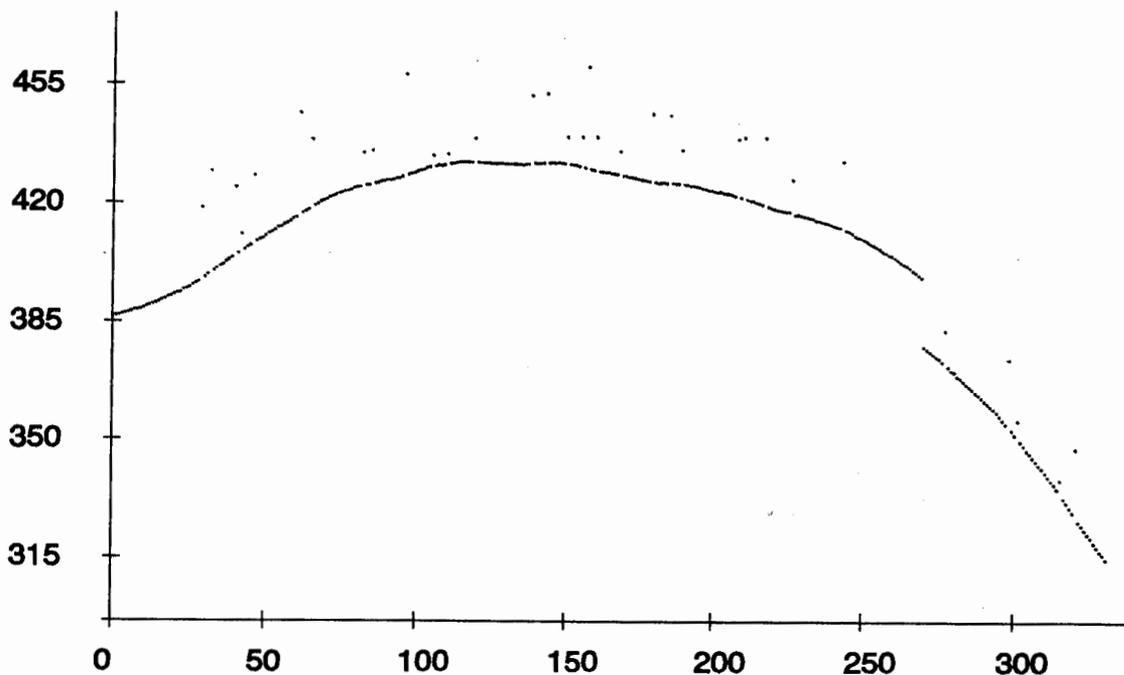


Abb. III.2.1 Beobachtete Zeitreihe mit "groben Fehlern"

Abbildung III.2.1 zeigt eine generierte, beobachtete Zeitreihe z_i mit einer Sprungstelle und einer Anzahl von Ausreißern, die als grobe Meßfehler oder topographisch nicht-relevante Objekte interpretiert werden können. Die Zeitreihe wurde als ARI(2,2)-Prozeß mit einer Standardabweichung des zugrundeliegenden Weißen Rauschprozesses von $\sigma_e = 0.05\text{m}$ generiert und mit einem Meßrauschen von $\sigma_n = 0.1\text{m}$ überlagert.

Die nicht-robuste Zeitreihenanalyse führt auf die in Abbildung III.2.2 dargestellte Zeitreihe x_i . Deutlich zu erkennen ist, wie die ursprünglich scharfe Sprungstelle verwaschen dargestellt wird. An den Stellen, wo sich ursprünglich die Ausreißer befanden, tendiert die nicht-robust geschätzte Zeitreihe x_i dazu, die groben Fehler in die Zeitreihe mit einzubinden, so daß es an diesen Stellen zu Wellenbewegungen im geschätzten Profil kommt. In der Varianzkomponentenschätzung wird das Meßrauschen mit $\sigma_n = 5.1\text{m}$ deutlich falsch geschätzt; ebenso die Standardabweichung der Prädiktionsfehler mit $\sigma_p = 2.2\text{m}$.

Der Effekt der robusten Zeitreihenanalyse wird in Abbildung III.2.3 eindeutig demonstriert. Durch die robuste Schätzung wird die Sprungstelle in der Zeitreihe x_i wiederum scharf abgebildet. Die groben Fehler bleiben ohne Einfluß auf den Verlauf des Profils, da die Ausreißer vollständig eliminiert wurden und an ihrer Stelle die prädierten Werte des ARI-Modells übernommen wurden. Die Schätzung der Standardabwei-

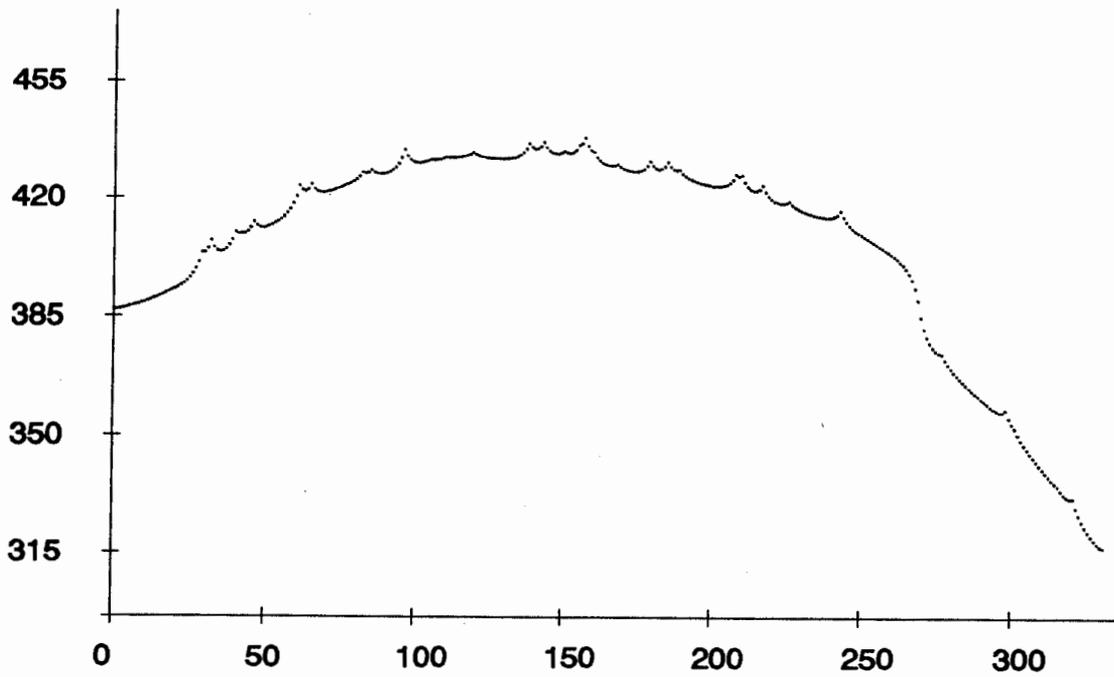


Abb. III.2.2 Ergebnis der nicht-robusten Zeitreihenanalyse

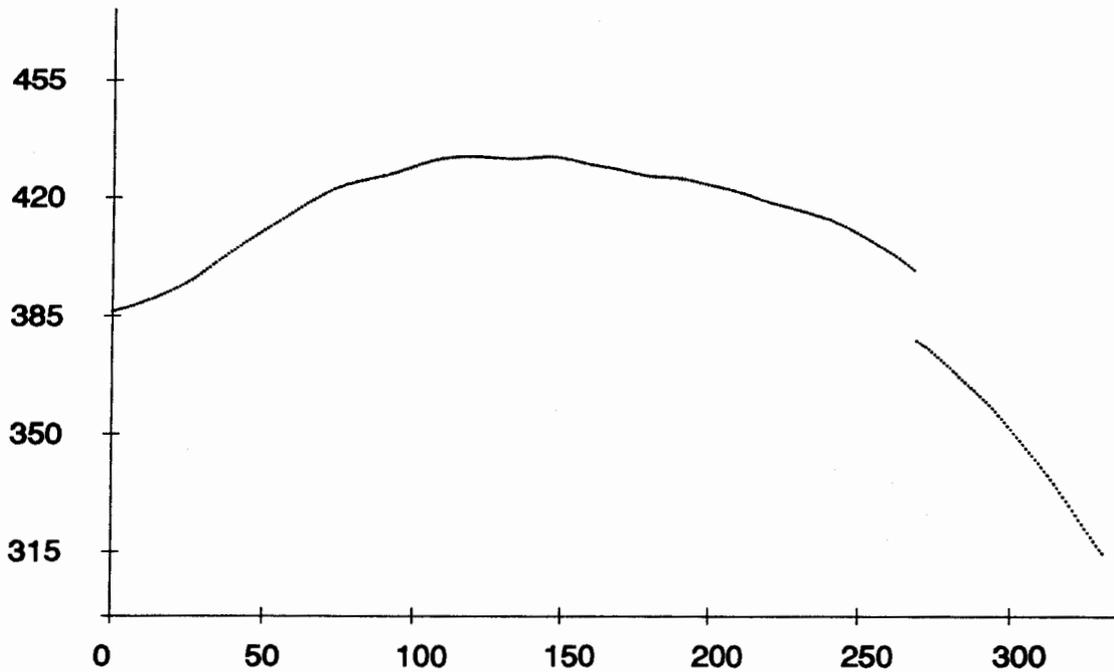


Abb. III.2.3 Ergebnis der robusten Zeitreihenanalyse

chung des Meßrauschens ergibt $\sigma_n = 0.108m$. Die Genauigkeit der Schätzung von σ_n ist hoch, sie beträgt $\pm 0.008m$ (entspricht 7.4% von σ_n). Die Standardabweichung des die Zeitreihe generierenden Weißen Rauschprozesses ist weniger gut bestimmbar. Bei einem geschätzten $\sigma_e = 0.002m$ beträgt die Genauigkeit 22% dieses Wertes. Die Meßfehler und Prädiktionsfehler sind bei einem Korrelationskoeffizient von $\rho_{\epsilon, \sigma_n} = 0.04$ sehr gut trennbar.

3. Mathematische Morphologie

3.1 Einführung

Die mathematische Morphologie ist ein relativ junger Zweig der Mathematik, der sich aus den Erfordernissen der digitalen Bildverarbeitung entwickelt hat. Begründet wurde dieses Gebiet im Jahre 1964 am Centre de Morphologie Mathématique des Mines de Paris in Fontainebleau (Schule von Fontainebleau). Die Wurzeln der mathematischen Morphologie sind vor allem in der integralen Geometrie und der geometrischen Stochastik, daneben aber auch in der Theorie stochastischer Prozesse, der algebraischen Topologie und der Spektralanalyse zu suchen. Die Arbeiten der Schule von Fontainebleau sind unter anderem in zwei Hauptwerken dokumentiert. Die Herleitung der mathematischen Morphologie findet sich bei Matheron (1975). Dagegen stellt Serra (1982) eine Verbindung der theoretischen Arbeiten Matherons mit praktischen Anwendungen aus dem Bereich der digitalen Bildverarbeitung her.

Die mathematische Morphologie beschäftigt sich mit der Form von Objekten (z.B. mathematische Funktionen oder digitale Bilder). Die Objekte werden, vereinfacht ausgedrückt, so bearbeitet, daß charakteristische Formelemente verstärkt und unwesentliche Formelemente eliminiert werden. Zur Lösung dieser Aufgabe werden Operatoren entwickelt, die auf das Objekt wirken. Die Operatoren können unabhängig von der Darstellung der zu bearbeitenden Objekte formuliert werden. So können beispielsweise kontinuierliche oder diskrete Funktionen, Binär- oder Grauwertbilder, ein- oder mehrdimensionale Objekte bearbeitet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit kann eine tiefere Beschäftigung mit der Theorie der mathematischen Morphologie nicht erfolgen. Da sie jedoch bei der Auswertung von Laserprofilen eine gewisse Rolle spielt, sollen die benötigten Operatoren, ohne mathematische Herleitung und Beweise, vorgestellt werden. Die Formulierung der Operatoren wurde in der Darstellung von Haralick et al. (1987) für digitale Grauwertbilder auf die Erfordernisse diskreter Laserprofile in eine eindimensionale Darstellung übertragen.

3.2 Objekt und Strukturelement

(1) Objekt

Bei der Auswertung von Laser-Profilmessungen ist das Laserprofil das Objekt der Bearbeitung mittels mathematisch morphologischer Operatoren. Das Laserprofil wird als eindimensionales Objekt des Euklidischen Raumes E betrachtet, das sich als Funktion $f(x)$ mit Wertebereich $F \subseteq E$ darstellen läßt. Nach III.1.3 liegt das Laserprofil in diskreter Form vor, das Argument x kann also nur diskrete Werte annehmen. Dagegen können die Funktionswerte beliebige reelle Werte sein.

(2) Strukturelement

Wesentliches Element der mathematischen Morphologie ist das sogenannte Strukturelement, das mittels der Operatoren auf das Objekt $f(x)$ wirkt. Das Strukturelement wird durch eine Funktion $k(x)$ mit Wertebereich $K \subseteq E$ gebildet. Die Argumente x können, wie bei der Definition des Objekts, nur diskrete Werte annehmen.

Die Wahl des Strukturelements muß im Zusammenhang mit der gestellten Aufgabe gesehen werden. Serra (1982) gibt Bedingungen, die das Strukturelement erfüllen soll: möglichst einfache geometrische Beschreibung und räumliche Beschränkung. Daneben formuliert Serra ein heuristisches Kriterium: Kommen mehrere Strukturelemente in Frage, die eine Aufgabe in gleicher Weise erfüllen, aber unterschiedliche Eigenschaften besitzen, dann sind die Strukturelemente mit extremen Formen abzulehnen.

Für die Bearbeitung von Laserprofilen wird folgendes Strukturelement $k(x)$ vorgeschlagen, das nur von einem Parameter L abhängig ist. Der Parameter L beschreibt die Länge des Strukturelements; mit einem anschaulicheren Begriff wird der Parameter auch als Fenstergröße bezeichnet. Im Fall der Laserprofile ist L die Anzahl der Laserpunkte, die mittels der Operatoren gleichzeitig bearbeitet werden.

$$k(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \frac{L}{2} \\ 0 & |x| > \frac{L}{2} \end{cases} \quad (\text{III.3.1})$$

3.3 Mathematisch morphologische Operatoren

(1) Basisoperatoren

Dilation und Erosion sind die Basisoperatoren der mathematischen Morphologie.

Definition: Dilation \oplus

Die Dilation eines Objektes $f(x)$ durch das Strukturelement $k(x)$ wird definiert durch:

$$(f \oplus k)(x) = \max_{\substack{z \in K \\ x-z \in F}} \{ f(x-z) + k(z) \} \quad (\text{III.3.2})$$

Definition: Erosion \ominus

Die Erosion eines Objektes $f(x)$ durch das Strukturelement $k(x)$ wird definiert durch:

$$(f \ominus k)(x) = \min_{z \in K} \{ f(x+z) - k(z) \} \quad (\text{III.3.3})$$

Die Definitionen der Basisoperatoren zeigen eine Analogie zu den Faltungsoperationen digitaler Filter, wobei Summationen durch Minimum- und Maximum-Operationen ersetzt werden.

(2) Kombinierte Operatoren

Erst durch die Kombination von Dilation und Erosion wird die gesuchte, vereinfachte Darstellung der Objektform erreicht. Bei den Operatoren Öffnen und Schließen werden Dilation und Erosion jeweils paarweise kombiniert ausgeführt. Das erzielte Ergebnis ist wesentlich stabiler als eine einfach durchgeführte Basisoperation.

Definition: Öffnen \circ

Das Objekt f wird durch das Strukturelement k geöffnet, indem die Erosion von f durch k einer anschließenden Dilation durch k unterzogen wird:

$$f \circ k = (f \ominus k) \oplus k \quad (\text{III.3.4})$$

Definition: Schließen \bullet

Das Objekt f wird durch das Strukturelement k geschlossen, indem die Dilation von f durch k einer anschließenden Erosion durch k unterzogen wird:

$$f \bullet k = (f \oplus k) \ominus k \quad (\text{III.3.5})$$

Einige interessante Eigenschaften der Operatoren Öffnen und Schließen sollen genannt werden; die mathematischen Beweise finden sich bei Haralick et al. (1987):

- Öffnen ist antiextensiv: $(f \circ k)(x) \leq f(x)$
- Schließen ist extensiv: $(f \bullet k)(x) \geq f(x)$
- Öffnen ist idempotent: $(f \circ k) \circ k = f \circ k$
- Schließen ist idempotent: $(f \bullet k) \bullet k = f \bullet k$
- Dualitätstheorem: $-(f \circ k) = -f \bullet k(-x)$

3.4 Geometrische Interpretation

Die Operation Öffnen kann auf einfache Weise wie folgt geometrisch interpretiert werden. Ein Fenster der Länge L wird Punkt für Punkt über das Objekt geschoben. Der zentrale Punkt im Fenster erhält den minimalen Wert aller Punkte innerhalb des Fensters zugeordnet. Das Ergebnis dieser ersten Operation ist die Erosion des Objekts, die einer anschließenden Dilation unterzogen wird. Dabei wird das Fenster punktweise über das erodierte Objekt geführt und jeweils der Maximalwert innerhalb des Fensters dem zentralen Fensterelement zugewiesen. Das Öffnen glättet die Objektoberfläche. Details des Objektes, die kleiner als das Strukturelement sind werden eliminiert, ohne dabei die globale Form des Objektes zu zerstören.

Entsprechend wird durch die Operation Schließen das Objekt bearbeitet, indem zunächst der Maximalwert innerhalb des Fensters dem zentralen Fensterelement zugewiesen wird. Aus der so erhaltenen Dilation des Objekts wird anschließend der Minimalwert innerhalb des Fensters gebildet. Durch das Schließen werden einzelne aus der globalen Form des Objektes ragende Details verstärkt wiedergegeben. Gemeinsam angewendet liefern Öffnen und Schließen eine Umhüllende des Objektes, wobei das Öffnen die untere und das Schließen die obere Begrenzungslinie bilden.

Werden die morphologische Operatoren auf Laserprofile angewendet, dann erhält man durch das Öffnen eine Näherung für das Bodenprofil. Das Schließen erzeugt ein Profil durch alle nicht-topographischen Objekte mit maximalem Abstand zum Bodenprofil. Die weitere Verarbeitung des geöffneten Profils erfolgt in der Modellierung der Geländeprofile, während das geschlossene Profil für nicht-topographische Untersuchungen (z.B. Bestimmung von Baumhöhen in der Forstwirtschaft) von Interesse sein kann.

Anhand eines Beispiels sollen die morphologischen Operatoren veranschaulicht werden. In Abbildung III.3.1 ist ein aus 940 Punkten bestehendes Laserprofil dargestellt. In den folgenden Abbildungen wird dieses Objekt mit einem Strukturelement der Länge L von 31 Punkten bearbeitet.

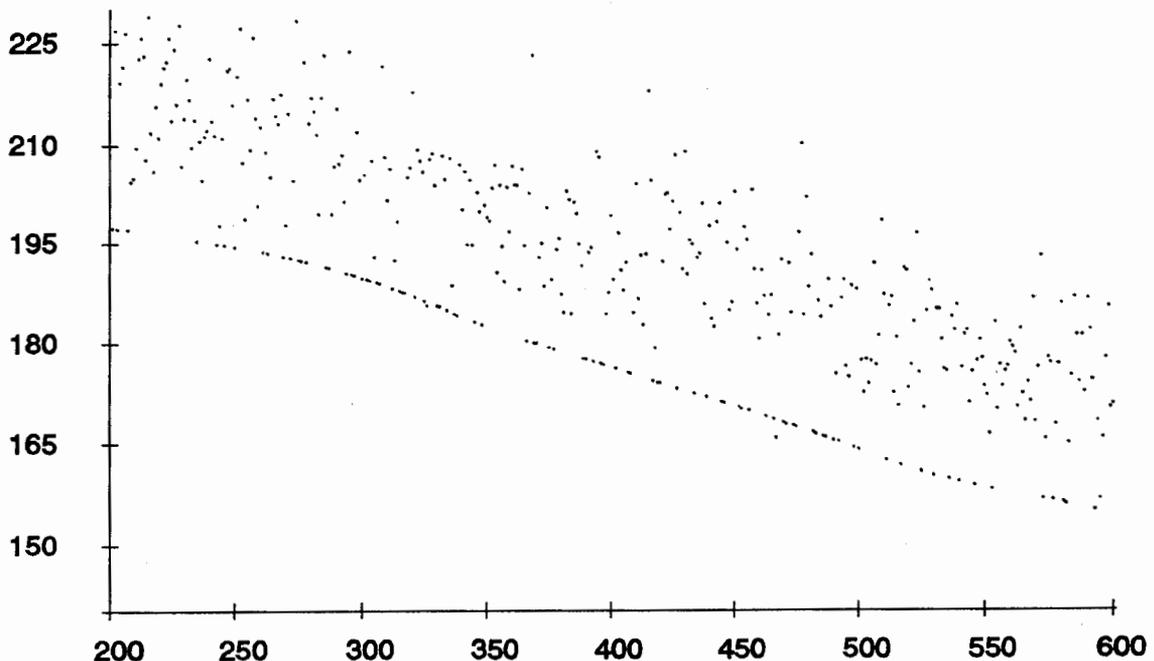


Abb. III.3.1 Laserprofil über Waldgebiet

In Abbildung III.3.2 wurde das Objekt der Abb. III.3.1 einer Erosion und einer Dilation durch das Strukturelement unterzogen. Die Erosion ergibt die untere, die Dilation die obere Begrenzungslinie. Das Ergebnis der Operatoren Öffnen und Schließen zeigt Abbildung III.3.3. Öffnen und Schließen bilden zusammen die Umhüllende des Objektes. Das Öffnen des Objektes durch das Strukturelement ergibt die untere, das Schließen die obere Linie der Umhüllenden. Im Vergleich zu Abbildung III.3.2 ist deutlich erkennbar, daß sich die kombinierten Operatoren Öffnen und Schließen wesentlich besser dem Objekt anpassen und somit die Form des Objektes sicherer wiedergegeben können als die Basisoperatoren Erosion und Dilation.

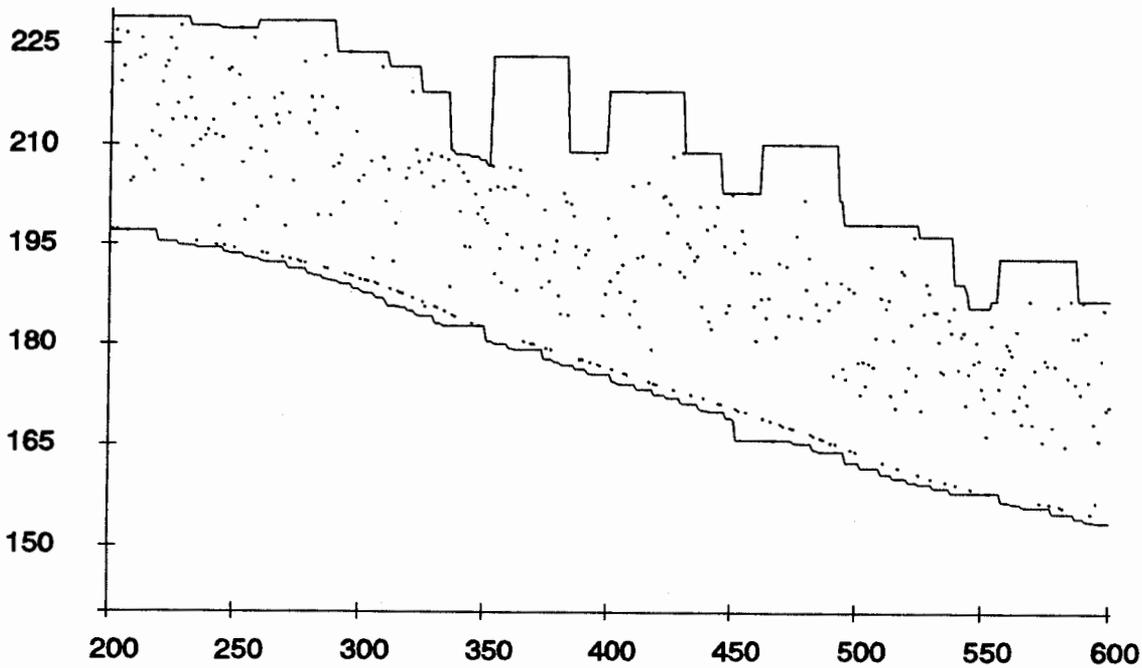


Abb. III.3.2 Morphologische Operatoren Dilation (oben) und Erosion (unten)

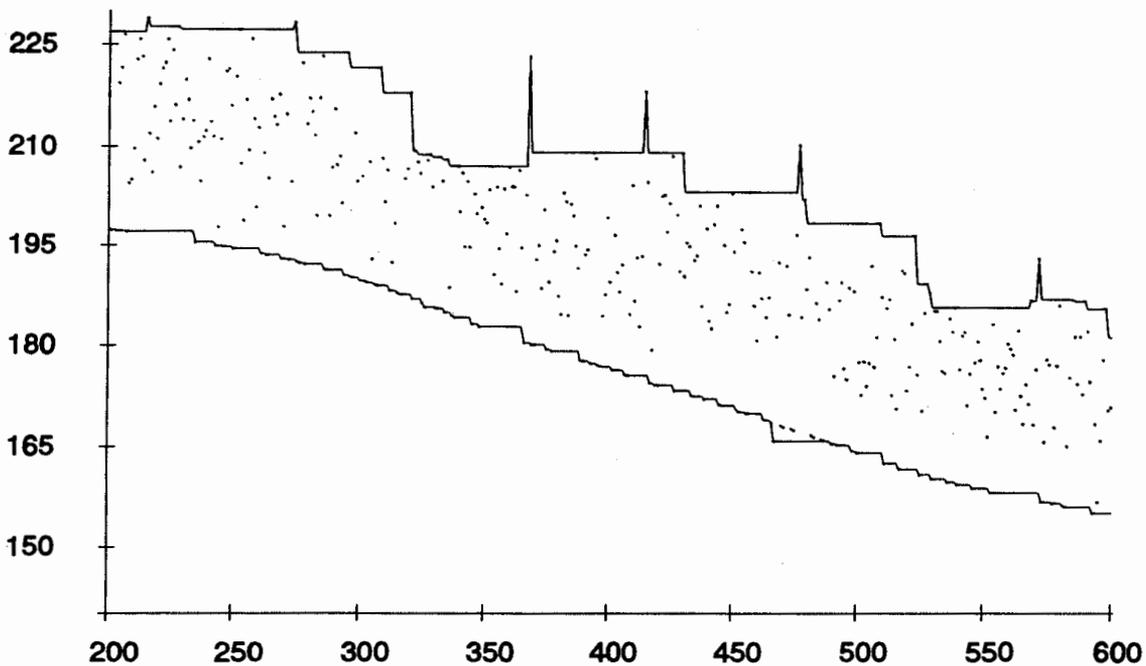


Abb. III.3.3 Morphologische Operatoren Öffnen (unten) und Schließen (oben)

3.5 Selektion der Bodenpunkte

Bei der Bearbeitung von Laserprofilen sind mit der Berechnung der unteren Umhüllenden mittels des morphologischen Operators Öffnen die tatsächlich gemessenen Bodenpunkte noch nicht identifiziert. Obwohl die Selektion der Bodenpunkte nicht zur Theorie der morphologischen Operatoren gehört, soll dieser Verarbeitungsschritt an dieser Stelle kurz angesprochen werden, da damit erst das Ziel der vorangehenden Bearbei-

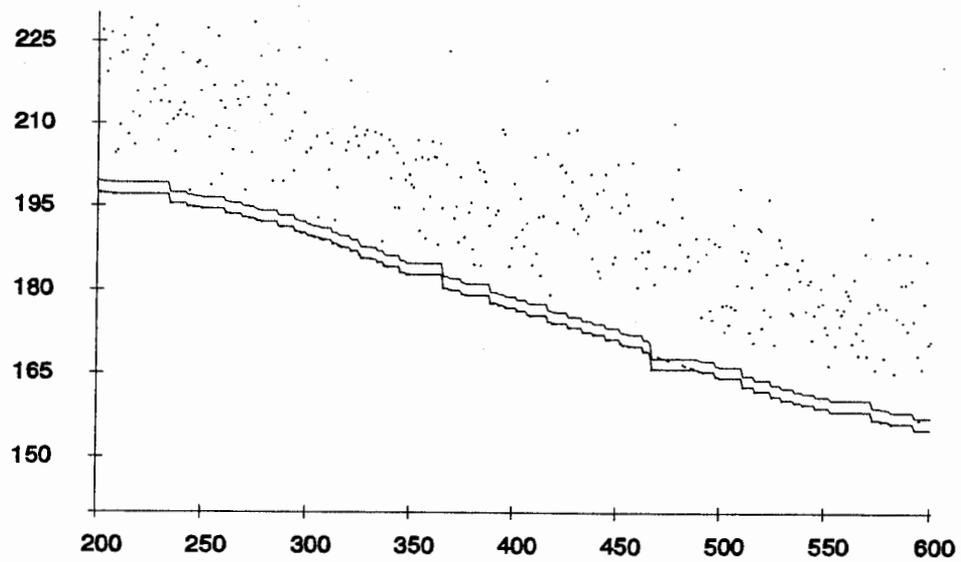


Abb. III.3.4 Band um untere Umhüllende (Bandbreite 2m)

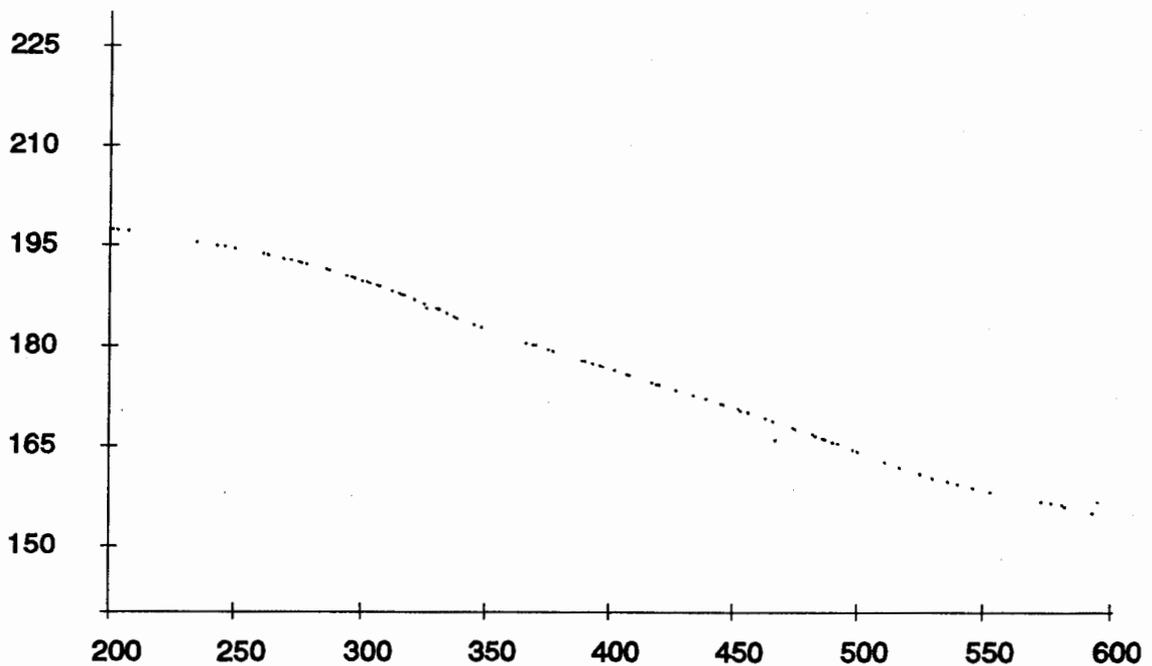


Abb. III.3.5 Selektierte Bodenpunkte

tungen, die Trennung der Bodenpunkte von den nicht verwertbaren Punkten, erreicht wird. Zur Demonstration der Vorgehensweise wird das bereits bekannte Beispielpprofil weiter verarbeitet.

Zunächst wird ein Band mit konstanter Bandbreite erzeugt, indem zu den Werten der unteren Umhüllenden eine Konstante addiert wird. Danach werden alle Laserpunkte, die innerhalb des Bandes liegen, als Bodenpunkte selektiert. Die Wahl der Bandbreite beeinflusst wesentlich die Auswahl der Bodenpunkte. Durch eine zu klein gewählte Bandbreite werden insbesondere bei in dichter Folge vorliegenden Bodenpunkte, Kleinformen des Geländes nicht berücksichtigt. Andererseits birgt eine zu große Bandbreite die Gefahr, daß Punkte auf niedrigen Vegetationsformen (Büsche, Unterholz) fälschlicherweise als Bodenpunkte selektiert werden.

Abbildung III.3.4 zeigt das Laserprofil mit der aus Abb. III.3.3 übernommenen unteren Umhüllenden. Das Band, innerhalb dessen die Bodenpunkte selektiert werden, hat in dieser Abbildung eine Bandbreite von 2m. Diese Größe wurde aus Gründen der graphischen Darstellbarkeit gewählt. Die Erfahrung anhand empirischer Untersuchungen zeigte, daß mit einer Bandbreite von maximal 0.5m zuverlässige Ergebnisse zu erzielen sind.

In Abbildung III.3.5 sind die innerhalb der gewählten Bandbreite liegenden Punkte dargestellt. Diese Punkte werden als Bodenpunkte identifiziert und der weiteren Bearbeitung zugeführt (s. III.4.3).

Die Selektion der Bodenpunkte nach der morphologischen Operation enthält als Ergebnis nur eine Teilmenge aller tatsächlich gemessenen Bodenpunkte. Es fehlen beispielsweise die Bodenpunkte des Geländes, die durch die Länge des Strukturelementes nicht berücksichtigt werden konnten. Eine korrekte Selektion der Bodenpunkte kann erst nach der Modellierung des Geländeprofils mit stochastischen Prozessen erfolgen. Dieser Sachverhalt wird anhand eines Beispiels in Abschnitt III.4.4 deutlich.

4. Bearbeitung der Laserprofile

4.1 Einleitung

In den vorangehenden Kapiteln III.2 und III.3 wurden stochastische Prozesse und mathematisch morphologische Operatoren als Hilfsmittel zur Bearbeitung von Laserprofilen vorgestellt. In diesem Kapitel wird anhand von empirischen Untersuchungen überprüft, ob sich die theoretisch entwickelten Modelle zur Bearbeitung von Laserprofilen anwenden lassen. Die Anwendbarkeit kann nicht auf theoretischem Wege bewiesen werden, sondern wird lediglich durch die Untersuchung von verschiedenartigen Daten empirisch festgestellt.

Zunächst werden im folgenden Abschnitt 4.2 Geländeprofile mit stochastischen Prozessen modelliert. Bei den in diesem Abschnitt untersuchten Profilen handelt es sich um konventionell, photogrammetrisch gemessene Profile; die Auswahl und die Messung der Punkte wurde also vom Operateur vorgenommen. Die Kriterien zur Beurteilung der ARI-Prozesse zur Geländeprofilmodellierung sind die Genauigkeit, ausgedrückt durch die Standardabweichung der Prädiktionsfehler σ_e , und der numerische Aufwand, der sich in der Gesamtanzahl der Prozeßparameter widerspiegelt.

Abschnitt 4.3 widmet sich der Bearbeitung von Laserprofilen. Es wird ein Verfahrensablauf vorgestellt, in den die in III.2 und III.3 eingeführten Methoden eingebunden sind. Die Anwendbarkeit dieses Verfahrens wurde an einer großen Anzahl von Laserprofilen überprüft (s. die durchgeführten Laser-Profilbefliegungen in IV.1.3). Exemplarisch werden in Abschnitt 4.4 die notwendigen Auswerteschritte an einem Laserprofil aufgezeigt. Ausgehend von den gemessenen Punkten des Laserprofils wird mit Hilfe der mathematisch morphologischen Operatoren und der Modellierung mit ARI-Prozessen das Geländeprofil abgeleitet und für die Eingabe in ein Digitales Höhenmodell vorbereitet.

4.2 Modellierung von Geländeprofilen mit ARI-Prozessen

Ebner (1979) hat wohl erstmals den Begriff des stochastischen Prozesses im Zusammenhang mit der Modellierung von Geländeprofilen verwendet. Der von ihm untersuchte Gauß-Markov-Prozeß 2. Ordnung, mit dem er die Geländemodellierung mittels finiter Elemente entwickelt, kann als ARI(0,2)-Prozeß, das heißt als zweifach integrierter Weißer Rauschprozeß, in die Terminologie der autoregressiven integrierten Prozesse eingegliedert werden. Mit der Verwendung dieses Prozeßtyps nimmt Ebner implizit an, daß das Krümmungsprofil (zweifache Differentiation) des Geländeprofils stets stationär ist. Eine individuelle, an die jeweilige, morphologische Geländeform angepaßte Modellierung kann durch den fixen Parametersatz nicht erfolgen.

In Lindenberger (1986) wurde über erste Ergebnisse zur Modellierung von Geländeprofilen mit ARIMA-Prozessen (autregressive integrierte moving average-Prozesse) berichtet. Empirische Untersuchungen

wurden an Profilen aus 9 verschiedenen Regionen vorgenommen, die größtenteils dem Datenmaterial des DHM-Vergleichstests der ISPRS Kommission III (Torlegård et al. 1984) entnommen wurden. Eine Beschreibung der Profile findet sich in Frederiksen (1980) und Jacobi und Kubik (1982). Ein wichtiges Ergebnis der Untersuchungen mit ARIMA-Prozessen ist die Feststellung, daß Moving-Average-Anteile in einigen Profilen zwar signifikant nachgewiesen werden können, ihr Einfluß auf die Genauigkeit der Modellierung aber so gering ist, daß eine Beschränkung auf die numerisch wesentlich einfacher zu handhabenden ARI-Prozesse gerechtfertigt ist.

| Region | Punkt- ab- stand | Bild- maß- stab 1: | Pro- filan- zahl | Punkt- anzahl pro Profil | Geschätzte Standard- abweichung des Meß- rauschen σ_n | | Geschätzte Standardabwei- chung der Prädiktionsfehler σ_e nach ARI-Modellierung | | |
|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------------|--|---------------------|--|-----|---------------------|
| | | | | | [m] | [‰ der Flughöhe] | ARI(0,2)- Modell | p | ARI(p,2)- Modell |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| Hannover D | 1.0 m | 4000 | 4 | 215-250 | 0.03 m | 0.05 ‰h | 0.002 m | 4 | 0.001 m |
| Horsens DK | 1.0 m | Nivell. | 10 | 300 | 0.01 m | - | 0.001 m | 4 | 0.001 m |
| Söhnstetten D | 2.5 m | 10000 | 3 | 210-350 | 0.10 m | 0.06 ‰h | 0.031 m | 5 | 0.009 m |
| Uppland S | 2.5 m | 30000 | 4 | 208-363 | 0.15 m | 0.03 ‰h | 0.039 m | 5 | 0.007 m |
| Bohuslaen S | 2.5 m | 30000 | 5 | 240-396 | 0.22 m | 0.05 ‰h | 0.075 m | 5 | 0.022 m |
| Drivdalen N | 5.0 m | 17000? | 5 | 130-318 | 0.48 m | 0.18 ‰h? | 0.277 m | 3 | 0.103 m |
| Oslo N | 15.0 m | 15000? | 7 | 500 | 0.44 m | 0.20 ‰h? | 0.656 m | 1 | 0.259 m |
| Disko Island Grönland DK | 30.0 m | 56000 | 8 | 300 | 0.40 m | 0.05 ‰h | 2.132 m | 3 | 0.227 m |
| Washington Grönland DK | 50.0 m | 56000 | 6 | 400 | 0.34 m | 0.04 ‰h | 2.432 m | 2 | 0.315 m |

Tab. III.4.1 Modellierung von Geländeprofilen mit ARI-Prozessen

In Tabelle III.4.1 sind die Ergebnisse der ARI-Modellierung dieser Geländeprofile zusammengestellt. In den Spalten (1)-(5) werden einige Angaben über die Herkunft und Meßcharakteristiken der Profile gemacht. In den weiteren Spalten (6)-(10) werden geschätzte Standardabweichungen wiedergegeben, die für jede Region als quadratische Mittelwerte aus den einzelnen Profilen berechnet wurden.

In den Spalten (6) und (7) sind die geschätzten Standardabweichungen des Meßrauschens σ_n als Ergebnis der Varianz-Kovarianz-Komponentenschätzung nach dem Ansatz (III.2.26) zum einen als Absolutwert in [m] und zum anderen in Relation zur jeweiligen Flughöhe h angegeben. Die Größenordnung der geschätzten Standardabweichungen liegt innerhalb der aus photogrammetrischer Sicht gesetzten Erwartungen.

In den Spalten (8) und (10) werden die Ergebnisse der Modellierung mit einem ARI(0,2)-Modell nach dem Vorschlag von Ebner und einem allgemeinen ARI(p,2)-Modell einander gegenübergestellt. In Spalte (9) ist die für jede Region ermittelte optimale Prozeßordnung p angegeben. Die Analyse dieser Ergebnisse macht deutlich, daß auch mit einer sehr sparsamen Parametrisierung der ARI-Modelle eine sehr deutliche Genauigkeitssteigerung gegenüber den ARI(0,2)-Modellen erzielt werden kann. Die allgemeineren ARI(p,d)-Modelle ermöglichen somit eine wesentlich bessere Modellierung der Geländeprofile als ein einfaches ARI(0,2)-Modell.

Die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen von verschiedenartigen Geländetypen haben gezeigt, daß mit den ARI-Prozessen eine Klasse von stochastischen Modellen gefunden wurde, mit denen eine sehr genaue und numerisch gesehen relativ einfache Beschreibung von Geländeprofilen möglich ist. Für die weitere Bearbeitung der Laserprofile werden deshalb ARI-Prozesse als mathematisches Modell für Geländeprofile herangezogen.

4.3 Vom Laserprofil zum Geländeprofil

In den Kapiteln III.2. und III.3. wurden die theoretischen Grundlagen dargestellt, auf die sich die Ableitung der Geländeprofile aus Laserprofilen stützt. Die algorithmische Umsetzung wurde soweit erforderlich entwickelt; die technische Realisierung innerhalb eines Computerprogramms wurde durchgeführt, sie soll hier jedoch nicht besprochen werden. In diesem Abschnitt werden die einzelnen Auswerteschritte zusammenfassend dargestellt. Ausgangspunkt sind die Laserprofile, die als eine Folge von gemessenen Laserpunkten vorliegen. Das Endprodukt sollen Geländeprofile sein, die zur Ableitung eines Digitalen Höhenmodells weiterverarbeitet werden können. Das Verfahren setzt sich aus folgenden vier Schritten zusammen:

1. Morphologische Bearbeitung

Das Laserprofil wird mit dem morphologischen Operator Öffnen bearbeitet. Als einziger Parameter dieser Operation ist die Länge des Strukturelementes zu wählen. Sie muß mindestens so groß sein wie der maximale Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bodenpunkten. Als Ergebnis des morphologischen Öffnens erhält man die untere Umhüllende der Laserpunkte.

2. Selektieren der Bodenpunkte

Alle Laserpunkte, die innerhalb einer gewissen Bandbreite über der unteren Umhüllenden liegen, werden als Bodenpunkte identifiziert. Durch die Wahl der Bandbreite kann die Anzahl der potentiellen Bodenpunkte beeinflusst werden. Damit wird eine erste Trennung der topographisch nicht-relevanten Objektpunkte von den Bodenpunkten vorgenommen. Das Ergebnis dieses Verarbeitungsschrittes enthält nur die vorläufige Anzahl aller Bodenpunkte.

3. Modellieren des Geländeprofiles

Die Modellierung des Geländeprofiles stützt sich zunächst nicht auf die in den vorhergehenden Schritten erarbeiteten Ergebnisse, sondern geht vom ursprünglichen Laserprofil aus. Das Laserprofil wird als beobachtete Zeitreihe angesehen (Zeitreihe z_t entsprechend der Bezeichnung in Abschnitt III.2.5). Mittels robuster Zeitreihenanalyse wird daraus das Geländeprofil x_t geschätzt. Als Modell werden ARI-Prozesse zugrunde gelegt. Die Modellierung erfolgt als robuste Zeitreihenanalyse.

Die Bearbeitung erfolgt in einem Iterationsverfahren, das bereits in III.2.5 behandelt wurde. Zusätzlich zu den dort beschriebenen Vorgaben zur Initialisierung des Iterationsprozesses gilt im robusten Schätzverfahren:

- Initialisierung:

Die Beobachtungsgleichungen zur Modellierung des Meßprozesses (1. Typ der Beobachtungsgleichungen im Gauß-Markov-Modell III.2.22) werden mit Gewichtungsfaktoren versehen, wobei die bereits unter Punkt 2. selektierten Bodenpunkte den Gewichtungsfaktor 1, alle übrigen Laserpunkte den

- Gewichtsfaktor 0 erhalten. Das bedeutet, daß grundsätzlich alle gemessenen Laserpunkte in der Modellierung mitgeführt werden.
- Die Gewichtsfaktoren der Beobachtungsgleichungen berechnen sich in den folgenden Iterationen funktional aus den Residuen der jeweils vorhergehenden Iteration mit der Gewichtsfunktion (III.2.28). Dadurch wird erreicht, daß einerseits fehlerhaft in den Vegetationsschichten selektierte Punkte (bei zu klein gewähltem Strukturelement) aus der Modellierung der Geländeprofile eliminiert werden, andererseits nicht selektierte Bodenpunkte (zu großes Strukturelement an Geländekuppen) an der Modellierung teilnehmen.
4. Reduktion der Geländepunkte
- Das in 3. geschätzte Geländeprofil liegt mit einem gleichmäßigen und sehr dichten Punktabstand vor, nämlich mit demselben Punktabstand, mit dem das Laserprofil ursprünglich gemessen wurde. Zur Ableitung eines Digitalen Höhenmodells soll die Anzahl der Punkte innerhalb der Profile so reduziert werden, daß der Punktabstand in einem vernünftigen Verhältnis zum Abstand der Profile steht. Ein Verhältnis von 1 : 2 bis 1 : 3 (Punktabstand : Profilaabstand) ist anzustreben. Die Reduktion wird durch Ausdünnen der Profile erreicht (jeder n-te Punkt des Geländeprofiles wird übernommen), wobei markante Formen des Geländeprofiles zusätzlich erhalten bleiben. Der Prädiktionsfehler aus der ARI-Modellierung eignet sich dafür als Kriterium. Als markante Geländepunkte werden diejenigen Punkte betrachtet, deren Prädiktionsfehler die dreifache Standardabweichung aus allen Prädiktionsfehlern ($3\sigma_e$) übersteigen.

4.4 Exemplarisches Beispiel zur Auswertung von Laserprofilen

Die vier Schritte umfassende Auswertung von Laserprofilen wird nachfolgend anhand eines tatsächlich gemessenen Profils exemplarisch verdeutlicht. Als Beispiel wird ein Ausschnitt eines Laserprofils der Befliegung Harz 1989 (s. IV.1.3.4) ausgewählt.

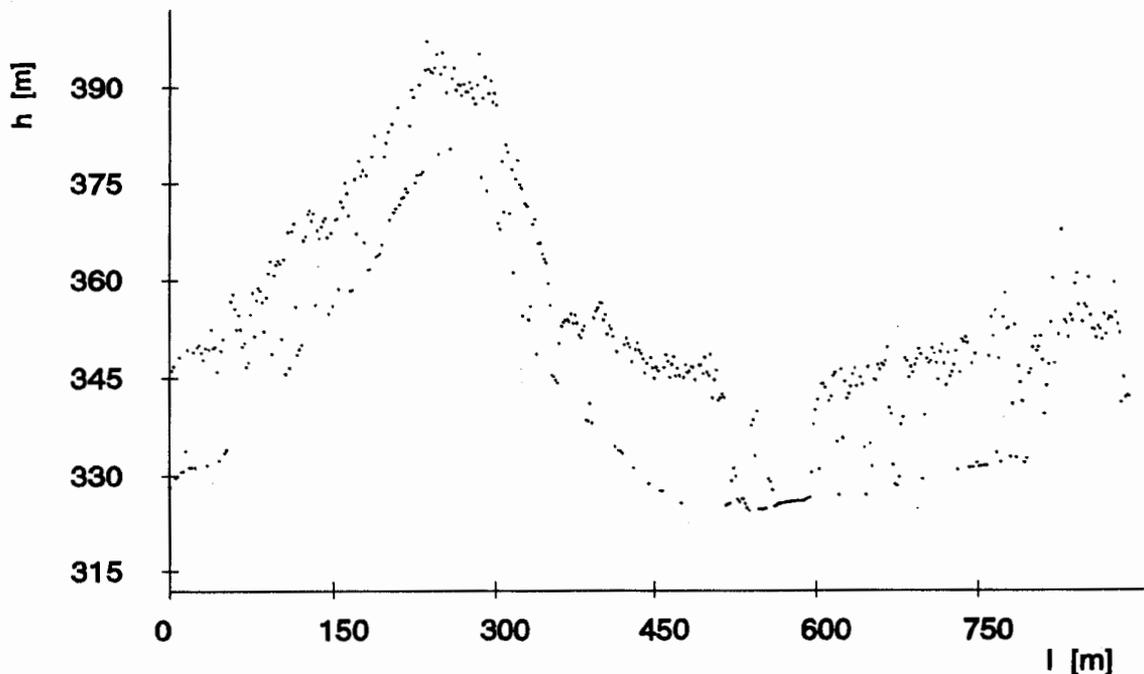


Abb. III.4.1 Laserprofil über Waldgebiet

(1) Abbildung III.4.1 zeigt einen 480 Punkte umfassenden Ausschnitt des ausgewählten Laserprofils. Die Höhen der Laserprofilpunkte sind über der Profilachse aufgetragen. Der Abstand zwischen den Laserpunkten beträgt ca. 2m. Der gesamte 960m lange Ausschnitt wurde über einem Waldgebiet aufgenommen.

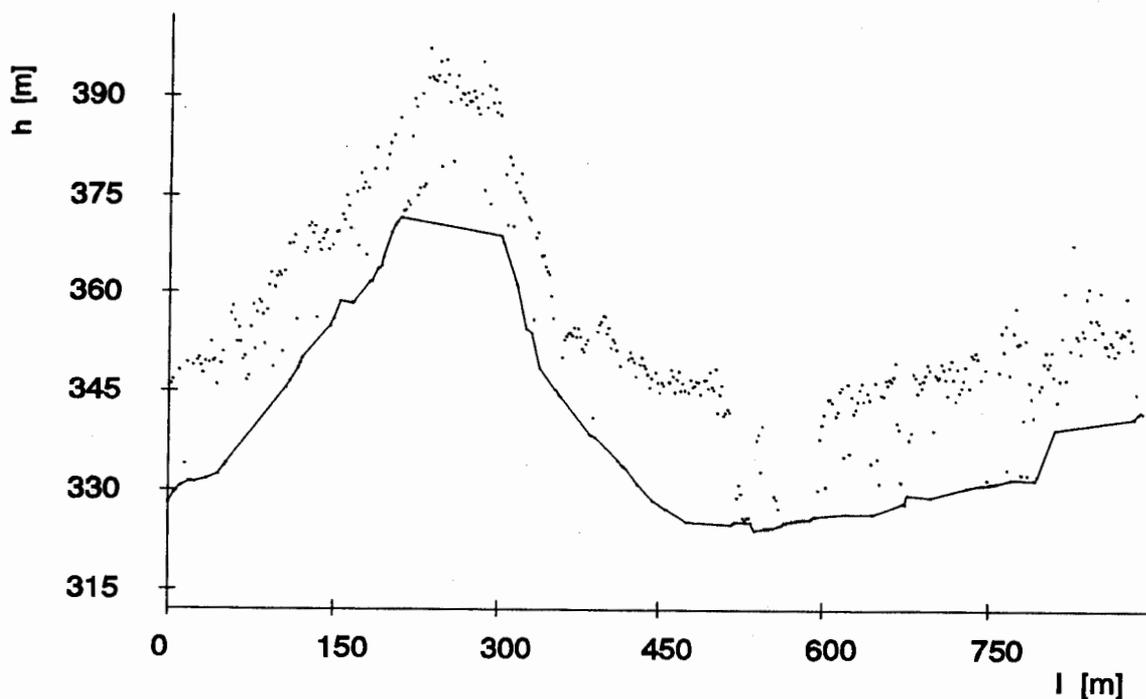


Abb. III.4.2 Morphologischer Operator Öffnen

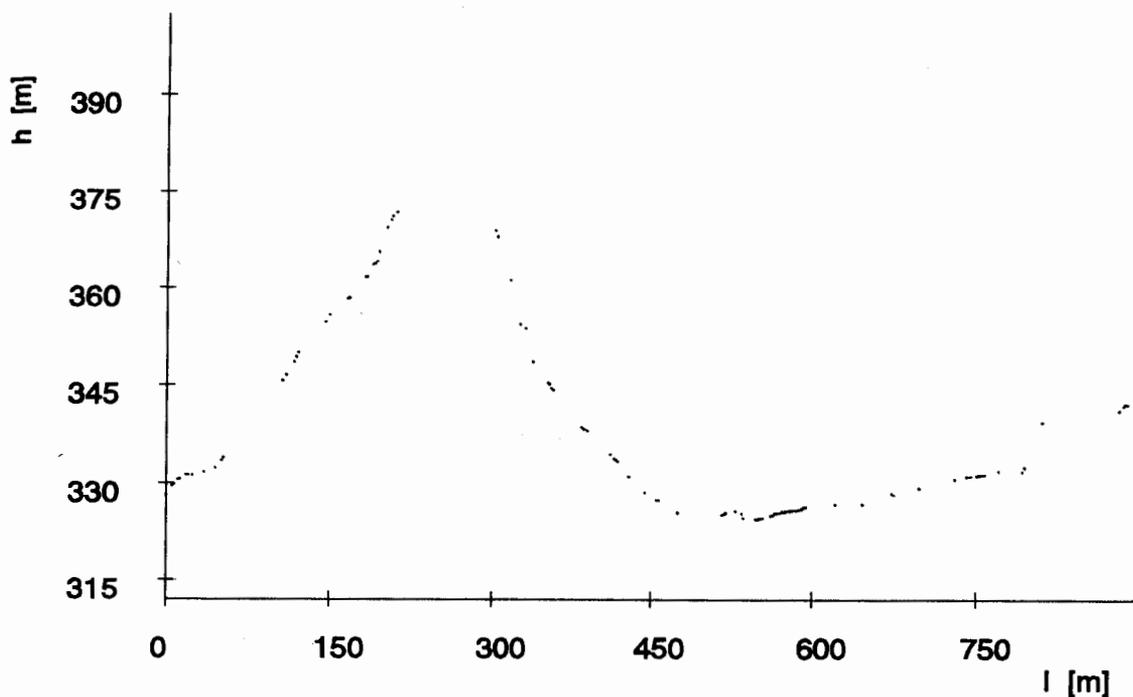


Abb. III.4.3 Selektierte Bodenpunkte nach morphologischem Öffnen

(2) Das morphologische Öffnen des Laserprofils wird mit einem 51 Punkte umfassenden (bzw. 102m langen) Strukturelement durchgeführt. In Abbildung III.4.2 ist die berechnete untere Umhüllende eingezeichnet. Deutlich erkennbar ist die Tendenz des Operators, Geländekuppen nicht zu berücksichtigen. Zu beachten ist auch der Sprung der Umhüllenden am rechten Rand des Profils. Hier wurde das Strukturelement zu klein gewählt und eine Laubreflexion fälschlich als Bodenpunkt identifiziert, wie der Vergleich mit den manuell identifizierten Bodenpunkten in Abbildung III.4.7 zeigt.

(3) In Abbildung III.4.3 sind die Bodenpunkte dargestellt, die nach einer Bearbeitung des morphologisch geöffneten Laserprofils innerhalb einer Bandbreite von 0.5m selektiert wurden.

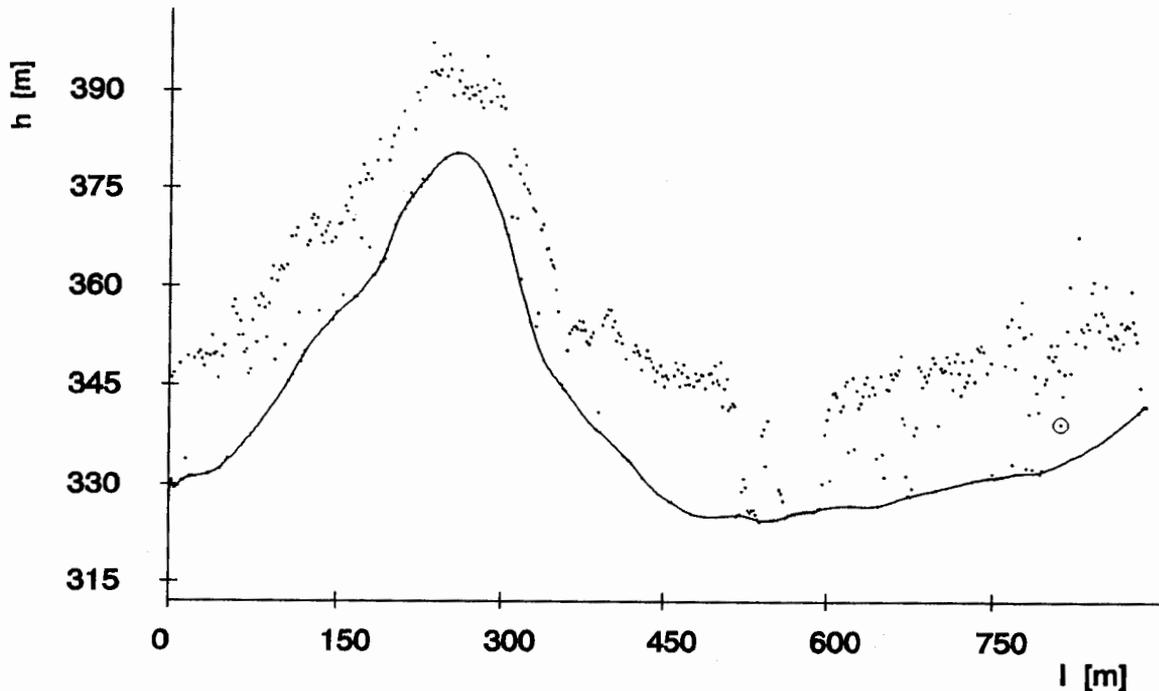


Abb. III.4.4 Geländeprofil aus der ARI-Modellierung

(4) Abbildung III.4.4 zeigt das geschätzte Geländeprofil als Ergebnis der Modellierung mit einem ARI(3,2)-Prozeß. Die Filterung des Profiles erfolgt mit einer Standardabweichung für das Meßrauschen von $\sigma_n = 0.3\text{m}$. Die Standardabweichung der Prädiktionsfehler beträgt $\sigma_e = 0.05\text{ m}$. Die Güte der ARI-Modellierung kann mit der Standardabweichung der gewichteten Verbesserungen (Differenzen zwischen den ursprünglich beobachteten Laserpunkten z_i und der geschätzten Geländepunkte x_i) nach der Filterung im Gauß-Markov-Modell (III.2.22) ausgedrückt werden; sie beträgt $\sigma = 0.40\text{ m}$.

Die Effekte der ARI-Modellierung sind im Vergleich zur ausschließlich morphologischen Bearbeitung des Laserprofils (Abb.III.4.2) deutlich zu erkennen. Die durch das morphologische Öffnen entstandene Lücke an der Geländekuppe wird wieder geschlossen. Durch den robusten Ansatz wird der falsch identifizierte Bodenpunkt (mit einem Kreis besonders gekennzeichnet) aus dem Geländeprofil wieder eliminiert.

(5) In Abbildung III.4.5 sind die nach einer Reduktion um den Faktor 8 verbleibenden 60 Punkte des ARI-Geländeprofils markiert. Der so erhaltene reduzierte Punktabstand von 16m steht in einem gewünschten Verhältnis zum Profilabstand, der 50m betrug. Die in dieser Abbildung markierten Punkte des Geländeprofils werden einem Digitalen Höhenmodell zugeführt.

Nach der Modellierung des Geländeprofils können die Bodenpunkte, das heißt die auf der Erdoberfläche gemessenen Laserpunkte, identifiziert werden. Die Bodenpunkte werden nicht weiter zur Ableitung des Digitalen Höhenmodells verwendet. Sie dienen lediglich zur Untersuchung statistischer Fragestellungen (z.B. Bestimmung der Durchdringungsraten) und zur Beurteilung des Modellansatzes durch den Vergleich mit manuell bestimmten Bodenpunkten.

In Abbildung III.4.6 sind die Bodenpunkte markiert, die innerhalb einer Bandbreite von 0.5 m um das ARI-Geländeprofil liegen. Ihre Anzahl beträgt 105 Punkte. Im Vergleich zu den selektierten Bodenpunkten nach der morphologischen Operation in III.4.3 stellt die Abbildung III.4.6 das endgültige Ergebnis der automatischen Identifikation der Bodenpunkte dar.

Zur Verifizierung der algorithmisch bestimmten Bodenpunkte wird eine unabhängige manuelle Identifizierung der Bodenpunkte in einem photogrammetrischen Luftbildpaar vorgenommen. In Abbildung III.4.7 sind die 100 photogrammetrisch ausgewählten Bodenpunkte markiert. Der Vergleich zur vorhergehenden Abbildung zeigt, daß die algorithmische Bearbeitung des Laserprofils fehlerfrei durchgeführt wurde; keine Laserpunkte in den Vegetationsschichten wurden fälschlicherweise als Geländepunkte identifiziert.

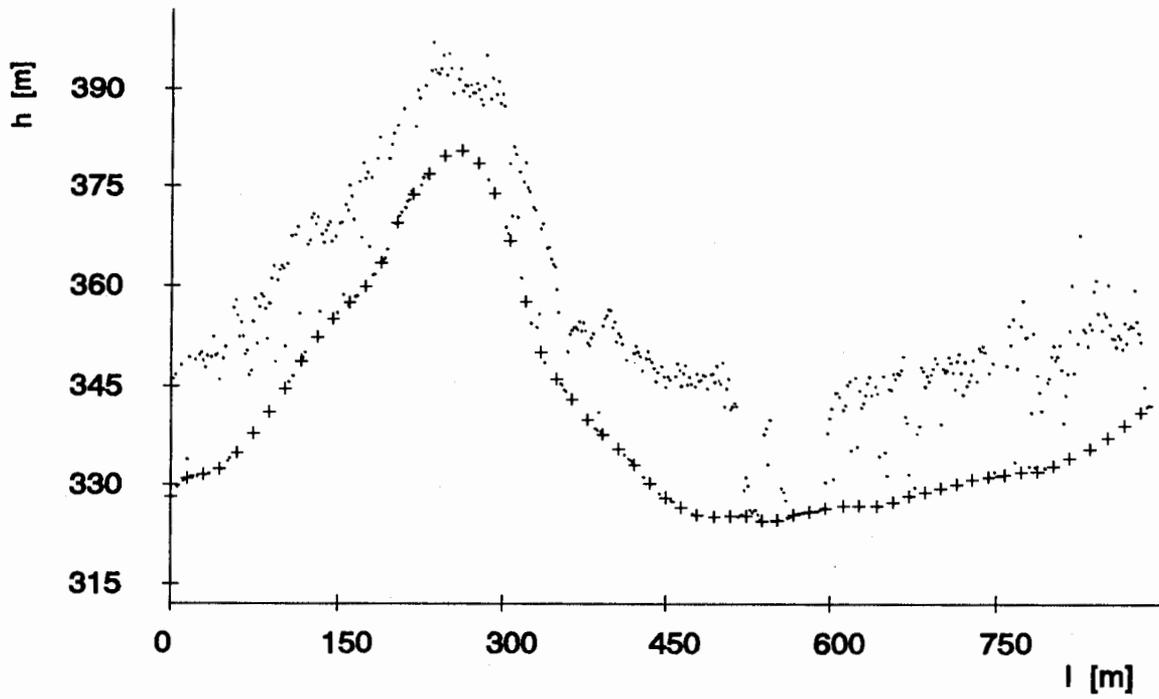


Abb. III.4.5 Reduziertes Geländeprofil

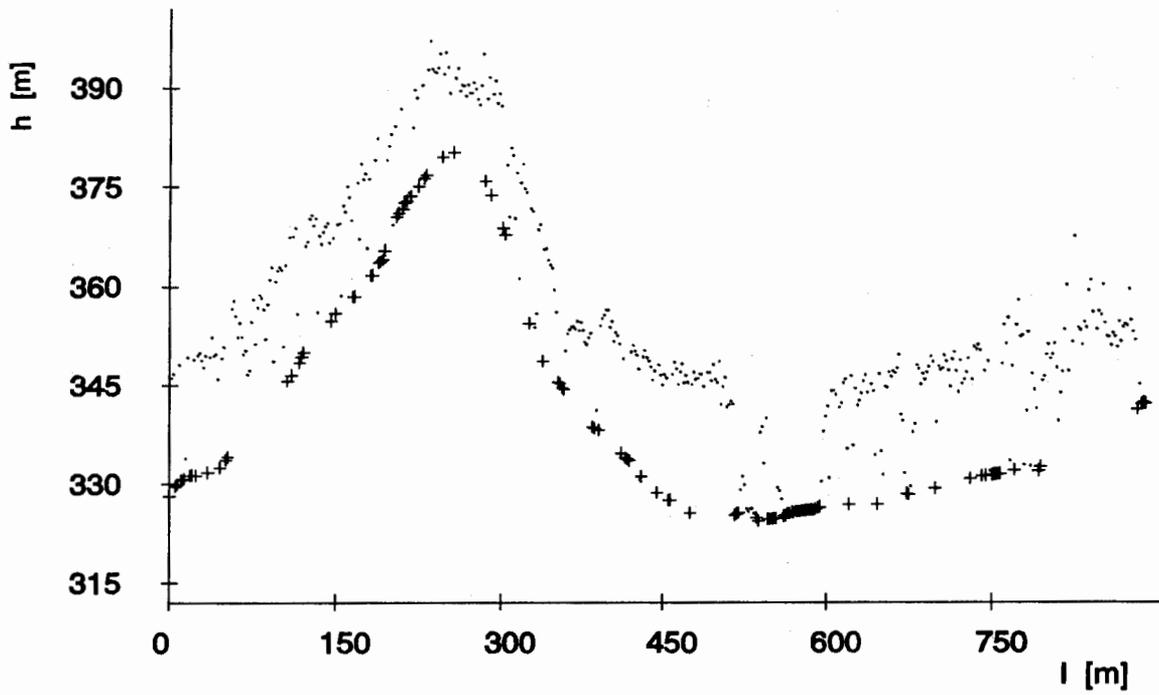


Abb. III.4.6 Bodenpunkte nach ARI-Modellierung

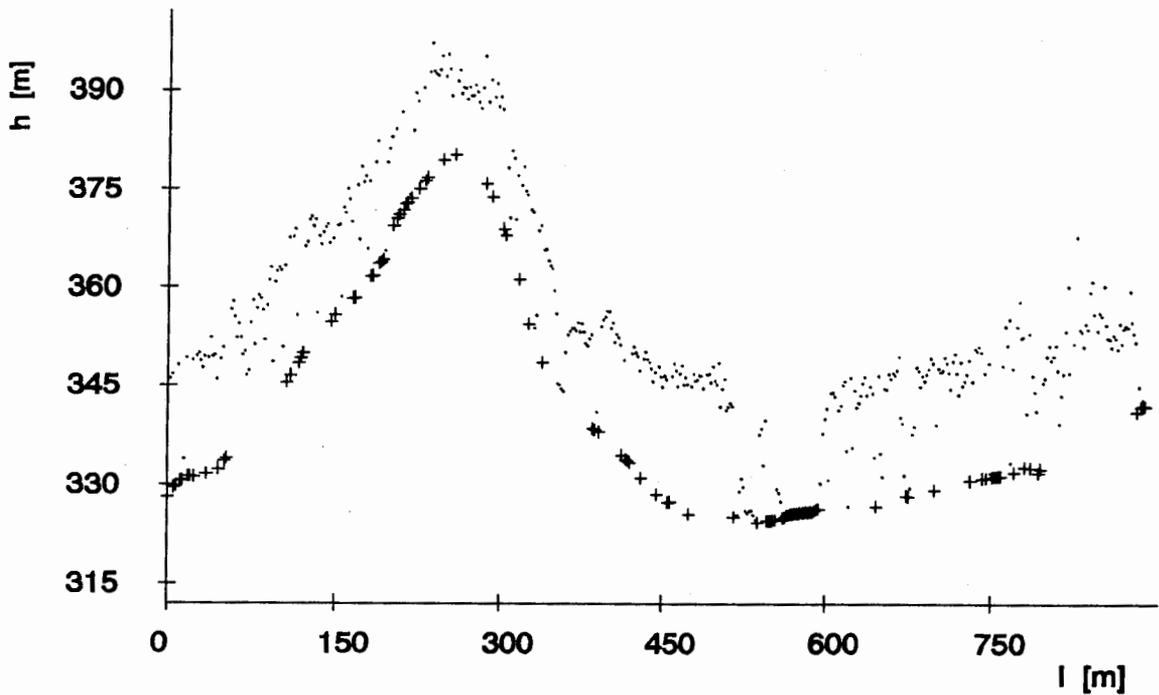


Abb. III.4.7 Manuell identifizierte Bodenpunkte

4.5 Ergebnis

In diesem Kapitel wurde der in Kapitel III.2 theoretisch entwickelte Ansatz zur Modellierung von Geländeprofilen zur Bearbeitung von Laserprofilen angewandt. Die theoretisch entwickelte Konzeption ist an Hand eines Beispiels demonstriert worden. Im übrigen hat sie sich bei der praktischen Anwendung (s. Teil IV) einwandfrei bewährt; eine empirische Überprüfung der Identifikation der Bodenpunkte erfolgt in IV.2.2.5. Die Analyse von Geländeprofilen mit ARI-Prozessen in Abschnitt 4.2 hat gezeigt, daß dieser Ansatz gegenüber anderen Modellansätzen zu einem wesentlich genaueren Geländemodell führt, wie die Standardabweichung der Prädiktionsfehler ausweist. Insbesondere hat sich die Vorgehensweise, morphologische Operatoren zur Beschaffung eines genäherten Bodenprofils und anschließende Modellierung mit robusten, beobachteten ARI-Prozessen, als automatisches algorithmisches Verfahren bewährt, das keinerlei zusätzliche Eingriffe bedurfte. Die Modellierung des Geländeprofiles aus gemessenen Laserpunkten ist auch unter schwierigen Geländebedingungen (z.B. Hanglagen, Geländekanten) stets erfolgreich verlaufen, sofern überhaupt Bodenpunkte vorliegen.

Abschließend sollen noch einige Erfahrungen, die bei der Bearbeitung der Laserprofile gemacht wurden, angesprochen werden.

Der Ansatz findet dort seine Grenzen, wo die Laser-Profilmessung in ihrer originären Aufgabe, der Erfassung der Erdoberfläche, versagt. Es handelt sich um zwei Fälle:

- sehr dichte Waldschonungen in denen auf lange Strecken (mehrere hundert Meter) der Laserstrahl nicht auf die Erdoberfläche durchdringt (ein derartiger Fall wird in IV.2.2 diskutiert),
- dichter Bodenbewuchs, der in ansonsten gut erfassbaren Waldgebieten eine scheinbare Bodenreflexion vortäuscht (dieses Problem wird unter IV.3.5 aufgegriffen).

Für diese Bereiche muß ein Indikator entwickelt werden, der anzeigt, an welchen Stellen eine örtliche Kontrolle der Laser-Profilmessungen notwendig wird.

Die Modellierung von Laserprofilen erfordert die Festlegung einer Reihe von Parametern (z.B. Länge des Strukturelements, Ordnung des ARI-Prozesses). Das Strukturelement muß so groß gewählt werden, daß seine Länge mindestens dem größten Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bodenpunkten entspricht. Diese Länge ist stark von der Dichte der jeweils vorherrschenden Vegetation abhängig und wird mittels

Erfahrungswerten festgelegt. Kritisch ist eine zu klein gewählte Länge, da dann zu viele Punkte in den Vegetationsschichten fälschlicherweise als Bodenpunkte mit hoher Gewichtung in die Modellierung eingeführt werden.

Die automatisch-algorithmische Prozeßidentifikation unter Zuhilfenahme des AIC-Kriteriums (II.2.17) kann erfahrungsgemäß leicht zu einer Überparametrisierung des ARI-Modells führen, die den numerischen Aufwand erhöht, ohne eine signifikante Genauigkeitssteigerung nach sich zu ziehen. Dem kann durch die Festlegung einer maximalen Prozeßordnung, die individuell für den jeweils zu bearbeitenden Geländetyp gewählt wird, begegnet werden.

Die Modellierung mit beobachteten ARI-Prozessen setzt die Kenntnis der Varianzen der Meß- und Prädiktionsfehler voraus (s. III.2.5). Die Schätzung der Varianzkomponenten stellt auch mit dem numerisch einfach handzuhabenden Ansatz im Spektralbereich (II.2.26) einen nicht unerheblichen Aufwand dar. Bei der Bearbeitung einer Laser-Profilbefliegung mit einer großen Anzahl gleichartiger Laserprofile läßt sich der numerische Aufwand wesentlich reduzieren, wenn die Varianzkomponentenschätzung lediglich an einzelnen, ausgewählten Profilen durchgeführt wird und das dort geschätzte Meßrauschen für die übrigen Profile übernommen wird; die Varianz der Prädiktionsfehler muß allerdings wegen der unterschiedlichen Geländeformen jeweils erneut geschätzt werden.

IV. Empirische Untersuchungen

1. Grundlagen der empirischen Untersuchungen

1.1 Überblick

Die bisherigen Ausführungen in den Teilen II und III haben die Anforderungen an das Laser-Profilmeßsystem beschrieben und die Methoden der Systemkalibrierung, der Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte und der Ableitung der Geländeprofile behandelt. Die Analyse der einzelnen Systemkomponenten hat zwar schon gewisse Genauigkeitseigenschaften aufgezeigt, es ist jedoch noch völlig offen, welche Ergebnisse mit einem derartigen Laser-Profilmeßsystem und den beschriebenen Auswerteverfahren erzielt werden können. Deshalb schließt sich ein Teil über empirische Untersuchungen an, die zunächst die Funktionsfähigkeit und Wirksamkeit des Systemkonzepts aufzeigen sollen. Weiterhin sind die Ergebnisse von Befliegungen über Waldgebieten bezüglich der Fähigkeit der Erfassung des Waldbodens zu analysieren. Schließlich sollen Genauigkeitsaussagen über das Gesamtsystem gemacht werden können. Das Ergebnis soll zu einer Beurteilung und zu Empfehlungen für die praktische Anwendung der Laser-Profilmessung führen.

Die Untersuchungen stützen sich auf Meßkampagnen, die in den Jahren 1988, 1989 und 1990 durchgeführt wurden. Die Befliegungen wurden vom Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 228 "Hochgenaue Navigation - Integration navigatorischer und geodätischer Methoden" der Deutschen Forschungsgemeinschaft geplant und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Flugführung der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. An Hand dieser Testbefliegungen ist das Gesamtsystem operationell entwickelt worden, sowohl was die Integration der Systemkomponenten im Flugzeug angeht, als auch bezüglich der Computerprogramme zur Auswertung der Messungen. Die Computerprogramme werden in dieser Arbeit nicht weiter beschrieben, sie entsprechen jedoch den dargelegten Ansätzen. Die wesentlichen Eigenentwicklungen sind:

- Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte aus den Meßwerten der Systemkomponenten (s. II.4)
- Ausgleichsprogramm zur Systemkalibrierung (s. II.5)
- Analyse der Laserprofile und Ableitung der Geländeprofilpunkte mit Hilfe erweiterter ARI-Modelle (s. III).

Darüber hinaus wird auf vorhandene Programmpakete zurückgegriffen:

- Relative kinematische Positionsbestimmung aus GPS-Trägerphasenbeobachtungen
- Programme zur Berechnung geodätischer Datumstransformationen für die Überführung von Koordinaten vom WGS84 in das Bezugssystem der Landesvermessung, insbesondere auch zur Interpolation von Geoidundulationen für die Höhenberechnung
- Ableitung eines flächendeckenden Digitalen Höhenmodells aus den Geländeprofilpunkten.

Dieser Einführung folgt im Abschnitt 1.2 eine Beschreibung des Laser-Profilmeßsystems, mit dem die Befliegungen durchgeführt wurden. Der sich anschließende Abschnitt 1.3 gibt einen Überblick über die durchgeführten Befliegungen. Die Art und Weise der Datenauswertung, die den eigentlichen Untersuchungen zugrunde liegt, wird im Abschnitt 1.4 beschrieben.

Die empirischen Untersuchungen der Laser-Profilmessungen folgen in drei Kapiteln, die einer logischen Gliederung, vom Lasersensor über den Laserpunkt zum Digitalen Höhenmodell, entsprechen. In Kapitel IV.2. werden zunächst die Eigenschaften des Lasersensors untersucht. Dazu zählen die Reflexionseigenschaften über verschiedenen natürlichen Gelände- und Vegetationsoberflächen, das Durchdringungsverhalten in Waldgebieten und die Meßgenauigkeit der Laserdistanzen. Kapitel IV.3. widmet sich der Genauigkeitsanalyse des Gesamtsystems. Angesprochen werden die geodätische Datumstransformation (vom WGS84 in das Bezugssystem der Landesvermessung), die Systemkalibrierung und die Überprüfung der Geländehöhen der Laserpunkte anhand von unabhängigen photogrammetrischen und terrestrischen Kontrollmessungen. Das abschließende Kapitel IV.4. befaßt sich mit dem aus Laser-Profilmessungen abgeleiteten Digitalen Höhenmodell.

1.2 Beschreibung des Laser-Profilmeßsystems

(1) Die Befliegungen im Jahr 1988 wurden mit einer Dornier Do 28 und in den Jahren 1989 und 1990 mit dem Nachfolgemodell Dornier Do 128 durchgeführt. Das grundlegende Design des Laser-Profilmeßsystems ist in beiden Flugzeugen dasselbe, lediglich einzelne Systemkomponenten wurden bei den Befliegungen mit der Do 128 verbessert.

(2) Die Flugzeuge sind mit Bordcomputern ausgestattet, denen neben der Navigationsrechnung die Steuerung der Meßgeräte und die Registrierung der anfallenden Daten auf Magnetband zukommt. Die Registrierungsrate, und damit die Meßfrequenz der Laserdistanzmessungen, beträgt bei dem in der Do 28 verwendeten Bordcomputer 23 Hz und konnte bei den Befliegungen mit der Do 128 in den Jahren 1989 und 1990 auf 33 Hz erhöht werden.

(3) Die Positionsbestimmung erfolgte mit zwei GPS-Empfängern des Typs Sercel TR5S-B. Diese Empfänger liefern alle 0.6 Sekunden auf 5 Kanälen Pseudorange- und Phasenbeobachtungen auf der L1-Trägerwelle. Die hohe Qualität und Zuverlässigkeit, die diese Empfänger auszeichnen, zeigt sich darin, daß bei allen durchgeführten Befliegungen keinerlei Probleme mit Cycle Slips aufgetreten sind.

Zur Echtzeitnavigation des Flugzeugs entlang der geplanten Flugprofile wurde nach dem Prinzip der relativen, kinematischen Positionsbestimmung vorgegangen. Dabei werden aus Pseudorangemessungen, die durch Phasenbeobachtungen geglättet wurden, laufend die Position beider Empfänger unabhängig berechnet (interne Positionsbestimmung der Sercel-Empfänger). An der stationären Empfängerstation können daraus laufend die Differenzen zu den Sollkoordinaten des koordinatenmäßig bekannten Referenzpunktes ermittelt und als Koordinatenkorrekturen über eine Telemetrieanlage an den Bordrechner im Flugzeug übertragen werden. Dort werden dann die Positionen des bewegten Empfängers um den Betrag der Koordinatenkorrekturen verbessert.

Zur Positionsbestimmung für die Sensororientierung wird dagegen anders vorgegangen. Die Trägerphasenbeobachtungen des stationären und des bewegten Empfängers im Flugzeug werden getrennt am jeweiligen Standort des Empfängers registriert. Die Datenauswertung zur relativen, kinematischen Positionsbestimmung erfolgt erst nach der Befliegung im Post-Processing.

Während der Lasersensor und das Inertiale Navigationssystem in einem synchronisierten Prozeß zentral vom Bordrechner gesteuert werden, ist die Integration des GPS-Empfängers aufwendig, vor allem wegen der asynchronen, von den Satellitensignalen gesteuerten Arbeitsweise der GPS-Empfänger. Bei den Befliegungen im Jahr 1988 konnte die zeitliche Zuordnung der GPS-Beobachtungen zu dem im Bordcomputer laufenden Prozeß nur mit einer Unsicherheit von maximal 0.2 Sekunden realisiert werden. Aus diesem Grund konnte aus diesen Befliegungen keine Genauigkeitsanalyse der Laserpunkte durchgeführt werden. Zu den Befliegungen im Jahr 1989 konnte das Problem der Zeitsynchronisation gelöst werden, indem der bei den Sercel-Empfängern für eine externe Eingabe frei gehaltene 6. Kanal (sog. photogrammetrische Input) zur Registrierung eines vom Bordcomputer ausgesandten Zeitsignals genutzt wurde.

(4) Die Neigungen des Flugzeuges wurden mit einem aus Laserkreisel aufgebauten Inertialen Navigationssystem der Marke Honeywell Lasernav I beobachtet. Zur Auswertung werden hier nur die vom INS intern berechneten Neigungswinkel des Flugzeuges, die sich auf das lokale, astronomische Horizontsystem beziehen, herangezogen.

(5) Die Laserbeobachtungen wurden mit Instrumenten der Firma Optech Inc., Ontario durchgeführt. Aus Kostengründen wurde ein Lasersensor mit einer maximalen Reichweite von 500m gewählt (es werden auch andere Instrumente mit maximalen Reichweiten bis zu 10km angeboten). Die geplante Flughöhe über Grund wurde deshalb bei allen Befliegungen auf etwa 300m festgesetzt. Wegen der geringen Reichweite des Lasers muß über bewegtem Gelände die Flughöhe dem Geländeverlauf angepaßt werden. Im Jahr 1988 wurde das Optech Modell 501 SX eingesetzt. Ab 1989 stand das modifizierte Modell 501 SA zur Verfügung, dessen wesentliche technischen Spezifikationen sich jedoch nicht vom Modell 501 SX unterscheiden. Einige vom Hersteller angegebene technische Spezifikationen sind in der Tabelle IV.1.1 zusammengestellt.

Der Lasersensor wurde außerhalb des Flugzeugs, in fester Verbindung mit der Flugzeugstruktur, eingebaut. Gegenüber dem flugzeugfesten Koordinatensystem wurde ein Einbauwinkel des Lasers von etwa 3deg vorgewählt, so daß in normaler Fluglage der Laserstrahl etwa lotrecht nach unten weist (das Flugzeug wird mit einem mittleren Anstellwinkel in dieser Größenordnung geflogen).

| | |
|---------------------------|--|
| Wellenlänge | 904 nm |
| Optische Leistung | 150 W bei einer Pulsbreite von 15 ns |
| Strahldivergenz | 2.5 mrad; entspr. 1.3m Strahldurchmesser bei 500m Flughöhe |
| Reichweite | 10 - 500 m bei klarem Wetter und 20% Reflexivität der Zieloberfläche |
| Steckenmeßgenauigkeit | 0.2 m |
| Streckenauflösung | 0.01 m |
| Meßrate | 1, 10, 100 Hz mit interner Triggerung jede beliebige Rate bis 2000 Hz mit externer Triggerung |
| Größe des Sensors | 260 mm · 180 mm · 120 mm |
| Größe der Kontrolleinheit | 260 mm · 190 mm · 150 mm |
| Gewicht | Sensor und Kontrolleinheit jeweils 3 kg |

Tab. IV.1.1 Eigenschaften des Lasersensors Optech Modell 501

1.3 Beschreibung der Befliegungen

Die empirischen Untersuchungen in den folgenden Kapiteln beziehen sich auf fünf Befliegungen, die in den Jahren 1988 bis 1990 durchgeführt wurden. Die drei Befliegungen des Jahres 1988, die im August und September kurz hintereinander stattfanden, standen unter dem Aspekt der Realisierung und der Untersuchung möglicher Einsatzbereiche eines Laser-Profilmeßsystems. So stand bei der Befliegung Gammertingen die topographische Geländeaufnahme in Waldgebieten im Vordergrund des Interesses. Diese Befliegung wurde zusammen mit dem Landesvermessungsamt Baden-Württemberg geplant und mit dessen Unterstützung durchgeführt. Bei der anschließenden Befliegung des Braunkohletagebaus Hambach der Rheinbraun Rheinische Braunkohlenwerke AG sollte die Eignung der Laser-Profilmessung für die Erdmassenbestimmung im Braunkohletagebau untersucht werden. Wegen des volldigitalen Systemkonzepts und die Möglichkeit der schnellen, vollautomatischen Auswertung kommen Laser-Profilmessungen für diese Anwendung in Betracht. Schließlich wurde bei der Befliegung Rotterdam das Reflexionsverhalten des Lasers über Küstengebieten (Sand, Watt, Meeresoberfläche) untersucht, um Aussagen für einen möglichen Einsatz der Laser-Profilmessung zur Küstenlinienüberwachung treffen zu können. Bei den beiden letzten Befliegungen sollte in erster Linie das Reflexionsverhalten des Laserstrahls untersucht werden. Weitergehende Genauigkeitsuntersuchungen waren nicht geplant.

Mit den gewonnenen Erfahrungen und mit verbesserten Systemkomponenten konnten die Befliegungen im Jahr 1989 der umfassenden Genauigkeitsanalyse gewidmet werden. In Zusammenarbeit mit dem Landesverwaltungsamt Niedersachsen - Landesvermessung Dezernat Topographie - wurde ein Gebiet im Harz befliegen und ausgewertet. Die Anwendung deckt sich mit der Befliegung Gammertingen: topographische Geländeaufnahme von Waldgebieten in Mittelgebirgslagen. Der Flug war in allen Komponenten erfolgreich und lieferte erstmals vollständiges Material für eine umfassende Genauigkeitsuntersuchung.

In den Jahren 1990 erfolgten weitere Befliegungen in Lachendorf und Zeeland. Die Befliegung Lachendorf 1990 diente zum einen als Vorbereitungsflug zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Systemkomponenten für die weitere Meßkampagne im Jahre 1990, und zum anderen wird das Verhalten der Lasermessungen über Waldgebieten auch unter extremen Flugmanövern analysiert. Mit der Befliegung Zeeland sollte ein durch Ebbe und Flut sich veränderndes Wattgebiet aufgenommen werden. Die Auswertung ist noch nicht abgeschlossen, so daß diese Befliegung hier nicht berücksichtigt wird.

Für die empirischen Untersuchungen werden somit Datensätze aus fünf Meßkampagnen herangezogen, die im folgenden kurz zusammengestellt werden.

1.3.1 Gammertingen

| | |
|-----------------------------|--|
| Anwendungsbereich | topographische Geländeaufnahme von Waldgebieten in Mittelgebirgslagen |
| Untersuchungsziel | Reflexionseigenschaften über natürlichen Oberflächen, Durchdringung des Laserstrahls auf Waldboden |
| Befliegungsdatum | 18., 19., 24. August 1988 |
| Lage des Testgebietes | Schwäbische Alb bei der Ortschaft Gammertingen, ca. 80 km südlich von Stuttgart |
| Ausdehnung des Testgebietes | 6 km in Ost-West-Richtung, 2.4 km in Nord-Süd-Richtung |
| Geländehöhen | von 640 m bis 805 m über NN |
| Bodenbedeckung | 53% offene Feldlage 32% Nadelwald 15% Laubwald |
| Flugplan | flächendeckende Befliegung mit 40 Längsprofilen 50 m Profilabstand in der südlichen 100 m Profilabstand in der nördlichen Hälfte |
| Punktanzahl | 78 060 Punkte im Testgebiet |

Der verkleinerte Ausschnitt aus der topographischen Karte 1:50000 L7720 Albstadt in Abbildung IV.1.1 gibt einen Überblick über das beflogene Gelände. Das Gebiet befindet sich auf einer Hochebene der schwäbischen Alb. Im westlichen Teil verläuft in einem tiefen Einschnitt das Laucherttal, in dem die Ortschaften Gammertingen und Hettingen liegen. Westlich des Tales herrschen dichte Nadelwälder vor.

Abbildung IV.1.2 zeigt als Beispiel ein Laserprofil der Befliegung Gammertingen. Die Geländehöhen sind zehnfach überhöht dargestellt. Am linken Bildrand befindet sich der Taleinschnitt der Lauchert. Über Waldgebieten ist deutlich die Reflexion am Waldboden und in den Blatt- bzw. Nadel-schichten zu erkennen.



Abb. IV.1.1 Ausschnitt aus topographischer Karte Befliegungsgebiet Gammertingen

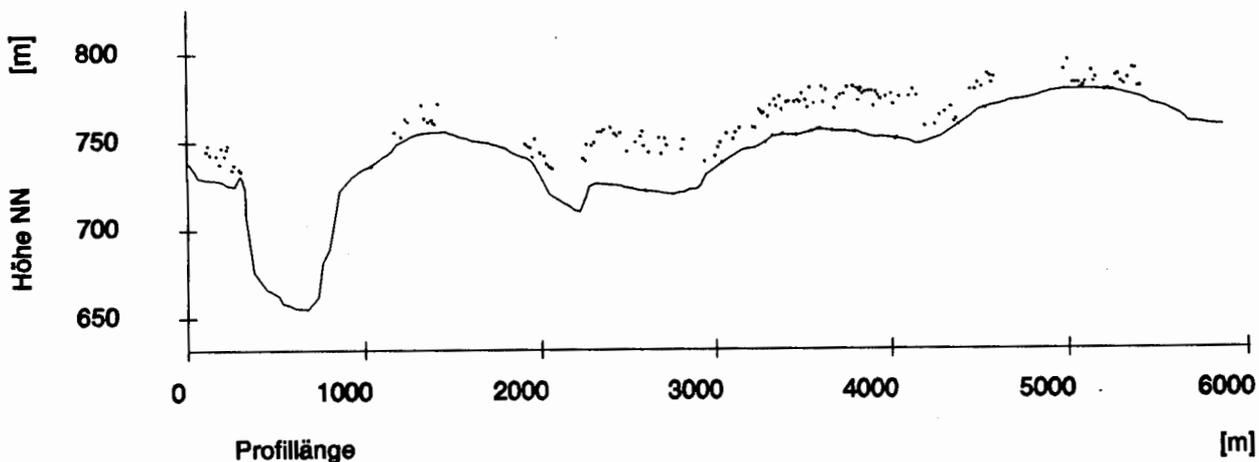


Abb. IV.1.2 Ein Laserprofil aus der Befliegung Gammertingen

1.3.2 Hambach

| | |
|------------------------|---|
| Anwendungsbereich | digitale Geländeaufnahme zur Erdmassenberechnung bei zeitkritischen Anwendungen im Braunkohlentagebau |
| Untersuchungsziel | Reflexionseigenschaften auf diversen Oberflächenmaterialien, insbesondere Kies, Sand, Kohle |
| Befliegungsdatum | 7. September 1988 |
| Lage des Testgebietes | Braunkohlentagebau Hambach, zwischen Köln und Aachen |
| Größe des Testgebietes | 10 km langes Profil über die gesamte Anlage des Braunkohlentagebaus |
| Geländehöhen | von 103 m unter NN bis 230 m über NN |
| Bodenbedeckung | Kies, Sand, Braunkohle; sowie Nadelwald in der Peripherie des Tagebaus |
| Flugplan | 4-fache Befliegung des 10 km langen Profiles |
| Punktzahl | 59 123 Punkte |

Abbildung IV.1.3 gibt einen Überblick über den Braunkohle Tagebau Hambach. In der Bildmitte findet der stufenweise Abbau statt. Die tiefste, überflogene Stelle befindet sich auf 103m unter NN. In der linken Bildhälfte befindet sich der 230m hohe, in Terrassen angelegte Abraumberg. An der rechten Peripherie des Tagebaus sind im Bildausschnitt ausgedehnte Nadelwälder zu erkennen.

Abbildung IV.1.4 zeigt ein Laserprofil aus der Befliegung in Hambach. Die Geländehöhen sind zehnfach überhöht gezeichnet. Links vom eigentlichen Tagebau wurde der Abraumberg überflogen. Am rechten Rand der Abbildung sind die Laserregistrierungen über Nadelwald zu erkennen.



Abb. IV.1.3 Braunkohlentagebau Hambach

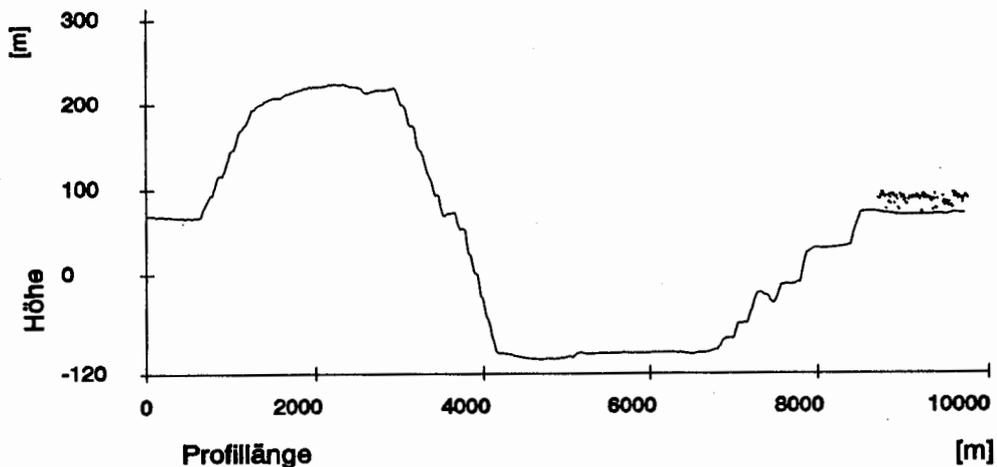


Abb. IV.1.4 Laserprofil der Befliegung Hambach

1.3.3 Rotterdam

| | |
|------------------------|---|
| Anwendungsbereich | Überwachung von Küstenlinien |
| Untersuchungsziel | Reflexionseigenschaften über Meeresoberfläche, Küstengewässer, Wattgebieten, Strand- und Dünenlandschaft; Reflexionseigenschaften in Abhängigkeit vom Neigungswinkel |
| Befliegungsdatum | 7. September 1988 |
| Lage des Testgebietes | Kanalküste südlich des Eurohafens bei Rotterdam |
| Größe des Testgebietes | einstündige Befliegung ohne gezielte Planung |
| Geländehöhen | 0m bis 5m über NN |
| Bodenbedeckung | Meeresoberfläche, Watt, Sandstrand, Sanddünen |
| Flugplan | 2-fache Befliegung eines ca. 10 km langen Profiles entlang der Küstenlinie, 5 Wendeschleifen, bzw. enge Kurven über der offenen Meeresfläche |
| Punktanzahl | 40 000 Punkte |

Abbildung IV.1.5 zeigt den Flugweg der Befliegung Rotterdam in einem schematisch digitalisierten Plan, der den Verlauf der Küstenlinie wiedergibt.

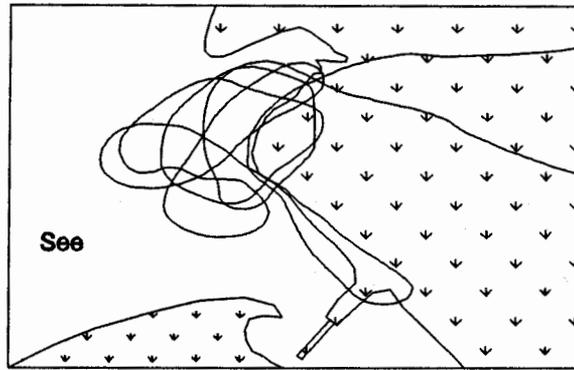


Abb. IV.1.5 Flugweg Rotterdam

1.3.4 Harz

| | |
|-----------------------------|--|
| Anwendungsbereich | topographische Geländeaufnahme in Waldgebieten |
| Untersuchungsziel | Systemkalibrierung, Genauigkeitsanalyse des Laser-Profilmeßsystems, photogrammetrische und terrestrische Überprüfung der Laserpunkte, Ableitung und Genauigkeitsanalyse eines digitalen Höhenmodells |
| Befliegungsdatum | 24., 25. August 1989 |
| Lage des Testgebietes | nördlich von Osterode im Harz |
| Ausdehnung des Testgebietes | 12 km in Ost-West-Richtung, 1 km in Nord-Süd-Richtung |
| Geländehöhen | 140 m bis 500 m über NN |
| Bodenbedeckung | 51% offene Feldlage 27% Nadelwald 17% Laubwald 5% bebaute Fläche |
| Flugplan | 24.8.89: 10 Profile mit 100 m Profilabstand 25.8.89: 5 Profile mit 100 m Profilabstand, im Abstand von 50m zu den Profilen vom 24.8. versetzt |
| Punktanzahl | 24.8.89: 66 019 Punkte 25.8.89: 32 261 Punkte |

Abbildung IV.1.6 zeigt einen verkleinerten Ausschnitt der topographischen Karte L4326 Osterode am Harz im Maßstab 1:50000. Das Gelände läßt sich in drei Typen unterteilen: im westlichen Drittel des Befliegungsgebietes verläuft ein bewaldeter Höhenrücken; im zentralen Teil liegt flaches, offenes Gelände vor, mit den Ortschaften Windhausen und Badenhausen, und es verläuft dort eine Bundesstraße und eine Eisenbahnlinie; im östlichen Teil befindet sich der stark bewaldete Anstieg in den Harz. Der Geländeverlauf ist

auch aus dem als Beispiel gewählten Laserprofil in Abbildung IV.1.7 zu entnehmen (Geländehöhen zehnfach überhöht).

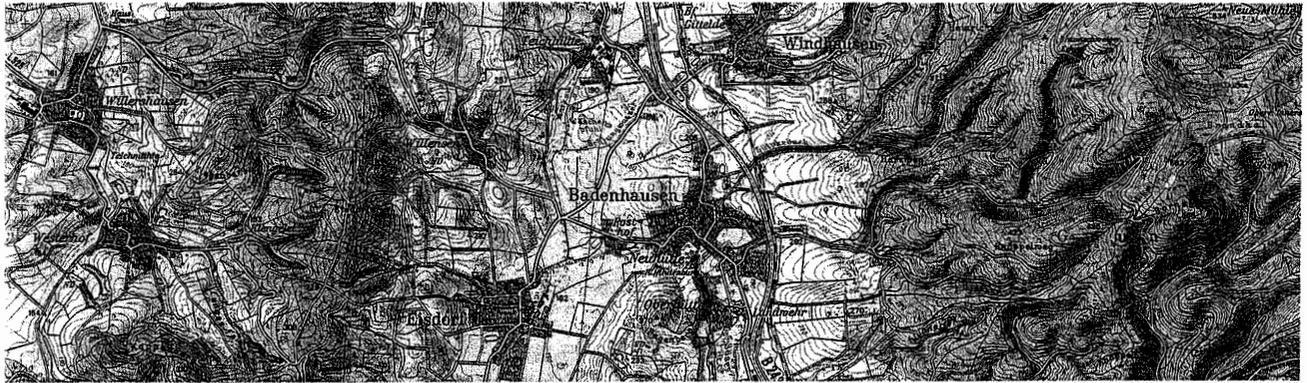


Abb. IV.1.6 Topographische Karte des Befliegungsgebiets Harz

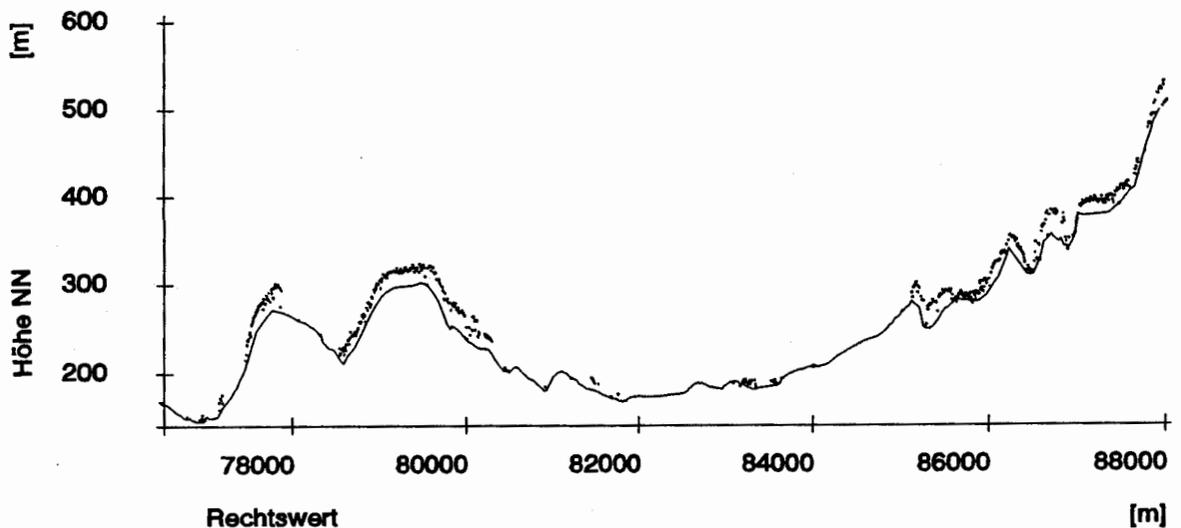


Abb. IV.1.7 Laserprofil der Befliegung Harz

1.3.5 Lachendorf

Anwendungsbereich
Untersuchungsziel

topographische Geländeaufnahme in Waldgebieten
Reflexionseigenschaften und Durchdringungsverhalten in Waldgebieten unter extremen Flugbedingungen

Befliegungsdatum

20. Juli 1990

Lage des Testgebietes

Südheide bei Celle

Größe des Testgebietes

23 km langes Profil in Nord-Südrichtung

Geländehöhen

40m bis 110m über NN

Bodenbedeckung

Heidelandschaft, Nadelwald

Flugplan

6-fache Befliegung des Profils mit folgenden Vorgaben:

1. und 2. Überfliegung: Flughöhe 300m, normale Fluglage

3. Überfliegung: Flughöhe 150m, normale Fluglage

4. Überfliegung: Steig und Sinkflug, normale Fluglage

5. Überfliegung: Flughöhe 300m, mehrfaches Rollen nach Backbord bis maximal 57°

6. Überfliegung: Flughöhe 300m, Rollen um Nulllage mit Rollwinkel $\pm 20^\circ$

Punktzahl

103 274 Punkte

1.4 Datenauswertung

Die bei den einzelnen Befliegungen registrierten Meßdaten des Laser-Profilmeßsystems werden in Abhängigkeit vom jeweiligen Untersuchungsziel in unterschiedlichen Stufen ausgewertet:

- Zur Untersuchung der Reflexionseigenschaften genügt eine Analyse der registrierten Beobachtungen des Lasersensors. Von Interesse ist dabei lediglich, ob eine Laserdistanzmessung erfolgreich durchgeführt werden konnte, oder ob die vom Objekt zurückreflektierte Energie nicht ausreichte, um eine Registrierung auszulösen.
- Für die Untersuchung des Durchdringungsverhaltens in Waldgebieten ist eine zumindest genäherte Transformation der Laserpunkte in das Geländesystem notwendig, um eine Trennung von Lage- und Höhenkoordinaten vornehmen zu können. Dann können die Bodenpunkte mit Hilfe der in Teil III vorgestellten Algorithmen automatisch identifiziert werden.
- Die Genauigkeitsanalysen und die Ableitung eines digitalen Höhenmodells können nur mit vollständig ausgewerteten Daten mit Systemkalibrierung und einer exakten Transformation der Laserpunkte in das Bezugssystem der Landesvermessung erfolgen.

Zur genauen Analyse der Reflexionseigenschaften und des Durchdringungsverhaltens werden die gemessenen Laserpunkte nach der jeweiligen Bodenoberfläche bzw. Vegetation klassifiziert. Diese Klassifizierung der Laserpunkte kann mit Hilfe der Aufzeichnungen der Spotting-Kamera oder in unabhängig von der Laser-Profilbefliegung aufgenommenen Luftbildern, gegebenenfalls auch aus aktuellem Kartenmaterial erfolgen. Die in den fünf Meßkampagnen vom Laser-Profilmeßsystem registrierten Daten wurden wie folgt für die Untersuchungen aufbereitet und ausgewertet:

- **Gammertingen**
Die aufgetretenen Probleme bei der zeitlichen Synchronisation der GPS-Beobachtungen wurden bereits in IV.1.2 angesprochen. Eine Genauigkeitsanalyse der Koordinaten der Laserpunkte konnte deshalb nicht durchgeführt werden. Zur Untersuchung des Durchdringungsverhaltens wurden die mit systematischen Fehlern behafteten Laserpunktkoordinaten in das Landessystem transformiert. Die Koordinatentransformation vom WGS84-System in das Landessystem erfolgte mit Transformationsparametern, die lokal im Testgebiet vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg an Hand identischer Punkte bestimmt wurden.
- **Hambach**
Die Auswertungen werden in einem kartesischen, topozentrischen Koordinatensystem, das im Referenzpunkt des stationären GPS-Empfängers gelagert ist, durchgeführt. Genauigkeitsuntersuchungen waren nicht vorgesehen.
- **Rotterdam**
Die Befliegung Rotterdam fand ohne GPS-Beobachtungen statt. Mit Hilfe der vom INS gelieferten Flugzeugpositionen konnte der Flugweg genähert dargestellt werden. Die Auswertung beschränkt sich auf das Reflexionsverhalten.
- **Harz**
Die Auswertung der Befliegungen wurden im Koordinatensystem der Landesvermessung durchgeführt. Die dazu notwendigen Voraussetzungen, Datumstransformation und Systemkalibrierung, werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschrieben. Bei der Befliegung vom 24.8.89 wurde keine Klassifizierung der Laserpunkte vorgenommen. Die Untersuchung der Reflexionseigenschaften und des Durchdringungsverhaltens stützt sich somit ausschließlich auf die Befliegung vom 25.8.89. Die Systemkalibrierung mit Genauigkeitsanalyse wurde an beiden Flugtagen durchgeführt. Die Höhengenaugigkeit wurde anhand von Laserprofilpunkten vom 25.8.89 durch unabhängige photogrammetrische und terrestrische Kontrollmessungen überprüft. Dagegen beziehen sich die Untersuchungen des abgeleiteten Digitalen Höhenmodells auf beide Tage.
- **Lachendorf**
Da bei der Befliegung Lachendorf hauptsächlich die Reflexionseigenschaften unter verschiedenen Flugbedingungen zu untersuchen waren, wurden wie bei der Befliegung Hambach die WGS-Koordinaten lediglich in ein topozentrisches Horizontsystem transformiert. Eine weitere Genauigkeitsanalyse fand nicht statt.

2. Untersuchung verschiedener Eigenschaften der Lasermessungen

2.1 Reflexionsverhalten

2.1.1 Erfolgsrate

In diesem Abschnitt wird unter verschiedenen Bedingungen untersucht, von wievielen der ausgesandten Laserimpulsen nach der Reflexion ein meßbares Signal zurückkehrt, das eine Distanzmessung erlaubt. Wie bereits in II.2 ausgeführt wurde, muß der von der Objektoberfläche zurückreflektierte Anteil der ausgesandten Laserenergie einen gewissen energetischen Schwellenwert überschreiten, um im Empfangsteil des Laserdistanzmessers eine Messung auslösen zu können. Für die praktische Anwendung der Laser-Profilmessung ist diese Untersuchung von grundsätzlicher Bedeutung. Im folgenden Abschnitt 2.1.2 wird deshalb das Reflexionsverhalten des Lasers über möglichst vielen Oberflächenmaterialien untersucht. Daraus lassen sich dann Rückschlüsse über die möglichen Einsatzbereiche der Laser-Profilmessung ziehen. Die weiteren Analysen widmen sich der Abhängigkeit des Reflexionsverhaltens unter verschiedenen Flugbedingungen (Flughöhe und Strahlneigung).

Die folgenden empirischen Untersuchungen präsentieren als Ergebnis eine Erfolgsrate, die von verschiedenen Bedingungen abhängen kann. Die Erfolgsrate drückt das Verhältnis der Anzahl der Laserimpulse, die mit genügend Energie zur Auslösung einer Streckenmessung reflektiert wurden (Anzahl der Punkte mit Reflexion), zur Gesamtanzahl der abgegebenen Laserimpulse aus:

$$\text{Erfolgsrate [\%]} = \frac{\text{Anzahl der Punkte mit Reflexion}}{\text{Anzahl abgegebener Impulse}} * 100$$

2.1.2 Erfolgsrate bei normaler Fluglage

In Tabelle IV.2.1 sind die Erfolgsraten der Befliegungen bei normaler Fluglage, das heißt einem Rollwinkel von +/- 5deg und einer durchschnittlichen Flughöhe von 200m bis 350m zusammengestellt. Über allen Oberflächen, mit Ausnahme des Laubwaldes in Gammertingen, wurde eine Erfolgsrate von über 90% erreicht; bei den mit dem Laser Modell 501 SA beflogenen Gebieten Harz und Lachendorf liegt die Rate sogar über 98%. Da über den sehr unterschiedlichen Bodenmaterialien der Befliegung Hambach, die von dunkler Kohle bis zu sehr hellen Sanden reichen, keine spezifischen Ausfälle beobachtet wurden, konnte auf eine besondere Klassifizierung verzichtet werden, ebenso wie auch bei der Befliegung Rotterdam. Dort konnten auf der in Küstennähe mit Schaumkronen versehenen Meeresoberfläche Erfolgsraten in derselben Größenordnung wie auf festem Untergrund erzielt werden. Dagegen wurden über stehenden Binnengewässern, die bei allen Befliegungen gelegentlich überflogen wurden, in der Regel keine Reflexion empfangen. Die zu geringe Anzahl der Messungen über Binnengewässern erlaubt jedoch keine statistisch gesicherte Aussage. Für die Identifizierung von topographischen Paßpunkten zur Systemkalibrierung spielen Laserpunkte innerhalb von bebauten Flächen eine große Rolle; bei der Befliegung Harz wurde innerhalb dieser Klasse eine Erfolgsrate von über 99% erreicht. Bei allen Befliegungen wurde eine starke Abhängigkeit der Reflexion vom Material, sowie von der Neigung der Gebäudedächer gegenüber dem Laserstrahl festgestellt.

Die Auswertung erfolgte nur in Abhängigkeit vom Oberflächenmaterial, die sich in der Reflexivität ρ (s. II.2.1) ausdrückt. Daneben spielt aber die Orientierung der Objektoberfläche gegenüber dem Laserstrahl, die durch den Einfallswinkel ausgedrückt wird und im Lambertschen Strahlungsgesetz durch einen Kosinusfaktor berücksichtigt wird, eine vergleichbare Rolle. Ohne den Einfallswinkel im einzelnen untersucht zu haben, zeigt die hohe Erfolgsrate, die auch unter den verschiedenen morphologischen Geländeformen (vom flachen Gelände der Befliegungen Lachendorf und Rotterdam bis zu den steilen Verhältnissen in Hambach und im Harz), daß für die praktische Anwendung der Laser-Profilmessung mit keinen Einschränkungen zu rechnen ist.

Unter energetischen Gesichtspunkten betrachtet, kann von einer Befliegung während der Nacht ein höheres Energiepotential des zurückreflektierten Laserimpulses erwartet werden, da auf den Einsatz von optischen Filtern, die den Einfluß des Tageslichtes ausschließen, verzichtet werden kann. Die hohe Erfolgsrate, die

| Befliegung | Geländeoberfläche | Punkte mit Reflexion | Punkte ohne Reflexion | Erfolgsrate |
|--|------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| Gammertingen | Ackerfläche | 38 877 | 805 | 98.0 % |
| | Nadelwald | 21 488 | 2 382 | 90.0 % |
| | Laubwald | 9 549 | 1 584 | 85.8 % |
| Hambach | Sand, Kies, Braunkohle | 53 551 | 5 572 | 90.6 % |
| Rotterdam (normale Fluglage +/- 5 deg) | Sand, Watt, Meeresoberfläche | 19 127 | 2 040 | 90.4 % |
| Harz 25.8.89 | Ackerfläche | 16 246 | 32 | 99.8 % |
| | Nadelwald | 8 684 | 179 | 98.0 % |
| | Laubwald | 5 365 | 72 | 98.7 % |
| | bebaute Flächen | 1 595 | 13 | 99.2 % |
| Lachendorf (normale Fluglage und Flughöhe) | Heidelandschaft | 52 955 | 161 | 99.7 % |

Tab. IV.2.1 Reflexionsverhalten an natürlichen Oberflächen

bei allen Befliegungen unter Tageslicht erreicht wurde, bestätigen implizit die Aussagen von Krabill et al. (1984), die bei vergleichenden Untersuchungen von Tages- und Nachtbefliegungen eine nur unwesentlich, nicht signifikant höhere Erfolgsrate bei Nacht erzielten und deshalb empfehlen, auf die mit Schwierigkeiten verbundenen Nachtbefliegungen zu verzichten.

2.1.3 Erfolgsrate in Abhängigkeit von der Flughöhe

Bei der Befliegung Lachendorf wurde zur Untersuchung der Abhängigkeit der Erfolgsrate von der Flughöhe das Profil in verschiedenen Flughöhen und im Steig- und Sinkflug überflogen. Dabei konnten bei einer minimalen Flughöhe von 133m und bei einer maximalen Flughöhe von 682m Streckenmessungen mit erfolgreicher Reflexion durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle IV.2.2 zusammengestellt.

| Befliegung Lachendorf Flughöhe über Grund | Punkte mit Reflexion | Punkte ohne Reflexion | Erfolgsrate |
|--|----------------------|-----------------------|-------------|
| 0 m bis 200 m | 2 297 | 93 | 96.1 % |
| 200 m bis 300 m | 2 343 | 2 | 99.9 % |
| 300 m bis 400 m | 4 415 | 43 | 99.0 % |
| 400 m bis 500 m | 3 447 | 92 | 97.4 % |
| 500 m bis 700 m | 3 648 | 1 179 | 75.6 % |

Tab. IV.2.2 Erfolgsrate in Abhängigkeit von der Flughöhe

In der Klasse der durchschnittlichen Flughöhen von 200m bis 400m werden mit über 99% die besten Erfolgsraten erzielt. Der nominelle Durchmesser des Strahlenkegels auf der Erdoberfläche liegt dabei zwischen

0.5m und 1.0m. Die Ursache der geringeren Erfolgsrate in Flughöhen unter 200m ist nicht geklärt. Es könnte ein Zusammenhang mit dem Durchmesser des Strahlkegels in Betracht gezogen werden. Aus energetischen Gründen nimmt die Meßbarkeit, wie zu erwarten war, über der nominellen Reichweite des Lasers von 500m rasch ab. Aber selbst im Bereich von 500m bis 700m konnte bei der Befliegung Lachendorf noch eine Erfolgsrate von 75.6% erreicht werden.

2.1.4 Erfolgsrate in Abhängigkeit von der Strahlneigung

Eine weitere Untersuchung widmet sich dem Zusammenhang von Laserreflexion und dem Neigungswinkel des Laserstrahls gegenüber der Zieloberfläche. Dadurch soll geklärt werden, ob beispielsweise in extremen Gebirgslagen mit einer energetischen Abschwächung der Laserreflexion, bedingt durch das Lambertsche Strahlungsgesetz, gerechnet werden muß. Darüber hinaus kann mit dieser Untersuchung eine Voraussetzung für den Einsatz scannender Lasermeßsysteme geklärt werden. Dazu wurden über den ebenen Gebieten der Befliegungen Rotterdam und Lachendorf spezielle Flugmanöver geflogen, um durch eine Schrägstellung des Flugzeugs eine Strahlneigung gegenüber der Zieloberfläche zu erzeugen. Bei der Befliegung Rotterdam wurden über der offenen Meeresfläche sehr enge Kurvenflüge durchgeführt, wobei Rollwinkel bis zu 31deg gemessen wurden. Weiteres Datenmaterial stammt von der Befliegung Lachendorf. Während der Befliegung zweier Profile wurde das Flugzeug bis zu einem Rollwinkel von 57deg geneigt. In Tabelle IV.2.3 sind die Ergebnisse der Auswertung dieser Flüge zusammengefaßt.

Bei der Befliegung Lachendorf, über den Wäldern der Heidelandschaft, wurde auch in den extremsten Fluglagen keine nennenswerte Abnahme der Erfolgsrate beobachtet. Dagegen wurde bei der Befliegung Rotterdam über der Meeresoberfläche eine starke Abhängigkeit der Reflexion vom Rollwinkel und damit von der Strahlneigung festgestellt. Die Erfolgsrate geht von 90.4%, bei normaler Fluglage, auf 32.2% in der Klasse der maximalen Neigungen (25-31 deg) zurück. Dieses Ergebnis ist wohl so zu erklären, daß auch bei bewegter Wasseroberfläche in erheblichem Umfang spiegelnde Reflexionen des Laserstrahls auftreten. Es steht jedoch, da es über der offenen Meeresoberfläche erzielt wurde, außerhalb des normalen, in dieser Arbeit zugrunde gelegten Anwendungsbereiches der Laser-Profilmessung.

| Befliegung | Rollwinkel des Flugzeugs | Punkte mit Reflexion | Punkte ohne Reflexion | Erfolgsrate |
|--|--------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| Rotterdam (Meeresoberfläche) | 0 bis 5 deg | 19 127 | 2 040 | 90.4 % |
| | 5 bis 10 deg | 5 129 | 2 461 | 67.6 % |
| | 10 bis 15 deg | 2 461 | 2 465 | 50.0 % |
| | 15 bis 20 deg | 1 409 | 1 967 | 41.7 % |
| | 20 bis 25 deg | 1 180 | 1 035 | 53.3 % |
| | 25 bis 31 deg | 234 | 492 | 32.2 % |
| Lachendorf (Heidelandschaft, Nadelwald) | 0 bis 5 deg | 13 149 | 18 | 99.9 % |
| | 5 bis 10 deg | 5 518 | 9 | 99.8 % |
| | 10 bis 15 deg | 4 810 | 5 | 99.9 % |
| | 15 bis 20 deg | 2 557 | 5 | 99.8 % |
| | 20 bis 25 deg | 3 527 | 63 | 98.2 % |
| | 25 bis 30 deg | 1 766 | 8 | 99.5 % |
| | 30 bis 60 deg | 1 157 | 7 | 99.4 % |

Tab. IV.2.3 Erfolgsrate in Abhängigkeit von der Strahlneigung

2.1.5 Ergebnis

Die Untersuchung des Reflexionsverhaltens hat gezeigt, daß bei allen natürlichen Bodenbedeckungen und auch an der bewegten Meeresoberfläche eine sehr hohe Erfolgsrate erzielt werden kann. Somit kann, was die Reflexion des Laserstrahls betrifft, die Laser-Profilmessung bei allen untersuchten Anwendungsbereichen eingesetzt werden. Die Untersuchung der Erfolgsrate in Abhängigkeit vom Neigungswinkel des Laserstrahls hat gezeigt, daß über natürliche Geländeoberflächen auch scannende Lasermessungen erfolgreich zum Einsatz kommen können.

2.2 Durchdringungsverhalten in Waldgebieten

2.2.1 Durchdringungsrate

Für die topographische Geländeaufnahme von Waldgebieten ist die Fähigkeit, Laserdistanzmessungen bis zum Waldboden vornehmen zu können, von entscheidender Bedeutung. In diesem Abschnitt soll diese Fähigkeit untersucht werden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen wird mit der Durchdringungsrate ausgedrückt. Dieser Wert gibt das Verhältnis der Punkte auf dem Waldboden (Bodenpunkte) zur Gesamtanzahl der gemessenen Punkte im Waldgebiet an:

$$\text{Durchdringungsrate [\%]} = \frac{\text{Anzahl der Bodenpunkte}}{\text{Gesamtanzahl der Punkte}} * 100$$

Die Identifizierung der Bodenpunkte erfolgt im Rahmen der normalen Auswertung automatisch mittels der in Teil III dargestellten Algorithmen. Zur Analyse des Durchdringungsverhaltens wurden nur die tatsächlich gemessenen Laserpunkte herangezogen, das heißt, es wurden keine Punkte des durch die ARI-Modellierung verdichteten Geländeprofiles verwendet. Als Bodenpunkt werden durch den Algorithmus diejenigen Punkte ausgewählt, die innerhalb einer Bandbreite von maximal 0.5m um das modellierte Geländeprofil liegen. Durch die Wahl dieser Bandbreite kann nicht ausgeschlossen werden, daß niedriger Bodenbewuchs mit einer maximalen Bewuchshöhe von 0.5m fälschlicherweise dem Bodenprofil zugeordnet wird. Die morphologischen Operatoren wurden mit einer Länge des Strukturelements (s. III.3.2) von 51 bis 71 Punkten, gerechnet; das bedeutet, daß nach höchstens 51 bis 71 Punkten, die in den Vegetationsschichten gemessen wurden, wieder eine Reflexion auf dem Waldboden erfolgen muß. Mit Berücksichtigung der Meßfrequenz ergab sich die metrische Länge des Strukturelements bei den einzelnen Befliegungen zu: Gammertingen 140m, Hambach 180m, Harz und Lachendorf 130m. Diese Werte wurden heuristisch festgesetzt nach einer visuell-graphischen Kontrolle von kritischen Teilprofilen, das sind Profilausschnitte, die über dichtem Waldgebiet geflogen wurden. Die Modellierung mit ARI-Prozessen wird individuell auf den jeweiligen Geländetyp angepaßt. Die durchschnittliche Profillänge, die mit einem gleichartigen ARI-Modell bearbeitet wird, beträgt etwa 2km.

2.2.2 Durchdringungsraten bei durchschnittlichen Flughöhen von 300m

Die Durchdringungsraten aus den Befliegungen Gammertingen, Hambach, Harz 25.8.89 und Lachendorf sind in Tabelle IV.2.4 zusammengestellt. Bei den Befliegungen Hambach und Lachendorf stand zwar die Untersuchung der Durchdringungsraten nicht im Vordergrund, aus diesem Grund wurde auf eine aufwendige, manuelle Klassifizierung der Laserpunkte nach der Vegetationsart verzichtet, aber durch die große Anzahl gemessener Punkte über Waldgebieten (in Hambach außerhalb des Braunkohletagebaus gelegen) bietet sich auch bei diesen beiden Befliegungen eine statistische Untersuchung an. Es kann davon ausgegangen werden, daß in den Gebieten der Befliegungen Hambach und Lachendorf hauptsächlich Nadelwald anzutreffen ist. Aus diesen beiden Befliegungen wurde für die Angaben in der Tabelle IV.2.4 nur größere, zusammenhängende Waldgebiete mit einer Bewuchshöhe von mindestens 12m ausgewertet.

Die Durchdringungsrate variiert in den untersuchten Waldgebieten zwischen 15.7% und 39.4%. Im Testgebiet Harz sind die Durchdringungsraten im Nadel- und Laubwald deutlich höher als in der vergleichbar angelegten Befliegung Gammertingen. Dieser Unterschied gibt den subjektiven Eindruck wieder, wonach die

| Befliegung | Vegetation | Gesamtanzahl der Punkte | Bodenpunkte | Durchdringungsrate |
|--------------|------------|-------------------------|-------------|--------------------|
| Gammertingen | Nadelwald | 18 997 | 3 535 | 18.6 % |
| | Laubwald | 8 094 | 1 272 | 15.7 % |
| Hambach | Nadelwald | 10 475 | 2 140 | 20.4 % |
| Harz 25.8.89 | Nadelwald | 8 684 | 3 043 | 35.0 % |
| | Laubwald | 5 365 | 1 327 | 24.7 % |
| Lachendorf | Nadelwald | 14 450 | 5 688 | 39.4 % |

Tab. IV.2.4 Durchdringungsraten in Waldgebieten

Wälder im Gebiet Gammertingen wesentlich dichter sind als im Harz. Eine objektive Überprüfung müßte mit forstwissenschaftlichen Kategorien erfolgen. In Nadelwäldern ist die Durchdringungsrate generell höher als in Laubwäldern. Hierbei muß berücksichtigt werden, daß alle Befliegungen im Hochsommer bei maximalem Vegetationsstand durchgeführt wurden. Für die Laser-Profilbefliegung stellt dies den ungünstigsten Fall dar. Von vergleichenden Befliegungen im Sommer und Winter berichten Krabill et al. (1984): während die Durchdringungsrate in Nadelwald keiner jahreszeitlichen Veränderung unterliegt, kann sie in Laubwald von 21% im Sommer auf bis zu 68% im Winter erhöht werden.

Eine eingehendere Untersuchung der Durchdringungsrate, die auch die Ursachen ihrer großen Variabilität erforschen könnte, würde eine sehr genaue Klassifizierung der befliegenen Waldgebiete auch unter forstwissenschaftlichen Gesichtspunkten wie z.B. Baumart, Baumdichte, Dichte der Laubschichten, Alter, Kronenumfang (s.a. Nelson et al. 1984) erfordern. Die in dieser Arbeit präsentierten Durchdringungsdaten unterscheiden nur die Kategorien Laubwald und Nadelwald. Die empirisch bestimmten Durchdringungsdaten beziehen sich somit nur auf den durchschnittlichen, im jeweiligen Befliegungsgebiet vorherrschenden Waldtyp und können nicht ohne weiteres zu spezielleren Aussagen herangezogen werden. Trotzdem zeigen auch andere Untersuchungen (z.B. Krabill et al. 1984), daß die hier präsentierten Ergebnisse durchaus das Spektrum angeben, in dem sich das Durchdringungsverhalten auch anderer Waldgebiete bewegt. Wesentliche Veränderungen der Durchdringungsdaten ergeben sich hauptsächlich für Laubwälder bei Befliegungen in den Wintermonaten. Empirische Untersuchungen darüber konnten aber für diese Arbeit nicht mehr durchgeführt werden.

2.2.3 Durchdringungsrate in Abhängigkeit von der Flughöhe

Bei der Befliegung Lachendorf wurde dasselbe 23km lange Profil in unterschiedlichen Flughöhen überflogen. Dies läßt eine Analyse der Abhängigkeit der Durchdringungsrate von der Flughöhe zu. In Tabelle IV.2.5 wurden die Flughöhen über Grund in 5 Klassen eingeteilt und für jede Klasse die Durchdringungsrate berechnet. Eine eindeutige Abhängigkeit der Durchdringungsrate von der Flughöhe ist nicht zu erkennen. Welche Bedeutung und Signifikanz die hohe Rate von 57.8% in der Klasse der "üblichen" Flughöhen von 300m bis 400m hat, kann aus dem vorhandenen Datenmaterial nicht entschieden werden.

| Befliegung Lachendorf Flughöhe über Grund | Gesamtanzahl der Punkte | Bodenpunkte | Durchdringungsrate |
|--|-------------------------|-------------|--------------------|
| 0 m bis 200 m | 6 757 | 2 634 | 39.0 % |
| 200 m bis 300 m | 8 122 | 2 416 | 29.7 % |
| 300 m bis 400 m | 3 355 | 1 938 | 57.8 % |
| 400 m bis 500 m | 456 | 127 | 27.9 % |
| 500 m bis 700 m | 626 | 181 | 28.9 % |

Tab. IV.2.5 Durchdringungsrate in Abhängigkeit von der Flughöhe

2.2.4 Verteilung der Bodenpunkte im Profil

Das Ziel der topographischen Geländeaufnahme, die Ableitung eines Digitalen Höhenmodells, setzt neben der flächendeckenden Befliegung durch mehrere parallele Profile eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Bodenpunkte innerhalb der Profile voraus. Die Durchdringungsrate allein sagt aber nicht aus, ob dieses Ziel in Waldgebieten erreicht werden kann, da keine Aussage über die Verteilung der Bodenpunkte entlang des Profils gemacht wird. Ein Beispiel soll diesen Sachverhalt veranschaulichen.

Abbildung IV.2.1 zeigt einen Ausschnitt eines Laserprofils der Befliegung im Harz vom 25.8.89. Am linken Rand des Profilausschnitts befindet sich Nadelwald. Die dort sehr gleichmäßige Verteilung der Bodenpunkte ist deutlich zu erkennen. Ein anderes Verhalten ist dagegen in der rechten Hälfte des Profils bei Laubwald festzustellen. An vereinzelten Stellen treten Bodenreflexionen gehäuft auf, während sich dazwischen mehr oder weniger große Lücken finden. Der größte Abstand zwischen zwei Bodenreflexionen beträgt hier etwa 100m. Das Beispiel macht deutlich, daß die durchschnittliche Durchdringungsrate, die bei der Befliegung Harz 35% im Nadelwald bzw. 25% im Laubwald betrug, noch keine Aussage über die Verteilung der Bodenpunkte zuläßt.

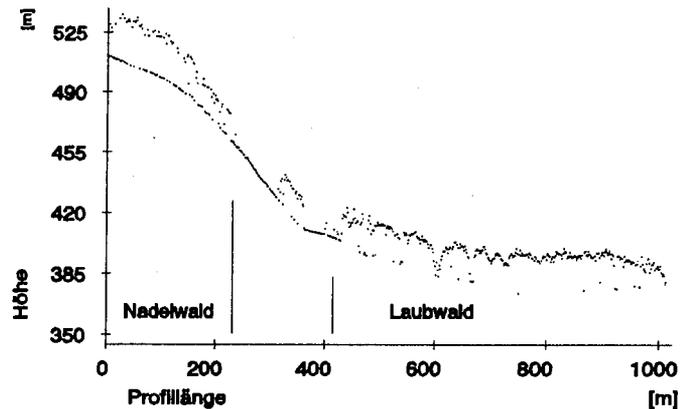


Abb. IV.2.1 Durchdringung in Nadel- und Laubwald

Ein Kriterium zur Beurteilung der Verteilung der Bodenpunkte kann unter Einbeziehung der Abstände benachbarter Bodenpunkte gefunden werden. Dazu werden die Abstände zwischen benachbarten Bodenpunkte berechnet und für Nadel- und Laubwald getrennt in Klassen (sog. Abstandsklassen) eingeteilt.

Wegen ihrer Zielsetzung - topographische Geländeaufnahme in Waldgebieten - wurden nur die Befliegungen Gammertingen und Harz 25.8. auf die Verteilung der Bodenpunkte untersucht. Da bei beiden Befliegungen die Flächendeckung durch einen Profilabstand von 50m angestrebt wurde, sollte der Punktabstand innerhalb der Profile für die Ableitung des Digitalen Höhenmodells nicht mehr als etwa 20m betragen. Die berechneten Abstände zwischen benachbarten Bodenpunkten wurden drei Abstandsklassen zugeordnet: Die erste Klasse wird aus den Abständen der Bodenpunkte bis 20m gebildet. In der zweiten Klasse beträgt der Abstand 20m bis 50m, und beinhaltet somit die Fälle, die für die Ableitung des DHMs noch akzeptiert werden können. In der dritten Klasse sind die für die DHM-Berechnung kritischen Fälle, mit Punktabständen von mehr als 50m zu finden. In Tabelle IV.2.6 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung zusammengestellt, wobei für jede Klasse zum einen der mittlere Punktabstand angegeben und zum anderen die Gesamtsumme aller Abstände gebildet und in das Verhältnis zur gesamten Profillänge des jeweiligen Waldtyps gesetzt ist.

Betrachtet wird zunächst die Befliegung im Harz. Die gesamte Profillänge im Nadelwald beträgt 15522m. Davon sind 11450m mit Bodenpunkten mit einem Abstand von bis zu 20m überdeckt, was 73.8% entspricht. Die kritische Klasse der Punktabstände von über 50m überdeckt 12.3% der Profillänge im Nadelwald. Der mittlere Punktabstand beträgt in dieser Klasse 70.8m. Die Profillänge über Laubwald erstreckt sich bei der Befliegung Harz über 9123m. Über etwa der Hälfte (51.5%) dieser Strecke wurde eine Verteilung der Bodenpunkte mit Abständen bis zu 20m erreicht. 14.2% der gesamten Profillänge im Laubwald weist einen Punktabstand von über 50m auf.

Bei der Befliegung Gammertingen fällt auf, daß in Laub- und Nadelwald ein ausgeglichenes Verhältnis in den Punktabstandsklassen herrscht: Im Nadelwald gehören 65.9% der Profillänge zur Abstandsklasse bis 20m, gegenüber 63.7% im Laubwald, und 6.7% bzw. 6.0% fallen in die Klasse über 50m Punktabstand. Der Anteil in der als kritisch angesehenen Klasse über 50m Punktabstand ist weniger als halb so groß wie bei der Befliegung im Harz. Dieses Ergebnis konnte nicht erwartet werden, wenn lediglich die Durchdringungsraten betrachtet werden. Werden die mittleren Abstände zwischen den Bodenpunkten in die Überlegungen mit einbezogen, dann wird deutlich, daß sich die höhere Durchdringungsrate im Laubwald im Harz gegenüber Gammertingen hauptsächlich in der Klasse der Punktabstände bis 20m niederschlägt.

| Befliegung | Vegetation | Punkt-zu-Punkt-Abstand der Bodenpunkte | Anzahl der Bodenpunkte pro Klasse | Mittlerer Abstand der Bodenpunkte pro Klasse | Gesamtstreckenlänge in der Abstandsklasse | Anteil an der Gesamtstrecke |
|-----------------|------------|--|-----------------------------------|--|---|-----------------------------|
| Gammertingen | Nadelwald | bis 20m | 9 582 | 4.4 m | 42 191m | 65.9% |
| | | 20m bis 50m | 603 | 29.1 m | 17 539m | 27.4% |
| | | 50m bis 100m | 67 | 63.9 m | 4 281m | 6.7% |
| | | Summe | 10 252 | 6.2 m | 64 011m | 100.0% |
| | Laubwald | bis 20m | 3 831 | 4.3 m | 16 526m | 63.7% |
| | | 20m bis 50m | 269 | 29.3 m | 7 869m | 30.3% |
| | | 50m bis 100m | 23 | 67.9 m | 1 562m | 6.0% |
| | | Summe | 4 123 | 6.3 m | 25 957m | 100.0% |
| Harz 25.8.89 | Nadelwald | bis 20m | 2 938 | 3.9 m | 11 450m | 73.8% |
| | | 20m bis 50m | 77 | 28.1 m | 2 161m | 13.9% |
| | | 50m bis 100m | 27 | 70.8 m | 1 911m | 12.3% |
| | | Summe | 3 042 | 5.1 m | 15 522m | 100.0% |
| | Laubwald | bis 20m | 1 212 | 3.9 m | 4 697m | 51.5% |
| | | 20m bis 50m | 103 | 30.4 m | 3 128m | 34.3% |
| | | 50m bis 100m | 20 | 64.9 m | 1 298m | 14.2% |
| | | Summe | 1 335 | 6.8 m | 9 123m | 100.0% |

Tab. IV.2.6 Punktabstandsklassen der Bodenpunkte in Waldgebieten

Die Übertragung der Ergebnisse dieser Untersuchung auf die Fläche läßt die Schlußfolgerung zu, daß bei der Befliegung Gammertingen etwa 6% der gesamten Waldfläche und im Harz etwa 13% der Waldfläche nur mit einem Abstand der Bodenpunkte von mehr als 50m überdeckt ist. Die Ableitung eines Digitalen Höhenmodells müßte in solche Flächen unter Umständen ausgespart oder durch zusätzliche terrestrische Messungen verdichtet werden. Da der Anteil in der kritischen Klasse mit Punktabständen über 50m im Nadel- und Laubwald etwa gleich groß ist, muß weiter gefolgert werden, daß durch eine Winterbefliegung, die im wesentlichen nur die Durchdringung im Laubwald beeinflusst, sich der Anteil der unzureichend erfaßten Fläche im Nadelwald nicht reduzieren läßt. Eine Lösung zur Erzielung einer besseren Verteilung der Bodenpunkte wird deshalb in erster Linie von einer wesentlich erhöhten Meßrate erwartet.

2.2.5 Überprüfung der automatischen Identifikation der Bodenpunkte

Wie bereits einleitend in 2.2.1 erwähnt, wurde die Identifikation der Bodenpunkte für die in den Tabellen IV.2.4, IV.2.5 und IV.2.6 präsentierten Ergebnisse automatisch mit Hilfe der in Teil III entwickelten Algorithmen durchgeführt. Das Ergebnis wurde stichprobenartig an verschiedenen Teilprofilen aus allen Befliegungsgebieten an Hand von graphischen Darstellungen visuell überprüft. Daneben wurde bei der Befliegung im Harz vom 25.8.89 eine unabhängige Identifikation der Bodenpunkte in photogrammetrischen Luftbildern (Bildflug Lerbach vom 23.4.1987, s. IV.3.4.1) vorgenommen, indem die gemessenen Laserpunkte vom Operateur unter stereoskopischer Betrachtung als Boden- oder Laubreflexion klassifiziert wurden. Durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse der automatisch, algorithmischen mit der visuellen Identifikation soll in

diesem Abschnitt die Qualität der algorithmischen Vorgehensweise überprüft werden und sollen Stellen aufgedeckt werden, die bei der automatischen Identifikation zu Schwierigkeiten führen können. Die Ergebnisse dieser Analyse, in Form einer Gegenüberstellung der identisch und verschieden identifizierten Reflexionen auf dem Waldboden bzw. in den Vegetationsschichten, sind in Tabelle IV.2.7 für Laub- und Nadelwald getrennt zusammengestellt.

| Vegetation Harz 25.8.89 | Identität der Klassifizierung | Visuelle Klassifizierung in Luftbildern | Algorithmische Klassifizierung | Anzahl der Punkte | Anteil |
|----------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------|-------------------|--------|
| Nadelwald | identisch klassifiziert | Boden | Boden | 2 853 | 32.2% |
| | | Nadel | Nadel | 5 382 | 60.8% |
| | Fehler 1. Art | Boden | Nadel | 120 | 1.4% |
| | Fehler 2. Art | Nadel | Boden | 491 | 5.5% |
| | Summe | | | 8 846 | 100% |
| Laubwald | identisch klassifiziert | Boden | Boden | 949 | 17.3% |
| | | Laub | Laub | 3 955 | 72.2% |
| | Fehler 1. Art | Boden | Laub | 73 | 1.3% |
| | Fehler 2. Art | Laub | Boden | 505 | 9.2% |
| | Summe | | | 5 482 | 100% |

Tab. IV.2.7 Gegenüberstellung von automatischer und visueller Klassifizierung der Bodenpunkte

In 93.1% aller untersuchten Punkte in Nadelwäldern und in 89.5% der Punkte in Laubwäldern kommen die visuelle und die automatische Klassifizierung zu einem identischen Ergebnis, beide Verfahren ordnen diese Punkte in gleicher Weise dem Waldboden oder in den Vegetationsschichten zu. Unterschiedliche Klassifizierungen können in zwei Fällen auftreten, die einer näheren Betrachtung bedürfen. Dabei wird davon ausgegangen, daß der Operateur eine fehlerfreie Klassifizierung vorgenommen hat.

Fehler 1. Art: Fälschliche Klassifizierung von Bodenpunkten als Vegetationspunkte

In beiden Waldarten ist dies der anteilmäßig kleinere Fall, wo der Operateur eine Bodenreflexion klassifiziert, während die algorithmische Klassifizierung eine Reflexion in der Vegetationsschicht annimmt. Dieser Fall trat bei 120 Punkten (1.4%) im Nadelwald und bei 73 Punkten (1.3%) im Laubwald auf. Eine Überprüfung ergab, daß diese Punkte ausnahmslos in bewegtem Gelände mit differenzierten Kleinformen liegen. Die fehlerhafte Klassifizierung läßt sich in diesen Fällen mit einer zu klein gewählten Bandbreite bei der automatischen Selektion der Bodenpunkte erklären. Dies muß jedoch in Kauf genommen werden, da eine zu große Bandbreite die Gefahr mit sich bringt, Reflexionen auf niedrigen Vegetationsformen (Unterholz, Farn, Buschgruppen) als Bodenreflexionen anzusehen. Es handelt sich im Sinne statistischer Hypothesentests um Fehler erster Art, wobei verwertbare Punkte fälschlicherweise ausgeschieden, das heißt nicht zur Bestimmung des Geländeprofiles herangezogen werden. Immerhin erfolgt dadurch keine direkte Verfälschung des Bodenprofils.

Fehler 2. Art: Fälschliche Klassifizierung von Vegetationspunkten als Bodenpunkte

Sowohl nach der Anzahl als auch nach den Auswirkungen auf die Geländemodellierung ist die zweite Kategorie der fehlerhaften Klassifizierung die bedeutendere und die schwerwiegendere. Hier werden vom Programm Bodenpunkte identifiziert, die der Operateur als nicht zum Bodenprofil gehörende Reflexionen in den Vegetationsschichten erkannt hat, was bezüglich der Akzeptanz einer Null-Hypothese dem Fehler 2. Art entspricht. Bei 5.5% aller untersuchten Laserpunkte in Nadelwäldern und in 9.2% der Punkte in Laubwäldern ist dieser Fall eingetreten. Die nähere Analyse dieser Punkte hat gezeigt, daß es sich hierbei um länge-

re Profilstücke über sehr dichtem und niedrigem Baumbestand handelt, insbesondere um dichte, noch nicht ausgerodete Schonungen (Baumschulen), wo über längere Stecken keine Durchdringung des Laserstrahls auf den Waldboden möglich war.

Ein Beispiel für diesen zweiten Fall der fehlerhaften Klassifizierung zeigt der Profilausschnitt in Abbildung IV.2.2. In einem steilen Hang liegt eine nicht gerodete Fichtenschonung mit einer Baumhöhe von etwa 8 bis 10m. Die Länge der Schonung beträgt etwa 400m. Durch den graphischen Auftrag der Laserpunkte läßt sich die tatsächliche Situation im Gelände nicht erfassen. Es fällt lediglich die relativ hohe Streuung der Laserpunkte bei sehr dichtem Punktabstand auf. Erst die photogrammetrischen Kontrollmessungen zeigten, daß über der gesamten Schonung keine Reflexion auf dem Waldboden erzielt wurde. Letztere Feststellung zeigt, daß durch eine visuelle Inspektion von Bildmaterial (Luftbilder, Video-Aufnahmen) derartige Bereiche identifiziert und erkannt werden können. Damit kann zumindest erreicht werden, daß derartige systematisch verfälschte Profilstücke nicht in die weitere Bearbeitung einbezogen werden.

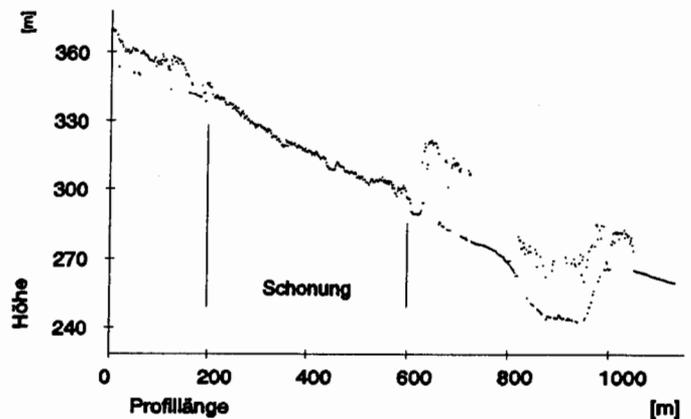


Abb. IV.2.2 Laserprofil über Fichtenschonung

Die Erklärung für das Versagen des algorithmischen Ansatzes in diesen Bereichen liegt in einer zu klein gewählten Länge des Strukturelements für die morphologische Operationen. Für die praktische Anwendung kann jedoch ein längeres Strukturelement nicht empfohlen werden. Die Prädiktion einer größeren Gelände- fläche ohne Stützung auf tatsächlich gemessene Bodenpunkte wäre mit einer zu großen Unsicherheit behaftet. Diese Kategorie der fehlerhaften Klassifizierung von Bodenpunkten muß als Grenzfall für die Einsetzbarkeit des gewählten Algorithmus angesehen werden. Für die flächendeckende topographische Geländeaufnahme bedeutet dies, daß für die betroffenen Flächen eine Nachmessung anderer Art erforderlich wird. Wie erwähnt, können zwar dichte Baumbestände, die zu einer fehlerhaften Punktklassifizierung führen, durch Inspektion von Bildmaterial erkannt und somit ausgegrenzt werden. Für die automatische Bearbeitung der Laserprofile sollte aber dennoch ein Qualitätskriterium entwickelt werden, um diese problematischen Stellen vom Algorithmus selbständig erkennen zu können und damit dem Bearbeiter einen Hinweis zu geben, diese Flächen von der weiteren Bearbeitung (z.B. Ableitung des Digitalen Höhenmodells) auszuschließen.

2.2.6 Ergebnis

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß mit der Laser-Profilmessung im größten Teil aller beflogenen Waldgebiete eine hinreichend hohe Durchdringung des Laserstrahls auf den Waldboden erreicht werden konnte. Die Durchdringung von Waldgebieten kann aber nicht ausschließlich mit der pauschalen Durchdringungsrate charakterisiert werden. Zur qualitativen Beurteilung der Laser-Profilmessungen wird als weiteres Kriterium die Verteilung der Bodenpunkte herangezogen. Dieses Kriterium ergab eine ausreichend gute Verteilung der Bodenpunkte in über 90% des beflogenen Gebietes in Gammertingen bzw. über 85% im Harz.

Bei den intensiveren Untersuchungen der Befliegungen in den Gebieten Gammertingen und Harz wurden einige problematische Stellen erkannt, wo das Gelände durch die abgeleiteten Bodenpunkte nicht hinreichend gut erfaßt wurde. Dabei muß in Betracht gezogen werden, daß beide Laser-Profilmessungen jeweils im August, bei maximalem Vegetationsstand und somit zur ungünstigsten Jahreszeit durchgeführt wurden. Ferner ist zu berücksichtigen, daß mit Meßraten von 23Hz bzw. 33Hz bei weitem nicht das Potential des Laserdistanzmessers (bis zu 2kHz) ausgenutzt werden konnte. Für den praktischen Einsatz der Laser-Profilmessung in dichten Waldgebieten muß eine wesentlich höhere Meßrate gefordert werden. Anzustreben sind zumindest 100Hz. Für die Aufnahme von Gebieten mit Laubwald wird eine Befliegung im Winter und im Frühjahr empfohlen. Mit der zusätzlich empfohlenen Maßnahme, der Analyse sehr dichter Bestände im

Nadelwald (Schonungen), ist somit zu erwarten, daß auch in Waldgebieten Bodenprofile ohne größere systematische Fehler und mit hinreichender Punktdichte regelmäßig erzielt werden können.

Mit dem vorhandenen Datenmaterial können nicht alle Fragen, die die Durchdringung in Waldgebieten betreffen, beantwortet werden. So müßten die Zusammenhänge einerseits von Eigenschaften der Vegetation, die mit forstwissenschaftlichen Kriterien zu beschreiben wären (Dichte der Vegetation, Baumarten, u.a.), und andererseits von physikalisch-technischen Faktoren, die bei der Auslegung eines Laser-Profilmeßsystems berücksichtigt werden können (Meßrate, Laserimpulsenergie, Durchmesser des Strahlkegels), noch weiter untersucht werden.

2.3 Streckenmeßgenauigkeit des Lasersensors

Der Hersteller des Lasersensors gibt in seinen technischen Spezifikationen eine Meßgenauigkeit für die einfach gemessene Laserstrecke von $\sigma_n = 0.2\text{m}$ an. Hinweise, daß diese Herstellerangabe als zu pessimistisch angesehen werden kann, lieferten stationäre Kalibrierungsmessungen und die Veröffentlichung von Thyer et al. (1989). Im folgenden wird die Meßgenauigkeit des Lasersensors unter kinematischen Bedingungen aus unserem Datenmaterial geschätzt, wobei die in III.2 entwickelten Verfahren zur Modellierung von beobachteten Zeitreihen herangezogen werden. Zunächst müssen möglichst ebene und vegetationsarme Teilstücke in den Befliegungsgebieten gesucht werden. Damit wird der Einfluß der Geländerauhigkeit auf ein Minimum reduziert und das verbleibende Rauschen der Laserstrecken wird dem Meßrauschen zugeordnet. Das Kriterium für die Auswahl der Teilprofile ist die Glattheit, die sich in der Standardabweichung des Prädiktionsfehlers σ_e der Zeitreihen ausdrückt. Bei den ausgewählten Profilstücken liegt die maximale Standardabweichung der Prädiktionsfehler bei $\sigma_e = 0.005\text{m}$.

Aus der Befliegung im Harz wurden 11 geeignete Teilprofile über einer Wiesenfläche gefunden. Dagegen gestaltete sich die Suche nach hinreichend langen Teilprofilen im sehr bewegten und vegetationsreichen Gebiet Gammertingen als schwierig, so daß von dieser Befliegung nur ein einziges in einer Talauflaufendes Teilprofil zur Untersuchung verwendet werden konnte. Aus der Befliegung Rotterdam wurden drei, über Sand- und Wattflächen verlaufende Teilprofile herangezogen. Bei der Befliegung Lachendorf ist die Heidelandschaft durch üppige Vegetation und Kleinstformen des Geländes geprägt, wodurch die Auswahl erschwert wird, es wurden aber 5 geeignete Teilprofile herangezogen.

| Befliegung | Anzahl der Teilprofile | Punktzahl | Gesamtlänge der Teilprofile | Geschätztes Meßrauschen σ_n |
|--------------|------------------------|-----------|-----------------------------|------------------------------------|
| Gammertingen | 1 | 54 | 143 m | 0.079 m |
| Rotterdam | 3 | 646 | 1 679 m | 0.083 m |
| Harz 25.8.89 | 11 | 2 688 | 4 839 m | 0.057 m |
| Lachendorf | 5 | 1 767 | 3 181 m | 0.064 m |

Tab. IV.2.8 Streckenmeßgenauigkeit des Lasersensors

In Tabelle IV.2.8 sind die Ergebnisse der Untersuchung zusammengestellt. Die angegebenen Werte für das Meßrauschen der Laserdistanzmessungen sind die quadratischen Mittelwerte aus den Schätzungen der einzelnen Teilprofile. Werden die mit dem Optech Modell 501SX beflogenen Profile in Gammertingen und Rotterdam, und die mit dem Modell 501SA durchgeführten Befliegungen im Harz und Lachendorf zusammengefaßt, dann ergibt sich für das Modell 501SX ein quadratischer Mittelwert des Meßrauschens von $\sigma_n = 0.082\text{m}$ und für das Modell 501SA von $\sigma_n = 0.059\text{m}$. Wird das Meßrauschen der Laserstrecken mit der Meßgenauigkeit unter operationellen Bedingungen gleich gesetzt, dann ist diese bei beiden Laserdistanzmessern selbst unter Einsatzbedingungen im Flugzeug wesentlich höher als vom Hersteller angegeben wird. Es ist allerdings zu vermuten, daß sich die Herstellerangabe nicht ausschließlich auf das zufällige Rauschen bezieht, sondern daß bei dieser Angabe auch systematische Effekte (s. II.2.4) inbegriffen sind.

3. Genauigkeitsanalyse der Laser-Profilmessung

3.1 Einführung

Dieses Kapitel befaßt sich mit der Genauigkeitsanalyse des Laser-Profilmeßsystems. Die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Systemkomponenten, die zur Berechnung der Laserpunkte beitragen (GPS, INS, Laserdistanzmesser), sind teilweise aus eigenen Untersuchungen, aber zum größten Teil aus anderen in der Literatur veröffentlichten Untersuchungen bekannt (insbesondere bezüglich GPS und INS). Dagegen ist noch weitgehend unbekannt, mit welchen Genauigkeitseigenschaften für das integrierte Laser-Profilmeßsystem gerechnet werden kann. Hierbei müssen sämtliche Fehlereinflüsse, die von den Systemkomponenten verursacht werden, wie auch die rechnerische Auswertung der Messungen in Betracht gezogen werden. Insbesondere wirken auf die Genauigkeit der Laser-Profilmessung:

- die zufälligen und systematischen Fehler der Systemkomponenten zur Sensororientierung (GPS zur Positionsbestimmung und INS zur Neigungsbestimmung) und der Laserdistanzmessung,
- systematische Fehler der Zeitsynchronisierung, insbesondere die Interpolation der Parameter der Sensororientierung auf die Zeitpunkte der Laserdistanzmessungen,
- die Qualität der Systemkalibrierung,
- die geodätische Datumstransformation vom globalen Koordinatensystem WGS84 auf das Bezugssystem der Landesvermessung und die Höhenübertragung auf die geophysikalisch definierten Gebrauchshöhen.

Aus dieser Aufzählung geht hervor, daß sich sämtliche Fehlerquellen hauptsächlich als systematische Fehler auf das Ergebnis der Laser-Profilmessungen auswirken. Zusätzlich werden zufällige Fehler der ursprünglichen Meßgrößen (Laserdistanz, GPS-Positionen, INS-Neigungen) angenommen.

Die Genauigkeitsanalyse der Laser-Profilmessung wird über die berechneten Koordinaten der Laserpunkte im Bezugssystem der Landesvermessung vorgenommen; gesucht ist die absolute Höhengenaugkeit der Laserpunkte. Das Bezugssystem der Landesvermessung wird deshalb für die Genauigkeitsanalyse herangezogen, weil das Ergebnis der Auswertung einer Laser-Profilbefliegung in diesem System vorliegen soll. Die Vorgehensweise der Genauigkeitsanalyse ergibt sich nach einer Untergliederung der oben aufgeführten Fehlereinflüsse. Sämtliche direkt mit dem Laser-Profilmeßsystem im Zusammenhang stehenden Komponenten bestimmen die Genauigkeit des nicht-kalibrierten Systems, darunter fallen die ursprünglichen Meßgrößen und die Zeitsynchronisierung. In der Systemkalibrierung werden systematische Fehler der GPS-Positionsbestimmung und der INS-Neigungsmessungen bestimmt und als Korrekturwerte in die Berechnung der Laserpunktkoordinaten im Koordinatensystem WGS84 eingebracht. Da die absolute Genauigkeit der Koordinaten im Bezugssystem der Landesvermessung analysiert werden soll, müssen auch die Einflüsse, die sich beim Übergang von WGS84 auf Landeskoordinaten ergeben, berücksichtigt werden.

Entsprechend dieser Einteilung erfolgt die Gliederung dieses Kapitels. Die Genauigkeitsanalyse wird ausschließlich mit dem Datenmaterial der Befliegungen im Harz vom 24.8.1989 und 25.8.1989 empirisch untersucht. Im Abschnitt 3.2 wird die Überführung der Laserpunktkoordinaten in das Bezugssystem der Landesvermessung beschrieben und ihre Genauigkeit abgeschätzt. Abschnitt 3.3 widmet sich der Systemkalibrierung. In den Abschnitten 3.4 und 3.5 werden die Geländehöhen der Laserpunkte durch unabhängige photogrammetrische und terrestrische Kontrollmessungen überprüft und zufällige und systematische Fehlerkomponenten analysiert.

3.2 Genauigkeit der Transformation vom WGS84 in Landeskoordinaten

Zur Auswertung der Laser-Profilbefliegungen im Harz 1989 wurden die 7 Parameter der Datumstransformation zwischen den WGS84-Koordinaten und den kartesischen Koordinaten bezüglich des Besselipsoides lokal bestimmt. Von 5 trigonometrischen Festpunkten wurden von der niedersächsischen Landesvermessung die WGS84-Koordinaten und Landeskoordinaten (Gauß-Krüger-Koordinaten und orthometrische Höhen über NN) zur Verfügung gestellt. Die 5 Punkte liegen gleichmäßig verteilt außerhalb des Befliegungsgebiets mit Höhen zwischen 201m und 873m über NN. Die Geoidundulationen zur Überführung der orthometrischen Höhen in ellipsoidische Höhen auf dem Besselipsoid wurden nach dem Geoidmodell von Denker (1989)

berechnet. Die Größe der Geoidundulationen variiert innerhalb des Befliegungsgebietes zwischen von 0.29m und 1.04m. Diese starke Variation innerhalb eines relativ kleinen Gebietes unterstreicht die Notwendigkeit eines genauen Geoidmodells zur Auswertung von Laser-Profilmessungen.

| Datumstransformation | Transformationsparameter | Standardabweichung |
|-------------------------|--------------------------|--------------------|
| Translation auf X-Achse | -627.825 m | ± 22.800 m |
| Translation auf Y-Achse | -32.098 m | ± 5.320 m |
| Translation auf Z-Achse | -402.764 m | ± 18.507 m |
| Rotation um X-Achse | -0.000329 ° | ± 0.000053 ° |
| Rotation um Y-Achse | -0.000483 ° | ± 0.000262 ° |
| Rotation um Z-Achse | -0.000590 ° | ± 0.000026 ° |
| Maßstabsfaktor | 0.99999426 - | ± 0.00000043 - |

Die geschätzten Parameter der Datumstransformation vom WGS 84 zum Bessel-Ellipsoid und ihre Standardabweichungen sind in Tabelle IV.3.1 angegeben. Die hohen Standardabweichungen der Translationsparameter ergeben sich durch die Bestimmung globaler Transformationsparameter in einem lokalen, sehr begrenzten Gebiet; sie beziehen sich auf den weit entfernten Koordinatenursprung im Erdmittelpunkt und sind in dieser Größenordnung erwartet worden. Für die Beurteilung der Genauigkeit, mit der die Datumstransformation zwischen beiden Koordinatensystemen innerhalb des von den 5 Punkten

Tab. IV.3.1 Geodätische Datumstransformation vom WGS84 zum Bessel-Ellipsoid bei der Befliegung im Harz

umgrenzten Gebietes durchgeführt werden kann, dienen die Restklaffungen der Koordinatenkomponenten an den 5 Punkten. Die Standardabweichung der Restklaffungen aus allen drei Koordinatenkomponenten beträgt 0.008m. Damit kann im Hinblick auf die Auswertung der Laser-Profilmessungen davon ausgegangen werden, daß die geodätischen Transformationen zwischen dem Koordinatensystem WGS84 und dem Landesystem mit einer sehr hohen Genauigkeit durchgeführt werden kann. Bezüglich den Anforderungen der topographischen Geländeaufnahme, die gegenüber der geodätischen Punktbestimmung wesentlich geringer sind, ist die Datumstransformation somit von übergeordneter Genauigkeit; systematische Fehler sind von der Datumstransformation bei der Auswertung der Befliegungen im Harz nicht zu erwarten.

3.3 Systemkalibrierung

3.3.1 Voraussetzungen

Die Systemkalibrierung gliedert sich nach II.5.1 in zwei Teile, die Laborkalibrierung und die indirekte Bestimmung der Kalibrierungsparameter durch einen Kalibrierungsflug. Die Laborkalibrierung wurde bei den Befliegungen im Harz mit den in II.5.2 beschriebenen Methoden durchgeführt; auf Ergebnisse muß hier nicht weiter eingegangen werden. Dagegen soll die bei jedem Flugtag durchzuführende Systemkalibrierung einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

Die Flugplanung im Harz sah keinen gezielten Kalibrierungsflug vor. Die Bestimmung der Kalibrierungsparameter erfolgte im Rahmen der regulären Profilbefliegungen. Es wurden lediglich parallel ausgerichtete Laserprofile geflogen, eine kreuzweise Befliegung (Querprofile) war nicht vorgesehen. Aus den Laser-Profilmessungen an beiden Flugtagen werden jeweils sämtliche Kalibrierungsparameter bestimmt: Lasereinbauwinkel, Translationsparameter und Rotationsparameter (s. II.5.4.2). Die als konstant anzunehmenden Lasereinbauwinkel werden auch am zweiten Flugtag, ohne Benutzung der Vorinformation aus dem ersten Flugtag, unabhängig bestimmt. Die gute Übereinstimmung beider Schätzungen wird in Tabelle IV.3.2 dokumentiert. Der Ausgleichungsansatz zur Bestimmung der 8 unbekannt Parameter ist im Koordinatensystem WGS84 formuliert. Dazu werden die im Landessystem vorliegenden Koordinaten der topographischen Paßpunkte nach WGS84 transformiert.

Die Auswahl und Messung der topographischen Paßpunkte erfolgte in zwei photogrammetrischen Luftbildpaaren über bebautem Gelände (Bildmaterial der Befliegung Lerbach vom 23.4.1987 s.IV.3.4.1). In den 10

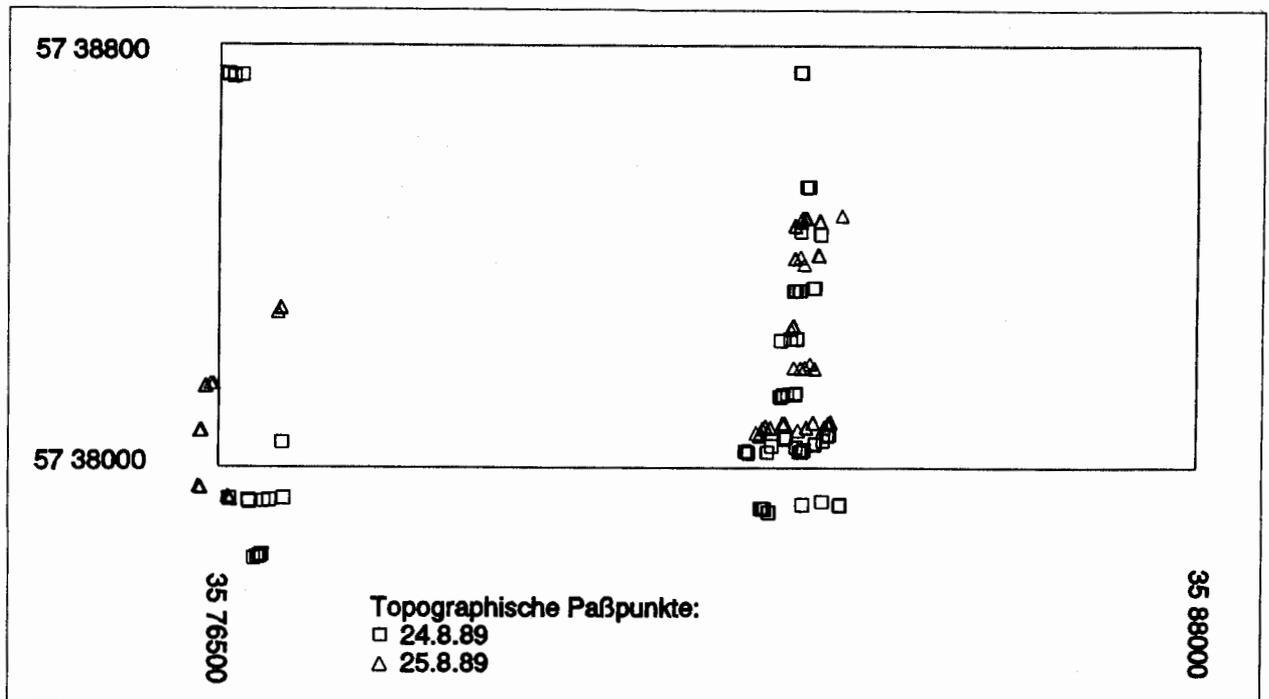


Abb. IV.3.1 Verteilung der topographischen Paßpunkte zur Systemkalibrierung (Rechts- und Hochkoordinaten in verschiedenen Maßstäben)

Profilen vom 24.8.89 wurden 79 topographische Paßpunkte ausgewählt und photogrammetrisch gemessen. Entsprechend wurden in den 5 Profilen vom 25.8.89 72 topographische Paßpunkte zur Systemkalibrierung gefunden. Eine eventuelle zeitliche Abhängigkeit der Kalibrierungsparameter wird bei der Auswertung nicht berücksichtigt (die Dauer der Befliegung betrug am 24.8.89 ca. 1 Stunde, am 25.8.89 ca. 30 Minuten). Abbildung IV.3.1 zeigt die Verteilung der topographischen Paßpunkte. Für die Rechts- und Hochwerte wurden zur besseren Darstellung verschiedene Maßstäbe gewählt. Der eingezeichnete Rahmen gibt die Begrenzung des Gebiets an, innerhalb dessen in Kapitel IV.4 ein Digitales Höhenmodell abgeleitet wird. Einige Profile verlaufen außerhalb dieser Gebietsgrenzen, daher liegen auch einige topographischen Paßpunkte außerhalb des Rahmens. Die Paßpunkte wurden am 24.8.89 in Flughöhen zwischen 150.9m und 318.2m und am 25.8.89 zwischen 197.1m und 361.2m überflogen. Diese Variation in der Flughöhe ergab sich aus der normalen Profilbefliegung; eine Befliegung von Paßpunkten in extrem unterschiedlichen Flughöhen, so wie sie für die Systemkalibrierung wünschenswert wäre (s. II.5.3.3), konnte nicht durchgeführt werden. Zur eindeutigen Identifizierung der Paßpunkte müssen jeweils mehrere Laserpunkte in der Umgebung des eigentlich zu messenden Paßpunktes herangezogen werden. Dadurch können Unsicherheiten bei der Festlegung der Punkte in der quer zur Flugrichtung verlaufenden Koordinatenkomponente reduziert werden. Ferner muß zur Identifikation der Paßpunkte die Meßfrequenz des Laser-Profilmeßsystems berücksichtigt werden. Für die Befliegung im Harz mit 33Hz Meßrate bedeutet das, daß einzelne markante Geländedetails (z.B. Hauswände) nur mit der Unsicherheit des Punktabstandes von 1.8m zugeordnet werden können.

3.3.2 Parameterschätzung

In Tabelle IV.3.2 sind die geschätzten Kalibrierungsparameter der beiden Befliegungstage einander gegenübergestellt. Deutlich unterscheiden sich die Werte der von Tag zu Tag variablen Translations- und Rotationsparameter, während die eigentlich festen Lasereinbauwinkel an beiden Tagen unabhängig voneinander nahezu identisch geschätzt wurden. Über die Qualität der Systemkalibrierung geben die Differenzen zwischen den Lasermessungen der topographischen Paßpunkte und den photogrammetrisch bestimmten Koordinaten dieser Paßpunkte jeweils vor und nach der Kalibrierung Auskunft. Die erste Angabe in Tabelle IV.3.2 bezieht sich auf die Differenzen in allen drei Koordinatenkomponenten im System WGS84. Sie wird

anschließend nach Lage- und Höhenkoordinaten, bezogen auf das Landessystem, aufgeschlüsselt. Der Effekt der Systemkalibrierung ist offensichtlich. Der mittlere Fehler der Koordinatendifferenzen reduziert sich durch die Kalibrierung insgesamt auf etwa 1/50-tel (oder 2%) seines ursprünglichen Wertes.

Der mittlere Fehler der Lagekoordinaten verringert sich durch die Systemkalibrierung von 9.1m bzw. 11.6m auf 0.27m bzw. 0.41m. In der Höhenkomponente bewirkt die Systemkalibrierung eine Reduzierung des mittleren Fehlers auf 10% seiner ursprünglichen Größe. Die mittlere Fehler der Höhenkomponente beträgt dann etwa 0.21m. Vom mittleren Fehler der Differenzen der Paßpunktkoordinaten kann aber nicht direkt auf die Genauigkeit der Laserpunkte geschlossen werden, da, wie oben erwähnt, die mit Schwierigkeiten verbundene Identifizierung der topographischen Paßpunkte einen nicht unerheblichen Beitrag zum Fehlerbudget der Systemkalibrierung leisten kann. Die Genauigkeit der Laserpunkte kann also eher noch besser als die hier ermittelten mittleren Fehler angenommen werden.

| Ergebnisse der Systemkalibrierung | | | Harz 24.8.89 | Harz 25.8.89 |
|--|--|-------------------|--------------|--------------|
| Anzahl gemessener Paßpunkte | | | 79 | 72 |
| Kalibrierungsparameter der Lasereinbauwinkel | dr | | -0.835 ° | -0.783 ° |
| | dp | | 3.124 ° | 3.100 ° |
| Translationsparameter Korrektur der GPS-Positionen | dtx | | 2.546 m | 0.222 m |
| | dty | | -0.036 m | -0.019 m |
| | dtz | | 1.167 m | -1.881 m |
| Rotationsparameter Korrektur der INS-Neigungen | α | | 0.061 ° | -0.091 ° |
| | β | | 0.437 ° | -0.282 ° |
| | γ | | 0.138 ° | -0.231 ° |
| Mittlere Fehler der Koordinatendifferenzen der Paßpunkte | 3 Koordinatenkomponenten in WGS84 | vor Kalibrierung | 13.032 m | 16.577 m |
| | | nach Kalibrierung | 0.246 m | 0.353 m |
| | Lagekoordinaten Rechts-Hoch in Gauß-Krüger- Abb. | vor Kalibrierung | 9.098 m | 11.614 m |
| | | nach Kalibrierung | 0.265 m | 0.405 m |
| | Höhenkomponente Geländehöhen über NN | vor Kalibrierung | 2.078 m | 2.252 m |
| | | nach Kalibrierung | 0.202 m | 0.215 m |

Tab. IV.3.2 Systemkalibrierung der Bfliegungen Harz

3.3.3 Stochastische Eigenschaften der Kalibrierungsparameter

Die Genauigkeit der geschätzten Kalibrierungsparameter und ihre Korrelationsstruktur ist aus Tabelle IV.3.3 ersichtlich. Für diese Tabelle wurde eine besondere Form der Matrixdarstellung gewählt. Auf den Hauptdiagonalen befinden sich die Standardabweichungen der geschätzten Kalibrierungsparameter. Die metrischen Einheiten der Standardabweichungen sind in der Kopfzeile angegeben. Auf den Nebendiagonalen sind die Korrelationen ρ (keine Einheit) zwischen den Kalibrierungsparametern eingetragen. Um einen schnellen Überblick über die Korrelationsstruktur geben zu können wurden lediglich die Korrelationen größer als 0.3 angegeben.

Die Lasereinbauwinkel sind mit einer hohen Genauigkeit von 0.01° bestimmt, was einer linearen Verschiebung auf der Erdoberfläche von 0.05m aus 300m Flughöhe entsprechen würde. Die Genauigkeit der Translationsparameter liegt bei etwa 0.2m und diejenige der Rotationsparameter α und β bei 0.05° . Die Genauig-

| Korrelationsmatrix: Standardabweichungen auf Hauptdiagonalen Korrelationen > 0.3 auf Nebendiagonalen | | Lasereinbauwinkel Standardabweichungen in [°] dr dp | | Translationsparameter Standardabweichungen in [m] dtx dty dtz | | | Rotationsparameter Standardabweichungen in [°] α β γ | | |
|--|-----|--|-------|---|--|-------|--|-------|---------------|
| Befliegung Harz 24.8.89 | | | | | | | | | |
| Lasereinbauwinkel | dr | 0.011 | | 0.72 | | -0.73 | | | -0.77 |
| | dp | | 0.011 | | | -0.71 | | 0.75 | |
| Translationsparameter | dtx | | | 0.139 | | -0.93 | | | -0.95 |
| | dty | | | | | 0.171 | | -0.98 | |
| | dtz | | | | | | 0.109 | | 0.97 |
| Rotationsparameter | α | | | | | | | 0.045 | |
| | β | | | | | | | | 0.046 |
| | γ | | | | | | | | 0.192 |
| Befliegung Harz 25.8.89 | | | | | | | | | |
| Lasereinbauwinkel | dr | 0.011 | | | | 0.31 | | 0.41 | 0.52 |
| | dp | | 0.010 | | | | | | -0.46 |
| Translationsparameter | dtx | | | 0.182 | | -0.92 | | | -0.95 |
| | dty | | | | | 0.214 | | -0.97 | |
| | dtz | | | | | | 0.145 | | 0.95 |
| Rotationsparameter | α | | | | | | | 0.042 | |
| | β | | | | | | | | 0.046 0.36 |
| | γ | | | | | | | | 0.178 |

Tab. IV.3.3 Stochastische Eigenschaften der geschätzten Kalibrierungsparameter

keit des Rotationsparameters γ , der eine Rotation um die Lotrichtung beschreibt, ist mit einer Größe von 0.19° bzw. 0.18° zwar auffallend hoch, dies wirkt sich jedoch nicht auf die Genauigkeit der Punktbestimmung aus; bei einer Anordnung der GPS-Antenne nahezu in Lotrichtung über dem Lasersensor, wie es bei den Befliegungen im Harz der Fall war, hat die Rotation um γ nur einen geringen Einfluß auf die Koordinatenberechnung.

In den hohen Korrelationen (über 0.9) zwischen den Translationsparametern dtx und dty und den Rotationsparametern β bzw. α macht sich die fehlende kreuzweise Befliegung der Paßpunkte bemerkbar. Die Korrelationen zwischen den Translationsparametern dtx und dtz ist dagegen von der Berechnung im System WGS84 bedingt, wie eine Simulationsstudie im Horizontsystem gezeigt hat, die hier nicht wiedergegeben wird. Dieselbe Ursache hat die hohe Korrelation zwischen dem Translationsparameter dtz und dem Rotationsparameter β . Die Korrelationen geben Auskunft über die Trennbarkeit der verschiedenen Kalibrierungs-

parameter, wenn diese in gleichartiger Weise wirken. Für die Genauigkeitsanalyse der Laser-Profilmessungen können die teilweise sehr hohen Korrelationen aber toleriert werden, da hier nicht die Bestimmbarkeit und Trennbarkeit einzelner Parameter im Vordergrund steht, sondern die Gesamtauswirkung der Systemkalibrierung auf die Genauigkeit der Koordinaten der Laserpunkte.

3.3.4 Ergebnis

Im Ergebnis kann festgehalten werden, daß die Systemkalibrierung eine hochgradige Wirkung auf die Genauigkeit der Laserpunkte ausübt, indem systematische Fehlereinflüsse sehr effizient reduziert werden. Die ungünstige Konfiguration der topographischen Paßpunkte im Zusammenhang mit dem Flugplan bei der Befliegungen im Harz verursachte hohe Korrelationen zwischen einzelnen Kalibrierungsparametern, so daß die Einflüsse dieser Parameter nicht sicher trennbar sind. Auf die Genauigkeit der Laserpunkte hat dies jedoch keinen Einfluß. Die Genauigkeit der Koordinaten der Laserpunkte kann aus den verbleibenden Koordinatendifferenzen der topographischen Paßpunkte nach der Systemkalibrierung geschätzt werden. Dabei erhält man allerdings nur einen oberen Grenzwert, da die Genauigkeit der manuellen Identifizierung und Messung der Paßpunkte nicht berücksichtigt wird. Die Lagekoordinaten der Laserpunkte haben dann eine Genauigkeit von besser als 0.26m (24.8.89) bzw. 0.40m (25.8.89) und die Geländehöhen von besser als 0.20m. Die unterschiedliche Genauigkeit in der Lage und Höhe zeigt den Einfluß der manuellen Messung der Paßpunkte, die in der Höhenkomponente wesentlich sicherer durchgeführt werden kann als in der Lage. Dies erklärt auch den Unterschied in den Lagekoordinaten zwischen den beiden Flugtagen. Für die Laser-Profilmessung kann davon ausgegangen werden, daß die Lagekoordinaten und die Höhen der Laserpunkte mit derselben Genauigkeit gemessen werden. Andererseits ist darauf hinzuweisen, daß für die topographische Geländeaufnahme die Höhengenaugkeit von erstrangigem Interesse ist.

3.4 Photogrammetrische Überprüfung der Höhengenaugkeit der Laserpunkte

3.4.1 Photogrammetrische Kontrollmessungen

Zur unabhängigen photogrammetrischen Überprüfung der Ergebnisse der Laser-Profilbefliegungen im Harz wurde vom Landesverwaltungsamt Niedersachsen Bildmaterial zur Verfügung gestellt. Ein aus 11 Luftbildern bestehender Bildstreifen des Bildfluges Lerbach vom 23.4.1987 beinhaltet das Gebiet der Laser-Profilbefliegung. Die Weitwinkel-Luftaufnahmen haben den Bildmaßstab 1:12500 (Brennweite $f=153.6\text{mm}$, Flughöhe $h=1900\text{m}$) und die übliche Längsüberdeckung von 60%. Aus diesen Angaben läßt sich nach Schwidewsky und Ackermann (1976) die zu erwartende Höhenmeßgenauigkeit nicht-signalisierter Geländepunkte von $\sigma_z=0.1\%h$ zu $\sigma_z=0.19\text{m}$ abschätzen.

Die photogrammetrischen Kontrollmessungen erfolgten im Koordinatensystem der Landesvermessung. Zur Überprüfung wurden die Geländehöhen der Laser-Bodenpunkte mit den photogrammetrisch gemessenen Geländehöhen derselben Punkte verglichen, wobei im analytischen Plotter jeweils die XY-Position der Laser-Profilpunkte angefahren und vom Operateur die Höhe stereoskopisch gemessen wurde. Um den Operateur nicht durch die Ergebnisse der Laser-Profilmessung zu beeinflussen, wurden im analytischen Plotter die Geländehöhen der zu messenden Punkte willkürlich in der Höhe verstellt. Im Prinzip wurde versucht, alle Laser-Bodenpunkte photogrammetrisch zu überprüfen.

3.4.2 Genauigkeit der Geländehöhen

Zur photogrammetrischen Kontrollmessung wurden die als Bodenpunkte klassifizierten Laserpunkte der Befliegung im Harz vom 25.8.89 verwendet. 90% aller Kontrollmessungen befanden sich in Gebieten mit offener Feldlage. In Waldgebieten waren die Laserpunkte größtenteils für den Operateur mangels Sicht zur Geländeoberfläche nicht meßbar. Von den 16246 Laser-Bodenpunkten dieser Befliegung in Feldlage konnten 15055 und von den 4370 Punkten im Waldgebiet 1661 photogrammetrisch nachgemessen werden. Aus den Geländehöhen der Laser-Profilmessung und der photogrammetrischen Kontrollmessung wurden Differenzen

gebildet und daraus der Mittelwert und die Standardabweichung gegenüber dem Mittelwert berechnet. Diese Werte sind unter verschiedenen Gesichtspunkten in Tabelle IV.3.4 zusammengestellt.

| Geländehöhendifferenzen Laser-Profilmessung - photogrammetrische Kontrollmessung | Anzahl der Differenzen | Mittelwert der Differenzen | Standardabweichung gegen Mittelwert |
|--|------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 1) alle gemessene Punkte der Befliegung im Harz vom 25.8.89 | 16 916 | -0.01 m | 0.27 m |
| 2) ohne extreme Differenzen > 0.75 m | 16 716 | -0.02 m | 0.24 m |
| 3) Punkte in Feldlage | 15 055 | -0.03 m | 0.24 m |
| 4) Punkte in Waldgebieten | 1 661 | 0.05 m | 0.27 m |
| 5) Westlicher Teil durchschnittliche Geländeneigungen 15% | 4 769 | -0.09 m | 0.26 m |
| 6) Mittlerer Teil durchschnittliche Geländeneigungen 7% | 11 353 | 0.00 m | 0.23 m |
| 7) Östlicher Teil durchschnittliche Geländeneigungen 28% | 1 443 | 0.03 m | 0.25 m |
| 8) Östlicher Teil Flugrichtung von Ost nach West | 963 | 0.05 m | 0.25 m |
| 9) Östlicher Teil Flugrichtung von West nach Ost | 480 | -0.01 m | 0.25 m |

Tab. IV.3.4 Photogrammetrische Kontrollmessung der Geländehöhen

In Zeile 1) sind Mittelwert und Standardabweichung der Geländehöhendifferenzen von allen überprüften Punkten angegeben. Der Mittelwert der Differenzen zeigt mit seinem Betrag von 0.01m, daß die aus Laser-Profilmessungen abgeleiteten Geländehöhen im Durchschnitt keine signifikanten systematischen Fehler enthalten. Unter 2) sind erneut Mittelwert und Standardabweichung angegeben, nach Elimination von 200 Punkten mit Differenzbeträgen >0.75m. Diese 200 eliminierten Punkte - ihr Anteil beträgt 1% aller Messungen - werden als grobe Fehler betrachtet; die gesetzte Schranke entspricht etwa der dreifachen Standardabweichung. Die Standardabweichung der verbleibenden Differenzen beträgt 0.24m. Daraus kann die Genauigkeit der Geländehöhen der Laserpunkte abgeschätzt werden. Wird die Genauigkeit der photogrammetrischen Kontrollmessungen mit 0.19m angenommen, dann berechnet sich die Genauigkeit der aus Laser-Profilmessungen abgeleiteten Geländehöhen zu 0.15m. Die Genauigkeit der Laserpunkte ist somit höher als die der photogrammetrischen Vergleichsmessung. Die Höhenmeßgenauigkeit von 0.15m bestätigt die Erwartungen, die nach der Auswertung der Systemkalibrierung (IV.3.3) in die Genauigkeit der Geländehöhen aus Laser-Profilmessungen gesetzt wurde.

3.4.3 Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung

Nach dem Nachweis der ausgezeichneten durchschnittlichen Höhengenaugigkeit der Laserpunkte wird nun untersucht, ob sich eine Abhängigkeit der Höhendifferenzen von der Bodenbedeckung nachweisen läßt. In Zeile 3) und 4) der Tabelle IV.3.4 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen von Punkten in Feldlage und in Waldgebieten einander gegenübergestellt. Der Vergleich von Feldlage und Waldgebieten zeigt eine

nur geringfügig höhere Standardabweichung der Differenzen in Waldgebieten. Auffallend ist das um 0,08m höhere mittlere Niveau der Lasermessungen in Waldgebieten gegenüber der Feldlage. Als Ursache könnten die vor allem in Laubwäldern anzutreffenden, den Waldboden dicht bedeckenden Vegetationsformen in Betracht kommen. Bei dichtem, niedrigem Bewuchs (Bewuchshöhen in der Größenordnung der Meßgenauigkeit) kann bei der automatischen Bearbeitung der Profilmessungen nicht unterschieden werden, ob sich die Lasermessungen auf den Waldboden oder auf diese niedrige Vegetationsdecke beziehen.

3.4.4 Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit von der Geländeneigung

Neben der Bodenbedeckung könnte auch die Geländeneigung einen Einfluß auf die Höhengenaugigkeit der Laserpunkte haben, und zwar im Zusammenhang mit der Ungenauigkeit der Bestimmung der Strahlrichtung als auch mit dem Durchmesser des Laserstrahls. Systematische Fehlereinflüsse, die in der Systemkalibrierung nicht vollständig modelliert wurden, müßten sich in erster Linie in den steilen Hanglagen auswirken. Das Gelände der Befliegung Harz wurde deshalb in drei charakteristische Teilbereiche eingeteilt (s. Höhenlinienplan Abb. IV.4.2). Im westlichen Teil verläuft eine Hügelkette; das Gelände steigt von 150m über NN auf ca. 290m an und fällt wieder auf ca. 200m ab. Die typischen Geländeneigungen betragen hier 15%. Den mittleren Teil bildet eine ebene Fläche mit etwa 180m Geländehöhe und einer Geländeneigung von durchschnittlich 7%. Der östliche Teil ist durch den steilen Anstieg in den Harz bis auf eine Geländehöhe von 500m geprägt. Die Geländeneigung beträgt durchschnittlich 28%. Geländeneigung und Bodenbedeckung sind allerdings miteinander korreliert: im westlichen Teil ist etwa die Hälfte der Fläche, im östlichen Teil bis zu 100% der Fläche mit Wald bedeckt, dagegen liegt der Waldanteil im mittleren Teil bei nur 2%. Die Ergebnisse der Unterscheidung nach Geländeneigung und nach Bodenbedeckung lassen sich deshalb nicht vollständig voneinander trennen.

In den Zeilen 5) bis 7) der Tabelle IV.3.4 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Höhendifferenzen für die drei Teilgebiete getrennt ausgewiesen. Auffallend ist die Veränderung des Mittelwertes von -0,09m im westlichen Teil auf +0,03m im östlichen Teil; im mittleren, flachen Teilgebiet sind keine systematischen Einflüsse auf die Höhen nachweisbar. Zur Erklärung der Veränderung des Mittelwertes der Differenzen ist ein systematischer Fehlereinfluß aus der photogrammetrischen Blockausgleichung, der sich in den photogrammetrischen Vergleichshöhen niederschlägt, als wahrscheinlich anzunehmen, wenn die Flughöhe von 1900m in Betracht gezogen wird. Systematische Fehler der Laser-Profilmessungen scheiden wegen der wechselnden Flugrichtungen als Erklärung praktisch aus.

Vor allem im steilen östlichen Teilgebiet müßten sich eventuelle, von der Geländeneigung abhängige systematische Höhenfehler der Laser-Profilmessung im Mittelwert der Differenzen niederschlagen. Da dies nicht der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, daß durch die Systemkalibrierung sämtliche systematisch wirkenden Fehlerkomponenten hinreichend erfaßt wurden, die Ergebnisse somit als frei von systematischen Höhenfehlern angesehen werden können. Die Tabelle IV.3.4 zeigt weiterhin, daß durch die in der Standardabweichung der Höhendifferenzen zum Ausdruck kommende Höhengenaugigkeit der Laser-Profilmessung keine signifikante Abhängigkeit von der Geländeneigung zeigt. Es bestätigt sich lediglich der schon festgestellte geringfügige Genauigkeitsunterschied der Laserpunkte in Feldlage und in Waldlage.

3.4.5 Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit von der Flugrichtung

Die gleichmäßig von Westen nach Osten ansteigende Geländeneigung im östlichen Teil, die sich in allen Profilen in gleicher Weise zeigt, bietet sich zur Untersuchung der Höhengenaugigkeit in Abhängigkeit von der Flugrichtung an. Mögliche Fehlerkomponenten, die sich bei wechselnder Flugrichtung auswirken müßten, könnten von den Kalibrierungsparameter (s. II.4.3.3), Lasereinbauwinkel und räumliche Exzentrizität zwischen Laser und GPS-Antenne im Flugzeug, verursacht werden.

In Zeile 8) der Tabelle IV.3.4 sind alle Höhendifferenzen der Laserpunkte aus Profilen, die von Ost nach West geflogen wurden, und in Zeile 9) diejenigen in umgekehrter Flugrichtung, zusammengestellt. Die Mittelwerte der Differenzen unterscheiden sich um 0,06m. In diesem Betrag zeigt sich eine ungenaue Bestimmung der angesprochenen Kalibrierungsparameter. Dies führt jedoch zu keinen Konsequenzen, da im Gelände mit durchschnittlichen Geländeneigungen von 28% Höhendifferenzen in dieser Größenordnung toleriert werden können.

3.4.6 Zeitliche Abhängigkeit der Höhengenaugkeit

Eine weitere Untersuchung beschäftigt sich mit der Frage nach einer möglichen zeitlichen Abhängigkeit der Geländehöhenunterschieden. Da bei der Systemkalibrierung keine zeitabhängigen Kalibrierungsparameter berücksichtigt wurden, andererseits aber von zeitabhängigen Driften in den GPS-Positionen und in den INS-Neigungen ausgegangen werden muß, ist diese Fragestellung von besonderem Interesse.

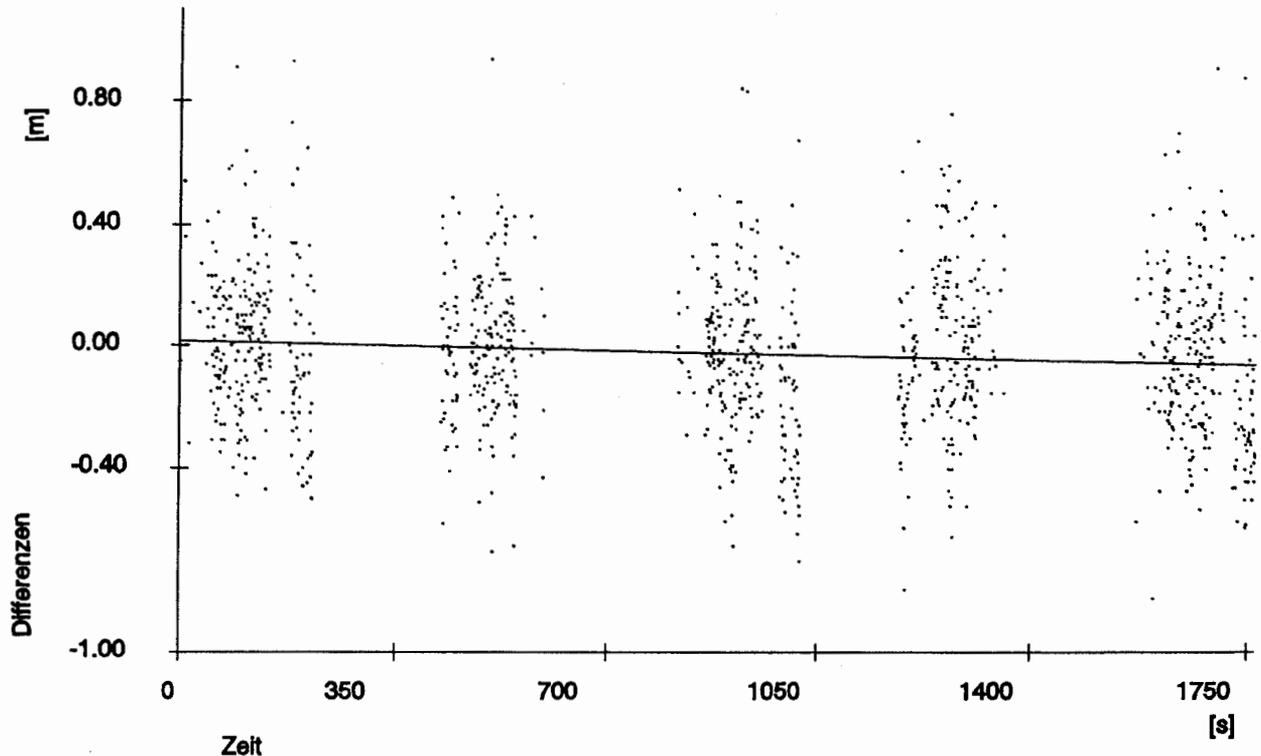


Abb. IV.3.2 Zeitliche Abhängigkeit der Differenzen

In Abbildung IV.3.2 sind die Höhendifferenzen (Geländehöhe aus Laser-Profilmessung minus Geländehöhe aus photogrammetrischer Kontrollmessung) über der Zeitachse aufgetragen. Die Anzahl der Punkte mit Differenzen zwischen -0.25m und 0.25m wurden für die Abbildung zehnfach ausgedünnt. Die Regressionsanalyse liefert einen Regressionskoeffizienten $a = -0.394 \cdot 10^{-4}$, der einer Driftrate von 0.14m/h entspricht. Der geschätzte Regressionskoeffizient ist mit über 99% Wahrscheinlichkeit signifikant (Test des Regressionskoeffizienten nach Kreyszig 1979). Durch die Berücksichtigung dieser Drift verringert sich die Standardabweichung der Höhendifferenzen nur unwesentlich um den nicht-signifikanten Betrag von 0.001m . Die Größenordnung der zeitabhängigen Driftrate gibt keinen Anlaß, bei der Auswertung der Befliegungen im Harz die Systemkalibrierung mit zeitabhängigen Parametern durchzuführen. Da die Driftrate aber signifikant nachweisbar ist, muß in Zukunft für längere, über mehrere Stunden andauernde Befliegungen ein zeitabhängiger Ansatz in die Systemkalibrierung eingebracht werden.

3.5 Tachymetrische Überprüfung der Höhengenaugkeit der Laserpunkte

3.5.1 Terrestrische Kontrollmessungen

Neben den photogrammetrischen Kontrollmessungen wurden einige Laserpunkte der Befliegung im Harz einer unabhängigen terrestrischen Kontrollmessung unterzogen. Die terrestrischen Kontrollmessungen haben gegenüber der Photogrammetrie den Vorteil, daß sie direkt in der Örtlichkeit vorgenommen werden; neben der Überprüfung der Höhenmeßgenauigkeit kann damit an Ort und Stelle zweifelsfrei entschieden werden,

ob sich die Laserpunkte tatsächlich auf die Erdoberfläche oder z.B. auf niederen Bodenbewuchs beziehen, der auch in den photogrammetrischen Luftbildern nicht immer erkennbar ist. Allerdings sind die terrestrischen Kontrollmessungen, wenn sie für die Kontrolle der hochgenauen Laser-Profilmessungen geeignet sein sollen, mit einem erheblichen Aufwand im Gelände verbunden. Die Schwierigkeiten, die sich gerade in den hauptsächlich interessierenden bewaldeten Hanglagen stellen, können hier nur stichwortartig angedeutet werden: Beschaffen von Koordinaten der Instrumentenstandorte, Herstellen von Sichtverbindungen, Absteckung in steilem Gelände. Diese Bedingungen machen deutlich, daß die terrestrischen Kontrollmessungen bei weitem nicht in demselben Umfang durchgeführt werden können, wie dies bei den photogrammetrischen Kontrollmessungen der Fall ist.

Vom Landesverwaltungsamt Niedersachsen - Landesvermessung Dezernat Topographie - wurden im Herbst 1990 in zwei Teilgebieten, die im folgenden als Feldlage und Waldgebiet bezeichnet werden, terrestrische Kontrollmessungen durchgeführt. Nach Absteckung der zu kontrollierenden Laserpunkte im Gelände wurden die Geländehöhen dieser Punkte gemessen und mit den Höhen aus der Laser-Profilmessung verglichen. Die Absteckungen und Kontrollmessungen wurden mit einem elektro-optischen Tachymeter Zeiss Elta 4 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle IV.3.5 zusammengefaßt und werden im folgenden, für Feldlage und Waldgebiet getrennt, kommentiert.

| Geländehöhenunterschiede Laser-Profilmessung - terrestrische Kontrollmessung | Anzahl der Differenzen | Mittelwert der Differenzen | Standardabweichung gegen Mittelwert |
|--|------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 1) Punkte in Feldlage | 121 | 0.00 m | 0.14 m |
| 2) Punkte im Waldgebiet | 111 | 0.23 m | 0.30 m |
| Untersuchung der Geländehöhenunterschiede in Waldgebieten ohne Bodenbewuchs | | | |
| 3) Hochwald ohne Bodenbewuchs | 30 | 0.06 m | 0.19 m |
| 4) Weg, Wiese ohne Bodenbewuchs | 20 | 0.08 m | 0.20 m |
| Untersuchung der Geländehöhenunterschiede in Waldgebieten mit Bodenbewuchs | | | |
| 5) Hochwald mit Bodenbewuchs | 32 | 0.30 m | 0.30 m |
| 6) Schonung mit Bodenbewuchs | 18 | 0.42 m | 0.27 m |
| 7) Ohne Baumbestand mit Bodenbewuchs | 11 | 0.72 m | 0.34 m |

Tab. IV.3.5 Tachymetrische Kontrollmessung der Geländehöhen

3.5.2 Höhengenaugigkeit in Feldlage

Die Kontrollmessungen im Teilgebiet der Feldlage liegen im fast ebenen, mittleren Bereich der Befliegung Harz auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche. Vom Dezernat Topographie wurden 122 Punkte in 2 Laserprofilen zur Überprüfung ausgewählt. Die Lagekoordinaten der Laserpunkte konnten mit einer mittleren Abweichung von 0.03m in die Örtlichkeit übertragen werden. In Zeile 1) der Tabelle IV.3.5 sind Mittelwert und Standardabweichung der Höhendifferenzen aus 121 nachgemessenen Punkten angegeben. Ein Punkt mit einer Höhendifferenz von 1.10m, der sich in einem Graben befindet, wurde dabei als Ausreißer betrachtet.

Der Mittelwert der Differenzen von 0.00m zeigt, daß bei der Laser-Profilmessung, zumindest im mittleren Teil der Befliegung Harz, keine systematischen Höhenfehler auftraten. Durch die Standardabweichung der Differenzen von 0.14m wird die hohe Genauigkeit der Koordinaten aus der Laser-Profilmessung bestätigt; dieser Wert deckt sich mit der Genauigkeitsschätzung, die sich aus den photogrammetrischen Kontrollmessungen ergeben hat.

3.5.3 Höhengenaugigkeit im Waldgebiet

Das zweite Gebiet der terrestrischen Kontrollmessungen befindet sich im östlichen Teil der Befliegung, im steilen und bewaldeten Anstieg in den Harz mit einer durchschnittlichen Geländeneigung von 28%. Hier wurden 130 Punkte aus 5 Laserprofilen ausgewählt, die mit einer mittleren Abweichung von 0.1m im Gelände abgesteckt werden konnten. Von den 130 gemessenen Punkten wurden 111 zur Genauigkeitsuntersuchung herangezogen. An den übrigen 19 Punkten wurde im Gelände festgestellt, daß sie sich nicht auf den Waldboden sondern auf die dichte Bepflanzung einer Fichtenschonung beziehen. Dieselbe Schonung ist bereits im Zusammenhang mit der Untersuchung der Durchdringungsrate in IV.2.2.5 (s.a. Abbildung IV.2.2) in Erscheinung getreten.

Aus allen 111 Punkten wurde ein Mittelwert der Differenzen von 0.23m und eine Standardabweichung von 0.30m ermittelt, wie Zeile 2) in Tabelle IV.3.5 ausweist. Diese Werte liegen deutlich höher als bei den photogrammetrischen Kontrollmessungen; insbesondere fällt der Mittelwert auf, der nach Tabelle IV.3.4 im Durchschnitt über alle Waldgebiete bei 0.05m und im östlichen Teil der Befliegung bei 0.03m lag. Wie die weitere Analyse zeigt, liegt die Ursache hierfür darin, daß ein Teil der terrestrisch überprüften Laserpunkte an Stellen mit dichtem Bodenbewuchs lagen.

Von den Mitarbeitern des Dezernats Topographie wurde während der örtlichen Messungen eine Beschreibung des Waldes und des Bodenbewuchses vorgenommen, so daß eine genauere Analyse der bei der terrestrischen Kontrolle festgestellten Höhendifferenzen möglich ist. Danach wurden die überprüften Laserpunkte nach dem Bewuchs in fünf Klassen eingeteilt, wobei der Umfang der Stichproben allerdings sehr klein ist. Die Ergebnisse finden sich in den Zeilen 3) bis 7) der Tabelle IV.3.5.

Der Einfluß des Bodenbewuchses - Farn, hohes Gras, Unterholz - wird beim Vergleich der Mittelwerte der Höhendifferenzen der Klassen ohne Bodenbewuchs in den Zeilen 3) und 4) mit denen der Klassen mit Bodenbewuchs in den Zeilen 5) bis 7) deutlich. Sowohl im Hochwald (Zeile 3) als auch im offenen Gelände ohne Bodenbewuchs (Zeile 4) sind die Mittelwerte mit 0.06m bzw. 0.08m und auch die Standardabweichungen mit 0.19m bzw. 0.20m nur unwesentlich größer als in der offenen Feldlage. Systematische Fehler des Laser-Profilmeßsystems sind hier nicht nachweisbar; das bedeutet auch, daß die in den Zeilen 5) bis 7) ausgewiesenen Mittelwerte der Differenzen ausschließlich auf den an diesen Stellen vorhandenen Bodenbewuchs zurückzuführen sind. Die Laserpunkte wurden über den Gebieten mit Bodenbewuchs durchschnittlich um 0.41m zu hoch gemessen, und auch die Standardabweichung der Differenzen ist deutlich erhöht. Der Mittelwert der Differenzen in einer Lichtung mit dichtem Bodenbewuchs (Zeile 7) ist überdurchschnittlich hoch; die geringe Anzahl der gemessenen Punkte in diesem Bereich erlaubt jedoch keine statistisch gesicherte Aussage. Für die während der Befliegung im August vorherrschenden dichten Vegetationsverhältnisse konnte ein anderes Ergebnis bezüglich des Einflusses des Bodenbewuchses eigentlich nicht erwartet werden. Auffallend ist jedoch, daß aus der großen Anzahl der photogrammetrisch gemessenen Punkte auf keinen so starken Einfluß des Bodenbewuchses geschlossen werden konnte. Die Frage, wie weit sich durch eine Laser-Profilbefliegung im Winter bei minimalem Vegetationsstand der Einfluß des Bodenbewuchses reduzieren läßt, muß durch weitere empirische Untersuchungen beantwortet werden.

3.6 Ergebnis

Gegenstand der empirischen Untersuchungen dieses Kapitels war die Genauigkeitsanalyse der Laser-Profilmessung. Systematische Fehler, die sich in den Koordinaten der Laserpunkte zeigen, könnten zunächst durch verbleibende Restfehler in der geodätischen Datumstransformation (von WGS84 auf das Bezugssystem der Landesvermessung einschließlich Höhenübertragung) verursacht werden. In Abschnitt 3.2 wurde gezeigt, daß bei der Laser-Profilbefliegung Harz keine Fehlereffekte der Datumstransformation festgestellt

werden konnten. Die Parameter der geodätischen Datumstransformation können mit wenig Aufwand (5 Paßpunkte) mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Wird auf eine gleichmäßige Verteilung der Paßpunkte rings um das zu befliegende Gebiet geachtet, dann sind für die Laserpunkte keine systematischen Fehler-effekte von der Datumstransformation her zu befürchten.

In Abschnitt 3.3 wurde die Systemkalibrierung für die Befliegungen im Harz im Zuge der normalen Profilbefliegungen durchgeführt, ohne auf die für einen Kalibrierungsflug geforderten, speziellen Flugmanöver zurückgreifen zu können. Die hohe Wirkung der Systemkalibrierung zeigt sich in der Reduktion der Streuungen der Koordinatendifferenzen an den topographischen Paßpunkten auf 2% ihres Wertes vor der Kalibrierung. Die photogrammetrische und terrestrische Überprüfung der Geländehöhen aus Laser-Profilmessungen hat gezeigt, daß nach durchgeführter Systemkalibrierung die Laserpunkte keine systematischen Fehler mehr aufweisen. Auf eine Modellierung zeitabhängiger Kalibrierungsparameter konnte bei den relativ kurzen Befliegungen im Harz verzichtet werden; bei längeren Befliegungen mit mehr als einstündiger Dauer muß jedoch eine zeitabhängige Drift der Kalibrierungsparameter berücksichtigt werden.

Aus der großen Zahl der photogrammetrischen und der terrestrischen Kontrollmessungen konnte eine sichere Genauigkeitsschätzung der aus Laser-Profilmessungen abgeleiteten Geländehöhen erfolgen. Die nachgewiesene Genauigkeit der Geländehöhen im offenen Gelände von $\sigma_h=0.15\text{m}$ zeigt, welches Genauigkeitsniveau mit dem Laser-Profilmeßsystem erreicht wird.

In Waldgebieten ist in den meisten Fällen die Höhengenaugkeit mit systematischen Höhenfehlern $<0.1\text{m}$ und mit Standardabweichungen von $\sigma_h=0.2\text{m}$ nur unwesentlich geringer. Bei niedrigem Bodenbewuchs dagegen, der in den Laserprofilen nicht ohne weiteres erkannt wird, können systematische Höhenfehler im Bereich von mehreren Dezimetern auftreten und die abgeleiteten Bodenprofile entsprechend verfälscht sein. In zukünftigen Untersuchungen ist deshalb zu klären, ob durch eine höhere Laser-Meßfrequenz und durch Winterbefliegung derartige Fehler vermieden oder zumindest reduziert werden können.

4. Digitales Höhenmodell aus Laser-Profilmessungen

4.1 Vorbemerkungen

Im Digitalen Höhenmodell (DHM) werden die Informationen über die Topographie, das heißt die Form der Geländeoberfläche als Raster in digitaler Form dargestellt und gespeichert. Höhenlinienkarten, perspektivische und andere graphische Darstellungen sind Folgeprodukte, die aus dem DHM jederzeit und in jeder gewünschten Form abgeleitet werden können. Das DHM stellt somit zunächst das Endprodukt der topographischen Geländeaufnahme dar, seine Berechnung ist der letzte Schritt bei der Auswertung von Laser-Profilmessungen.

Auf die Verfahren zur Berechnung eines DHM wird in dieser Arbeit nicht eingegangen; es kann auf eine große Anzahl vorhandener Verfahren und Rechenprogramme zurückgegriffen werden. Dagegen müssen einige Aspekte angesprochen werden, die die Genauigkeit eines aus Laser-Profilmessungen abgeleiteten DHM beeinflussen. Die Frage nach der Genauigkeit eines DHM zielt darauf ab, mit welcher Genauigkeit die interpolierten Rasterpunkte und die Rastermaschen das Gelände repräsentieren. Diese Repräsentationsgenauigkeit ist weitgehend unabhängig von der Genauigkeit der gemessenen Punkte und der Interpolationsmethode (Ackermann 1980). Dagegen spielen die räumliche Dichte und Verteilung der gemessenen Punkte im Zusammenhang mit der Morphologie des Geländes die entscheidende Rolle. Auf Untersuchungen zur Bestimmung der Repräsentationsgenauigkeit in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, wie Topographie und Aufnahmemethode, kann hier nicht weiter eingegangen werden. Im folgenden sollen lediglich zwei Gesichtspunkte angesprochen werden, die sich auf die Genauigkeit eines DHM aus Laser-Profilmessungen wesentlich auswirken können.

- Flächendeckung

Die Laser-Profilmessung liefert zunächst Geländepunkte entlang des geflogenen Profils. Eine Flächendeckung wird durch die Befliegung mehrerer, paralleler Profile erzielt. Da der Abstand zwischen den Geländepunkten innerhalb eines Profils in der Regel wesentlich kleiner sein wird als der Abstand

zwischen den Profilen, bestimmt der Profilverabstand als ungünstigste Größe die Genauigkeit des DHM. Bei der Planung einer Laser-Profilbefliegung ist der Profilverabstand die entscheidende Planungsgröße.

- Forminformation

Die Geländepunkte aus der Laser-Profilmessung gehen nur als sogenannte Massenpunkte in die Berechnung des DHM ein, das heißt sie bringen keine spezielle Information über besondere Strukturen der Geländeoberfläche ein. Die Genauigkeit und Qualität des DHM läßt sich generell durch die Berücksichtigung besonderer Strukturlinien wie Bruchkanten oder Formlinien wesentlich steigern. Bei der Laser-Profilmessung werden die quer zur Profilverichtung verlaufenden Geländeformen, die von den Profilen geschnitten werden, verhältnismäßig gut erfaßt. Durch eine spezielle Gewichtung einzelner markanter Punkte z.B. an Knickstellen des Geländeprofiles könnten derartige Geländeformen besonders berücksichtigt bzw. hervorgehoben werden. Dagegen ist die Erfassung von parallel zur Profilverichtung, das heißt zwischen den Profilen verlaufenden Geländeformen kaum möglich, insbesondere von engen Talformen oder Kammlinien zwischen den Laserprofilen. Eine gewisse Abhilfe bietet sich durch zusätzliche Laser-Profilbefliegungen quer zur ursprünglichen Profilverichtung an. Allgemein muß im jeweiligen Einzelfall entschieden werden, ob in steilem Gelände eine zusätzliche terrestrische oder photogrammetrische Aufnahme von einzelnen Strukturlinien notwendig ist, um die geforderte Genauigkeit und morphologische Detailtreue des DHM zu gewährleisten.

In diesem Kapitel wird ein DHM aus den Laser-Profilbefliegungen im Harz abgeleitet und dessen Genauigkeit unter verschiedenen Aspekten untersucht. In Abschnitt 4.2 sind die Eingabedaten und die Berechnung des DHM beschrieben. In Abschnitt 4.3 wird die Genauigkeit des berechneten DHM in zwei Varianten untersucht, wobei der Frage nach der Notwendigkeit zusätzlicher Forminformation nachgegangen wird. Zunächst beschreibt der Abschnitt 4.3.1 die unabhängig von der Laser-Profilmessung durchgeführten Kontrollmessungen mit denen die Genauigkeit des ausschließlich aus Laser-Profilmessungen abgeleiteten DHM im Abschnitt 4.3.2 überprüft wird. Diese Ergebnisse werden in Abschnitt 4.3.3 einem DHM gegenübergestellt, zu dessen Berechnung zusätzlich gemessene Strukturlinien eingeführt wurden. Abschließend werden die Ergebnisse in 4.4 zusammengefaßt und bewertet.

4.2 DHM aus der Laser-Profilbefliegung im Harz 1989

4.2.1 Beschreibung der Eingabedaten

Das DHM wird aus den Geländepunkten, die mit den in Teil III behandelten Methoden aus den Laser-Profilpunkten abgeleitet wurden, berechnet. Der wesentliche Vorteil der Verwendung von modellierten Geländeprofilen gegenüber der Verwendung der direkt gemessenen Bodenpunkte als Eingabedaten für das DHM ist die gleichmäßige Verteilung der Punkte innerhalb der geglätteten Geländeprofile. Die Laserprofile wurden in überlappenden Teilprofilen von jeweils 900m Länge modelliert. Die Länge der morphologischen Operatoren zur Beschaffung der Näherungswerte für die ARI-Modellierung betrug 125m. Nach der ARI-Modellierung hatten die prädiagnostierten Geländeprofilpunkte einen regelmäßigen Punktabstand von 1.8m. In die Berechnung des DHM wurde jedoch nur ein durch eine Reduktion um den Faktor 8 ausgedünnter Datensatz eingeführt. An Stellen, die durch ihre Prädiktionsfehler bei der Modellierung aufgefallen sind, wurde nicht ausgedünnt, um eine möglichst gute Erfassung der strukturell auffälligen Geländestellen zu gewährleisten. Der mittlere Punktabstand auf dem reduzierten Geländeprofil

| Eingabedaten für DHM Harz | Befliegung vom 24.8.89 | Befliegung vom 25.8.89 | Befliegung Harz insgesamt |
|--|------------------------|------------------------|---------------------------|
| Anzahl Laserpunkte | 66 009 | 31 946 | 97 955 |
| Anzahl Geländeprofile | 10 | 5 | 15 |
| Anzahl Geländepunkte nach Reduktion mit Faktor 8 | 8 495 | 4 097 | 12 592 |
| Mittlerer Punktabstand | 14.1 m | 14.0 m | 14.1 m |

Tab. IV.4.1 Eingabedaten zur DHM-Berechnung Harz

belieft sich schließlich auf 14m. Das DHM wurde aus den Geländeprofilen beider Befliegungen im Harz vom 24. und 25.8.1989 abgeleitet. Einige Angaben zu den Eingabedaten sind in Tabelle IV.4.1 zusammengestellt.

Die Art der Flächendeckung ist durch den geplanten bzw. den tatsächlichen Abstand zwischen den Geländeprofilen und seine Variation charakterisiert. Die Flugplanung sah für die Befliegungen im Harz für jeden Flugtag einen Profilabstand von 100m vor, wobei die Profile des zweiten Tages im gleichen Gebiet um 50m gegenüber den Profilen des ersten Tages versetzt waren. In Tabelle IV.4.2 sind die tatsächlich erzielten Navigationsergebnisse dargelegt. Die Streuung der Lagekoordinaten der Geländepunkte und die mittleren Abstände der Geländeprofile wurden in Bezug auf die jeweiligen Regressionsgeraden der Profile berechnet. Der Vergleich mit den Sollprofilen ist hier nicht sinnvoll, da die Flugnavigation nicht im Bezugssystem der Landesvermessung, sondern in einem topozentrischen am WGS84 ausgerichteten Koordinatensystem erfolgt war. Die mittlere Streuung der Geländepunkte gegen die Regressionsgeraden von 8.4m veranschaulicht die hohe Genauigkeit der Flugnavigation. Da die Befliegung am 25.8.1989 wegen schlechter Witterung nach 5 Profilen abgebrochen werden mußte, liegt keine vollständige Überdeckung des Geländes mit einem gleichmäßig dichten Profilabstand vor. Die Genauigkeitsuntersuchungen, die in den nachfolgenden Abschnitten analysiert und in den Tabellen IV.4.3 und IV.4.4 dargelegt werden, beschränken sich daher auf das Gebiet zwischen dem 2. und 7. Profil vom 24.8.89, das von Profilen mit einem mittleren Abstand von 50m überdeckt ist. Allerdings wurde das DHM über den gesamten Befliegungsbereich berechnet und ist in den nachfolgenden Abbildungen stets vollständig dargestellt.

| Profil Anordnung nach aufsteigender Hoch- Koordinate | Mittlere Quer- abweichung der Profilpunkte gegen Regres- sionsgerade | Mittlerer Abstand zum nachfolgenden Profil | |
|--|---|---|--------|
| | | Soll | Ist |
| 24.8. / 1 | 5.6m | 100m | 108.3m |
| 24.8. / 2 | 8.4m | 50m | 32.7m |
| 25.8. / 1 | 10.1m | 50m | 67.1m |
| 24.8. / 3 | 5.7m | 50m | 44.7m |
| 25.8. / 2 | 7.7m | 50m | 57.3m |
| 24.8. / 4 | 13.6m | 50m | 32.9m |
| 25.8. / 3 | 9.7m | 50m | 67.8m |
| 24.8. / 5 | 6.0m | 50m | 43.9m |
| 25.8. / 4 | 9.8m | 50m | 64.0m |
| 24.8. / 6 | 7.6m | 50m | 24.7m |
| 25.8. / 5 | 10.5m | 50m | 67.9m |
| 24.8. / 7 | 6.6m | 100m | 105.3m |
| 24.8. / 8 | 7.3m | 100m | 93.5m |
| 24.8. / 9 | 6.6m | 100m | 113.0m |
| 24.8. / 10 | 5.8m | | |
| Mittel aus allen Profilen | 8.4m | | 65.9m |
| Mittel aus den 50m-Profilen | 9.0m | | 50.3m |

Tab. IV.4.2 Flächendeckung durch Geländeprofile

Abbildung IV.4.1 zeigt die Geländeprofile, die für die Ableitung des DHM insgesamt verwendet wurden. In dieser und den nachfolgenden Abbildungen ist das gesamte Gebiet jeweils in drei aneinander anschließende Teile unterteilt, die als westlicher, mittlerer und östlicher Teil bezeichnet werden. In diesen drei Regionen unterscheiden sich die morphologischen Geländeformen in charakteristischer Weise, wie bereits im Abschnitt IV.3.4.4 erläutert wurde und wie die Abbildungen IV.4.2, IV.1.6 und IV.1.7 verdeutlichen.

4.2.2 Berechnung des DHM

Die Berechnung des DHM erfolgte mit dem Programmsystem SCOP der INPHO GmbH Stuttgart. Dieses Programm interpoliert die Geländehöhen in einem regelmäßigen Raster; die Rasterweite wurde zu 20m

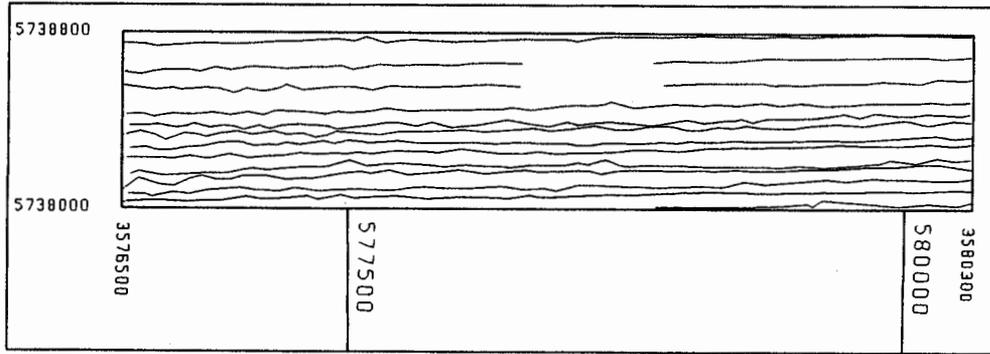
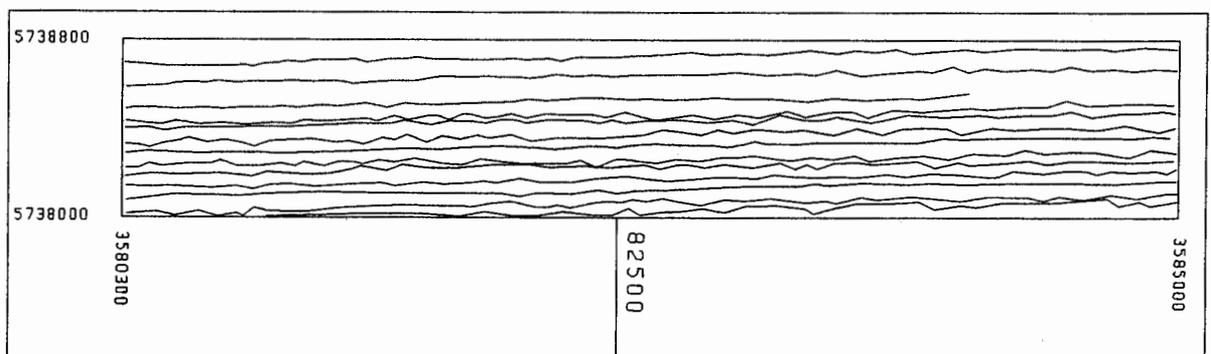
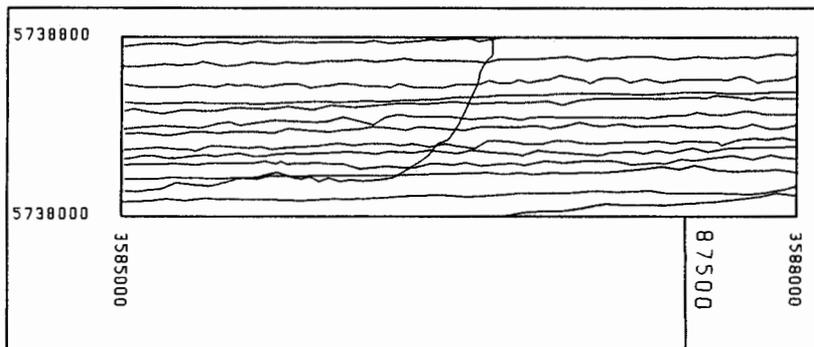
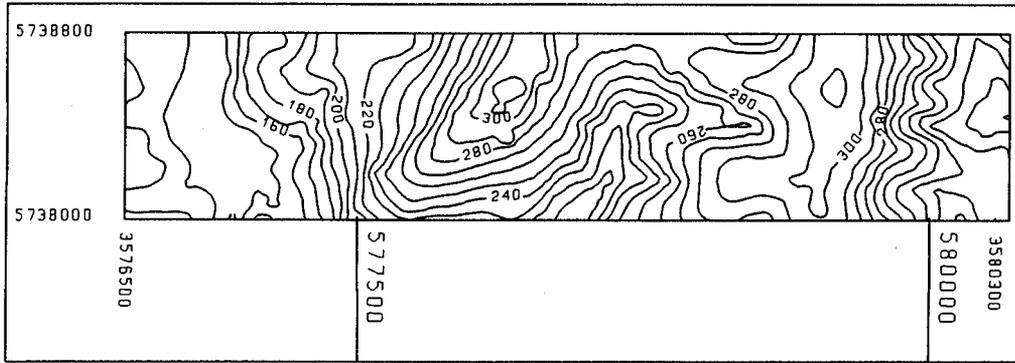
**Westlicher Teil****Mittlerer Teil****Östlicher Teil**

Abb. IV.4.1 Eingabedaten für DHM-Berechnung
Geländeprofile der Befliegungen im Harz

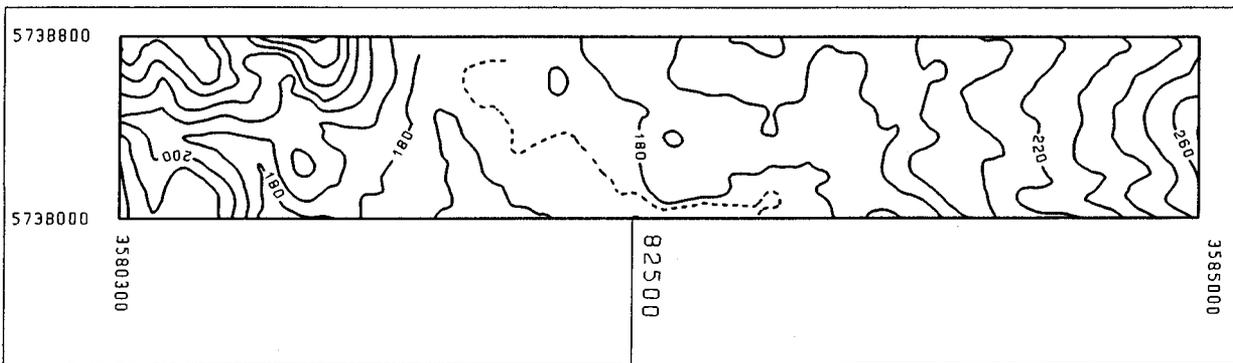
gewählt. Der mittlere Filterbetrag für die eingegebenen Geländehöhen ergab sich bei der Interpolation zu 0.12m. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Geländepunkte bereits durch die ARI-Modellierung einer Filterung unterzogen waren, die den Anteil des Meßrauschens vorweg eliminiert hat.

Die Abbildungen IV.4.2 zeigen den aus dem DHM abgeleiteten Höhenlinienplan. Die Höhenlinien sind mit Äquidistanz 10m gezeichnet, lediglich im ebenen Bereich des mittleren Teils finden sich zusätzliche, gestrichelt wiedergegebene 5m-Höhenlinien. Aus der Betrachtung des Höhenlinienbildes kann nicht auf etwaige

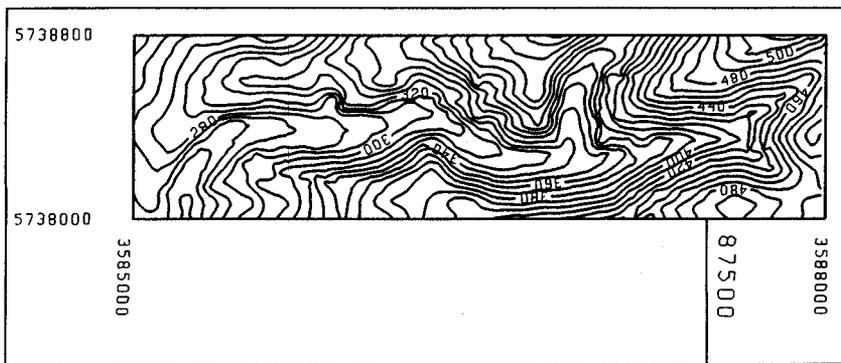
Mängel des DHM geschlossen werden. Insbesondere sind Einflüsse, die von der profilweisen Datenerfassung herrühren könnten, nicht erkennbar.



Westlicher Teil



Mittlerer Teil



Östlicher Teil

Abb. IV.4.2 Höhenlinienplan
DHM aus Laser-Profilbefliegung im Harz

4.3 Genauigkeitsuntersuchung des Digitalen Höhenmodells

4.3.1 Kontrollmessungen

Die Höhengenaugkeit, mit der die Gelände­fläche durch das DHM repräsentiert wird, wurde durch unabhängige photogrammetrische und terrestrische Kontrollmessungen überprüft. Dazu wurden über die Gelände­fläche regelmäßige Punktraster gelegt, deren Geländehöhen terrestrisch bzw. photogrammetrisch mit Hilfe des Bildmaterials vom 23.4.1987 (s. IV.3.4.1) gemessen wurden. Die Lage der Vergleichspunkte ist unabhängig von der Lage der Punkte, die zur Ableitung des DHM dienten. Sie fallen auch nicht mit den interpolierten Rasterpunkten des DHM zusammen. Die an den Vergleichspunkten photogrammetrisch oder terrestrisch gemessenen Geländehöhen, die als vergleichsweise fehlerfrei betrachtet werden können, wurden jeweils mit der aus dem DHM interpolierten Höhe der identischen Punkte verglichen. Die so erhaltenen Höhendifferenzen stellen die Höhengenaugkeit des DHM dar.

Zur Überprüfung des DHM Harz standen zwei verschiedene Datensätze zur Verfügung. In beiden Fällen wurde ein regelmäßiges Raster von Vergleichspunkten zugrunde gelegt. Bei Punkten in Waldgebieten, die photogrammetrisch nicht meßbar waren, wurde in unmittelbarer Nähe der Rasterpunkte versucht eine Kontrollmessung vorzunehmen, oder der Punkt wurde übergangen, falls dies ebenfalls nicht möglich war.

- Das Dezernat Topographie der niedersächsischen Landesvermessungsbehörde stellte Kontrollmessungen in einem regelmäßigen, quadratischen Raster mit einer Rasterweite von 35m zur Verfügung. Diese Messungen überdecken die gesamte beflogene Gelände­fläche. Insgesamt umfaßt dieser Datensatz 6925 Punkte, wovon 4079 Punkte, die im Bereich des DHM mit 50m Profilabstand liegen, für die weitere Untersuchungen verwendet wurden.
- In 5 ausgewählten photogrammetrischen Luftbildpaaren wurden vom Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart Geländehöhen in einem regelmäßigen Raster von 40m Rasterweite gemessen. Dazu wurde das in Abschnitt IV.3.4 erwähnte Bildmaterial verwendet, so daß mit einer Genauigkeit der photogrammetrisch gemessenen Geländehöhen von etwa 0.2m gerechnet werden kann. Im dicht beflogenen Bereich mit 50m Profilabstand wurden 1026 Punkte gemessen.

In den folgenden Genauigkeitsuntersuchungen wird keine Unterscheidung zwischen diesen beiden Datensätzen gemacht, da die getrennte Auswertung keine signifikante Unterschiede ergaben.

4.3.2 DHM aus Laser-Profilmessungen

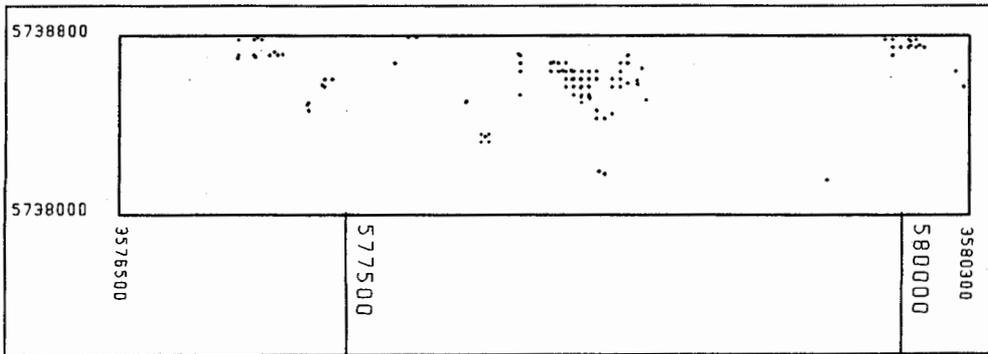
In Tabelle IV.4.3 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Höhendifferenzen (aus DHM interpolierte Geländehöhen - Geländehöhe der Kontrollmessungen) für die drei Regionen (westlicher, mittlerer und östlicher Teil) getrennt zusammengestellt.

| DHM aus Laser-Profilmessungen Differenzen: Interpolierte Geländehöhe - Kontrollmessung | Anzahl Kon- trollmessungen | Mittelwert der Differenzen | Standardabwei- chung der Diffe- renzen |
|--|-------------------------------|-------------------------------|--|
| Westlicher Teil durchschnittliche Geländeneigung 15% | 1 303 | 0.10m | 1.18m |
| Mittlerer Teil durchschnittliche Geländeneigung 7% | 2 171 | 0.08m | 0.76m |
| Östlicher Teil durchschnittliche Geländeneigung 28% | 1 626 | -0.34m | 2.87m |

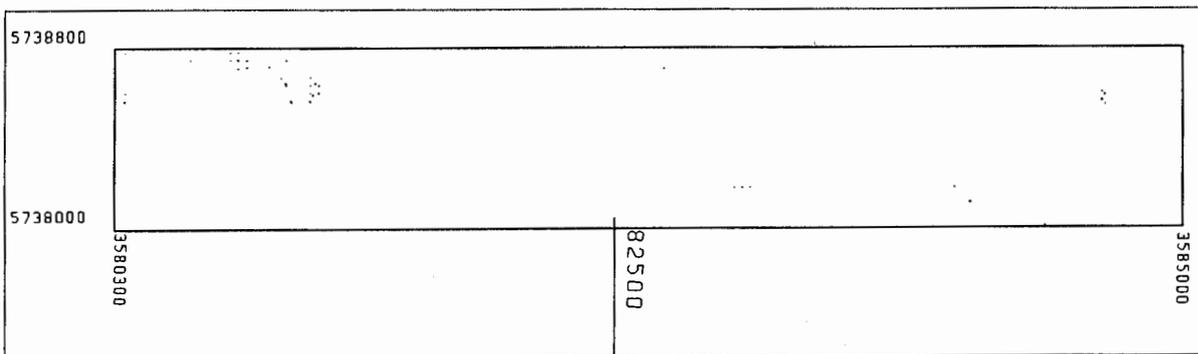
Tab. IV.4.3 Höhengenaugkeit des DHM aus Kontrollmessungen

Der Mittelwert der Differenzen weist vor allem im steilen Ostteil auf systematische Fehler in der Erfassung der Geländeformen hin. Ein positives Vorzeichen des Mittelwerts deutet darauf hin, daß durch die Interpolation der Laser-Profilmessungen zum DHM z.B. die Tallinien des Geländes nicht völlig erwartungstreu

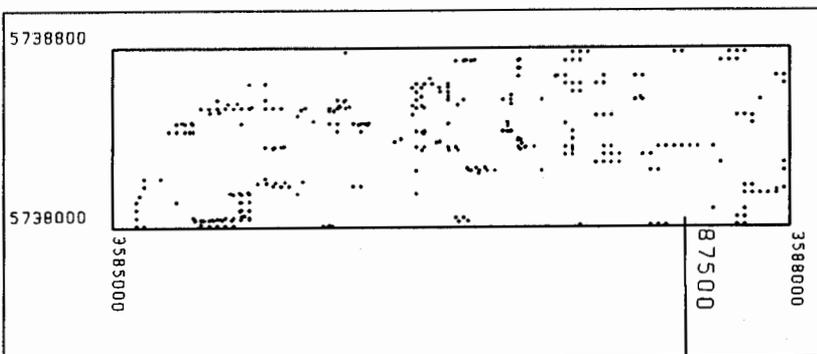
erfaßt wurden; umgekehrt bedeutet ein negatives Vorzeichen, daß die Kammlinien der Höhenrücken zu niedrig repräsentiert werden. Während im westlichen und mittleren Teil des DHM der Mittelwert einen Betrag um 0.10m annimmt, und damit sicherlich vernachlässigbar ist, ist im östlichen Teil der Mittelwert mit -0.34m deutlich von Null verschieden. Wird unterstellt, daß die photogrammetrischen Kontrollmessungen in den dort vorherrschenden Waldgebieten tatsächlich die Bodenpunkte erfaßt haben, dann muß gefolgert werden, daß in diesem Teil des DHM hauptsächlich die Höhenzüge des Geländes nicht ausreichende Berücksichtigung finden. Im übrigen ist aber der Mittelwert der Differenzen von -0.34m im Vergleich ihrer Streuung von 2.87m im östlichen Gebietsteil völlig vernachlässigbar.



Westlicher Teil



Mittlerer Teil



Östlicher Teil

Abb. IV.4.3 Extreme Höhendifferenzen $> 5.0\text{m}$ an den Kontrollpunkten

Um einen Einblick zu erhalten, wo die größten Höhendifferenzen auftreten, sind in den Abbildungen IV.4.3 alle Punkte mit einem Absolutbetrag der Höhendifferenz von größer als 5.0m dargestellt. Aufschlußreich ist der Vergleich dieser Punkte mit den Eingabedaten nach Abbildung IV.4.1. Im westlichen Teil liegt eine

Häufung derartiger Punkte an einer Stelle vor, an der, aus unbekannter Ursache, bei zwei Profilen die Laser-Registrierungen ausgefallen sind und somit keine Messungen vorhanden sind.

Werden die im folgenden Abschnitt besprochenen zusätzlichen Strukturlinien mit in die Überlegungen eingebracht und deren Lage (s. Abb. IV.4.5) mit der Lage der großen Höhendifferenzen verglichen, dann kann eine hohe Korrelation festgestellt werden. Die großen Höhendifferenzen treten mit systematischem Vorzeichen überwiegend entlang der Geländestrukturlinien auf, die bei der Ableitung des vorliegenden DHM nicht verwendet wurden. Dieser Zusammenhang fällt besonders im Bereich des steilen Geländes im östlichen Teil des Testgebiets auf.

Die Standardabweichung der Differenzen setzt sich aus der Repräsentationsgenauigkeit und der Meßgenauigkeit der Kontrollmessungen zusammen. Bei einer angenommenen Genauigkeit der photogrammetrisch gemessenen Geländehöhen von 0.2m ist der Einfluß der Meßgenauigkeit gering, so daß die in der Tabelle IV.4.3 angegebenen Standardabweichungen der Differenzen nahezu die Repräsentationsgenauigkeit wiedergeben.

Nach den Faustregeln der photogrammetrischen Kartierung wird zwischen der Höhengenaugkeit m_h von interpolierten Einzelpunkten und der kleinstzulässigen Äquidistanz ΔH der Höhenlinien in Europa ein Verhältnis von 1/4 bis 1/5 eingehalten (Schwidefsky und Ackermann 1976 S.355). Aus dem mit 50m Profilabstand erstellten DHM könnten danach im westlichen Gebietsteil Höhenlinien mit Äquidistanz 5m, im mittleren Teil mit 4m und im östlichen Teil mit 15m abgeleitet werden.

In Abbildung IV.4.4 sind die erhaltenen Höhengenaugkeiten (Linie mit Bezeichnung $d=50m$) in Abhängigkeit von der Geländeneigung ($\tan \alpha$) in den drei Gebietsteilen in Beziehung zu der zulässigen Genauigkeit für die Deutsche Grundkarte 1:5000 (DGK5) gesetzt. Die zulässige Höhengenaugkeit m_h berechnet sich aus $m_h = (0.4 + 5 \tan \alpha)$ [m]. Im westlichen und mittleren Gebietsteil, das heißt bis zu einer mittleren Geländeneigung von 15%, genügt das aus den Laser-Profilmessungen abgeleitete DHM den Anforderungen der DGK5. Im schwierigen östlichen Teil wird die zulässige Genauigkeit dagegen deutlich überschritten. Hier hätte eine Laser-Profilbefliegung mit dichtem Profilabstand durchgeführt werden müssen.

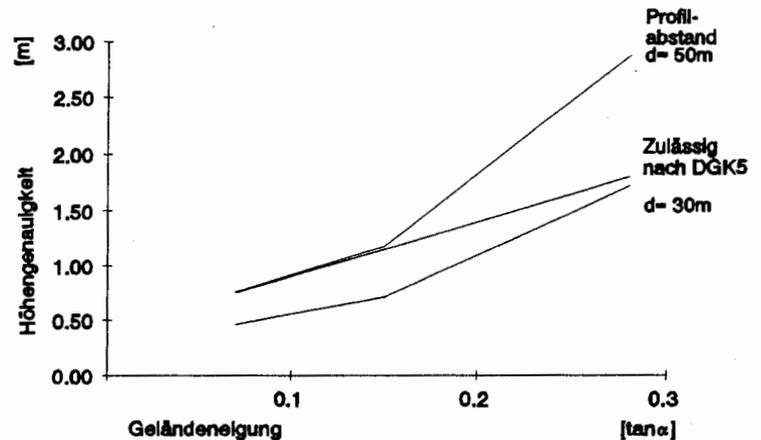


Abb. IV.4.4 Höhengenaugkeit des DHM in Abhängigkeit von Geländeneigung

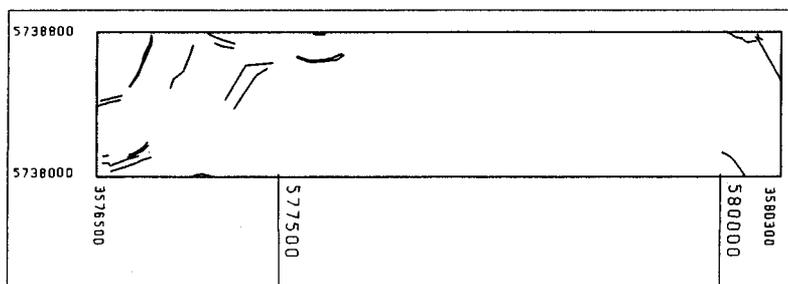
Über die Abhängigkeit der Höhengenaugkeit von der Geländemorphologie und dem Stützpunkt- bzw. Profilabstand gibt es kaum theoretisch fundierte Untersuchungen. Die empirischen Untersuchungen von Ackermann (1980) und Rüdener (1980) haben jedoch gezeigt, daß die Höhengenaugkeit linear vom Stützpunktabstand abhängt, wobei der jeweilige Geländetyp den Regressionskoeffizienten bestimmt. Bei einem Profilabstand von 30m wäre dann eine Höhengenaugkeit von 0.7m (statt 1.18m) im westlichen Teil, von 0.45m (statt 0.53m) im mittleren Teil und von 1.7m (statt 2.87m) im östlichen Teil zu erwarten. Wie der Abbildung IV.4.4 entnommen werden kann, liegen diese Genauigkeiten (Linie mit Bezeichnung $d=30m$) in allen Gebietsteilen innerhalb der für die DGK5 zulässigen Grenzen. Mit dem angenommenen Profilabstand von 30m ließen sich dann im östlichen Gebietsteil Höhenlinien mit Äquidistanz 7m ableiten.

4.3.3 Genauigkeitsuntersuchung des DHM mit zusätzlich gemessenen Strukturlinien

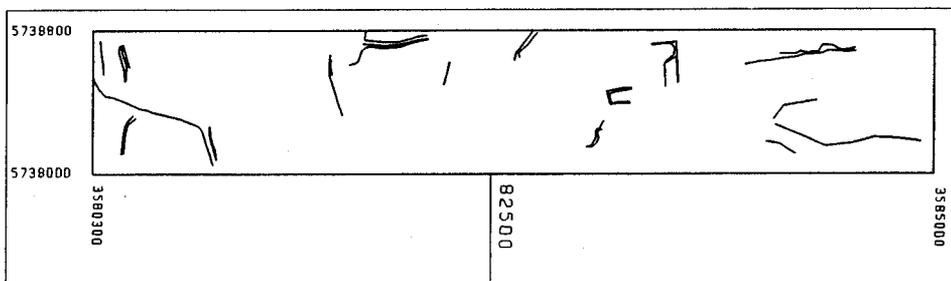
Zur Untersuchung des Einflusses von zusätzlicher Forminformation auf die Genauigkeit der Geländerepräsentation, wurde ein zweites DHM berechnet. Dabei wurden Forminformationen berücksichtigt, die in zusätzlich photogrammetrisch gemessene Formlinien und Bruchkanten bestanden. Insgesamt handelt es sich um 414 Geländepunkte, verteilt auf 23 Formlinien und 45 Bruchkanten. Die Auswahl und Messung dieser

Strukturlinien erfolgte unter den normalen photogrammetrischen Produktionsbedingungen der niedersächsischen Landesvermessungsbehörde. Die lagemäßige Verteilung der Strukturlinien ist aus den Abbildungen IV.4.5 ersichtlich.

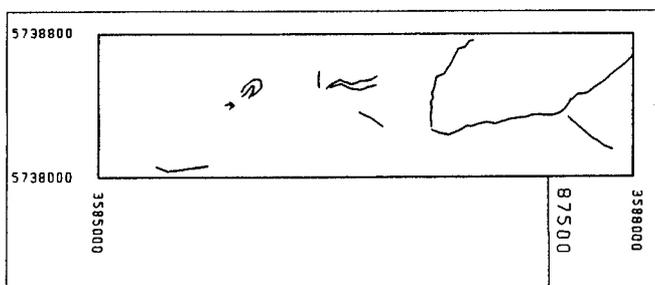
In Tabelle IV.4.4 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Höhendifferenzen für das DHM mit zusätzlichen Strukturlinien angegeben. Werden die Mittelwerte beider DHM-Versionen (Vergleich mit Tabelle IV.4.3) einander gegenübergestellt, dann zeigt sich ein Einfluß der Strukturlinien, wie erwartet, im steilen östlichen Teil des DHM: der Mittelwert der Höhendifferenzen wird von -0.34m auf -0.11m reduziert. Im vorhergehenden Abschnitt wurde der große Betrag des Mittelwerts mit negativem Vorzeichen auf unzureichend erfaßte Höhenzüge zurückgeführt. Dies wird nun beim Vergleich der Abbildungen IV.4.2 und IV.4.5 im östlichen Teil bestätigt. Die Verbesserung des Mittelwerts wird durch die Erfassung einer einzigen Formlinie erreicht, die entlang der Kammlinie eines Höhenzuges verläuft. Die Standardabweichung der Höhendifferenzen reduziert sich in allen Teilgebieten des DHM nur unwesentlich um wenige Zentimeter. Dies entspricht der allgemeinen Erfahrung, daß Bruchkanten und Strukturlinien das DHM lokal deutlich verbessern, die durchschnittliche Genauigkeit jedoch nur gering beeinflussen.



Westlicher Teil



Mittlerer Teil



Östlicher Teil

Abb. IV.4.5 Zusätzlich photogrammetrisch gemessene Strukturlinien

| DHM aus Laser-Profilmessungen mit zusätzlichen Strukturlinien Differenzen: Interpolierte Geländehöhe - Kontrollmessung | Anzahl Kontrollmessungen | Mittelwert der Differenzen | Standardabweichung der Differenzen |
|---|--------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Westlicher Teil durchschnittliche Geländeneigung 15% | 1 303 | 0.10m | 1.14m |
| Mittlerer Teil durchschnittliche Geländeneigung 7% | 2 176 | 0.09m | 0.75m |
| Östlicher Teil durchschnittliche Geländeneigung 28% | 1 637 | -0.11m | 2.64m |

Tab. IV.4.4 Höhengenaugigkeit des DHM aus Kontrollmessungen mit zusätzlichen Strukturlinien

4.4 Ergebnis

Die Einflußgrößen, die die Genauigkeit bestimmen, mit der das Gelände durch ein Digitales Höhenmodell repräsentiert wird, sind bekannt. Bei der hohen, empirisch in IV.3 nachgewiesenen Höhengenaugigkeit der aus Laser-Profilmessungen abgeleiteten Geländeprofile (Genauigkeit der Geländehöhen 0.15m) hängt die Genauigkeit des DHM praktisch ausschließlich vom Profilabstand und im Zusammenhang damit von der Morphologie des Geländes ab.

Die Ergebnisse der Überprüfung des aus den Laser-Profilbefliegungen im Harz abgeleiteten DHM müssen unter diesen Voraussetzungen gesehen werden. So ist die Genauigkeit, mit der das steile Gelände im östlichen Teil bei 50m Profilabstand erfaßt wird, nicht ausreichend, um hohen Anforderungen an topographische Geländeaufnahmen, wie zum Beispiel für die Deutsche Grundkarte 1:5000, zu genügen. Hier hätte eine Befliegung mit deutlich geringerem Profilabstand erfolgen müssen, der mit dem ansonsten für entsprechende photogrammetrische Auswertungen gewählten Punktabstand von 35m vergleichbar ist. Die vergleichenden Untersuchungen in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3 könnten zu der Schlußfolgerung führen, daß die zusätzliche Messung von Strukturlinien, zumindest in nicht allzu steilem Gelände entbehrlich ist. Die grundsätzliche Frage, ob auf detaillierte Forminformationen generell verzichtet werden kann, läßt sich jedoch nicht losgelöst von der Wahl des Profilabstandes betrachten. Im Einzelfall wird es vom jeweiligen Geländetyp bzw. von der morphologischen Charakteristik abhängen, auf welche Weise die geforderte Genauigkeit und Qualität eines DHM erreicht werden kann. Dabei muß auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zwischen den Möglichkeiten - dichter Profilabstand, zusätzliche Querprofile, zusätzliche photogrammetrische oder tachymetrische Messung von Strukturlinien - abgewogen werden.

V. Zusammenfassung

Diese Arbeit stellte die Laser-Profilmessung als eine neue Methode zur topographischen Geländeaufnahme vor. Der Ausgangspunkt für die Beschäftigung mit dieser Methode war die Suche nach einem Vermessungsverfahren für die Aufnahme von Waldgebieten. Die grundlegenden Erkenntnisse aus den Untersuchungen werden an dieser Stelle zusammengefaßt. Auf einzelne Ergebnisse wird hier nicht mehr eingegangen; sie wurden in den jeweiligen Abschnitten ausführlich kommentiert.

Der einführende Teil I stellte das Prinzip der Laser-Profilmessung vor und setzte die wesentlichen Charakteristiken dieser Methode in Beziehung zu den bekannten Verfahren der topographischen Geländeaufnahme. Der Überblick über die aus der Literatur bekannt gewordenen Systeme (s. Tab. I.3.1) zeigte, daß derzeit kein System routinemäßig für Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen zur Verfügung steht. Insbesondere existieren keine durchgreifenden Konzepte zur vollautomatischen Auswertung der Meßdaten bis hin zur Ableitung des Digitalen Höhenmodells. Vor diesem Hintergrund wurde die Aufgabenstellung in I.4 formuliert, die in den Teilen II und III bearbeitet wurde.

In Teil II wurden die Systemkomponenten des Laser-Profilmeßsystems behandelt. Als Ergebnis konnte festgestellt werden, daß sowohl für die Laserdistanzmessung vom Flugzeug aus auf die Erdoberfläche als auch für die Orientierung des Laserstrahls im Raum Meßinstrumente zur Verfügung stehen, die ein hochgenaues Ergebnis im Bereich von 1dm Höhengenaugigkeit erwarten lassen. Die Entwicklung von neuen Hardwarekomponenten für die Laser-Profilmessung ist somit nicht notwendig. Weiter wurde in Teil II die in Zusammenhang mit den gewählten Systemkomponenten zu sehende Systemkalibrierung und die Berechnung der Koordinaten der Laserpunkte beschrieben. Die dabei entwickelten Algorithmen wurden in Computerprogramme umgesetzt und standen für die Auswertung von experimentellen Laser-Profilbefliegungen zur Verfügung.

Teil III befaßte sich mit der Modellierung der Laserprofile. Die Aufgabe bestand in der Trennung von verwertbaren Laserpunkten, die sich auf die Erdoberfläche beziehen, von den Punkten die auf topographisch nicht interessierenden Objekten (Vegetation, Gebäude) gemessen wurden, und in der Ableitung von Geländeprofilen mit gleichabständigen auf die mathematische Geländeoberfläche sich beziehenden Stützpunkten, die zur Ableitung eines über die Fläche sich erstreckenden Digitalen Höhenmodells weiterverarbeitet werden können. Die Lösung dieser Aufgabe basiert auf zwei mathematischen Theorien, der mathematischen Morphologie und den stochastischen Prozessen. Die benötigten morphologischen Operatoren wurden vorgestellt und für die Bearbeitung von Laserprofilen formuliert. Die Theorie der stochastischen Prozesse wurde zur Analyse beobachteter, nicht-stationärer Zeitreihen, einschließlich der robusten Zeitreihenanalyse, weiterentwickelt. Die Brauchbarkeit der theoretisch entwickelten Ansätze für die Modellierung von Laserprofilen und ihre Realisierung in einem Computerprogramm wurde anhand von zahlreichen Laserprofilen überprüft.

Für die empirischen Untersuchungen von Laser-Profilmessungen im Teil IV standen Datensätze aus fünf Meßkampagnen zur Verfügung, die im Rahmen der Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 228 "Hochgenaue Navigation - Integration geodätischer und navigatorischer Methoden" durchgeführt wurden. Dieser Teil gliederte sich in die Untersuchung von Eigenschaften der Lasermessungen, die Genauigkeitsanalyse der Laser-Profilmessungen und die Ableitung und Analyse eines Digitalen Höhenmodells.

Die Untersuchung der Reflexionen des Laserstrahls zeigte über einer großen Anzahl von Bodenarten und Bodenbedeckungen eine hohe Erfolgsquote, so daß die Laser-Profilmessungen ohne Einschränkungen zur topographischen Geländeaufnahme eingesetzt werden kann. In Waldgebieten wurde unter sommerlichen Vegetationsverhältnissen durchschnittliche Durchdringungsraten zwischen 16% und 39% in Abhängigkeit vom jeweiligen Waldtyp erreicht. Als problematisch haben sich dichte, nicht ausgerodete Schonungen erwiesen, die vom Laserstrahl nicht durchdringbar waren. Diese Gebiete sind aber erkennbar und müssen nicht zu einem falschen Ergebnis führen, wenn an einzelnen Stellen eine terrestrische Nachmessung erfolgt.

Die Genauigkeitsanalyse der Laser-Profilmessungen erbrachte ein sehr gutes Ergebnis. Die Genauigkeit der Geländehöhen von $\sigma_h = 0.15\text{m}$ bei der Befliegung im Harz 1989 wurde durch eine große Anzahl photogrammetrischer und tachymetrischer Kontrollmessungen nachgewiesen. Damit steht mit der Laser-Profilmessung eine hochgenaue Methode zur topographischen Geländeaufnahme zur Verfügung, die bezüglich der Genauigkeit neben der Tachymetrie und Photogrammetrie eingestuft werden kann, vom Zeit- und Personalaufwand

und den nahezu unbegrenzten Möglichkeiten ihrer Anwendung her betrachtet, diese konventionellen Methoden jedoch wesentlich übertrifft.

Für die Genauigkeit eines aus Laser-Profilmessungen abgeleiteten Digitalen Höhenmodells ist die Höhengenaugigkeit des einzelnen Stützpunktes jedoch sekundär gegenüber dem Profilabstand und die Erfassung von Strukturlinien. Strukturlinien können mit Laser-Profilmessungen nicht erfaßt werden. Der Profilabstand muß in Abhängigkeit von den Genauigkeitsanforderungen und von der morphologischen Bewegtheit des Geländes gewählt werden. So müßte, um die Anforderungen der DGK5 im Testgebiet Harz zu erreichen, mit einem Profilabstand von 30m geflogen werden. Die Frage, ob sich dies unter wirtschaftlichen Bedingungen durchführen läßt, wird in dieser Arbeit nicht diskutiert.

Literaturverzeichnis

Abkürzungen :

| | |
|---------|---|
| BuL | Bildmessung und Luftbildwesen (Photogrammetrie und Fernerkundung) |
| DGK | Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IAP | International Archives of Photogrammetry (and Remote Sensing) |
| PE(&RS) | Photogrammetric Engineering (and Remote Sensing) |
| ZfV | Zeitschrift für Vermessungswesen |

- Ackermann, F. : Numerische Photogrammetrie. Gegenwärtiger Stand und Weiterentwicklung. Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe 1973
- Ackermann, F. : The Accuracy of Digital Height Models. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 6, 1980, S. 133-144
- Akaike, H. : A New Look at the Statistical Model Identification of Gaussian ARMA Models. IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 19, 1974, S. 716-723
- Anderson, T.W. : The Statistical Analysis of Time Series. John Wiley and Sons, New York, 1971
- Blair, J.D., J.F. McLellan : Route Profiling in Queensland Using Satellite Control and an Integrated Inertial and Laser Profiling System. Australian Surveyor, Vol. 32, Heft 4, 1984, S.257-273
- Blair, J.D., B. Hlasny, J. Schleppe : High Altitude Laser Profiling for Vertical Control in Small and Large Scale Mapping. GIS Symposium, Vancouver, 1990
- Box, G.E.P., G.M. Jenkins : Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden-Day, San Francisco 1976
- Britting, K.R. : Inertial Navigation System Analysis. John Wiley & Sons, New York 1971
- Brockwell, P.J, R.A. Davis : Time Series: Theory and Methods. Springer Series in Statistics, Springer-Verlag, New-York, 1987
- Calder, M. : WRELADS - The Australian Laser Depth Sounding System. International Hydrographic Review, Vol. LVII, No. 1, Monaco, 1980
- Chapman, W.H. : Profiling the Great Salt Lake Desert with the Aerial Profiling of Terrain System (APTS). Proceedings of the Third International Symposium on Inertial Technology for Surveying and Geodesy, The University of Calgary 1986
- Chapman, W.H., E.J. Cyran, J.W. Hursh : Airborne Precision Mapping System, The New Generation. Proceedings of the Gyro Symposium, Universität Stuttgart 1988
- DiCarlo, C., G.J. Eakin : Mapping and Survey System Geodetic AN/USQ-28. IAP, Vol. 15-3, Lisboa 1965
- Decker, B.L. : World Geodetic System 1984. Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, Texas, 1986, S. 69-92
- Denker, H. : A New Gravimetric Quasigeoid for the Federal Republic of Germany. DGK, Reihe B, Heft 291, München 1989
- Ebner, H. : Zusätzliche Parameter in der Ausgleichung. ZfV, Vol. 98, Heft 9, 1973, S. 385-391
- Ebner, H. : Zwei neue Interpolationsverfahren und Beispiele für ihre Anwendung. BuL, Vol. 47, 1979, S.15-27

- Ebner, H., D. Fritsch, W. Gillessen, C. Heipke : Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der Digitalen Photogrammetrie. BuL, Vol. 55, 1987, S. 194-203
- Engler, M.L. : Terrain Profiling Using an Inertial Survey System Integrated with an Airborne Laser Altimeter. ACSM-ASP Fall Convention, Salt Lake City, Utah, Sept. 1983
- Fahrmeir, L., H. Kaufmann, F. Ost : Stochastische Prozesse. Eine Einführung in Theorie und Anwendungen. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1981
- Fiocco, G., L.D. Smullin : Detection of Scattering Layers in the Upper Atmosphere (60-140 km) by Optical Radar. Nature, Vol. 199, 1963, S. 1275-1276
- Förstner, W. : Determination of the Additive Noise Variance in Observed AR Processes Using Variance Component Estimation Technique. in: Statistics & Decisions, Supplement Issue No. 2, R. Oldenburg Verlag, 1985, S. 263-274
- Frederiksen, P. : Terrain Analysis and Accuracy Prediction by Means of the Fourier Transformation. IAP, Vol. 23, Teil B4, Hamburg 1980, S.284-293
- Frederiksen, P., O. Jacobi, K. Kubik : Modelling and Classifying Terrain. IAP, Vol. 25, Teil A3a, Rio de Janeiro 1984, S. 256-267
- Frieß, P. : Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulation mit dem NAVSTAR Global Positioning System. DGK, Reihe C, Heft 359, München 1990
- Fritsch, D. : Some Experience with the Determination of the Optimum Sampling Density. IAP, Vol. 27, Teil B 11, Kyoto 1988
- Großmann, W. : Geodätische Rechnungen und Abbildungen in der Landesvermessung. Verlag Konrad Wittwer Stuttgart, 1976
- von Gruber, O. : Beitrag zur Theorie und Praxis von Aeropolygonierung und Aeronivellement. BuL, Vol. 10, 1935, S. 127-141, 167-190
- Hahn, M. : Automatic Measurement of Digital Terrain Models by Means of Image Matching Techniques. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 13, 1989, S. 141-151
- Hampel, F.R., E.M. Ronchetti, P.J. Rousseeuw, W.A. Stahel : Robust Statistics. The Approach Based on Influence Functions. John Wiley & Sons, New York 1986
- Haralick, R.M., S.R. Sternberg, X. Zhuang : Image Analysis Using Mathematical Morphology. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 4, 1987, S. 532-550
- Hartl, Ph., A. Wehr : Chancen der GPS-Satellitennavigation für die Luftphotogrammetrie. BuL, Vol. 54, 1986, S. 221-241
- Heck, B. : Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung. Wichmann Verlag Karlsruhe, 1987
- Heiskanen, W.A., H. Moritz : Physical Geodesy. W.H. Freeman and Company, San Francisco and London, 1967
- Hoge, R.E., R.N. Swift, E.B. Frederick : Water Depth Measurement Using an Airborne Pulsed Neon Laser System. Applied Optics, Vol. 19, No. 6, 1980, S.871-883
- Hursh, J.W., Staff of the Charles Stark Drapper Laboratory : Aerial Profiling of Terrain System. Design Phase Interim Report. The Charles Stark Draper Laboratory, Inc., Cambridge Mass., 1977, Report 1070
- Imhof, E. : Kartographische Geländedarstellung. Walter de Gruyter & Co., Berlin 1965
- Jacobi, O, K. Kubik : New Concepts for Digital Terrain Models. Proceedings of the Symposium of ISPRS Comm. III, Helsinki, 1982
- Jordan / Eggert / Kneissl : Handbuch der Vermessungskunde. Band VI. J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1966

- Kay, S.M., S.L. Marple : Spectrum Analysis - A Modern Perspective. Proceedings of the IEEE, Vol. 69, No. 11, 1981
- Klein, H. : Genauigkeit von Höhenblöcken mit gemeinsamer Ausgleichung von Stratoskop- oder APR-Hilfsdaten. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 1, 1976, S. 5-16
- Klein, H., W. Förstner : Realization of Automatic Error Detection in the Block Adjustment Program PAT-M43 Using Robust Estimators. IAP, Vol. 25, Teil A3a, Rio de Janeiro 1984, S. 234-245
- Koch, K.R. : Parameterschätzung und Hypothesentests. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn, 1987
- Krabill, W.B. : GPS Applications to Laser Profiling and Laser Scanning for Digital Terrain Models. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 13, 1989, S. 329-340
- Krabill, W.B., J.G. Collins, L.E. Link, R.N. Swift, M.L. Butler : Airborne Laser Topographic Mapping Results. PE&RS, Vol. 50, No. 6, 1984, S. 685-694
- Krabill, W.B., J.G. Collins, R.N. Swift, M.L. Butler : Airborne Laser Topographic Mapping Results from Initial Joint NASA/U.S. Army Corps of Engineers Experiment. NASA Technical Memorandum 73287, Wallops Flight Center, Wallops Island Virginia 1980
- Krabill, W.B., R.N. Swift : Airborne Lidar Experiments at the Savannah River Plant June 1985. NASA Technical Memorandum 4007 DOE/SR/14075-1, September 1987
- Krarup, T., J. Juhl, K. Kubik : Götterdämmerung over Least Squares Adjustment. IAP, Vol. 23, Teil B3, Hamburg 1980, S. 369-378
- Krarup, T., K. Kubik : The Danish Method; Experience and Philosophy. in: F. Ackermann (Ed.): Seminar Mathematical Models of Geodetic/ Photogrammetric Point Determination with Regard to Outliers and Systematic Errors. DGK, Reihe A, Heft 98, München 1983
- Kraus, K. : Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie. BuL, Vol. 40, 1972, S.7-12
- Kreyszig, E. : Statistische Methoden und ihre Anwendungen. Vandenhoeck & Ruprecht, 7. Auflage, Göttingen 1979
- Kubik, K. : An Error Theory for the Danish Method. IAP, Vol.24-III, Helsinki 1982, S. 299-309
- Leclair, R., T. Crago : Alternative Applications of Inertial Technology. 3rd International Symposium on Inertial Technology, Calgary 1986, S. 593-607
- Lelgemann, D., D. Ehlert, H. Hauck : Eine astro-gravimetrische Berechnung des Quasigeoids für die Bundesrepublik Deutschland. DGK, Reihe A, Heft 92, München 1981
- Lindenberger, J. : ARIMA Processes for Modelling Digital Terrain Profiles. IAP, Vol. 26, Teil 3/2, Rovaniemi 1986, S. 427-441
- Lindenberger, J. : Consideration of Observation Errors when Modelling Digital Terrain Profiles. Proceedings of the ISPRS WG III/3 International Colloquium: Progress in terrain modelling, TU Denmark Lyngby, 1987
- Lindenberger, J. : Modelling Orientation Parameters of Sensor Platforms. IAP, Vol. 27, Teil B1, Kyoto 1988, S.82-89
- Lindenberger, J. : Test Results of Laser Profiling for Topographic Terrain Survey. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 13, 1989, S. 25-39
- Lindenberger, J. : Quality Analysis of Platform Orientation Parameters for Airborne Laser Profiling Systems. in: K. Linkwitz, U. Hangleiter (Eds.): High Precision Navigation, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1989a
- Makarovič, B. : Progressive Sampling for Digital Terrain Models. ITC-Journal, No. 3, 1973, S. 397-416

- Mamon, G., R.C. Rogers : APT System Design and Real-Time Software. Proceedings of the Third International Symposium on Inertial Technology for Surveying and Geodesy, The University of Calgary 1986
- Matheron, G. : Random Sets and Integral Geometry. John Wiley & Sons, New York 1975
- Measures, R.M. : Laser Remote Sensing. Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, New York 1984
- Moritz, H. : Geodetic Reference System 1980. Bulletin Geodesique, Vol. 54, No. 3, 1980, S.395-405
- Myres, J.A.L. : Laser Airborne Depth Sounder (L.A.D.S.). Conference of Commonwealth Surveyors, Cambridge 1983, Paper C4
- Nelson, R., W. Krabill, G. MacLean : Determining Forest Canopy Characteristics Using Airborne Laser Data. Remote Sensing of the Environment, Vol. 15, 1984, S. 201-212
- Nelson, R., W. Krabill, J. Tonelli : Estimating Forest Biomass and Volume Using Airborne Laser Data. Remote Sensing of the Environment, Vol. 24, 1988, S. 247-267
- Price, W.F., J. Uren : Laser Surveying. Van Nostrand Reinhold (International), London, 1989
- Priestley, M.B. : Non-linear and Non-stationary Time Series Analysis. Academic Press Limited, London, 1988
- Optech Inc. : Rangefinder 501SX. Operating Manual. Optech Inc., Downsview, Ontario, 1987
- Rahnemoon, M. : Ein neues Korrekturmodell für Mikrowellen-Entfernungsmessungen zu Satelliten. DGK, Reihe C, Heft 335, München 1988
- Remondi, B.W. : Using the Global Positioning System (GPS) Phase Observable for Relative Geodesy: Modeling, Processing, and Results. Center for Space Research, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 1984
- Ruddock, K.A. : Laser Altimeter. 31st. Annual Meeting of American Society of Photogrammetry, Washington D.C., 28.3.-3.4.1965
- Rüdenauer, H. : Experimentelle Genauigkeitsanalyse Digitaler Höhenmodelle. IAP, Vol. 23, Teil B11, Hamburg 1980, S.328-340
- Schmid, H.H. : An Analytical Treatment of the Orientation of a Photogrammetric Camera. PE, Vol. 20, 1954, S. 765-781
- Schmid, H.H., E. Schmid : A Generalized Least Squares Solution for Hybrid Measuring Systems. The Canadian Surveyor, 1965, S.27-41
- Schreier, H., J. Loughheed, J.R. Gibson, J. Russel : Calibrating an Airborne Laser Profiling System. PE&RS, Vol. 50, No. 11, 1984, S. 1591-1598
- Schroth, R. : Ein erweitertes mathematisches Modell der Aerotriangulation zur hochgenauen Punktbestimmung. DGK, Reihe C, Heft 316, München 1986
- Schulte, S. : Modellierung von Beobachtungsreihen durch ein erweitertes Autoregressives Modell. DGK, Reihe C, Heft 327, München 1987
- Schut, G.H. : Review of interpolation methods for digital terrain models. XIIIth Congress of the ISP, Helsinki 1976, Invited paper Commission III
- Schwidefsky, K., F. Ackermann : Photogrammetrie. Grundlagen, Verfahren, Anwendungen. B.G. Teubner, Stuttgart 1976
- Schwieder, W.H. : Laser Terrain Profiler. PE, Vol. 34, No. 7, 1968, S. 658-664
- Serra, J. : Image Analysis and Mathematical Morphology. Academic Press Inc., London 1982
- Stanger, W. : Ein digitales Geländemodell und einige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Flurbereinigung. DGK, Reihe C, Heft 273, München 1982

- Starr, L.E., W.H. Chapman : Aerial Profiling of Terrain System. Conference of Commonwealth Surveyors, Cambridge 1983, Paper No. C3
- Tempfli, K. : Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse. Geowissenschaftliche Mitteilungen der TU Wien, Heft 22, 1982
- Thyer, N.H., J.A.R. Blais, M.A. Chapman : High Altitude Laser Ranging over Rugged Terrain. PE&RS, Vol. 55, No. 5, 1989, S. 559-565
- Torge, W. : Geodäsie. Sammlung Göschel Nr. 2163, Walter de Gruyter, Berlin New York, 1975
- Torlegård, K., A. Östman, R. Lindgren : A Comparative Test of Photogrammetrically Sampled Digital Elevation Models. IAP, Vol. 25, Teil A3b, Rio de Janeiro 1984, S. 1065-1082
- Tradowsky, K. : Laser: Grundlagen, Technik, Basisanwendungen. Vogel-Buchverlag, Würzburg, 4. Auflage 1979
- Ulrych, T.J., R.W. Clayton : Time Series Modelling and Maximum Entropy. Phys. Earth. Planet. Inter., Vol. 12, 1976, S. 188-200
- Ulrych, T.J., M. Ooe : Autoregressive and Mixed Autoregressive-Moving Average Models and Spectra. in: S. Haykin (Eds.): Nonlinear Methods of Spectral Analysis. Topics in Applied Physics, Vol 34. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1979
- van der Vegt, H.J.W. : GPS Test Flight Flevoland. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 13, 1989, S. 285-298
- Wehr, A. : 3D-Mapping by a Semiconductor Laser Scanner, Description of an Experimental Setup. in: K. Linkwitz, U. Hangleiter (Eds.): High Precision Navigation. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1989
- Wehr, A. : Entwicklung und Erprobung von opto-elektronischen Entfernungsmeßsystemen mit CW-Halbleiterlasern für die Navigation. Dissertationsschrift der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 1990
- Werner, H. : Automatic Gross Error Detection by Robust Estimators. IAP, Vol. 25, Teil A3b, Rio de Janeiro 1984, S.1101-1108
- Wild, E. : Die Prädiktion mit Gewichtsfunktionen und deren Anwendung zur Beschreibung von Geländeflächen bei topographischen Geländeaufnahmen. DGK, Reihe C, Heft 277, München 1983
- Wolf, H. : Das geodätische Gauß-Helmert-Modell und seine Eigenschaften. ZfV, Vol. 103, Heft 2, S. 41-43, 1978
- Wooden, W.H. : NAVSTAR Global Positioning System: 1985. Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville Maryland 1985, Vol. 1, S. 23-32
- Wrobel, B. : Facet Stereo Vision (FAST-Vision) - A New Approach to Computer Stereo Vision and to Digital Photogrammetry. Proceedings of the Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, ISPRS und ETH Zürich, Interlaken 1987
- Zarzycki, J.M. : The Use of Auxiliary Data in Aerial Triangulation. IAP, Vol. 19, Teil 3, Ottawa 1972

Lebenslauf

| | |
|---------------------|--|
| Personaldaten | Joachim Lindenberger, geboren am 10. Oktober 1959 in Ludwigsburg als Sohn der Eheleute Herbert Lindenberger und Irmgard Lindenberger geb. Stecher |
| Staatsangehörigkeit | deutsch |
| Familienstand | ledig |
| Schulbildung | 1966-1969 Grundschule in Ludwigsburg 1969-1978 Mörrike Gymnasium Ludwigsburg Abschluß : Abitur am 28.4.1978 |
| Studium | Studium des Vermessungswesens an der Universität Stuttgart vom WS 78/79 bis SS 83 Abschluß : Diplom-Ingenieur des Vermessungswesens Abschluß der Diplomhauptprüfung am 4.10.1983 |
| Beruf | Seit 1.7.1984 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart auf dem Teilprojekt C1 des Sonderforschungsbereiches 228 "Hochgenaue Navigation - Integration navigatorischer und geodätischer Methoden" Seit 1.1.1992 Geschäftsführer der TopScan Gesellschaft zur Erfassung topographischer Information mbH in Stuttgart |