

**Entwicklung eines Qualitätsmodells für die Generierung von  
Digitalen Geländemodellen aus Airborne Laser Scanning**

**Dr. sc. ETH Jürg Lüthy**

Zürich, 2008



Diese Publikation ist eine editierte Version von:

---

DISS. ETH Nr. 17066

## **Entwicklung eines Qualitätsmodells für die Generierung von Digitalen Geländemodellen aus Airborne Laser Scanning**

A B H A N D L U N G

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

HANS JÜRIG LÜTHY

Dipl. Ing. ETH Zürich

geboren am 02. Oktober 1971

von Schöffland AG

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Hilmar Ingensand, Referent

Prof. Dr. Matthäus Schilcher, Ko-Referent

2007

---

IGP Mitteilung Nr 95  
Entwicklung eines Qualitätsmodells für die  
Generierung von Digitalen Geländemodellen  
aus Airborne Laser Scanning

Jürg Lüthy

Copyright © 2008

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
Eidgenössische Technische Hochschule  
ETH Hönggerberg  
8093 Zürich

Alle Rechte vorbehalten  
ISBN 978-3-906467-70-2,  
ISSN 0252-9335



## Vorwort

Seit einigen Jahren hat Airborne Laser Scanning weltweit die traditionelle Luftbildvermessung als wichtigste Technologie zur Erfassung von hoch aufgelösten Digitalen Geländemodellen abgelöst. Im Gegensatz zu den bisherigen photogrammetrischen Verfahren wird dabei die Distanz zum Objekt direkt gemessen. Die Georeferenzierung, die originäre messtechnische Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten, die hohe Punktdichte, die Fähigkeit, in einem Messprozess das Terrain- und Oberflächenmodell zu erfassen, sowie der grosse Automatisierungsgrad sind entscheidende Vorteile dieses Verfahrens. Airborne Laser Scanning stellt damit ein Bindeglied zwischen der vektoriiellen Messtechnik mit punktorientierten Real-Time-Verfahren und der Photogrammetrie mit flächenhaften Erfassungen und einem aufwändigen Postprocessing dar. Während bei anderen Methoden zur Bestimmung von Digitalen Geländemodellen in der vergangenen Zeit passende Qualitätsmerkmale und -prüfungen entwickelt wurden, fehlten bisher im Bereich Airborne Laser Scanning derartige Normen. Mit der vorliegenden Arbeit wurden Qualitätsindikatoren mit Hilfe geeigneter Prüfmethode und mittels Definition des akzeptierbaren Qualitätsniveaus präzisiert und parametrisiert. Damit wird erstmals eine präzise Beschreibung der Qualitätsanforderung bei einer gleichzeitig grossen Komplexität der Datenauswertung und der Filterung der Punktwolke möglich. Die statistischen Prüfungen eignen sich dabei für grossflächige Prüfungen von einzelnen Qualitätselementen (insbesondere räumliche Genauigkeit, Vollständigkeit der Datenerfassung und horizontale Auflösung). Das Modell beruht auf dem in Qualitätsmanagementsystemen bekannten Grundsatz, dass in einem ersten Schritt das Zielprodukt mit seinen Qualitätsanforderungen definiert werden muss. Die Anforderungen werden mit qualitativen und nicht-quantitativen Merkmalen beschrieben und gehen im Pflichtenheft (technische Spezifikationen) in die vertragliche Vereinbarung zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber ein.

Für das innerbetriebliche Produktions- und Qualitätsmanagement wurden insgesamt drei Module im Sinne einer Prozess begleitenden Datenbank entwickelt:

Das Modul *Qualitätssicherung und Visuelle Kontrolle* zielt darauf ab, den Interpretationsspielraum des Sachbearbeiters bei der visuellen Qualitätsbeurteilung durch standardisierte Testmethoden und Fokussierung auf festgelegte Testfälle einzuschränken.

Das Modul *Produktionsmonitoring* umfasst die Entwicklung einer Datenbank zur Speicherung aller relevanten Informationen für das Projekt- und Qualitätsmanagement sowie Eingabemasken zur Festlegung von Prozessfolgen, Testfällen und verschiedenen Auswertefunktionen. In dieser Datenbank werden somit alle Informationen abgelegt, die zur Überwachung, Steuerung und Dokumentation des Projekts notwendig sind.

Die Produktionsdatenbank mit den beiden Teilen *Projektkonfiguration und Produktionsstatus* sowie der Dokumentation von Qualitätsprüfungen ist durch die strukturierte Ablage aller prozessrelevanten Daten gekennzeichnet. Die Aufbereitung der Datensätze für die Qualitätskontrolle wird mit den Informationen aus der Projektkonfiguration parametrisiert und gesteuert.

Diese von Herrn Lüthy entwickelten projektbegleitenden Datenbanken und die daraus abgeleiteten Verfahren und Modulwerkzeuge wurden unmittelbar in die Praxis umgesetzt und haben sich hervorragend bewährt.



# **Entwicklung eines Qualitätsmodells für die Generierung von Digitalen Geländemodellen aus Airborne Laser Scanning**

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von  
HANS JÜRIG LÜTHY  
Dipl. Ing. ETH Zürich  
geboren am 02. Oktober 1971  
von Schöffland AG

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. Hilmar Ingensand, Referent  
Prof. Dr. Matthäus Schilcher, Ko-Referent  
2007





# Inhaltsverzeichnis

1	Einführung .....	1
1.1	Ausgangslage und Motivation .....	1
1.2	Ziel der Arbeit .....	2
1.3	Gliederung der Arbeit .....	2
1.4	Qualitäts- und Prozessmanagement .....	3
1.4.1	Erläuterung zum Begriff Qualität .....	3
1.4.2	Grundzüge des Qualitätsmanagements .....	3
1.4.3	Prozesse .....	4
1.4.4	Qualitätsplanung .....	5
1.4.5	Qualitätsmanagement bei ALS-Projekten .....	5
1.5	Qualität im Vermessungswesen .....	6
1.6	Qualität von Geodaten .....	7
1.6.1	Produktmerkmale .....	7
1.6.2	Allgemeine Qualitätsmerkmale von Geodaten .....	7
1.6.3	Die Qualitätsmerkmale der ISO Geonormen .....	8
1.6.4	Der Prozess der Qualitätsprüfung .....	10
1.6.5	Dokumentation der Qualitätsinformation .....	12
1.7	Qualität von Digitalen Geländemodellen .....	12
1.7.1	Begriffe .....	12
1.7.2	Modellierungsprozesse .....	13
1.7.3	Klassische Qualitätsmerkmale von DGM .....	14
2	Datenerfassung mittels Airborne Laser Scanning .....	15
2.1	Laser Scanner .....	16
2.1.1	Laser Impuls .....	16
2.1.2	Ablenktechnologie .....	18
2.2	Positionierungs- und Orientierungssystem .....	19
2.2.1	Kinematisches DGPS .....	19
2.2.2	Inertiales Messsystem .....	20
2.2.3	Kombination der POS-Messgrößen .....	20
2.3	Vergleich der gebräuchlichsten ALS-Systeme .....	21
2.4	Unsicherheiten in der Datenerfassung .....	23
2.4.1	Unsicherheit der Objekterfassung .....	24
2.4.2	Messunsicherheit in der Rangebestimmung .....	26
2.4.3	Messunsicherheit der Winkelbestimmung .....	28
2.4.4	Messunsicherheit der Positions- und Orientierungsbestimmung .....	28
2.4.5	Kombinierte Messunsicherheit .....	31
2.4.6	Anmerkung zur kombinierten Messunsicherheit .....	34
2.5	Bestimmung und Reduktion von systematischen Einflüssen .....	35
2.5.1	Labor-Kalibrierung Laser Scanner .....	35
2.5.2	In situ Systemkalibrierung .....	36
2.5.3	Streifenausgleichung .....	37
2.6	Diskussion .....	37
3	Die ALS-Prozesskette .....	39
3.1	Produktspezifikation .....	40
3.2	Flugplanung .....	41
3.3	Flugvorbereitung und Systemkalibrierung .....	43
3.4	Befliegung .....	44

---

3.5	Berechnen der externen Orientierung.....	45
3.6	Prozessieren der Rohdaten .....	46
3.7	Filterung der Punkte .....	47
3.8	Modellbildung .....	49
3.9	Metadaten und Datenabgabe .....	49
3.10	Datensätze .....	50
3.10.1	Daten für die Planung und Vorbereitung der Arbeiten .....	52
3.10.2	Befliegung.....	53
3.10.3	Prozessieren der Rohdaten .....	53
3.10.4	Filterung der Punktwolke.....	54
3.10.5	Unterstützende Daten.....	54
3.10.6	Prozess-Aufzeichnungen.....	55
3.10.7	Qualitätskontrollen.....	56
3.11	Unsicherheiten in und aus den Prozessen.....	57
3.11.1	Umgang mit Ausreißern in der Rangebestimmung.....	57
3.11.2	Abweichungen und Fehler bei Terrain-Filterung.....	58
3.11.3	Unsicherheit aus der Modellierung .....	60
3.12	Diskussion .....	60
4	Qualitätsmodell für Airborne Laser Scanning .....	61
4.1	Aufbau des ALS-Qualitätsmodells.....	61
4.2	Nicht-quantitative Qualitätselemente .....	62
4.2.1	Allgemeine Produktdefinitionen für DGM .....	62
4.2.2	Definition des Produkts „DTM“ .....	63
4.2.3	Definition des Produkts „DOM“ .....	64
4.2.4	Nachvollziehbarkeit und Metadaten .....	66
4.3	Quantitative Qualitätselemente (technischen Spezifikationen).....	67
4.3.1	Auflösung.....	68
4.3.2	Räumliche Genauigkeit.....	72
4.3.3	Thematische Genauigkeit.....	75
4.3.4	Vollständigkeit.....	75
4.3.5	Zeitliche Genauigkeit.....	77
4.3.6	Logische Konsistenz .....	78
4.3.7	Vorschlag für technische Spezifikationen.....	78
4.4	Prozessqualität.....	81
4.5	Realisierungsprozesse .....	83
4.6	Managementprozesse .....	83
4.6.1	Projektmanagement.....	84
4.6.2	Kontinuierliche Verbesserung .....	84
4.6.3	Ausbildung und Training .....	85
4.6.4	Know-how Management.....	85
4.7	Qualitätsprüfung.....	85
4.7.1	Methoden der Qualitätsprüfungen .....	86
4.7.2	Kontrollen im Prozessablauf.....	86
4.7.3	Werkzeuge zur Qualitätskontrolle .....	88
4.7.4	Aufzeichnung der Qualitätsprüfung.....	90
4.8	Datenmanagement .....	90
4.9	Produktionssystem für ALS .....	91
4.9.1	Modul Qualitätssicherung und Visuelle Kontrolle .....	92

---

4.9.2	Modul Produktionsmonitoring .....	95
4.9.3	Modul Prozess-Manager .....	98
5	Analyse und Verbesserungsmöglichkeiten aus dem Projekt Landwirtschaftliche Nutzflächen .....	101
5.1	Einführung zum Projekt .....	101
5.2	Erarbeiten der Spezifikationen .....	102
5.3	Datenerfassung .....	103
5.3.1	Flugplanung .....	103
5.3.2	Schwierigkeiten in der Befliegung.....	105
5.3.3	Erkenntnisse aus der Datenerfassung im alpinen Raum .....	106
5.4	Prozessieren der Messwerte.....	107
5.4.1	Ableiten der Punktwolke aus den Messungen.....	107
5.4.2	Klassifizierung der Punkte .....	109
5.4.3	Ausbildung .....	109
5.4.4	ALS-Produktionssystem .....	109
5.5	Qualitätsmanagement .....	110
5.5.1	Kontrolle während der Befliegung.....	110
5.5.2	Kontrolle der Datenerfassung .....	111
5.5.3	Visuelle Kontrolle der Endprodukte .....	111
5.5.4	Resultate der quantitativen Qualitätsprüfungen .....	112
5.6	Diskussion der Erkenntnisse aus dem Projekt LWN.....	112
6	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	115
6.1	Schlussfolgerungen.....	115
6.2	Ausblick.....	117
6.2.1	Monitoring des Scannens .....	117
6.2.2	Automatische Selektion der optimalen Punkte im Überlappungsbereich .....	119
6.2.3	Filterung der Terrainpunkte .....	119
6.2.4	Echtzeit-Datenauswertung .....	119
6.3	Dank .....	120
7	Literaturverzeichnis .....	121
8	Abbildungsverzeichnis.....	131
9	Verzeichnis der Tabellen .....	133
10	Anhang.....	134
10.1	Glossar und Abkürzungen .....	134
10.2	Fragebogen für Auftraggeber .....	137
10.3	Zusammenfassung der Antworten auf den Fragebogen .....	140



---

## Summary

Airborne Laser Scanning (ALS) has become the most important technology in Europe to acquire high resolution Digital Elevation Models (DEM). Compared to the well established Photogrammetry ALS allows an increased efficiency due to direct georeferencing and direct determination of 3D coordinates. The dense point spacing and the possibility to acquire simultaneous Digital Terrain (DTM) and Digital Surface Models (DSM) are additional benefits. Some of the drawbacks of ALS are known from other methods to acquire spatial data: the abstraction of the real world in a data model is strongly influenced by the impossibility to validate the quality of data acquisition by the use of on set of reference data. As a matter of fact only partial verification of single characteristics is performed using adequate methods or reference information. A well known example for this is the determination of vertical accuracy using ground control points.

The two main disadvantages compared to Photogrammetry are the number of involved sensors and the unstructured data capturing during the scanning process. The former leads – in combination with the separation in different data processing activities – to a delayed discovery of faults in the data acquisition. Not captured features (completeness of data acquisition) are often detected later on in the feature extraction. Whilst for other survey methods quality measures had been developed over years, standards or guidelines for ALS with appropriate quality indicators and test methods are still missing. The separation between the determination of coordinates in the unstructured data acquisition and the feature extraction during point classification may have a negative impact on the data quality. The use of the spatial accuracy as the dominant indicator to measure the quality of a DEM is not suited to detect errors in the point classification. Delays and excessive costs in many projects are the consequence of this lack of complete specifications if a principal conducts thorough visual inspection of the deliverables.

This thesis introduces a quality model which eliminates the above listed shortcomings. In a holistic approach sensors, algorithms and processes are examined on their impact on spatial data described. The quality model is built up on the requirements set forth in the ISO standards for quality management and for spatial data but is also taking into account the (unique) properties of the ALS technology and the sensitive customer relationship. The core element of the model is the product specification where the representation of the real world in the spatial data set is defined. The non-quantitative quality element is completed by the Meta data further information to allow traceability. To the second layer of the quality model belong various components to describe the quantitative quality indicators. By extending the elements from currently used spatial accuracy and point spacing all user requirements can be captured in technical specifications. The benefit can only be achieved if appropriate test methods and the acceptable conformance quality level are defined. The thesis does not attempt to define a minimum acceptable level of quality for DEMs since they strongly depend on individual user requirements but proposes ideas how the quality elements may be used. The third layer then defines requirements for process quality. Here it is distinguished between the processes for product realisation and management processes. The activities on the technical side directly impact the quality of the products and include inter alia sensor system, data processing, verification and documentation. The mid and long term quality of the products and realisation processes is achieved through the management processes. Special attendance is needed for data management due to the huge volume of data. As the outcome of the three inner layers the outermost contains finally the spatial data sets according to product definitions and technical specifications.

The complexity of the processes and the data volume requires suitable software tools, particularly for larger projects. A high level system architecture and the base functionality of such a production suite for ALS are outlined and the positive effects in the production due to increased efficiency and effectivity are demonstrated.

The benefits and the advantages of the quality model in the practical application are discussed on a large project for the Federal Office of Topographie (swisstopo).



## Zusammenfassung

Seit einigen Jahren hat Airborne Laser Scanning (ALS) in Europa die traditionelle Luftbildvermessung (Photogrammetrie) als wichtigste Technologie zur Erfassung von hochaufgelösten Digitalen Geländemodellen (DGM) abgelöst. Die direkte Georeferenzierung bzw. die direkte Bestimmung von 3D Objektkoordinaten, die hohe Punktdichte, die Fähigkeit in einem Messdurchgang das Terrain- und Oberflächenmodell (DTM bzw. DOM) zu erfassen sowie der grosse Automatisierungsgrad sind entscheidende Vorteile. Die Anwender von ALS haben aber auch Schwierigkeiten zu lösen: Wie bei allen Methoden, mit denen die Realwelt in ein abstrahiertes Datenmodell (bzw. in einen Geo-Datensatz) übergeführt wird, kann die Güte einer Datenerfassung mangels Referenzdaten nicht vollständig durch direkten Vergleich bestimmt werden, sondern nur durch partielle Vergleiche einzelner Merkmale des Geo-Datensatzes mit geeigneten Methoden oder Referenzinformation. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Beurteilung der Höhengenaugigkeit mittels Vergleich zwischen DTM und Kontrollpunkte.

Das Kombinieren von Messwerten aus verschiedenen Sensoren in mehreren Arbeitsschritten und das Fehlen zuverlässiger Kontrollinformationen führen dazu, dass Mängel in der Datenerfassung (insbesondere deren Vollständigkeit) erst deutlich später in der Objektzuordnung erkannt werden. Während bei anderen Methoden zur Erfassung von DGM über Jahre Verfahren in der Datenerfassung oder -auswertung und dazu passende Qualitätsmerkmale und -prüfungen entwickelt wurden fehlen diese de facto Standards bei ALS.

Weiter ist die Qualität von Geodaten aus ALS geprägt durch die unstrukturierte Datenerfassung (Punktwolke) und der nachträglichen Auswertung (Objektzuordnung). Die Trennung der Koordinaten von der Objektbestimmung bringt mit sich, dass die räumliche Genauigkeit als bisher bedeutendstes Merkmal zur Beurteilung der Qualität von DTM bei ALS Mängel in der Objektbestimmung nicht nachweisen kann. Es hat sich gezeigt, dass in vielen Datenerfassungsprojekte mittels ALS geeignete Produktdefinitionen und vollständige technische Spezifikationen zur Beschreibung der erwarteten Qualität der Endprodukte fehlen. Als Folge davon sind diese Projekte von Verzögerungen und Mehraufwand geprägt.

Diese Mängel werden durch das in dieser Arbeit beschriebene Qualitätsmodell behoben, welches auf einer ganzheitlichen Betrachtung von Sensoren, Auswertalgorithmen, Prozessen, Geodaten und Kundenbeziehung beruht. Das Modell orientiert sich an den ISO-Normen zu Qualitätsmanagement und Geodaten, ist aber auf die Merkmale hochaufgelöster DGM und den spezifischen Eigenschaften der ALS-Technologie ausgerichtet. Das Modell ist aus mehreren Schichten aufgebaut. Die zentrale Stellung nimmt die Produktdefinition ein. Sie beschreibt, wie die Realwelt in dem Geodatensatz abgebildet werden soll. Zusammen mit den Metadaten und weiteren Informationen aus dem Produktionsprozess zur Gewährung der Nachvollziehbarkeit beschreibt die Produktdefinition die nicht-quantitativen Qualitätsmerkmale. Zur quantitativen Beschreibung der Qualität eines Datensatzes stehen mehrere Merkmale zur Verfügung (zweite Schicht). Der Nutzen dieser Merkmale kann nur erzielt werden, wenn die dazugehörigen Testmethoden und die Qualitätsgrenzlage beschrieben sind. In der Arbeit werden geeignete Ansätze präsentiert, ohne aber konkrete Vorschläge für Qualitätsgrenzlagen anzubieten, da diese stark von der Anwendung abhängen. Die dritte Schicht des Qualitätsmodells beschreibt die Anforderungen an die Prozessqualität. Auf der technischen Seite stehen die Realisierungsprozesse, welche die Qualität der Produktion entsprechend den Qualitätsvereinbarungen sicherstellen. Zur Mittel- und langfristigen Sicherstellung der Prozessqualität dienen die Managementprozesse. In der äussersten Schicht des Qualitätsmodells steht der Geodatensatz als das Ergebnis der inneren Schichten. Von besonderer Bedeutung ist auch das Datenmanagement, welches aufgrund der anfallenden Datenmenge besondere Aufmerksamkeit erfordert.

Durch die Einführung des Qualitätsmodells in die Produktionsprozesse und die Bereitstellung geeigneter Softwarewerkzeuge, welche zur Vervollständigung des Modells beschrieben werden, kann die Effizienz und Effektivität in Projekten zur Generierung von DGM mittels ALS gesteigert werden.

Die praktischen Vorteile und Nutzen des Qualitätsmodells werden anhand der Erfahrungen in einem Grossprojekt für das Bundesamt für Landestopographie (swisstopo) diskutiert.





# 1 Einführung

## 1.1 Ausgangslage und Motivation

Airborne Laser Scanning (ALS) ist in den vergangenen Jahren zur führende Technologie für die grossflächige Erfassung von dreidimensionalen Geländemodellen (DGM) herangereift. Die Technologie weist gegenüber der traditionellen Luftbildphotogrammetrie verschiedene Vorteile auf, die eine deutliche Effizienzsteigerung und eine Senkung der Produktionszeiten ermöglicht. Dank den wirtschaftlichen Vorteilen, den erzielten Verbesserungen in der Sensortechnologie und der Erschliessung neuer Anwendungsbereiche hat ALS die Luftbildphotogrammetrie in vielen Bereichen der 3D-Datenerfassung verdrängt. Die vergangenen Jahre haben damit einen Paradigmawechsel beim Sensorsystem (Kraus, 2002) gebracht, welcher auf die Datenerfassung, die Auswerteprozesse und die Produkte einen starken Einfluss ausübt:

- Beim ALS handelt es sich nicht um einen einzelnen Sensor, sondern um eine Kombination von drei Sensoren, über welche hinsichtlich Signalauswertung und Verarbeitungsalgorithmen wenig Angaben publiziert werden und die damit zu einem bedeutenden Mass als Black Box zu akzeptieren sind.
- Zwischen den für den Kunden relevanten Produkten und den Messgrössen der einzelnen Sensoren steht eine mehrstufige Prozesskette. Die originären Ursachen von Abweichungen zwischen erwartetem und aktuellem Wert sind nicht einfach zu eruieren.
- Die Datenerfassung erfolgt mit hoher Geschwindigkeit, aber unstrukturiert; es werden teilweise über 150'000 Punkte pro Sekunde registriert, aber die wesentliche Eigenschaft eines erfassten Punktes – welches Objekt bei einer Messung abgetastet wird – kann erst im späteren, mehrstufigen Auswerteprozess bestimmt werden.
- Die Technologie erlaubt das direkte Bestimmen eines Geländemodells in viel höherer horizontaler Auflösung als mit anderen Messmethoden und in einer vergleichbaren räumlichen Genauigkeit. Die höhere Auflösung und die unstrukturierte Erfassung bringen den Nachteil mit sich, dass (Klein-) Strukturen erfasst werden, welche bis anhin kaum grossräumig bestimmbar waren (wie Freileitungen) oder die nicht von Bedeutung sind (mobile Objekte wie Fahrzeuge).
- Die gebräuchlichsten Kriterien zur Beurteilung der Qualität eines DGM – räumliche Genauigkeit und Auflösung – sind aufgrund dieser neuen Eigenschaften nicht mehr ausreichend. Andere Merkmale wie thematische Genauigkeit und logische Konsistenz (was gehört in das Modell) sind als genauso wichtig einzustufen.
- Die Entwicklung der Algorithmen zur Auswertung der Messungen und der Analyse der Punktwolken hinken zurzeit den Entwicklungen der Sensorsysteme hinterher.
- Die gängigen Methoden aus der Geodäsie zur Beurteilung der räumlichen Genauigkeit von Messungen kann nicht angewendet werden, weil die Messungen nicht reproduzierbar sind (keine explizit redundanten Messungen).
- Als junge Technologie gibt es noch keine etablierte Lehrmeinung über Prozesse und Qualitätsindikatoren von Produkten aus ALS, subjektive Kriterien und Interpretationen prägen die Arbeit.
- Das Resultat eines Teilprozesses kann aufgrund mangelnder Redundanz oder fehlender Vergleichsmöglichkeiten nicht ausreichend geprüft werden. Mängel treten erst in nachfolgenden Prozessen zutage.
- Das anfallende Datenvolumen ist trotz stetig wachsenden Rechnerkapazitäten nicht zu unterschätzen. Die enorme Datenmenge zwingt dazu, mit Stichproben zu prüfen.

Diese einschneidende Veränderung in der Datenerfassung und -auswertung verlangt nach komplett neuen Prozessen und neuen Denkstrukturen (vgl. auch Petzold et al., 1999). Diesem Wandel wurde in der Vergangenheit oft zuwenig Rechnung getragen, so dass die Auswerteprozesse und Qualitätskriterien weitgehend den Strukturen der photogrammetrischen DGM-Erfassung folgten. Bei der visuellen Beurteilung eines Datensatzes durch den Auftraggeber werden daher immer wieder Mängel entdeckt, die auf unterschiedliches Verständnis über die Produkte und die vereinbarte Qualität zurück zu führen sind.

Als Resultat davon sind viele ALS-Projekte von Verzögerung und Diskrepanzen zwischen Erwartungshaltung und realem Ergebnis geprägt<sup>1</sup>.

Parallel zum Aufkommen der ALS-Technologie sind in der letzten Dekade laufend neue digitale Datensätze entstanden und damit haben Geo-Informationssysteme (GIS) in immer mehr Bereichen Einzug gehalten. Die GIS-Anwender sind auf zuverlässige Daten angewiesen und mit „besseren“ Daten steigen auch die Einsatz-Möglichkeiten des GIS. Die Vielseitigkeit von Basisdaten wie Grundbuchkataster oder Geländemodelle verlangt nach abstrakten Beschreibungen der Datenmodelle und Schnittstellen. Aber auch über Datencharakteristiken wie räumliche und inhaltliche Genauigkeit, Aktualität oder Erfassungsmethoden und über standardisierte Methoden zur Evaluation und Beschreibung der Qualitätsmerkmale sind allgemein gültige Konzepte notwendig. Auf diesen und anderen Forderungen begründet sich die Technische Kommission TC211 der International Organisation for Standardization (ISO), welche seit 1995 die Normierung im Bereich von digitalen geografischen Informationen vorantreibt (Normenreihe ISO 19100).

## 1.2 Ziel der Arbeit

Die Arbeit hat zum Ziel, ein umfassendes Qualitätsmodell für die Erzeugung von DGM mittels ALS zu formulieren. Mit diesem Qualitätsmodell wird eine objektive Basis geschaffen, damit der Paradigmawechsel bei den Sensoren auch in der Beschreibung der Qualitätskriterien, in der Datenauswertung und den Qualitätskontrollen nachvollzogen wird. Im Zentrum des Modells steht ein Auftraggeber mit seinen Forderungen an die Eigenschaften eines Produkts (hier DGM), nicht die Möglichkeiten der Sensoren oder Algorithmen. Die Abstraktion der Realwelt in ein Geländemodell ist verbunden mit einer Selektion, da die Komplexität der Umwelt nicht ohne Reduktion in ein Modell überführt werden kann. Trotzdem wird ein DGM häufig nicht als Modell behandelt, sondern wird als „wahre“ Abbildung des Geländes verstanden (vgl. auch Wechsler, 2000; Zhang und Goodchild, 2002). Der Auftraggeber ist sich dessen vielleicht nicht immer bewusst, anerkennt diese Vereinfachung aber implizit durch die Vorgaben bezüglich Datenkatalog und räumliche Genauigkeit. Die Bedeutung des Begriffs Modell – ein *vereinfachtes* Abbild der Wirklichkeit – darf im Kontext der Qualität von Geodaten aber nicht ausser Acht gelassen werden.

Das Qualitätsmodell beruht auf einer ganzheitlichen Betrachtung von Kundenforderungen, Datenmodellierung, Sensoren, Prozessen und Auswertalgorithmen. Es beinhaltet die abstrakte Beschreibung von Qualitätsmerkmalen von Geodaten, das Entwickeln von Testmethoden und setzt sich mit den Prozessen bei der Abwicklung eines ALS-Projekts auseinander. Die Qualitätsmerkmale und die Dokumentation der Datenprozessierung beruhen auf der Normenreihe ISO 19100, damit die Vergleichbarkeit zu anderen Datensätzen und Prozessen vereinfacht wird. Indem eine relative Vollkommenheit aufgrund der Kundenforderungen „so gut wie verlangt“ und nicht ein absolutes Perfektionieren „so gut wie technisch möglich“ angestrebt wird, übt das Qualitätsmodell eine positive Auswirkung auf die Effizienz, Effektivität und damit Kosten und Termine bei der Abwicklung von ALS-Projekten aus.

## 1.3 Gliederung der Arbeit

Aus Sicht eines Auftraggebers mögen präzise technische Spezifikationen auf den ersten Blick ausreichend sein, da die Wahl eines geeigneten Sensors und die Erarbeitung eines Datensatzes dem Auftragnehmer anvertraut werden. Da sich ALS zurzeit als *die* Technologie für hoch auflösende Geländemodelle behauptet, sollten sich Auftraggeber aber auch mit den Vor- bzw. Nachteilen eines ALS-Sensors und der Entstehung des Produkts auseinandersetzen. Zum besseren Verständnis werden deshalb nach einer Einleitung zum Qualitätsbegriff im Allgemeinen, zur Qualität von Geodaten bzw. zur Qualität von DGM im Speziellen im Kapitel 2 die Technologien zur Datenerfassung und im Kapitel 3 die Prozesse zur Auswertung der Daten beschrieben. Bei diesen beiden Kapiteln werden die aktuell verfügbaren Sensoren und Algorithmen insbesondere hinsichtlich ihrer möglichen Einflüsse auf die Qualität der

---

<sup>1</sup> Diese Erfahrung wurde bei einer Befragung verschiedener Vermessungsämtern im deutschsprachigen Raum bestätigt, welche bereits Datenerfassungsprojekte mit ALS durchgeführt haben (vgl. Anhang).

Endprodukte analysiert. Im Kapitel 4 wird das Qualitätsmodell mit seinen Komponenten Datenqualität (Spezifikationen), Prozessqualität, Qualitätsprüfungen und Datenmanagement präsentiert. Das Kapitel 5 behandelt die Erfahrungen aus einem Projekt zur Datenerfassung eines digitalen Terrain- und Oberflächenmodells in der Schweiz, welches der Autor als technischer Projektleiter bei einem der Auftragnehmer (Swissphoto AG) begleitete. Hier werden insbesondere verschiedene Faktoren mit negativen Einflüssen auf die Qualität der Produkte und die getroffenen Massnahmen diskutiert. Im abschliessenden Kapitel 6 werden die Schlussfolgerungen gezogen und Vorschläge präsentiert, wie die Sensoren und Algorithmen verbessert werden können, um weitere Hilfen zur schnelleren Beurteilung der Resultate eines Prozessschrittes anzubieten.

## 1.4 Qualitäts- und Prozessmanagement

### 1.4.1 Erläuterung zum Begriff Qualität

In dieser Arbeit nimmt der Begriff *Qualität* einen bedeutenden Stellenwert ein, weshalb ein einheitliches Verständnis zur Terminologie notwendig ist. Nach (Zollondz, 2002) bezeichnet der Begriff Qualität in der Umgangssprache einerseits nicht wertend die Beschaffenheit eines Produktes oder Dienstleistung (beispielsweise „eine Uhr von hoher Qualität“) und andererseits wertend die Güte („fitness for use“, Aussage über diese Einheit, die sich auf einen zu erfüllenden Zweck bezieht). In der ISO Norm 9000:2000 (ISO 9000) wird Qualität definiert mit „*Realisierte Beschaffenheit bezüglich Qualitätsanforderung*“. Mit der Einführung des Begriffs *Anforderung* wird ein Massstab für die Auslegung von Produktionsprozessen und die Qualitätsbeurteilung festgelegt. Die weitere Verwendung des Begriffs *Qualität* erfolgt in dieser Bedeutung. Die in der Geodäsie gebräuchliche Assoziation von Genauigkeit und Zuverlässigkeit mit Qualität deutet darauf hin, dass der Begriff nicht immer korrekt verwendet wird.

Die präzisierte Definition macht deutlich, dass den (technischen) Anforderungen bei Geländemodellen aus ALS ein sehr hoher Stellenwert zukommt, insbesondere da es zurzeit weder einen allgemein gültigen, noch einen de facto Standard für hoch auflösende DGM gibt.

### 1.4.2 Grundzüge des Qualitätsmanagements

Die wichtigsten Prinzipien des heutigen Qualitätsmanagements sind in der Mitte des 20. Jahrhunderts entstanden. Verschiedene Wissenschaftler und Ingenieure wie Crosby, Deming, Feigenbaum, Ishikawa, Juran oder Taguchi haben erkannt, dass durch den Wandel in der Produktion (stärkere Automatisierung der Prozesse) und in den Märkten (kürzere Entwicklungszyklen, eine sich verschärfende Konkurrenzsituation) neue Methoden notwendig sind, um ein Gleichgewicht zwischen Produktqualität, finanziellem Erfolg, Effizienz, Innovation und Strukturen zu erreichen (Kamiske und Brauer, 2003). Das neue Gedankengut wurde häufig im Umfeld von automatisierter Fertigung (z.B. Automobilindustrie) und in sicherheitskritischen Bereichen (Aviatic, Weltraumprogramme) entwickelt und hat sich später dann auch in anderen Industrien durchgesetzt. Aus den Ideen und Programmen entstanden Qualitätswerkzeuge (wie Qualitätsregelkarte, Pareto-Diagramm oder Ishikawa-Diagramm) und spezialisierte Qualitätssysteme (Total Quality Control, Company-Wide-Quality Control, Zero-Defects-Concept). Die Normen für Qualitätsmanagementsysteme der verschiedenen Industriezweige wurden in der internationalen Normenreihe ISO 9000:1987 erstmals harmonisiert. Diese ISO-Normen beschreiben allerdings kein Qualitätsmanagementsystem (QMS), sondern bieten in Form von Anforderungen eine Grundlage, auf der ein spezifisches QMS der Organisation aufzubauen ist. In den Jahren 1994 und 2000 wurde die Norm zweimal revidiert, wobei seit der letzten Revision das Hauptaugenmerk auf strukturierte Geschäftsprozesse gelegt wird. Insbesondere nach der Revision 1994 haben immer mehr (Vermessungs-) Firmen ein Qualitätssystem nach ISO 9001 aufgebaut (Flach et al., 1999). Seit 2000 ist die Zahl der zertifizierten Betriebe in der Schweiz von gut 1'900 auf über 11'500 und weltweit von 408'000 auf 670'000 angestiegen (ISO, 2005). Neben dem QMS nach ISO haben sich weitere Qualitätsmodelle wie Six Sigma, European Foundation of Quality Management (EFQM) oder Total Quality Model (TQM) etabliert. Es muss also davon ausgegangen werden, dass ein Qualitätsmodell für ALS auf einem bestehenden, firmenweiten QMS aufbauen kann. Der Fokus wird deshalb auf die Parameter zur Beschreibung der Qualität von Geodaten, auf die *Prozessqualität* und auf die *Qualität der Umsetzung* gelegt (Seghezzi, 1996).

Beim Erarbeiten der Ausführungen sind aber auch Ansätze aus dem TQM (Radtke, 1997) von Bedeutung wie;

- Qualität steht im Mittelpunkt des Denkens und Handelns
- Ständige Verbesserung aller Prozesse
- Nachvollziehbares Handeln
- Fehlervermeidung durch vorbeugendes Handeln

### 1.4.3 Prozesse

Das gesamte betriebliche Handeln ist im Normalfall als eine Kombination von Prozessen bzw. Prozessketten zu betrachten (Kamiske et al., 2003). Eine Reihe von Aktivitäten transformieren eine Eingabe in ein Ergebnis und können als Prozess aufgefasst werden. Ein Ergebnis kann wieder als Eingabe für den nächsten Prozess dienen. Der Prozessgedanke widerspiegelt die Vereinheitlichung einer Handlung mit dem Ziel, mit der gleichen Eingabe das gleiche Ergebnis zu erhalten. Jeder Prozess unterliegt einem Verbesserungskreislauf (Feedback-Loop) zur Steigerung der Qualität und Produktivität, den bereits (Deming, 1986) beschrieben hat; „Plan-Do-Check-Act“. Nach diesem Prinzip ist auch die vorliegende Arbeit zu verstehen: sie beschreibt einen ersten Schritt zur Verbesserung der Qualität und Produktivität bei der Datenerfassung mittels ALS, es wird aber weiterhin notwendig sein, nach Verbesserungspotentialen zu suchen und sie zu realisieren.

Die Abbildung 1 zeigt einen Prozess in schematischer Darstellung. Der Feedback-Loop kann entweder auf den Prozess selber oder auf das übergeordnete QMS einwirken.

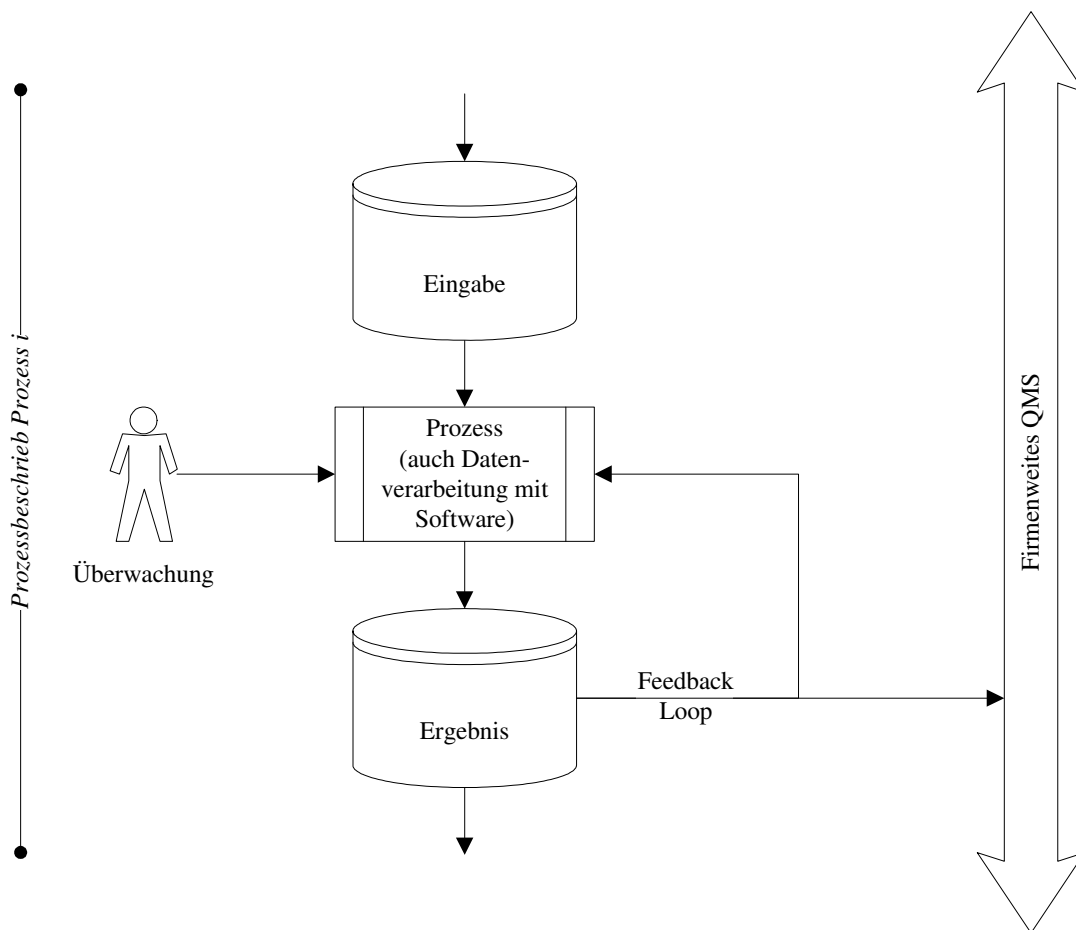


Abbildung 1 Schematische Darstellung eines Prozesses

#### 1.4.4 Qualitätsplanung

Die Qualität eines Produktes wird nicht durch die Qualitätskontrollen am Ende der Produktionskette sichergestellt. Vielmehr muss die Qualität beim Design eines Produktes (Deming, 1986) oder im Fall von ALS bei den Spezifikationen, beim Design des Sensors, bei der Auswertesoftware und bei der Planung der Abwicklung eines Projektes definiert werden. Die Norm ISO 9001:2000 verlangt folgende Bestandteile:

- Qualitätsziele und Anforderungen für das Produkt;
- die Notwendigkeit, Prozesse einzuführen, Dokumente zu erstellen und die produktspezifischen Ressourcen bereitzustellen;
- die erforderlichen produktspezifischen Verifizierungs-, Validierungs-, Überwachungs- und Prüftätigkeiten sowie die Produktannahmekriterien;
- die erforderlichen Aufzeichnungen, um nachzuweisen, dass die Realisierungsprozesse und resultierenden Produkte die Anforderungen erfüllen.

Bei der Erarbeitung eines neuen Produktes kommt den Produktdefinitionen und den technischen Spezifikationen eine besondere Bedeutung zu. Die durchführende Organisation hat dabei die vom Kunden für ein Produkt erwarteten Eigenschaften einschließlich der Anforderungen hinsichtlich Lieferung und allenfalls auch hinsichtlich Verfahren und Prozessen zusammen zu tragen, um das geforderte Qualitätsniveau sicherstellen zu können.

#### 1.4.5 Qualitätsmanagement bei ALS-Projekten

Eine nicht zu unterschätzende Besonderheit bei der Anwendung von ALS ist die Singularität jedes Auftrages. Die Datenerfassung kann nicht *identisch* reproduziert werden, da diese Aktivität mit nicht beeinflussbaren Faktoren wie Wetter und GPS-Konstellation sowie damit einhergehender Mitwirkung von Menschen (Navigation des Piloten) verbunden ist. Somit sind auch alle nachfolgenden Prozesse von dieser Einzigartigkeit geprägt, auch wenn sie im Wesentlichen unverändert bleiben und für einen bestimmten Datensatz (Input) auch wiederholbar werden.

Das Erfassen eines DGM mittels ALS ist daher als Projekt zu betrachten und einige Besonderheiten von Projekten sollen kurz diskutiert werden (ISO 10006):

1. Jedes Projekt ist unterteilt in nicht-wiederholbare Phasen, welche aus Prozessen und Aktivitäten bestehen
2. Sie weisen einen gewissen Grad an Risiko und Unsicherheit auf, da nicht immer auf bestehende Prozesse abgestützt werden kann (Innovationsbedarf)
3. Es wird erwartet, dass die Resultate (mindestens) den erwarteten Spezifikationen entsprechen
4. Die Rahmenbedingungen mit Start- und Enddatum, Kosten und Zwänge bei den Ressourcen sind klar definiert
5. Personal kann über die gesamte Projektdauer oder auch nur über einen Teil zugeordnet werden und Veränderungen in der Projektorganisation sind normal

Es ist Aufgabe des Projektleiters, diese Schwierigkeiten zu (er-)kennen und mittels eines strukturierten Projektmanagementplanes die Grundlage für eine erfolgreiche Projektabwicklung zu schaffen. Der Plan beschreibt u. a. die Produktspezifikationen, wie sie zu messen und wie sie zu überprüfen sind. Als weiterer wichtiger Punkt müssen Kennwerte für das Messen und Kontrollieren des Fortschritts identifiziert werden, um laufend die Planung der weiteren Aktivitäten vorzubereiten.

Die Produktspezifikationen eines DGM-Datensatzes müssen auf die einzelnen Aktivitäten und Prozesse verfeinert werden. Da dies nicht streng mathematisch erfolgen kann, muss vielmehr festgestellt werden, in welchem Bereich das Resultat einer Aktivität zu planen ist (unscharfe Definition - „fuzzy“), um die Spezifikationen am Ende der Prozesskette mit genügend grosser Wahrscheinlichkeit zu erfüllen und gleichzeitig den wirtschaftlichen Erfolg zu gewährleisten. Konsequenterweise sind damit die Prozesse laufend zu überwachen und der Input und Output von Aktivitäten auf die Erfüllung der Anforderungen an diesen Schritt zu überprüfen. Diese Forderung ist aus dem Qualitäts- und Projektmanagement bekannt, allerdings darf nicht vergessen werden, dass die räumlich getrennte Datenerfassung, die anfallende Datenmenge und die Verzahnung der Prozesse das Erfüllen dieser Anforderung stark erschweren.

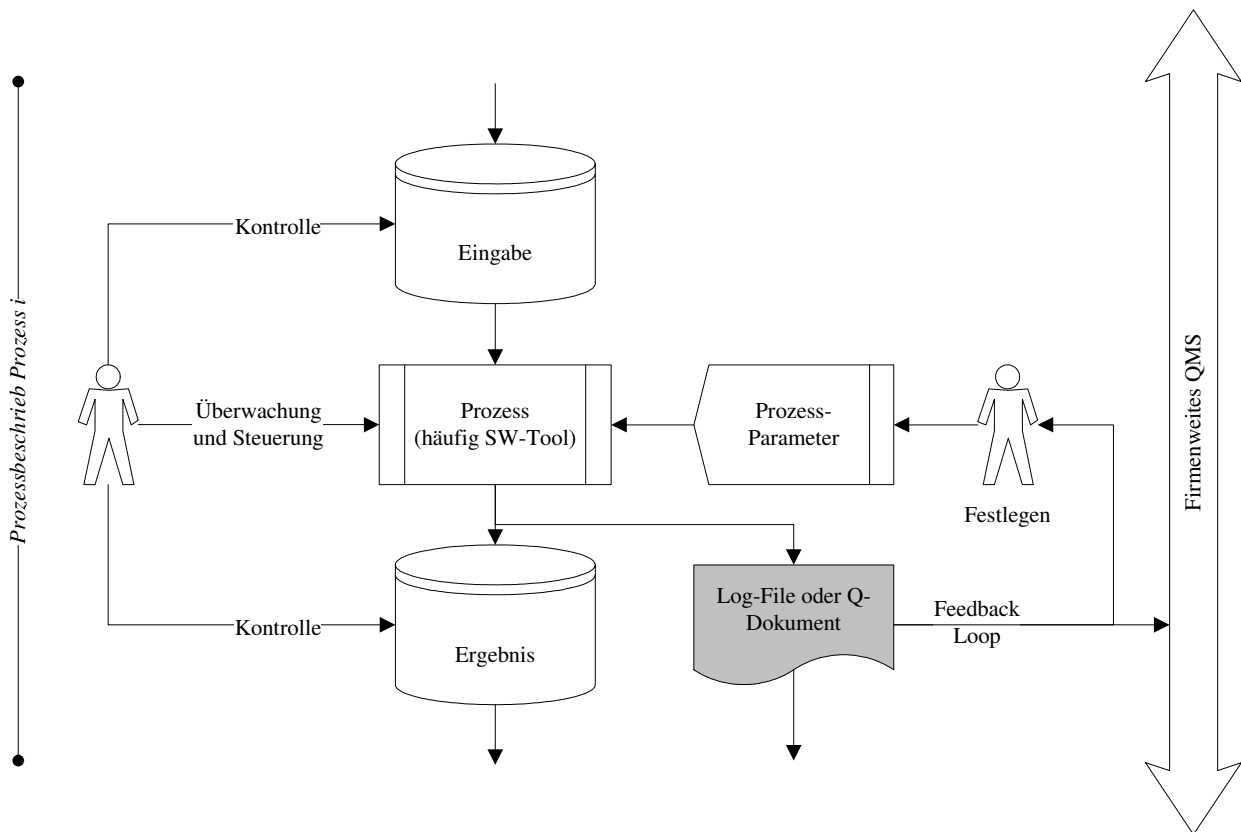


Abbildung 2 Verfeinerter, generischer Prozessablauf

## 1.5 Qualität im Vermessungswesen

Im Vermessungswesen sind die Messprozesse wie trigonometrische Winkelbestimmung oder Nivellement über Jahrzehnte verbessert worden, weshalb heute durch möglichst unabhängige Messanordnung und redundante Messungen das eigentliche Messergebnis, d.h. dessen Genauigkeit und Zuverlässigkeit sehr zeitnah geprüft werden können. Damit werden einerseits grosse Fehler durch unsachgemässe Bedienung (z.B. Stehachsenschiefe) unmittelbar detektiert und andererseits die Resultate auf Plausibilität geprüft (Doppel-Nivellement). Die Prozessketten sind also geprägt durch wenige, dafür kontrollierte (respektive kontrollierbare) Arbeitsschritte, in situ Auswertung der Messgrössen (Kontrolle) sowie durch eine überschaubare Datenmenge. Dies zeigt sich insbesondere bei der über lange Zeit verbreiteten in situ Geländeaufnahme mittels Messtisch und Kippregel: Das Resultat der Messung geht in Real Time als Objekt in eine topographische Karte über, welche mit jeder Messung zusätzlich validiert wird.

Durch die laufend stärkere Einbindung von elektronischen Komponenten und Auswerte- bzw. Berechnungsprozesse in den Sensoren (beispielsweise die Ausgabe von kartesischen Koordinaten beim GPS), geht das Verständnis über die Messgrössen verloren. Die vom Beobachter wahrgenommene Messgrösse ist tatsächlich bereits ein aus verschiedenen Messgrössen berechneter Wert. Da nur wenig oder tlw. gar keine Informationen zu diesen Auswertelgorithmen vorhanden sind, geht die oben erwähnte Transparenz und die Nachvollziehbarkeit (von Messgrössen) in der Vermessung verloren. Die Ausgabe von abgeleiteten Grössen beeinträchtigen auch die unmittelbaren Qualitätskontrollen. Ganz besonders gilt dies beim ALS, wo es zum aktuellen Stand eine klare zeitliche und räumliche Trennung zwischen Datenerfassung und Auswertung(en) gibt. Die einzelnen Prozesse zeichnen sich durch einen hohen Abstraktionsgrad aus und die Anforderungen an die Prozesseigner (Mitarbeiterqualifizierung) sind sehr unterschiedlich. Die Anzahl der Prozessschritte gegenüber der terrestrischen Aufnahme steigt, es findet eine Arbeitsteilung statt, d.h. ein Produktionsprozess wird auf Teilprozesse unterteilt, wobei die Teilprozesse häufig von jeweils spezialisierten Fachkräften ausgeführt werden. Des Weiteren können die Prozessoutputs nicht direkt auf ihre Qualität überprüft werden. Die Steigerung der Komplexität der Auswerteprozesse, die Kombination verschiedenster Auswertewerkzeuge und dadurch oft fehlendes Know-how auf Seiten der Auftraggeber erschweren im Fall von ALS zusätzlich die Zusammenarbeit zwischen Kunde und Auftragnehmer.

## 1.6 Qualität von Geodaten

Der Bereich digitale Geodaten ist erst mit der weiten Verbreitung von GIS bei Kommunen, Verwaltungen und Versorgungsbetrieben mit der Frage nach Qualitätsangaben und der anwendungsneutralen Beschreibung der Daten konfrontiert worden. Im Zeitalter von analogen Katastern und CAD-gestützter Kartenerzeugung wurde ein Datensatz für seine unmittelbare Anwendung erfasst, andere Nutzungen waren weniger vorgesehen. Durch die schnell gewachsene Verbreitung von GIS und mit der Vereinfachung des Datenaustausches über das Internet interessieren sich mehr Benutzer für Geodaten (z.B. im Navigationssystem, bei Map-Services, mit Google Earth). Um die Güte ihrer Erzeugnisse abschätzen zu können, wollen sie aber auch wissen, welche Daten in welcher Auflösung, Genauigkeit und Aktualität wo bezogen werden können. Die Abkehr von proprietären Systemen und Daten widerspiegelt sich auch im Normenwesen, wo seit etwa Anfang der Neunziger Jahre Standards für Datenmodelle und Austauschformate (z.B. AV93/Interlis in der Schweiz, ALK/EDBS in Deutschland) entwickelt wurden. In diesen Zeitraum (1994) fällt auch die Gründung des Open Geospatial Consortium (OGC), welches die Vision verfolgt, dass beliebige Systeme über Netzwerke miteinander kommunizieren, indem die Systeme normierte Schnittstellen zur Verfügung stellen bzw. verstehen (OGC, 2005). Im gleichen Jahr wurde auch innerhalb der ISO erkannt, dass Standardisierungen im Bereich von digitalen geographischen Informationen notwendig sind und das Technische Komitee ISO/TC211 wurde gegründet. Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit sind die drei (bereits publizierten) Standards:

- (ISO 19113): Grundlage zur Beschreibung der Qualität,
- (ISO 19114): Bestimmen des Qualitätsmasses
- (ISO 19115): Metadaten.

Momentan noch in Arbeit befindet sich u. a. der Standard ISO 19131 über Datenproduktspezifikationen.

### 1.6.1 Produktmerkmale

Die Erhebung von Geodaten ist meistens mit hohen Kosten verbunden, deshalb ist es angebracht, einen Geodatensatz für mehrere Anwendungen zu nutzen. Aus Sicht der Anwender ist gewünscht, dass es einen einfachen und für sie verständlichen Zugang zu den Informationen über verfügbare Datensätze und ihre Produkt- und Qualitätsmerkmale gibt, um die Eignung für eine konkrete Anwendung ohne Analyse der Geodaten selber zu überprüfen. Für den Produzenten von Geodaten sind die objektivierten Qualitätsanforderungen des Kunden die Richtlinien, nach welchen die Prozesse auszulegen sind. Der Beschreibung eines Datensatzes und dessen Qualität kommt damit eine Mittlerfunktion zu, weshalb sie unabhängig von Methoden, Sensoren, Prozessen und Anwendungen zu formulieren ist.

Bevor über die Qualitätsmerkmale von räumlichen Daten im engeren Sinn die Rede sein kann, muss definiert werden, nach welchen Regeln die Objekte der Realwelt abstrahiert werden. Je nach Anwendung ist der Abstraktionsgrad und der Detaillierungsgrad eines real existierenden Objekts unterschiedlich: Eine Strassenfläche in der Hydrologie wird als versiegelte Fläche behandelt, die Anzahl Fahrstreifen oder Geschwindigkeitsvorschriften sind im Gegensatz zu einer Navigationsapplikation nicht von Bedeutung. Auch bei digitalen Geländemodellen unterscheidet sich das Verständnis über den Abstraktionsgrad je nach Nutzer: ab welcher Höhe (ev. Grösse) gehört ein künstliches Objekt nicht mehr zu einem Terrainmodell? Wird die Grenze beim Bürgersteig, beim Bahnsteig oder gar erst bei der 2 m hohen Mauer gezogen? Auch wenn sich Produktmerkmale nie abschliessend definieren lassen, da nicht jeder mögliche Fall vorausgesehen oder eindeutig spezifiziert werden kann, geben sie doch den Rahmen für alle anschliessenden Prozesse vor. Eine sorgfältige Erarbeitung von angemessen detaillierten Spezifikationen ist daher unabdingbar.

### 1.6.2 Allgemeine Qualitätsmerkmale von Geodaten

In den vergangenen zwei Dekaden wurden von verschiedenen Autoren allgemeine Qualitätsmerkmale von Geodaten beschrieben. Etliche dieser Publikationen gehen auf das amerikanische National Committee for Digital Cartographic Data Standards (1988) zurück, welches als erste einen Standard publizierte. In der Praxis konnte sich dieser Standard aber nur beschränkt durchsetzen. Anbieter von Geodaten haben meistens ihre eigenen Qualitätsmerkmale definiert und verwendet (Schilcher et al., 1996). Nichtsdestotrotz haben wesentliche Bestandteile dieser Norm Eingang gefunden in spätere Modelle bis hin zur ISO Norm 19113, welche unverändert auch als europäische (CEN) und nationale

Norm (z.B. in AU, CH, DE, NL) übernommen wurde. Die ISO-Serie dient auch als Grundlage für die Beschreibung des ALS-Qualitätsmodells und wird dort erweitert, wo aus Sicht des Autors noch Lücken bestehen. Eine dieser Lücken, nämlich die Nachvollziehbarkeit der Entstehung, wird beim Vergleich der Qualitätsparameter (vgl. Tabelle 1) ersichtlich: Die Anwendungsbereiche mit den höchsten Anforderungen an die Zuverlässigkeit und an die Beschreibung der Qualität von Geodaten sind aufgrund der mit einer Publikation verbundenen Haftpflicht die Luft- und Schifffahrt. In einer europäisch-amerikanischen Zusammenarbeit wurden die allgemeinen Anforderungen an das Prozessieren von Daten für die Verwendung in der Luftfahrt in einer Industrienorm beschrieben (ED-76/DO-200A). Hier spielt die Nachvollziehbarkeit eine bedeutende Rolle. Da der Einsatz von ALS für verschiedene Anwendungen der Aviatik, insbesondere für die Kartierung von Flughindernissen intensiv diskutiert wird (vgl. auch Wang et al., 2004; ED-98/DO-276; Parrish et al., 2005; Lüthy et al., 2006), macht es Sinn, die Forderung nach der Nachvollziehbarkeit einer Information als eigenes Qualitätsmerkmal zu beschreiben.

Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich der Qualitätsparameter für Geodaten (basierend auf Aalders, 2002), grau unterlegt sind die Parameter, welche in dieser Arbeit untersucht werden.

	<b>Spatial Data Transfer Standard (1992)</b>	<b>International Cartographer Association (1996)</b>	<b>CEN, TC287 (1997)</b>	<b>ED76 (2002)</b>	<b>ISO 19113 (2001)</b>
Nicht-quantitative Merkmale	Quelle	Quelle	Quelle	Nachvollziehbarkeit	Nicht quantitative Qualitätselemente: Quelle, beabsichtigter Gebrauch, tatsächliche Anwendungen
			(Beabsichtigte) Verwendung	Datenintegrität	
Quantitative Merkmale	Auflösung	Auflösung		Auflösung	
	Metrische Genauigkeit	Metrische Genauigkeit	Metrische Genauigkeit	Genauigkeit	Räumliche Genauigkeit
	Thematische Genauigkeit	Thematische Genauigkeit	Thematische Genauigkeit		Thematische Genauigkeit
	Vollständigkeit	Vollständigkeit	Vollständigkeit	Vollständigkeit	Vollständigkeit
	Logische Konsistenz	Logische Konsistenz	Logische Konsistenz	(Beziehung zwischen den Datenelementen)	Logische Konsistenz
		Semantische Genauigkeit	Meta Qualität		
		Zeitliche Genauigkeit	Zeitliche Genauigkeit	Aktualität	Zeitliche Genauigkeit
			Homogenität		

**Tabelle 1 Qualitätsparameter von Geodaten (hervorgehoben sind die Parameter, welche untersucht werden)**

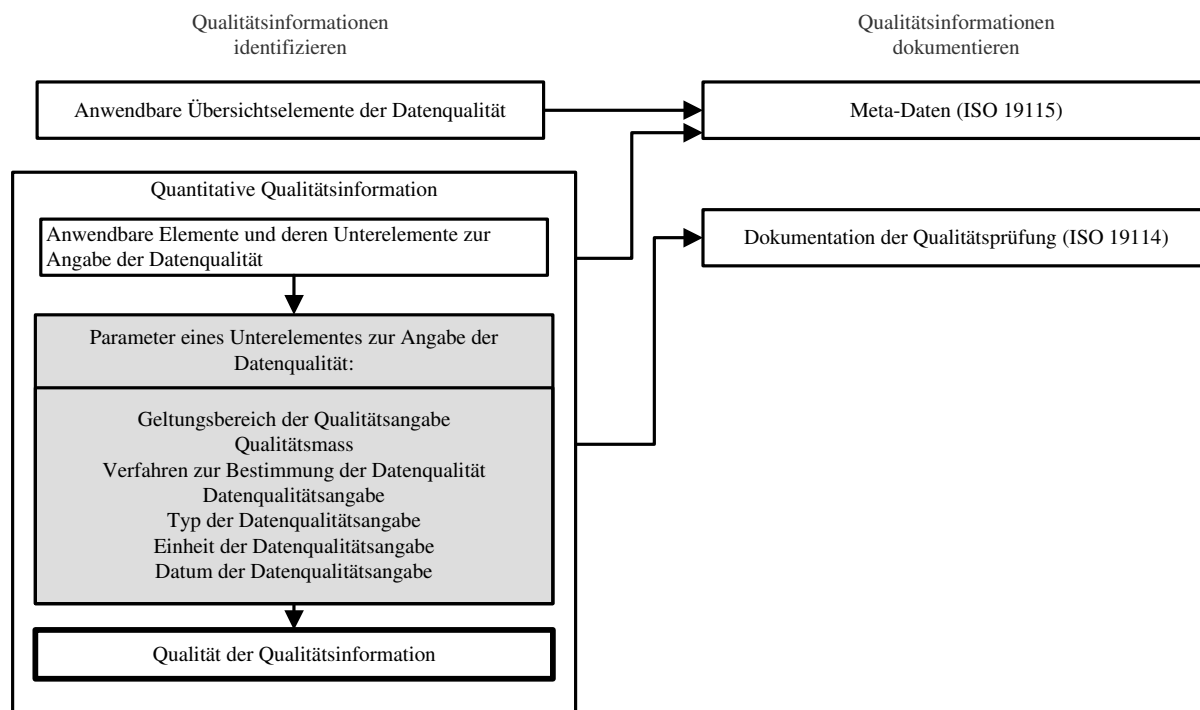
### 1.6.3 Die Qualitätsmerkmale der ISO Geonormen

Der Grundgedanke vom Modell nach ISO 19113 zielt darauf ab, dass zuerst die Informationen zur Datenqualität identifiziert und danach in einer geeigneten Form dokumentiert werden (vgl. Abbildung 3). Informationen werden unterteilt in nicht-quantitative Übersichtselemente und quantitative Elemente zur



Angabe der Qualität. Die allgemein gültigen, quantitativen Qualitätselemente sollen, sofern sie als Qualitätsindikator für den Datensatz herangezogen werden, mittels verschiedener Parameter präzisiert werden. Damit wird verständlich gemacht, was wie geprüft wird und wie das Resultat der Prüfung („Qualitätsangabe“) zu interpretieren ist.

Die nicht-quantitativen Elemente und die Zusammenfassung der Qualitätsprüfungen werden als Metadaten abgelegt, so dass die Eignung des Datensatzes für eine bestimmte Anwendung aufgrund dieser „Daten über die Daten“ geprüft werden kann, ohne den Datensatz selber nochmals testen zu müssen. ISO 19114 gibt Vorgaben, wie die detaillierten Resultate der einzelnen Qualitätsprüfungen dokumentiert werden.



**Abbildung 3 Überblick über die Informationen zur Datenqualität nach ISO 19113**

Die Qualitätsmerkmale aus ISO 19113, welche für die quantitative Beurteilung von dreidimensionalen Geländedaten aus ALS von Bedeutung sind, werden wie folgt definiert und verwendet (siehe auch Tabelle 1):

<i>Auflösung</i>	<i>Kleinste Differenz zwischen zwei benachbarten Objekten, die im Modell wiedergegeben werden können.</i>
<i>Räumliche Genauigkeit</i>	<i>Äussere oder innere<sup>2</sup> geometrische Genauigkeit eines Objektes (x, y, z)</i>
<i>Thematische Genauigkeit</i>	<i>Genauigkeit der messbaren und die Korrektheit der nicht-messbaren Attribute und die Klassifizierung von Objekten und deren Beziehungen</i>
<i>Vollständigkeit</i>	<i>Vorhandensein oder Fehlen von Objekten, derer Attribute oder Beziehungen</i>
<i>Logische Konsistenz</i>	<i>Grad der Einhaltung von logischen Regeln der Datenstruktur, der Attributierung und der Beziehung</i>
<i>Zeitliche Genauigkeit</i>	<i>Genauigkeit einer Zeitmessung, Korrektheit des zeitlichen Bezuges, der zeitlichen Beziehung zwischen Objekten und der Gültigkeit eines Objektes auf der Zeitachse (temporale Gültigkeit)</i>

Für jedes Merkmal werden verschiedene Unterelemente beschrieben, um die Aussage weiter zu präzisieren. Im einfachsten Fall der Vollständigkeit gibt es die Möglichkeit von Vorhandensein oder

<sup>2</sup> Anstelle von innerer Genauigkeit wird häufig der Begriff Präzision verwendet.

Nichtvorhandensein. Jeder Parameter kann auf einen ganzen Datensatz, auf ein Thema, ein Objekt oder gar ein einzelnes Attribut angewandt werden. Für weitere Details zu den Unterelementen wird auf die entsprechende Norm verwiesen.

Die Nachvollziehbarkeit als zusätzliches nicht-quantitatives Element (aus ED-76) verlangt, dass die Entstehung und alle Transformationen jedes Objektes eines Datensatzes nachvollzogen werden kann. Sie ist in diesem Sinn kein eigentliches Qualitätsmerkmal, da die Eigenschaften der Objekte nicht von ihr abhängen. Im Fall von nicht bestandenen Tests oder erst in einer späteren Anwendung aufgedeckten Mängeln hilft die lückenlose Prozessdokumentation aber, die Ursachen der Abweichungen zu eruieren und Situationen zu finden, wo analoge Fehler zu erwarten sind. Die erleichterte Suche nach Fehlerursachen unterstützt zudem die Verbesserung der Prozesse, so dass der aufgedeckte Mangel später vermieden werden kann.

#### 1.6.4 Der Prozess der Qualitätsprüfung

In ISO 19114 ist der Prozess der Qualitätskontrolle ausführlich beschrieben; die wesentlichen Schritte sind in der Abbildung 4 ersichtlich und im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

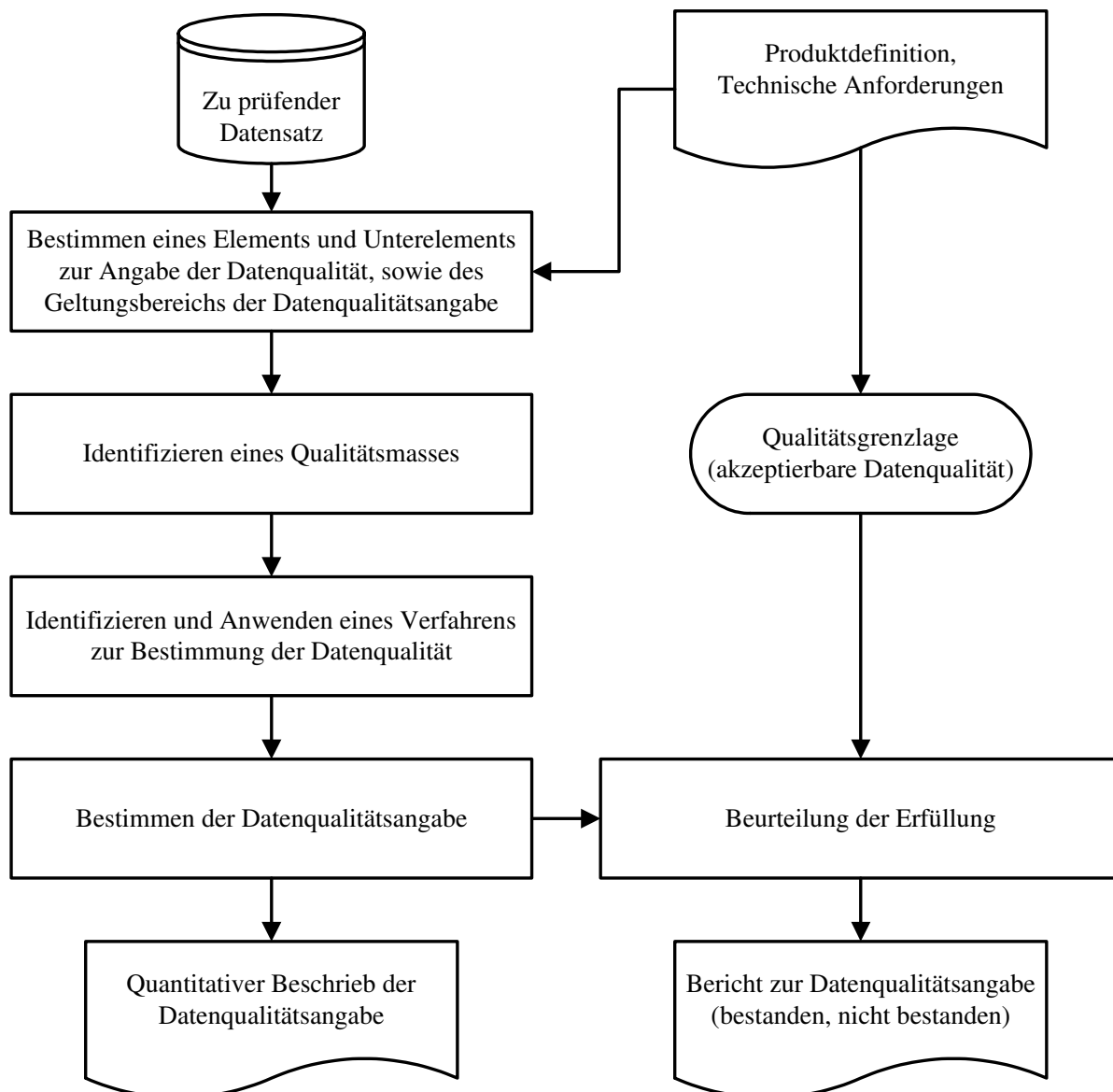


Abbildung 4 Der Prozess Qualitätsprüfung und Dokumentation nach ISO 19114

Die Produktspezifikation zusammen mit den technischen Anforderungen sind die Grundlage für die Definition und Ausführung der Qualitätsprüfung. Wie bereits früher erwähnt, sind nicht nur die Endprodukte, sondern auch die Zwischenresultate aller Aktivitäten zu überprüfen. Demzufolge sind aus den mit dem Kunden festgehaltenen Qualitätsforderungen entsprechende Spezifikationen für Zwischenresultate abzuleiten. Basierend auf diesen verfeinerten Anforderungen und in Kenntnis der Eigenschaften des zu prüfenden Datensatzes werden die notwendigen Qualitätsparameter und die jeweiligen Unterelemente sowie der Geltungsbereich definiert (siehe auch Kapitel 4). In der folgenden Tabelle sind die Schritte der Qualitätsprüfung sowie *eine* mögliche Ausprägung aufgeführt.

Schritt	Handlung	Anmerkung	Beispiel
1	Bestimmen eines Elements und Unterelements zur Angabe der Datenqualität, sowie des Geltungsbereichs der Datenqualitätsangabe	Die zu testenden Elemente und der Geltungsbereich sind anhand ISO 19113 zu identifizieren. Dies wird wiederholt, bis alle Spezifikationen mit geeigneten Prüfungen kontrolliert werden können.	Räumliche Genauigkeit – Genauigkeit der Höhe, bezogen auf das interpolierte Modell über den gesamten Perimeter. Qualitätsgrenzlage: nicht mehr als 10 % der Punkte dürfen um mehr als 15 cm abweichen
2	Identifizieren eines Qualitätsmasses	Für jeden Test werden die Qualitätsmasse und ggf. die Einheit festgelegt	Prozentsatz der Elemente die grösser sind, als die Spezifikation
3	Identifizieren und Anwenden eines Verfahrens zur Bestimmung der Datenqualität		Vergleich mit Kontrollpunkten, welche terrestrisch mittels GPS bestimmt werden. Punkte, die mehr als 15 cm vom interpolierten Modell abweichen, werden gezählt und anschliessend der Prozentsatz berechnet
4	Bestimmen der Datenqualitätsangabe	Durchführen des Tests nach den vorgängig definierten Vorschriften	27 Werte > 15 cm, 337 Werte ≤ 15 cm. 8 % der Werte weichen um mehr als 15 cm vom Soll ab.
5	Beurteilung der Erfüllung	Falls eine Qualitätsgrenzlage (Acceptable Quality Level) definiert wurde, erfolgt jetzt die Aussage zur (Nicht-)Erfüllung	Soll: ≤ 10 % Ist: 8 % Damit ist dieses Kriterium erfüllt

**Tabelle 2 Erläuterungen zum Prozess der Qualitätsprüfung**

Bei der Prüfung wird unterschieden zwischen direkter und indirekter Prüfung (vgl. Abbildung 5), wobei in der letztgenannten nicht die Daten selber validiert werden, sondern Sensoren und Verfahren. Diese Methode sollte nur dann angewendet werden, wenn keine direkte Prüfung möglich ist. Sie ist daher für die Untersuchung nicht weiter relevant, da genügend interne Referenzinformationen vorliegen. Bei der direkten Prüfung wird weiter unterschieden in interne und externe Prüfung, je nachdem, ob nur der Datensatz selber geprüft wird (wie beispielsweise der mittlere Punktabstand), oder ob zusätzliche Daten (z.B. Kontrollpunkte) herangezogen werden müssen. Beide Verfahren sind für die Qualitätsbeurteilung im ALS-Prozess von Bedeutung.

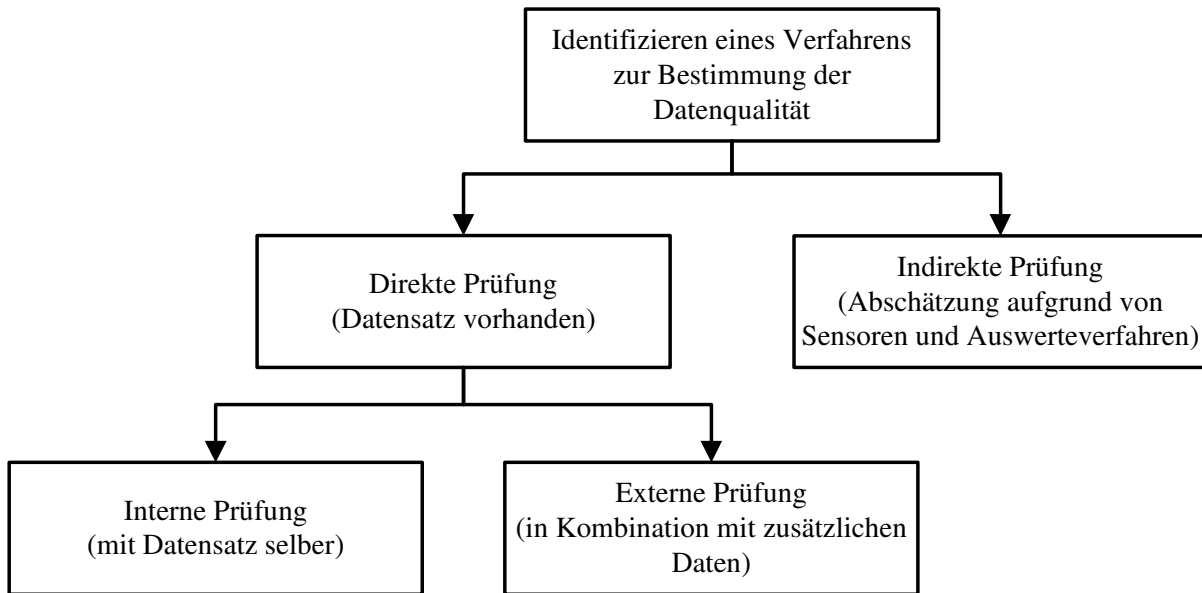


Abbildung 5 Die Prüfmethode nach ISO 19114

### 1.6.5 Dokumentation der Qualitätsinformation

Die Resultate aus Qualitätsprüfungen sind zu dokumentieren, so dass zu einem späteren Zeitpunkt der Prozess und die Resultate der Aktivitäten wieder rekonstruiert werden können. Die vereinfachte Fehlersuche ist insbesondere bei den Prozessen von Bedeutung, deren Resultate normalerweise erst später in der Prozesskette wieder verwendet werden; das Berechnen der Trajektorie kann zu scheinbar korrekten und die Vorgaben erfüllenden Resultaten führen, aber beim Kombinieren der Punktwolken von verschiedenen Messflügen wird beispielsweise festgestellt, dass die Stativ-Höhe der Referenzstation einmal nicht mitberücksichtigt wurde. Aufgrund der Vielzahl von Aktivitäten und der Verschiedenartigkeit von Sensoren und Auswerteprozess sowie der grossen Anzahl von Datensätzen sollen die Resultate der Qualitätsprüfungen strukturiert gemäss den Vorgaben in ISO 19115 abgelegt werden. Dies hilft nicht nur beim Finden von Informationen, sondern es ermöglicht auch, dass Metadaten automatisiert in ein beliebiges Format ausgegeben werden können.

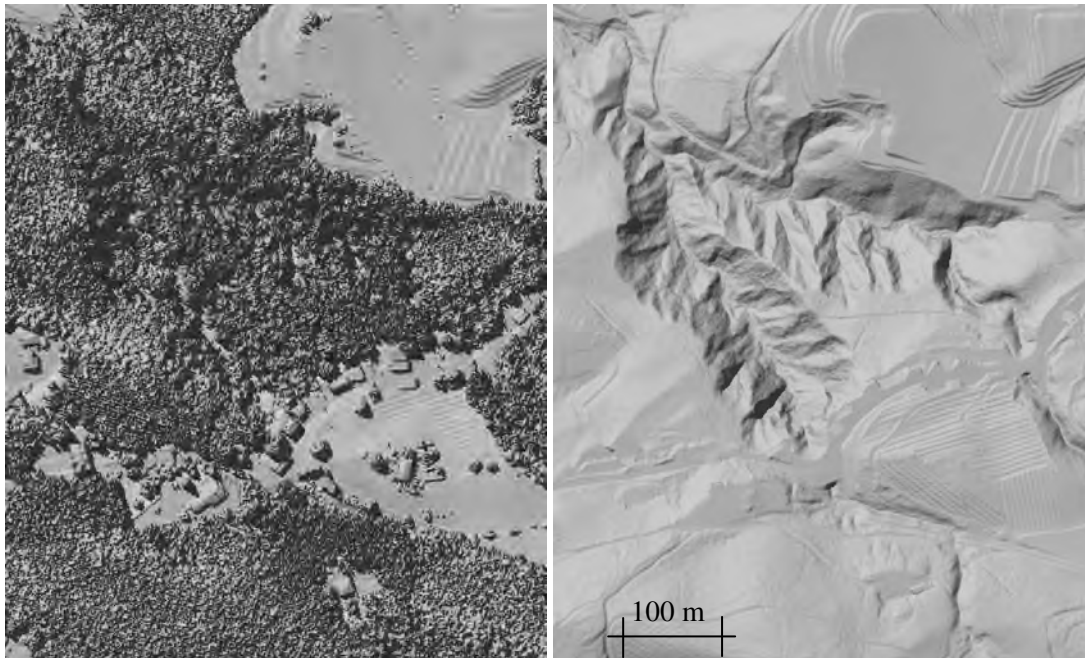
## 1.7 Qualität von Digitalen Geländemodellen

### 1.7.1 Begriffe

Das Endprodukt einer Datenerfassung mittels ALS kann von Projekt zu Projekt variieren, im Rahmen dieser Arbeit wird das System abgegrenzt beim Digitalen Terrainmodell (DTM) bzw. digitalen Oberflächenmodell (DOM). Das DTM beschreibt annäherungsweise den Verlauf des natürlich gewachsenen Terrains, (Miller und Laflamme, 1958) definierten dies als erste vor über 50 Jahren wie folgt:

*„The digital terrain model (DTM) is simply a statistical representation of the continuous surface of the ground by a large number of selected points with known X,Y, Z coordinates in an arbitrary coordinate field.“*

Das DOM widerspiegelt die Umhüllende der beständig sichtbaren Oberfläche, ist also im offenen Gelände identisch mit dem DTM und unterscheidet sich nur da, wo beständige vertikale Objekte vorhanden sind. Aus diesen beiden Definitionen folgt, dass die unstrukturierten Massenpunkte aus ALS mit geeigneten Methoden zu filtern sind, um einerseits aus den Massenpunkten die das Terrain beschreibenden Punkte zu extrahieren und andererseits um aus den verbleibenden Messungen mobile oder nicht beständige Objekte wie Verkehrsmittel oder einjährige Pflanzen auszuscheiden. Sofern es nicht von Bedeutung ist, ob ein DTM oder DOM gemeint ist, wird der allgemeine Term Digitales Geländemodell (DGM) verwendet.



**Abbildung 6** Links digitales Oberflächenmodell, Auflösung 1 m, rechts entsprechender Ausschnitt als digitales Terrainmodell (Quelle Swissphoto)

### 1.7.2 Modellierungsprozesse

Ein wesentlicher Prozess bei der Erzeugung von Geodaten ist die Abstraktion der Realwelt in ein Datenmodell (Bartelme, 1995). Sie führt durch Selektion, Generalisierung und Strukturierung der Objekte zu einer Vereinfachung. Das Datenmodell beschreibt, welche Eigenschaften die zu erfassenden Objekte aufweisen sollen, beispielsweise Lage und Thema, und welche thematischen Attribute die Objekte näher beschreiben sollen (Raggia, 2001). Im Fall von DTM und DOM kann das Datenmodell im Gegensatz zu anderen Geodatenätzen relativ einfach gehalten werden. Trotzdem wird ein Vergleich zwischen DGM und Realwelt immer Unterschiede auf Grund der Abstrahierungsregeln aufdecken. Die auffälligsten Abweichungen entstehen dann, wenn die gewählte Auflösung (der Abstand zwischen benachbarten Punkten im Modell) Objekte der Realwelt nicht wiederzugeben vermag (Fritsch, 1992).

Neben dem mit Unsicherheiten behafteten Vorgang der Datenmodellierung sind auch die Messungen zur Bestimmung einer 3D-Koordinate als Datenbasis für die Geländemodellierung und allfällige weitere Auswerteprozesse nicht perfekt. Die Geodäten sind geneigt, insbesondere die Messabweichungen als Fehler zu bezeichnen. Da aber ein wahrer Wert seiner Natur nach nicht ermittelbar ist (GUM, 1995) und ein gewisses Mass an Abweichungen nicht zu Fehlern in den darauf basierenden Anwendungen führen (und Geodäten nicht Messungen und Berechnungen mit mehr oder weniger Fehlern sondern genauere oder ungenauere Resultate liefern), werden die Begriffe Abweichungen oder Messunsicherheit verwendet<sup>3</sup>. Weitere Ausführungen sind in Kapitel 2.4 zu finden:

*"Experience has shown that no measurement, however carefully made, can be completely free of uncertainties [...]. In science, the word error does not carry the usual connotations of the term mistake or blunder. Error in a scientific measurement means the inevitable uncertainty that attends all measurements. As such, errors are not mistakes; you cannot eliminate them by being very careful." (Taylor, 1997).*

Aus diesen Umständen lässt sich schliessen, dass das Aufstellen von messbaren Qualitätscharakteristiken für ein DTM bzw. DOM und deren Beurteilung aufgrund einer erwarteten Abstraktion der Realität zu erfolgen hat. Der Grad der Abstraktion und das Setzen von Prioritäten in der visuellen Interpretation sind nicht vollständig objektivierbar.

<sup>3</sup> In Analogie wird der Begriff Fehler (englisch „Defect“) verwendet, um die Nicht-Erfüllung von Spezifikationen zu beschreiben. Fehler bezeichnen damit Abweichungen ausserhalb der Toleranz

### 1.7.3 Klassische Qualitätsmerkmale von DGM

Nach geodätischer Tradition wird die Qualität von Geodaten (und damit auch von DGM) sehr häufig aufgrund der räumlichen Genauigkeit beurteilt, bzw. eine hohe Genauigkeit wird mit guter Qualität assoziiert (Jakobsson, 2002). Diese Sichtweise wurde für die Beurteilung von DTM aus ALS von verschiedensten Autoren übernommen (vgl. hierzu Pereira und Wicherson, 1999; Behan et al., 2000; Al-Bayari et al., 2002; Oude Elberink et al., 2003; Ahokas et al., 2004; El-Sheimy et al., 2005). Diese Vereinfachung ignoriert allerdings unter anderem den Massstab (wie genau ist überhaupt gefordert) sowie den kritischen Prozess der Punktfilterung (Auswahl der DTM-Punkte aus der unstrukturierten Punktwolke). Lohmann und Koch (1999) weisen immerhin darauf hin, dass die Filterung einen bedeutenden Einfluss auf die Qualität haben kann. (Kraus et al., 2004) berechnen ein Qualitätsmass aufgrund von Krümmung und Punktabstand, gehen aber davon aus, dass die Nicht-Bodenpunkte vorgängig herausgefiltert wurden; aus den Berechnungen folgt aber wieder eine geschätzte Standardabweichung als Qualitätsmerkmal. (Wechsler, 2000) klassifiziert mögliche „Fehler“ in einem DTM hinsichtlich Datenfehler (Alterung der Daten, Verteilung der Daten), Messfehler und Fehler in den Prozessen (Unschärfen in den Algorithmen, Interpolations-, Klassifikations- oder Generalisierungsprobleme). Die Beurteilung der Daten reduziert sie dann allerdings wieder auf räumliche Genauigkeitsmasse.

Bei (Li et al., 2005) wird die Genauigkeit eines DTM auf noch mehr Faktoren zurück geführt, sie wird aber zusammen mit der Alterung der Daten wiederum als Qualitätsmass für DTM herangezogen:

$$G_{DTM} = f(C_{DTM}, M_{Modellierung}, R_{Terrain}, G_{Daten}, V_{Daten}, D_{Daten}, A) \quad (1.1)$$

wobei

$G_{DTM}$	<i>Genauigkeit des DTM</i>
$C_{DTM}$	<i>Charakter des DTM (kontinuierlich, diskontinuierlich, glatt)</i>
$M_{Modellierung}$	<i>Methode, welche zur Modellierung des DTM verwendet wird (Interpolation)</i>
$R_{Terrain}$	<i>Geländerauigkeit</i>
$G_{Daten}$	<i>Genauigkeit der zugrunde liegenden Daten</i>
$V_{Daten}$	<i>Verteilung der Datenwerte</i>
$D_{Daten}$	<i>Dichte der Datenwerte</i>
$A$	<i>Andere Einflüsse</i>

Verschiedene Organisationen haben Standards zur Beurteilung von digitalen Terrainmodellen entwickelt (Kölbl, 2001; Maune, 2001; FEMA, 2004). Auch in diesen Vorgaben hat die räumliche Genauigkeit die grösste Bedeutung. FEMA behandelt auch die Korrektheit der DTM-Filterung, empfiehlt allerdings, sie nur in Ausnahmefällen als Qualitätskriterium zu gebrauchen, da die Qualitätskontrolle subjektiv, zeitaufwändig und damit kostenintensiv ist.

Die nachträgliche Qualitätsbeurteilung von bereits bestehenden Geländemodellen basieren ebenfalls mehrheitlich auf der räumlichen Genauigkeit (Zhang et al., 2002). Die Kosten für das Bestimmen von Kontrollpunkten sind allerdings recht hoch, weshalb verschiedene Ansätze publiziert wurden, die eine Abschätzung der Genauigkeit über grössere Gebiete aufgrund einzelner Kontrollpunkte ermöglichen. Beispiele zu räumliche Korrelation, Variogramme, Kriging Interpolation oder Monte Carlo Simulation im Bereich DGM sind zu finden in (Davis und Keller, 1997; Fisher, 1998; Kyriadikis et al., 1999; Zhang et al., 2002). Im Gegensatz zu diesen Untersuchungen, welche auf dem Modell selber – ohne detaillierte Kenntnisse über den Erfassungsprozess – erfolgen müssen, kann bei der Erzeugung der Produkte aus ALS die gesamte Entstehung verfolgt werden und so eine präzise Abschätzung über Dimension und räumliche Verteilung der Messunsicherheit erfolgen.

Aufgrund dieser Beispiele und den Kenntnissen über die Technologie müssen sorgfältige Überlegungen zu geeigneten Qualitätsindikatoren angestellt werden. Die Indikatoren müssen die Eigenschaften (Qualität) eines DGM so umfassend beschreiben, dass die Eignung des Datensatzes für eine bestimmte Anwendung eruiert werden kann, ohne die Daten selber nochmals zu prüfen. Je umfangreicher die Dokumentation der Qualitätscharakteristiken ausfällt, desto einfacher fällt die Beurteilung und desto mehr Anwendungen können diese Daten nutzen.

## 2 Datenerfassung mittels Airborne Laser Scanning

Ein Airborne Laser Scanning System ist aus verschiedenen Sensoren und Komponenten zusammengesetzt, welche in diesem Kapitel vorgestellt werden. Nach den Erläuterungen zu den einzelnen Sensoren und ihren Messprinzipien werden anschliessend die Messunsicherheit jedes Sensors bzw. die kombinierte Messunsicherheit und Verfahren zur Bestimmung und Reduktion von systematischen und zufälligen Abweichungen (Kalibrierung, Ausgleichverfahren) diskutiert.

Der Laser Scanner zur Bestimmung des Vektors des Messstrahles von der Sensorplattform zum angestrahlten Objekt besteht aus einem Laser-basierten Distanzmesser, einer Ablenkeinrichtung und einem Steuerungsrechner. Daneben wird ein weiteres Sub-System – bestehend aus einem GPS-Empfänger und einem Inertialen Messsystem (IMS) – betrieben, das die Position und Orientierung der Sensorplattform registriert. Die Messgrößen der Sensoren werden zuerst einzeln ausgewertet und anschliessend miteinander kombiniert (vgl. Lasergleichung in Kapitel 2.4.5). Das System wird im Normalfall in einem Flugzeug oder Helikopter installiert. Im Hinblick auf die Produktspezifikationen können verschiedene Parameter wie Flughöhe, -geschwindigkeit, Scanwinkel, Scanrate und Pulswiederholfrequenz variiert werden.

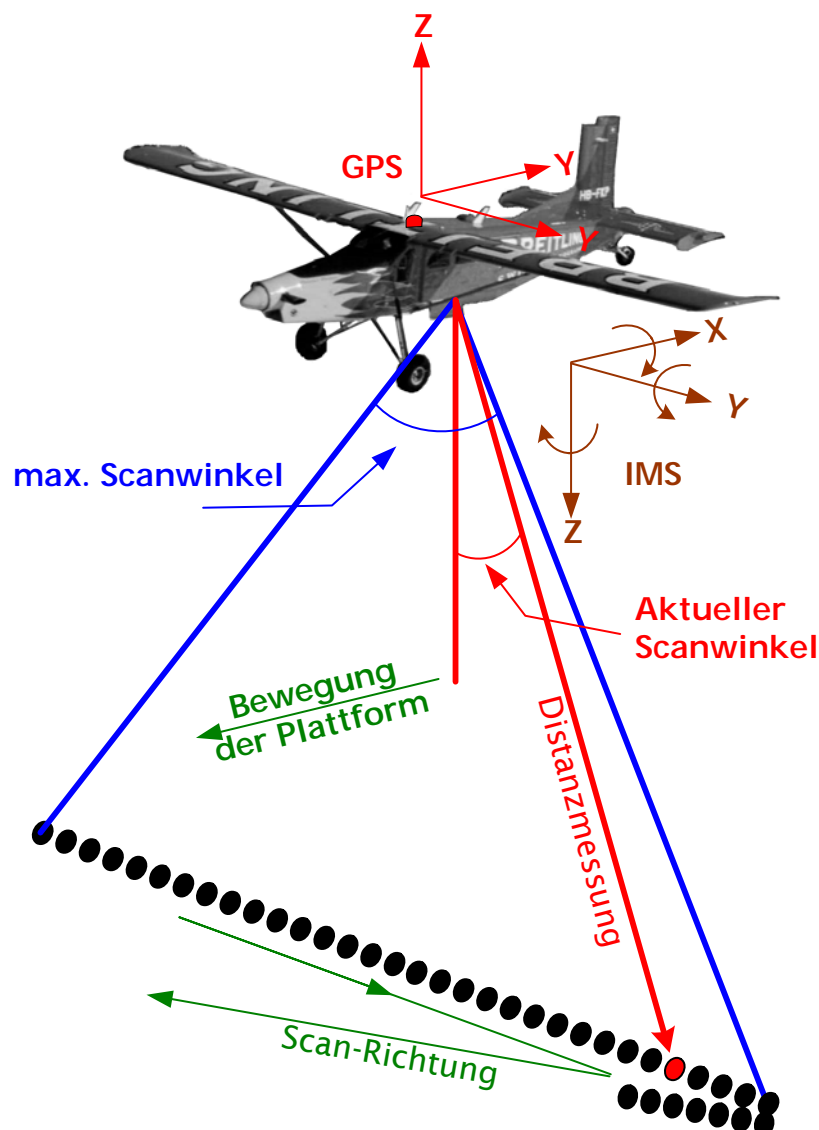


Abbildung 7 Messprinzip eines ALS-Systems

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Sensoren des ALS und ihre Eigenschaften vorgestellt. Auch wenn im Nachfolgenden jeweils nur von einem Sensor die Rede ist, darf nie vergessen werden, dass

die unabhängigen Messungen zu synchronisieren sind und daher eine sehr präzise Zeitmessung in allen Sensoren unabdingbar ist (vgl. Kapitel 2.4.4).

## 2.1 Laser Scanner

Die Distanzmessung erfolgt bei den meisten Systemen über einen gepulsten Laserstrahl in einzelnen Fällen auch über Mehrfrequenz-Phasenvergleichsverfahren (Hug, 1996); beim Pulsmessverfahren entspricht die Zeit zwischen dem Emittieren und dem Detektieren des Lichtimpulses (Time of Flight - TOF) der zweifachen Distanz ( $r$ ).

$$r = \frac{\Delta t \cdot v_g}{2} \quad (2.1)$$

wobei

$v_g$  Gruppengeschwindigkeit

$\Delta t$  Verstrichene Zeit zwischen Emission und Detektion

### 2.1.1 Laser Impuls

Die Pulsdauer beträgt typischerweise 10 ns und der Öffnungswinkel des Laserstrahls (Beam Divergence) ist je nach System zwischen 0.3 mrad und 1 mrad (Baltsavias, 1999b). Bei konstantem Laserimpuls beeinflussen die Witterungsbedingungen (Reduktion der Gruppengeschwindigkeit, Streuung und Dämpfung des Signals in der Atmosphäre), Fremdstrahlung sowie die Reflektionseigenschaften und die Geometrie des angestrahlten Objektes die Form des empfangenen Signals (Wagner et al., 2003). Der Detektor muss das empfangene Signal analysieren und ermittelt (im Normalfall) diskrete Messwerte.

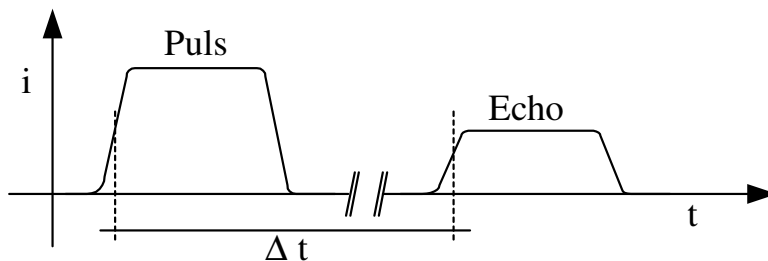
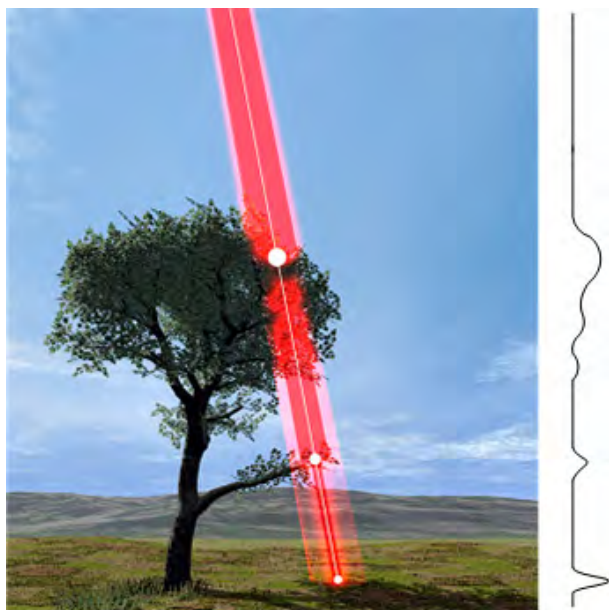


Abbildung 8 Gesendeter und empfangener Impuls beim Laser Scanning (nach Katzenbeisser, 2003b)

Da der Durchmesser des Laserpunktes (Footprint) beim Auftreffen auf der Erdoberfläche bis zu 1 m beträgt, kann er grösser als das angestrahlte Objekt sein. Ein Teil des Lichtes erreicht in diesem Fall eines oder mehrere tiefer gelegene Objekte (siehe Abbildung 9). Die Photonen werden gegenüber der Reflektion vom zuerst angestrahlten Objekt zeitlich versetzt den Sensor wieder erreichen. Die kommerziellen Systeme sind in der Lage, mehr als nur einen Impuls zu registrieren (siehe auch Abbildung 25). Damit kommt der Diskretisierung der Messungen aus dem reflektierten Signal eine entscheidende Bedeutung zu. Im einfachsten Fall wird ein konstanter Schwellwert definiert, andere Verfahren zielen darauf ab, den Impulsschwerpunkt oder lokale Maxima zu bestimmen. Dies hat aber zur Folge, dass bei unterschiedlichem Reflexionsgrad nicht die gleichen Distanzen bestimmt werden (siehe Abbildung 10 und Abbildung 15).

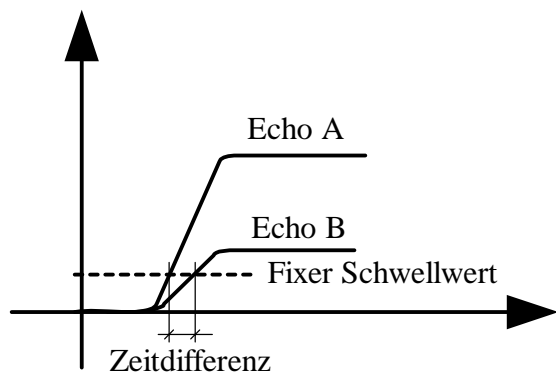




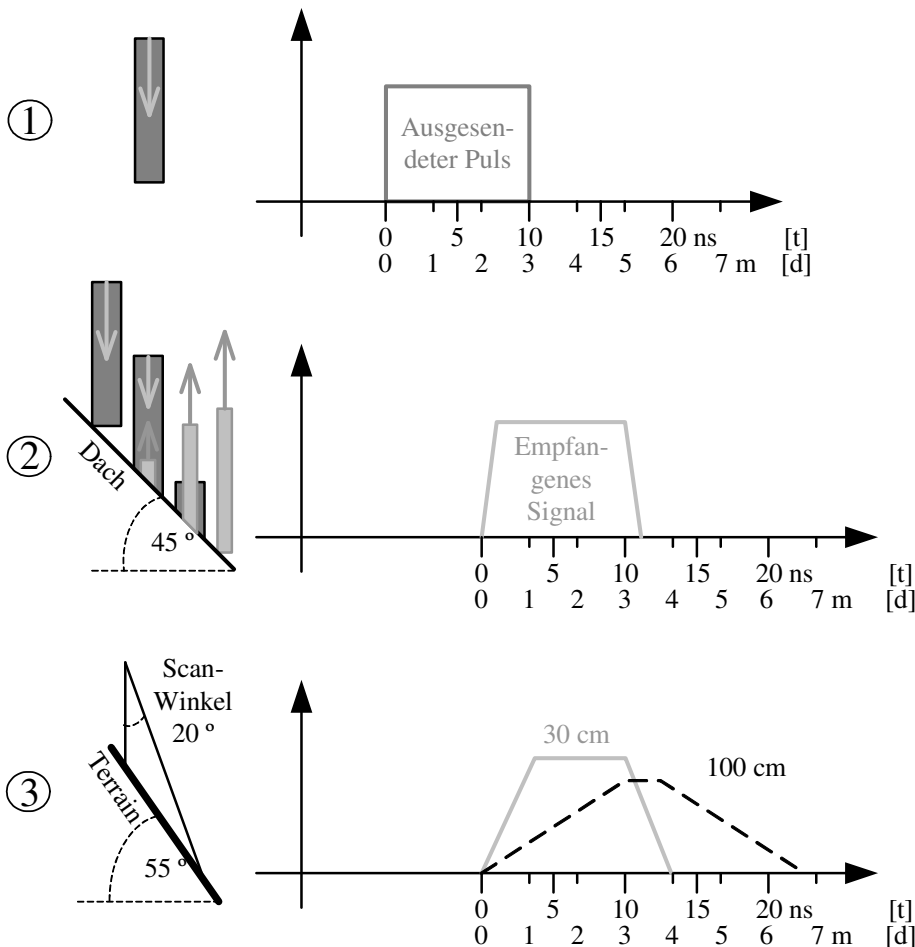
**Abbildung 9 Penetration des Laserstrahls durch Vegetation, rechts das entsprechende Signal (Quelle Swissphoto)**

Eine weitere Schwierigkeit stellt sich bei Messungen mit flachem Auftreffwinkel, sei es durch geneigte Oberfläche, grossen Scanwinkel oder eine Kombination davon. Der projizierte Footprint wird eiförmig, somit das zurückgeworfene Signal gestreckt und das Signal-Rauschen-Verhältnis (SNR) verschlechtert (vgl. Abbildung 11). Bei homogener Oberfläche ist davon auszugehen, dass die Diskretisierung anstatt über einen konstanten Schwellwert auf dem Impulsschwerpunkt erfolgt, so dass die resultierende Distanz dem Zentrum des Footprints (Energimaximum) entspricht.

Obwohl diese Informationsverarbeitung eine zentrale Bedeutung hat, werden von Herstellerseite praktisch keine Informationen publiziert. Seit 2004 sind aber für zwei Sensoren Erweiterungen erhältlich, welche das vollständige Signal digitalisieren („Full-Waveform“) und die Diskretisierung einem nachfolgenden, unabhängigen und damit besser beeinflussbaren Prozess überlässt (Hug et al., 2004b; Wagner et al., 2004b).



**Abbildung 10 Differenz in der Distanzbestimmung aufgrund unterschiedlicher Reflektionseigenschaften des angestrahlten Objekts bei Diskretisierung mittels eines fixen Schwellwertes (nach Katzenbeisser, 2003b)**



**Abbildung 11 Einfluss des geneigten Geländes und des Scanwinkels auf das reflektierte Signal**

**Erläuterung zu Abbildung 11:**

1. ausgesendeter Puls von 10 ns (Signal zur Vereinfachung rechteckig)
2. zurückgeworfenes Signal von einem 45 Grad geneigten Fläche bei einem Footprint von 30 cm (Streckung der Signallänge um 1 ns bzw. 30 cm)
3. zurückgeworfenes Signal von einer 55 Grad geneigten Fläche mit einem Scanwinkel von 20 Grad. Die helle, durchgezogene Linie beschreibt das Signal eines Footprints von 30 cm, die gestrichelte Linie resultiert aus einem Footprint von 100 cm. In letzterem Fall kann das theoretische Energiemaximum im Detektor nicht mehr erreicht werden, da die Pulslänge kürzer ist als die Streckung des projizierten Footprints auf dem Gelände.

**2.1.2 Ablenktechnologie**

Es wurden verschiedene Verfahren entwickelt, um die einzelnen Laserimpulse quer zur Flugrichtung abzulenken: rotierender beziehungsweise oszillierender Ablenkspiegel oder mittels paralleler Anordnung von Glasfaserbündeln. Bei den Ablenkspiegelsystemen definieren die Bewegungsgeschwindigkeit und der zeitliche Abstand zwischen zwei Impulsen das Winkelinkrement. Das einfachste System ist ein Spiegel mit mehreren Facetten, welcher mit konstanter Geschwindigkeit rotiert. Mit diesem Prinzip kann ein orthogonales Punktmuster erzeugt werden, was später für das Berechnen eines Rasterdatensatzes von Vorteil ist, dafür kann bei gegebenem Spiegel die Streifenbreite nur über die Wahl der Flughöhe beeinflusst werden. Das System mit oszillierenden Spiegeln ermöglicht demgegenüber ein kontinuierliches Anpassen des Öffnungswinkels bis hin zur maximalen Öffnung. Der Nachteil dieses Systems liegt darin, dass der Spiegel für jede Scanlinie beschleunigt und wieder abgebremst werden muss und das Punktmuster daher am Boden weder quer noch parallel zur Flugrichtung über den Flugstreifen konstant ist. Bei beiden Prinzipien wird empfohlen, die Messungen an den Rändern einer Scanlinien im Prozessieren nicht zu berücksichtigen, da die Zuverlässigkeit der Messungen abnimmt (Wechsel der Facetten, grosse Beschleunigungen). Ein drittes Verfahren kommt ganz ohne Spiegel aus: die Ablenkung erfolgt über ein Bündel von Glasfasern, welche nebeneinander angeordnet sind. Jede Glasfaser ist damit für einen Punkt einer Scanlinie verantwortlich. Dadurch entfällt die Winkelmessung und die Anordnung

der Glasfasern kann im Labor kalibriert werden. Für weitergehende Ausführung wird auf (Lohr und Eibert, 1995; Baltsavias, 1999b) verwiesen.

## 2.2 Positionierungs- und Orientierungssystem

Zur Bestimmung von Position und Orientierung des Laser Scanners („Georeferenzierung“) wurden bei ALS anfänglich mehrere GPS-Antennen an verschiedenen Stellen des Flugzeugs installiert (Favey, 2001). Dank Preisreduktionen von Inertialen Messsystemen (IMS) und den Vorteilen der Kombination der beiden Sensoren kommen im Normalfall ein GPS-Empfänger und ein IMS als Positionierungs- und Orientierungssystem (POS) zum Einsatz. (Skaloud, 1999) beschreibt die Vorteile der kombinierten GPS-IMS-Lösung wie folgt:

- eine hohe Genauigkeit der Bestimmung von Position, und Geschwindigkeit und Orientierung über einen langen Zeitraum
- eine hohe Datenerfassungsrate
- ein Detektieren und Überbrücken von Datenlücken bei der GPS-Aufzeichnung
- eine Real-Time-Qualitätskontrolle der Orientierungsinformation

Eine gute Einführung zur direkten Georeferenzierung mittels POS ist in (Hutton und Mostafa, 2005) zu finden.

### 2.2.1 Kinematisches DGPS

Um die Position der sich bewegenden Sensorplattform zu bestimmen, eignet sich insbesondere die satelliten-gestützte Vermessung mit GPS, da es sich dabei um eine ausgereifte Technologie handelt, die ausserdem sehr wirtschaftlich eingesetzt werden kann. Da ein ALS auf einem Flugzeug oder Helikopter installiert wird und damit von ca. 50 m bis zu 6000 m über Grund betrieben wird, sind die Einschränkungen wegen Verfügbarkeit und freiem Horizont deutlich geringer als bei terrestrischen Messungen.

Zur Positionsbestimmung wird auf differentielles GPS (DGPS) abgestützt, bei welchem ein Empfänger auf einer (Referenz-)Station mit bekannten Koordinaten betrieben wird und ein zweiter Empfänger (Nutzerstation) auf dem Flugzeug angebracht wird. Mit diesem Verfahren wird nicht die Position der Sensorplattform direkt bestimmt, sondern es wird die Basislinie zwischen den beiden Empfängern berechnet. Die Koordinate der Nutzerstation (bzw. der Sensorplattform) erfolgt durch Addition des Basislinienvektors mit den absoluten Koordinaten der Referenzstation im Bezugssystem WGS84. Durch die gleichzeitige Beobachtung von Phasen (L1, L2) auf verschiedene Satelliten werden systematische Abweichungen der Satellitenuhren eliminiert bzw. die Einflüsse wie Refraktion (Ionosphäre, Troposphäre) und Abweichungen der Umlaufbahnen reduziert. Die Genauigkeit einer relativen Lösung ist daher deutlich höher als bei einer absoluten Positionsbestimmung.

Da die Verfügbarkeit der GPS-Daten bei ALS zeitlich nicht kritisch ist, werden auf beiden Empfängern die Signale aufgezeichnet. Das Berechnen der Basislinie erfolgt anschliessend. Beim Prozessieren der GPS-Messdaten werden aufgrund der bekannten Position (Referenz) und den Messgrössen von Referenz- und Nutzerstation über lineare Kombinationen dieser Grössen Differenzen gebildet. Die Algorithmen können dabei Differenzen zwischen Empfängern, zwischen Satelliten und zwischen Epochen rechnen. Bei der Doppeldifferenz der Beobachtungsgleichung von den beiden Empfängern auf zwei Satelliten lassen sich die Abweichungen der Empfängeruhren bestimmen.

Für das Lösen der Mehrdeutigkeit der Phasenmessung („Ambiguities“) stehen je nach Software unterschiedliche Algorithmen zur Verfügung, welche mit Hilfe von Kombinationen der beiden Phasen und der Codemessung Suchbereiche festlegen und die wahrscheinlichste Lösung mittels statistischer Verfahren bestimmen. Die Zuverlässigkeit dieser Verfahren steigt durch längere Beobachtungszeiträume und kürzere Basislinien, deshalb muss vor Beginn eines Messfluges eine statische Initialisierung durchgeführt werden. Falls während der Befliegung die Anzahl sichtbarer Satelliten kleiner als vier ist, muss die Mehrdeutigkeit neu berechnet werden. Da bei ALS-Messflügen die Basislinie häufig grösser als 10 km wird, lohnt sich eine sorgfältige Missionsplanung (immer genügend Satelliten sichtbar, gute Verteilung bzw. kleiner PDOP) und eine geeignete Platzierung der Empfänger-Antenne auf dem

Flugzeug, so dass auch bei Kurven- oder Sink- bzw. Steigflügen der sichtbare Horizont möglichst wenig eingeschränkt wird.

Durch die Bewegung der Messplattform bezieht sich jede kinematische Messung auf nur eine Position, so dass die sonst typische Überbestimmung bei Vermessung mit GPS wegfällt. Das von der Erfassung getrennte Auswerten ermöglicht aber die Berechnung von Anfang zu Ende und umgekehrt (vorwärts und rückwärts), dadurch kann in einer kombinierten Lösung eine minimale Überbestimmung erzielt und die Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösung validiert werden. Die Rate für kinematische Aufzeichnungen liegt heute bei maximal 20 Hz.

Detaillierte Ausführungen zur GPS-Technologie und Algorithmen sind zu finden in (Cocard, 1995; Hofmann-Wellenhof et al., 2001; Bauer und Wanninger, 2003; MacDonald, 2005).

### 2.2.2 Inertiales Messsystem

Die Bestimmung der Orientierung erfolgt über Kreisel. Bei einem faseroptischen Kreisel wie er beim Applanix-System POS AV 510<sup>4</sup> zum Einsatz kommt, wird das Licht von einer Breitband-Quelle über eine Polarisierung in zwei Strahlen aufgeteilt. Diese werden in entgegengesetzter Richtung durch eine Faserschleife geschickt. Bei einer Rotation im Uhrzeigersinn um die Achse der Schleife verlängert sich der Weg für den Strahl, der ebenfalls in Uhrzeigersinn die Schleife durchläuft. Für den anderen Strahl verkürzt sich der Weg dementsprechend (Sagnac Effekt). Der Effekt ist nicht nur abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit, sondern auch von der umschlossenen Fläche. Deshalb kann durch eine höhere Zahl von Wicklungen die Länge und damit die Fläche vergrößert werden, so dass die Sensitivität gesteigert werden kann. Beim Austreten aus der Spule werden die beiden Strahlen wieder kombiniert und der Photodetektor misst die Spannung. Treffen beide Strahlen gleichzeitig ein, ist die Spannung maximal, bei einer zeitlichen Verzögerung reduziert sich die Spannung wegen der Phasenverschiebung. Die Glasfaser-Kreisel eignen sich aufgrund der erreichbaren Genauigkeiten gut für die Georeferenzierung und sie zeichnen sich durch die einfache Konstruktion aus (keine beweglichen Teile), wodurch keine Wartung anfällt. Mit den drei Kreiseln werden Roll- (Rotation um Flugachse), Pitch- (Nickwinkel quer zur Flugachse) und Heading-Winkel (Änderung der Flugrichtung) bestimmt

Neben den Sensoren zur Orientierung enthält ein IMS drei Beschleunigungsmesser, die der Bestimmung der Position dienen. Ein Beschleunigungssensor erfasst die Reaktion einer bekannten Masse auf eine externe Kraft und misst die Beschleunigung. Aus der Integration über die Zeit lassen sich Geschwindigkeiten beziehungsweise nach einer weiteren Integration Distanzen ableiten.

Das IMS misst die relative Position und Orientierung mit einer hohen Datenrate von ca. 200 Hz. Wird das IMS autonom betrieben, nimmt die Genauigkeit schnell ab, dies wegen zeitabhängigen systematischen Abweichungen. Detailliertere Ausführungen zu den Sensoren und ihrer Anwendung in der direkten Georeferenzierung finden sich in (Mohammed und Schwarz, 1999; Skaloud, 1999; Jekeli, 2001; Schwarz und El-Sheimy, 2004). Von Herstellerseite werden wenige Angaben zu den System-Spezifikationen gemacht, da die Technologie insbesondere in sicherheitskritischen Anwendungen zum Einsatz kommt. Applanix verwendet das Litton LN-200 IMS von Northrop Grumman<sup>5</sup>.

### 2.2.3 Kombination der POS-Messgrößen

Um die eingangs erwähnten Vorteile der Kombination dieser beiden Sensoren für ein Positionier- und Orientierungssystem zu nutzen, werden die Messgrößen zusammengeführt und kombiniert ausgewertet. Während der Befliegung werden die Datenströme beider Sensoren in einem POS Computer System (PCS) gespeichert und gleichzeitig ausgewertet, um eine Real-Time-Navigationslösung zu berechnen. Die Messungen des IMS sind über die Zeit zu integrieren und um die Erdrotation zu korrigieren, um die Änderung der Orientierung im Bezug auf den Navigationsrahmen zu berechnen. Die Orientierungswinkel dienen anschliessend dazu, aus den gemessenen Beschleunigungen die absoluten Änderungen der Position abzuleiten. Da die IMS-Messgrößen eine Drift aufweisen, wird die Lösung durch die Kombination mit den GPS-Daten in einem Kalman-Filter verbessert. Der Kalman-Filter enthält ein

---

<sup>4</sup> Produktinformation unter: [http://www.applanix.com/products/posav\\_index.php](http://www.applanix.com/products/posav_index.php)

<sup>5</sup> Weitere Informationen sind zu finden unter <http://www.nsd.es.northropgrumman.com/Automated/products/LN-200.html>

dynamisches Verhaltensmodell (erwartete Dynamik der Sensorplattform und geschätzte Messunsicherheiten), mit welchem aufgrund des aktuellen Systemzustandes der zukünftige Zustand geschätzt wird. Mit dem nachfolgenden Messtupel (rohe inkrementelle Winkel, Beschleunigungen, Phasen und Pseudorange) wird die Differenz zur Schätzung gebildet, das Modell der Abweichungen für beide Sensoren aufdatiert und eine neue Schätzung berechnet. Die Navigationslösung dient dem Piloten zur Steuerung des Flugzeugs, indem Abweichungen von der Soll-Fluglinie laufend dargestellt werden. (Mostafa und Hutton, 2001a)

In der Datenauswertung werden analog dazu zuerst die kinematische differentielle GPS-Lösung und anschliessend die Trajektorie (Position und Orientierung mit 200 Hz Rate) in einem Kalman-Filter berechnet. In den Kalman-Filter fliessen neben der DGPS-Lösung, die IMS-Rohmessungen und weitere Parameter (bspw. Einbauvektor und -matrix, vgl. Kapitel 2.5.2) ein. Damit werden die GPS-Punkte geglättet, auf 200 Hz verdichtet und um die Orientierungswinkel ergänzt.

### 2.3 Vergleich der gebräuchlichsten ALS-Systeme

Durch geeignete Kombination dreier Sensorsysteme kann ein ALS System je nach Anwendungsbereich optimiert werden. Bei den kommerziell verfügbaren Systemen sind aufgrund der eingesetzten Spiegelsysteme zwei Hauptkategorien zu erkennen:

- Riegel und TerraPoint verwenden rotierende Spiegel, welche sich durch ein homogenes Streifenmuster, aber eingeschränkter Parametrisierbarkeit auszeichnen
- Optech und Leica Geosystems setzen auf oszillierende Spiegel, welche dank unterschiedlichen Öffnungswinkeln sowohl für Korridorbefliegungen als auch für flächige Datenerfassung geeignet sind.
- Weitere Spiegelsysteme wie die parallel angeordneten Glasfaser (Katzenbeisser, 2003a) oder der nutierende Spiegel von ScaLars der IFP Stuttgart (Hug, 1996) konnten sich bisher nicht gleich bedeutend im Markt etablieren.

Die Erfahrungen aus verschiedenen Projekten zeigen, dass jeder Sensor Stärken und Schwächen besitzt. Der Vergleich der Sensoren offenbart aber auch, dass die den Markt dominierenden Systeme nicht grundsätzlich verschieden und einzelne Komponenten wie das POS sogar identisch sind, weshalb grundlegende (Mess-)Unsicherheiten, wie sie im nächsten Kapitel beschrieben werden, für alle Sensorsysteme Gültigkeit besitzen.

	Toposys <sup>6</sup>	Leica Geosystems	Optech	Riegl	TerraPoint <sup>7</sup>
<b>ALS-Modell</b>	Falcon 3	ALS50-II	ALTM3100	LMS-Q560	ALTMS 4036
<b>IMS</b>	Applanix POS AV 410	Leica IPAS10	Applanix POS AV 510	Nicht Bestandteil.	Honeywell H-764 G
<b>Scan-Muster</b>	Geschwungen	Sinusoidal	Sägezahn	Parallele Linien	
<b>Max. Anzahl Echos</b>	9, optional full Waveform	3 plus letzter, optional full Waveform	3 plus letzter, optional full Waveform	Full Waveform bzw. erster oder letzter	4
<b>Pulswiederholrate</b>	50-125 kHz	Bis zu 150 kHz,	33, 50, 75 oder 100 kHz	100 kHz (effektiv 50)	40 kHz
<b>Max. Scanwinkel (SW)</b>	Fix $\pm 13^\circ$	10 bis $\pm 37.5^\circ$	0 bis $\pm 25^\circ$	Fix $\pm 22.5^\circ$	Fix $\pm 18^\circ$
<b>Max Scanrate (SR)</b>	415 Hz	90 Hz	70 Hz	160 Hz	100 Hz
<b>Einfluss SW auf SR</b>	Keinen Einfluss	$SR \sim 261.7 * (SW * 2)^{-0.473}$ bei $SW = \pm 20^\circ \rightarrow SR < 46 \text{ Hz}$	$SR < 1000 / SW$ bei $SW = \pm 20^\circ \rightarrow SR < 50 \text{ Hz}$	SW ist fix, SR wird aufgrund der Fluggeschwindigkeit so gewählt, dass Punktabstand in beiden Richtungen homogen ist	
<b>Rollkompensation</b>	Ja, bis zu $6^\circ$	Ja	Ja, unter Reduktion SW	Nein	Nein
<b>Beam divergence</b>	0.7 mrad	0.22 mrad	0.3 oder 0.8 mrad	< 0.5 mrad	0.5-1.0 mrad
<b>Auflösung der Distanzmessung</b>	1 cm	1 cm	1 cm	< 2 cm	0.75 cm
<b>Intensitätsmessung</b>	12 bit auf dem letzten Puls	8 bit für die drei ersten Pulse	12 bit für jeden Puls	16 bit (falls nicht bei Full Waveform)	12 bit
<b>Minimale Flughöhe</b>	30 m	200 m	80 m (0.3 mrad), 400 m (0.3 mrad)	40 m	600 m
<b>Empfohlene maximale Flughöhe</b>	2500 m	6000 m	1100 m (100 kHz)-3500 m (33 kHz)	1500 m	2500 m

**Tabelle 3 Zusammenstellung der bedeutendsten Sensor-Charakteristiken der aktuell meistverbreiteten Systeme**

Verschiedene Hersteller bieten zur Ergänzung der ALS-Sensoren digitale Luftbildkameras oder weitere zumeist bildgebende Sensoren an. Die Kombination mehrerer Sensoren hat verschiedene Vorteile:

- **Wirtschaftlichkeit:** Bei einer kombinierten Erfassung reduzieren sich die verhältnismässig hohen Kosten für die Befliegung und die Trajektorie ist nur einmal zu berechnen.
- **Optimierung DGM:** Verbesserung der Vollständigkeit der Geländeinformationen aus ALS durch Erfassung von Bruchkanten in Stereobildern, insbesondere für hydrologische Anwendungen
- **Erweiterung des Datenkataloges:** Die georeferenzierten Luftbilder können entweder im Stereomodell oder nach Berechnung eines Orthophotos mittels des aus ALS erzeugten DTM ausgewertet werden,

<sup>6</sup> Homepages der Anbieter: <http://www.toposys.de>, <http://www.gis.leica-geosystems.com/products>, <http://www.optech.ca>, <http://www.riegl.com>, <http://www.terrapoint.com>

<sup>7</sup> TerraPoint publiziert keine technischen Spezifikationen auf der Homepage. Die hier aufgeführten Daten stammen von [http://core2.gsfc.nasa.gov/lidar/terrapoint/TerraPoint\\_System\\_Description.pdf](http://core2.gsfc.nasa.gov/lidar/terrapoint/TerraPoint_System_Description.pdf)

um neben Geländemodellen weitere Datensätze zu erfassen. Typische Beispiele sind Kartierung von Bodennutzung und Vegetation

- Erweiterung des Informationsgehaltes: Je nach Spektralbereich können zu Objekten zusätzliche Informationen registriert werden. Multispektralkameras (insbesondere Erweiterung um Infrarot-Kanal) sind mit dem Einzug der digitalen Photogrammetrie gängig<sup>8</sup>.
- Temporale Aspekte: Der gleiche Aufnahmezeitpunkt für Höhenmodell und Luftbild eliminiert die häufig störenden Abweichungen in den beiden Datensätzen, welche auf unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte zurück zu führen sind.

Als Nachteil dieser kombinierten Datenerfassung sind insbesondere die notwendigen Kompromisse bei der Befliegung zu nennen:

- Flughöhe und Streifenbreite: unterschiedliche optimale Flughöhen bzw. maximale Ranges der Sensoren und unterschiedliche Öffnungswinkel (bzw. Streifenabdeckung)
- Befliegungszeitpunkt: ALS kann unabhängig vom Sonnenstand betrieben werden, Luftbilder werden bevorzugt bei gutem Kontrast durch Sonnenlicht erfasst
- Saisonale Unterschiede: für aussagekräftige Orthophotos oder zur Vegetationsanalyse mittels Infrarotbilder wird eine Datenerfassung im Frühsommer angestrebt, für ein hochwertiges DTM muss in Zonen mit Laubwäldern im Winter geflogen werden

## 2.4 Unsicherheiten in der Datenerfassung

Jede Messung und damit auch die resultierende Grösse ist aufgrund der beschränkten Auflösung der Sensoren und von nicht modellierbaren Einflüssen (unvollkommener Eliminierung von Einflussfaktoren) mit (Mess-)Unsicherheiten behaftet. Die Messunsicherheit beschreibt die Streuung um den „wahren“ Wert, die vernünftigerweise der Messgrösse zugeordnet werden kann (GUM, 1995). Die quantitative Bestimmung der Messunsicherheit erfolgt mittels Komponenten, die mit statistischen Methoden (Kategorie A) oder anderen Methoden (Kategorie B) ermittelt werden können<sup>9</sup>. Die Ermittlungsmethoden in der Kategorie A folgen den bekannten statistischen Verfahren (empirische Standardabweichung, Unsicherheitsfortpflanzung), da die Messunsicherheiten direkt ermittelt werden können. Sie werden als Standardunsicherheit bezeichnet. Die Werte der Kategorie B können nicht direkt ermittelt werden, sie sind aus der Kalibrierung oder durch ergänzende Angaben des Herstellers, aus Erfahrungswerten oder aus Daten von früheren bzw. vergleichbaren Messungen zu bestimmen. Die Komponenten der Kategorie B werden allgemein als Messunsicherheit und die Kombination aller Komponenten als kombinierte Messunsicherheit bezeichnet (vgl. auch Heister, 2005). Bei ALS liegen mit Ausnahme der Bestimmung der Translationsvektoren keine redundanten Messgrößen vor und die Mess- und Auswertemethoden sind in nicht offen gelegte Datenformate und Algorithmen verpackt. Die Abschätzung der Messunsicherheiten bzw. der kombinierten Messunsicherheit eines Einzelpunktes muss daher entweder als Komponente der Kategorie B betrachtet werden oder es wird die Standardunsicherheit des DGM (nicht des Einzelpunktes) mittels Kontrollmessungen oder mittels Analyse von sich überlagernden Streifen berechnet. Im Allgemeinen werden bei den Abweichungen drei verschiedene Ursachen unterschieden:

- Abweichungen aus zufälligen Einflüssen
- Abweichungen aus systematischen Einflüssen
- Grobe Fehler

Die Ursachen für zufällige Abweichungen sind eingangs beschrieben worden. Systematische Abweichungen entstehen z.B. durch mangelhafte Sensorkalibrierung oder unvollständiger Modellierung des Messprozesses (wie Ignorieren einzelner Einflüsse), können aber auch die Folge einer zufälligen Abweichung sein (falsche Bestimmung der Ambiguity der GPS-Lösung führt zu systematischen Abweichungen aller davon abhängigen Berechnungen). Die groben Fehler basieren zumeist auf Irrtümern

---

<sup>8</sup> Beispiele mit weiteren Sensoren für die Dokumentation von Hochspannungsfreileitungen sind zu finden unter <http://www.net-airx.com/>

<sup>9</sup> Als Notation für die Messunsicherheit der Komponente  $i$  wird  $u_i$  verwendet

und Verwechslungen: falsche Koordinate einer GPS-Referenzstation, Öffnungswinkel  $12^\circ$  statt  $21^\circ$  u. a. Grobe Fehler können jederzeit und bei jeder Tätigkeit entstehen. Sie sind deshalb durch geeignete Prozessstrukturen und Kontrollen aufzudecken und zu eliminieren. In diesem Kapitel stehen die Abweichungen aufgrund zufälliger und systematischer Einflüsse im Messprozess im Vordergrund.

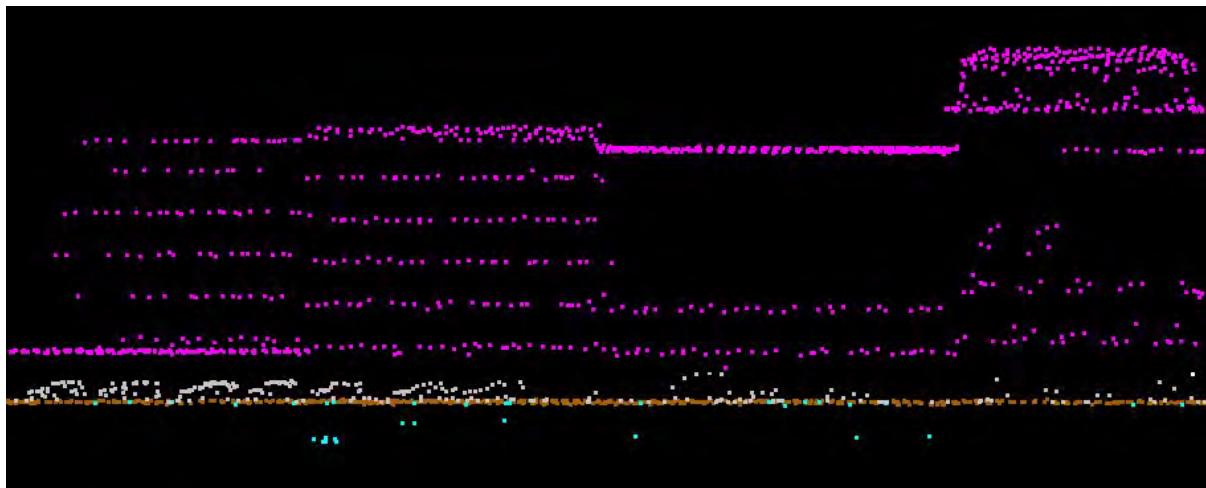
Trotz den grossen Schwierigkeiten, ein deterministisches Modell aufzustellen, welches die tatsächlichen Vorgänge und Messunsicherheiten beim ALS genügend gut beschreibt (vgl. auch Baltsavias, 1999a; Filin, 2003), lohnt sich eine vertiefte Betrachtung darüber: Solange nämlich Beobachtungen, Messgrößen und Zwischenresultate von Auswertungen (z.B. GPS-Prozessierung mit den Angaben zur geschätzten Messunsicherheit) vorliegen, lassen sich die Untersuchungen automatisieren und eine Schätzung der kombinierten Messunsicherheit grossflächig durchführen (vgl. auch Kapitel 2.4.5). Wenn am Schluss der Prozesskette nur ein DGM zur Verfügung steht, ist das Berechnen der (empirischen) Standardunsicherheit mit grossem Aufwand für terrestrische Kontrollpunkte verbunden. Dieses Genauigkeitsmass gilt streng genommen nur genau für die Gesamtheit der Orte, an denen Kontrollpunkte vorliegen, lokale Anomalien können nur zufällig aufgedeckt werden.

### 2.4.1 Unsicherheit der Objekterfassung

Wie bereits im Kapitel 2.1.1 beschrieben kann beim ALS häufig keine Aussage darüber gemacht werden, welches von einem Laserimpuls angestrahlte Objekt genügend Energie reflektiert, um eine Messung auszulösen. Das gleiche Objekt wird je nach umgebenden Objekten (relative Lage, Reflektierbarkeit), Auftreffwinkel (d.h. Winkel zwischen Lichtstrahl und Oberfläche des angestrahlten Objekts), Durchmesser des Footprints, Flughöhe, Luftfeuchtigkeit und Pulswiederholfrequenz gemessen oder nicht (vgl. auch Wotruba et al., 2005). Aufgrund der Vielschichtigkeit der Ursachen können für jedes ALS-System nur Hinweise für eine optimale Konfiguration für eine vollständige Erfassung gegeben werden, ohne die Unsicherheit genauer zu quantifizieren. Dieser Effekt bereitet Schwierigkeiten in Anwendungen, bei denen Objekte mit kleinem Querschnitt wie Äste (Vegetationsanalyse), Freileitungen oder Flughindernisse (Antennen, Masten) erfasst werden müssen und in welchen die vollständige Erfassung der Objekte das wichtigste Qualitätsmerkmal sind. Durch Kippen des ALS-Systems in Flugrichtung (10-20 Grad Abweichung vom Nadir) und der damit einhergehenden Expansion der angestrahlten Fläche von dünnen, vertikalen Objekten kann die Wahrscheinlichkeit der Erfassung von Antennen und Masten gesteigert werden (Parrish et al., 2005; Lüthy et al., 2006). Vom Konzept her ist die Full-Waveform-Technologie geeignet, nicht nur dünnere, sondern auch schwächer reflektierende Objekte noch zu detektieren. Allerdings besteht bei geringeren Schwellwerten die Gefahr, dass zu viele Messungen (z.B. Vögel oder reflektierende Luftpartikel) registriert werden, die nachträglich wieder zu eliminieren sind.

Zu viele Daten treten aber auch bei diskret erfassenden Sensoren auf: wegen Penetration des Laserpulses durch Glasdächer sowie durch Multi-Path-Effekte. Durch die gesteigerte Empfindlichkeit des Detektors und wegen der kleineren Beam-Divergence können Pulse, die auf ein Glasdach auftreffen, zum Teil durch das Glas eindringen, im Gebäudeinnern reflektiert und letztlich vom Sensor aufgezeichnet werden. Obwohl diese Messung im Prinzip korrekt ist, stört sie bei der Filterung der Objekte, da sie nicht die Erdoberfläche beschreiben. Beim ALTM3100 von Optech sind des weiteren Situationen aufgetreten, in denen Pulse flach auf ein vertikales Objekt auftreffen, von da auf den Boden abgestrahlt werden und bei stark reflektierenden Oberflächen (insbesondere bei Schnee) zurück gestrahlt werden (Multi-Path-Effekt).

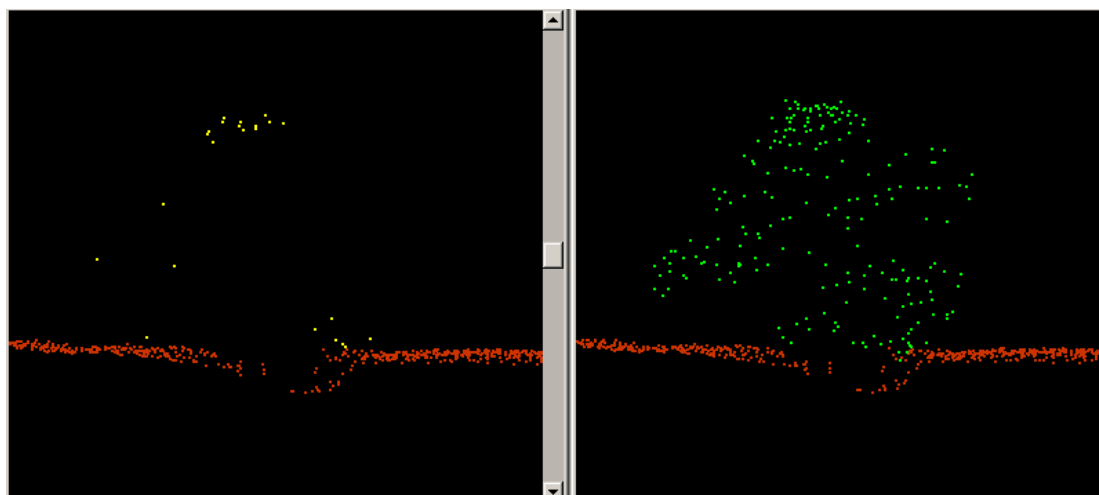




**Abbildung 12 Multi-Path-Effekt durch Reflektion an einer Gebäudefassade**

**Die braunen Punkte beschreiben das Gelände, graue Punkte stammen von Fahrzeugen, die tief liegenden hellblauen Punkte sind falsch in Lage und Höhe aufgrund zu langer Rangemessungen**

Die Unsicherheit in der Objekterfassung hängt aber nicht nur vom System und der Witterungsbedingung ab: Bei einer Befliegung mit dem TerraPoint System ALMS 2036 im Winter 2000/2001 wurde der Rotationsspiegel durch die Abgase und Verbrennungsrückstände des Flugzeugmotors verunreinigt, welche durch die Bodenluke einströmen konnten. Durch die Verunreinigung wurde das Energieniveau des ausgesendeten bzw. reflektierten Laserpulses reduziert. Dies hatte zur Folge, dass praktisch keine Messungen von Bäumen, sondern nur vom Gelände aufgezeichnet wurden (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14). Da die erste Kontrolle der Datenerfassung auf die Punktdichte fokussierte, wurden diese Unstimmigkeiten erst später bei der Überlagerung mit Orthophotos erkannt. Etwas einfacher zu erkennen war dieser Mangel bei ausgedehnten, stark absorbierenden Oberflächen, beispielsweise auf einer frisch geteerten Strasse, bei dunklen, porösen Dachziegeln oder bei nasser, dunkler Erde: hier kam es zu grossflächigen und damit auffälligen Datenlücken. Als Gegenmassnahme wurde die Optik in regelmässigen Abständen gereinigt und mittels baulichen Massnahmen das Einströmen der Abgase reduziert.



**Abbildung 13 Unterschiedliche Erfassung desselben Baumes im Winter 2001 (links) bzw. im Winter 2003**

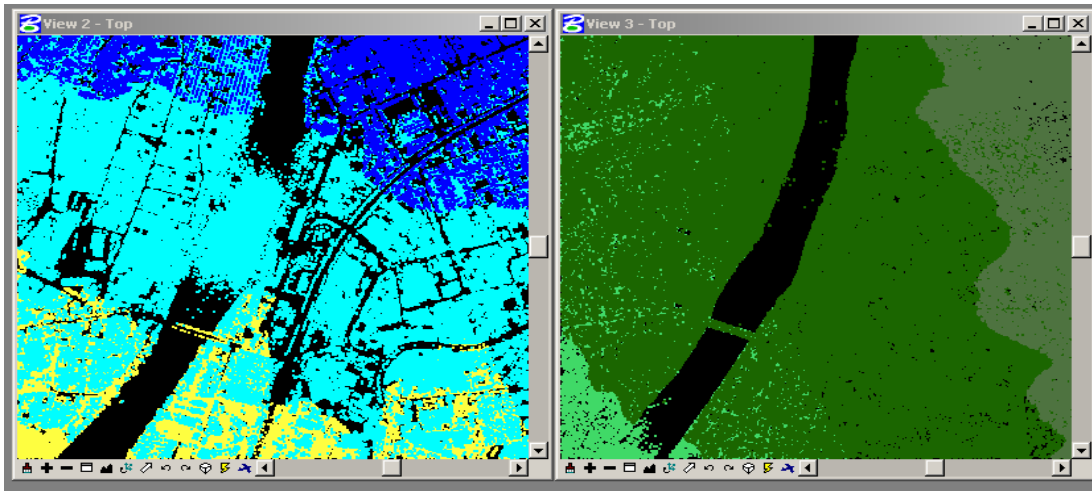


Abbildung 14 Datenlücken auf Dächern und Strassen aus Befliegung im Winter 2001 (links) verglichen mit den Daten aus der Befliegung im Winter 2003

#### 2.4.2 Messunsicherheit in der Rangebestimmung

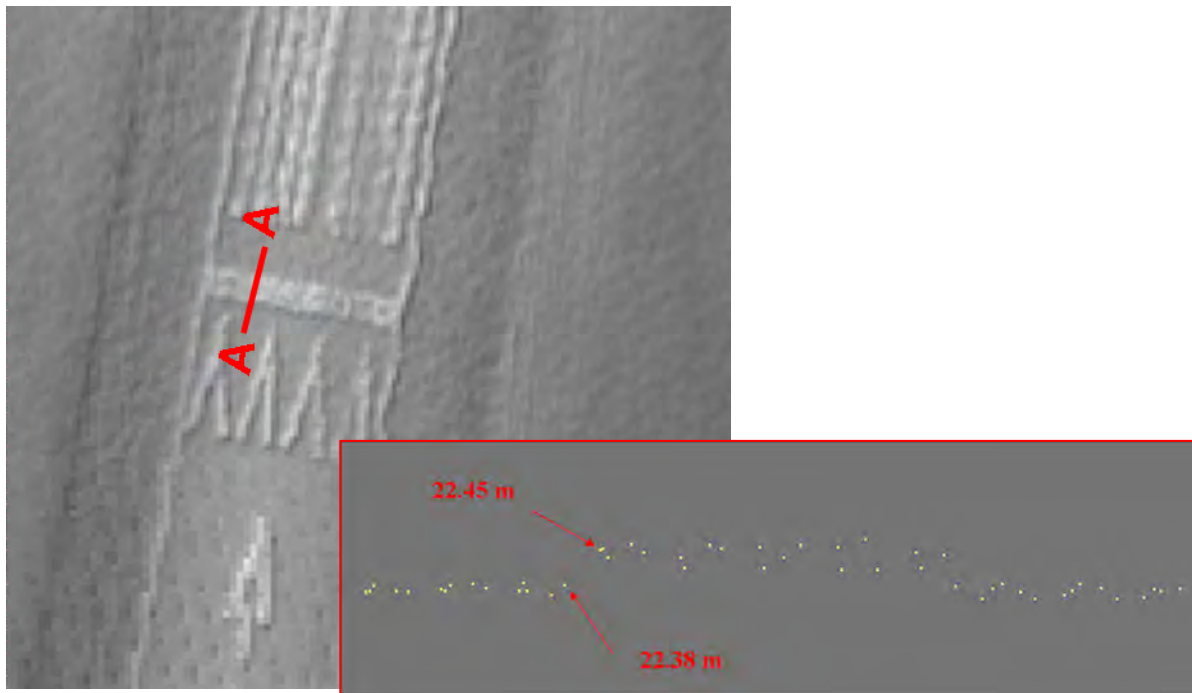
Die Rangebestimmung ist unabhängig von den im Kapitel 2.1.1 beschriebenen Methoden zur Diskretisierung der Messungen systematischen und zufälligen Abweichungen unterworfen. Systematische Abweichungen sind hauptsächlich durch meteorologische Einflüsse auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Pulses bedingt: Druck, Temperatur und Dampfdruck beeinflussen den Brechungsindex  $n$  (Ingensand, 2004). Die Laufzeit eines Pulses wird dann zu

$$\Delta t = \frac{r \cdot 2 \cdot n}{v_g} \quad (2.2)$$

Die meteorologischen Bedingungen variieren während einer (häufig mehrstündigen) Datenerfassung wegen lokalen Unterschieden und den Änderungen im Tagesverlauf und sind des Weiteren durch die unterschiedliche Höhenlage von Sensor und Zielobjekt beeinflusst. Korrekturen können deshalb nur näherungsweise angebracht werden. Der Einfluss der meteorologischen Verbesserungen liegt im Allgemeinen im cm-Bereich. Andere Einflüsse sind dagegen häufig viel bedeutender<sup>10</sup>:

- Das Messrauschen steigt mit grösserer Distanz, geringerer Reflektierbarkeit oder höherer Pulsrate an (Schulz et al., 2004; Smith und Lane, 2005; Wotruba et al., 2005)
- Der Detektor muss entweder stabil gegenüber unterschiedlicher Reflektionseigenschaften sein, oder die Distanzmessung ist nachträglich aufgrund des Intensitätswertes zu korrigieren. Wird der Einfluss vernachlässigt, werden Distanzen zu hellen Objekten zu kurz gemessen (bzw. zu dunklen Objekten zu lang), was insbesondere bei Markierungen auf Strassen zu unplausiblen Resultaten führt (vgl. auch Wehr und Lohr, 1999). Ein Beispiel ist in der folgenden Abbildung gegeben.

<sup>10</sup> Eine ausführliche Beschreibung zu den verschiedenen Effekten bei der reflektorlosen Distanzmessung ist zu finden in (Ingensand, 2006).

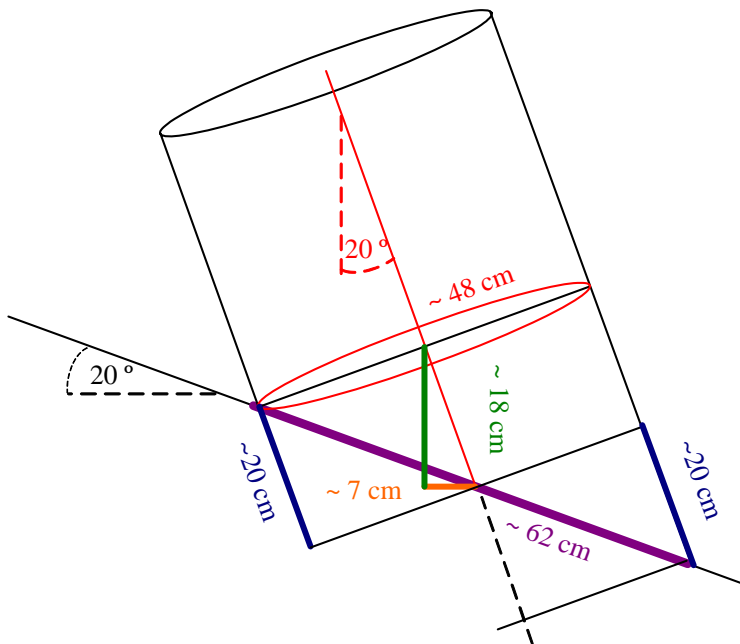


**Abbildung 15 Einfluss der Reflektion auf die Distanzmessung: die Markierung „steht“ ohne Korrektur der Intensität 7 cm über dem Belag. (Datenquelle Leica Geosystems)**

Mit Abflachen des Auftreffwinkels nimmt die Messunsicherheit der Rangemessung zu, da das Maximum der zurückgestrahlten Energie geringer wird (siehe Abbildung 11). Diese Unsicherheit wird noch vergrößert, wenn die Reflektion der angestrahlten Fläche inhomogen ist (Hodgson und Bresnahan, 2004; Schulz et al., 2004). In Abbildung 16 ist die Messunsicherheit schematisch dargestellt: Bei Flughöhe 1500 m, Beam Divergence 0.3 mrad und Scanwinkel  $20^\circ$  hat der Footprint einen Durchmesser von ca. 48 cm, welcher durch die Projektion auf das Gelände zu einer Ellipse mit den Halbachsen 24/31 cm wird. Im ungünstigsten Fall wird die Messung aufgrund von Reflektion bei den Hauptscheiteln ausgelöst, womit die Distanz im Vergleich zum Mittelpunkt um 20 cm zu kurz bzw. zu lang wird. In der Planimetrie wirkt sich dies in einer maximalen Abweichung von ca. 7 cm aus, in der Vertikalen beträgt die Abweichung in dieser Konstellation allein aus der Rangemessung aber bis zu 18 cm. Im geneigten Gelände kann es durch parallele Fluglinien quer zur Hangneigung zu heterogenen Auftreffwinkeln und damit unterschiedlichen zufälligen Abweichungen kommen. Bei sich überlagernden Flugstreifen können zur Verminderung dieses Effekts die Punkte desjenigen Flugstreifens selektiert werden, welche – bei vergleichbaren Einflussgrößen der anderen Messkomponenten – den günstigsten Auftreffwinkel besitzen (Wack und Stelzl, 2005). Variieren die Einflüsse der anderen Messungen stark, muss iterativ über Verfahren der Streifenkalibrierung eine optimale Selektion der Punkte erreicht werden.

(Smith et al., 2005) haben in ihren Untersuchungen die Standardunsicherheit der Rangebestimmung auf flachem Gelände für das System ALTM3100 wie folgt bestimmt:

- bis 50 kHz (Flughöhen > 1000 m): 5 cm
- bei 75 kHz ( $h_g < 1500\text{m}$ ): 7 cm
- bei 100 kHz ( $h_g < 1000\text{m}$ ): 9 cm



**Abbildung 16 Einfluss des Auftreffwinkels und der Hangneigung auf die Messunsicherheit der Rangebestimmung**

### 2.4.3 Messunsicherheit der Winkelbestimmung

Die Messunsicherheiten der Winkelbestimmung werden durch zufällige Abweichungen beim Winkelabgriff und durch systematische Abweichungen verursacht, falls die Nullrichtung nicht mit der Z-Achse übereinstimmt („Indexabweichung“) bzw. die Abtastebene nicht senkrecht zur X-Achse steht. (Schenk und Csathó, 2001) haben diese Abweichungen im Detail beschrieben und geben zu den Auswirkungen auf die Koordinaten Grössenordnungen im Bereich von bis zu mehreren dm an. Mit den aktuellen Systemen werden aber deutlich bessere Werte für die kombinierte Messunsicherheit eines Punktes erreicht, daher scheinen ihre Annahmen überholt. Konstruktionsbedingte systematischen Einflüsse werden durch die Orientierungswinkel des IMS überlagert (Roll mit Nullrichtung, Heading mit Abtastebene) und daher in der in situ Systemkalibrierung berücksichtigt. Optech gibt für das ALTM3100 die Messunsicherheit der Winkelbestimmung mit  $0.0018^\circ$  an, dies ist um einen Faktor zehn besser, als die Annahme von Schenk und Csathó. Die zufälligen Abweichungen bei der Winkelmessung wird beim ALTM3100 beim Prozessieren der Messdaten reduziert, indem die Messreihe pro Scanlinie über gleitende Mittelbildung geglättet wird (Optech, 2004). Für weitere Ausführungen zu Ursachen von Abweichungen bei Range- und Winkelbestimmung wird auf (Katzenbeisser, 2003a) verwiesen.

### 2.4.4 Messunsicherheit der Positions- und Orientierungsbestimmung

Bei der Analyse der Messunsicherheit der Positions- und Orientierungsbestimmung sind wegen der grossen Bedeutung der Auswerteprozesse auf die Endresultate nicht nur die Qualität der Messung selber, sondern auch die der Algorithmen zu berücksichtigen. Da aber bei beiden Komponenten von Herstellerseite wenig Informationen publiziert werden und zudem die Qualität der GPS-Messung sehr stark von den aktuellen Bedingungen (Basislinie, Satellitenkonstellation, Topographie, meteorologischen Bedingungen) abhängen, wird für die Beurteilung der Dimension der Unsicherheit der Georeferenzierung ein POS als Black Box betrachtet. Die Grössenordnung der Unsicherheit des POS in der luftgestützten Datenerfassung wird im Allgemeinen über den Vergleich mit alternativen Erfassungsmethoden bestimmt. Die ersten Tests wurden vor allem terrestrisch durchgeführt, indem ein mit einem POS ausgestatteten Fahrzeug eine Strecke mit bekannten Punkten abfährt (vgl. auch Roesler, 2000; Jekeli, 2001). Diese Verfahren sind zwar einfach und preiswert, sie berücksichtigen aber die besonderen Umstände der luftgestützten Datenerfassung (Dynamik der Messplattform, Unterschiede der Troposphäre) nicht. Für diese Bestimmung eignet sich ein Messflug mit POS und Luftbildkamera, wo die Trajektorie mit den Bildzentren aus der photogrammetrischen Bündelblock-Ausgleichung verglichen werden können (Beispiele siehe Cocard, 1995; Skaloud, 1999; Cramer, 2003).

Die Genauigkeit eines POS kann unter günstigen Umständen und bei Basislinienlängen unter 35 km wie folgt angenommen werden (Cramer, 2003; Waypoint, 2005):

- Lage: 3-10 cm
- Höhe: 5-15 cm

In den Spezifikationen von Applanix werden für das System AV 510 folgende Werte angegeben<sup>11</sup>:

- Position: 5-30 cm
- Orientierung:
  - Roll und Pitch: 0.005 °
  - Heading: 0.008 °

In den beiden folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Messunsicherheiten von GPS und IMS aufgeführt und Massnahmen vorgestellt, um die Messunsicherheiten möglichst gering zu halten.

## GPS

Die Abweichungen der Positionsbestimmung mittels GPS sind auf verschiedene Faktoren zurück zu führen:

- Satelliten: Unsicherheiten der Ephemeriden und der Uhren (Abweichung der Satellitenzeit zur GPS-Zeit). Anzahl und Verteilung der sichtbaren Satelliten (PDOP)
- Signalausbreitung: Einfluss der Ionosphäre und der Troposphäre auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals, Multi-Path-Effekt (von einem nahe beim Empfänger liegendem Objekt reflektiertes Signal). Bei tief über dem Horizont stehenden Satelliten ist dieser Einfluss grösser als bei senkrecht stehenden.
- Empfänger: zufälliges Messrauschen, systematische (Hardware bedingte) Verzögerungen im Instrument, Abweichung des Phasenzentrums, systematisches Verrauschen des Signals durch Störsender
- Algorithmen: sie beruhen alle auf statistischen Analysen, welche von normalverteilten Abweichungen ausgehen und die wahrscheinlichste Lösung bestimmen. Abweichungen der Realität von zugrunde liegenden Modellen in der Berechnung (beispielsweise Troposphäre, Autokorrelation oder im Signalverhalten) wirken sich auf die Unsicherheit aus (vgl. hierzu Kuhlmann, 2003). Algorithmen werden für folgende Aufgaben eingesetzt:
  - Entfernen von Messrauschen
  - Bestimmung der Mehrdeutigkeit (Ambiguity)
  - Entdecken von Phasensprüngen (Cycle Slips)

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird durch den Anwender im Auswerteprozess sehr stark beeinflusst. Das Prozessieren von (kinematischen) GPS-Messungen erfordert vertiefte Kenntnisse über die Einflussfaktoren und einer fundierten Analyse der aktuellen Messwerte und Abweichungen, um das Genauigkeitspotential von GPS auszuschöpfen. Die „beste“ Lösung wird in einem iterativen Verfahren gefunden. Häufig setzen aber zeitliche und finanzielle Vorgaben Grenzen in der Auswertung. Dies kann akzeptiert werden, wenn das Prozessresultat den Forderungen entspricht.

Für die direkte Georeferenzierung werden folgende organisatorischen Massnahmen empfohlen:

- Verwendung von Zweikanalempfänger: Einflüsse der Ionosphäre können – da frequenzabhängig – praktisch vollständig eliminiert werden.
- Satellitenkonstellation: Anzahl der sichtbaren Satelliten muss für eine Lösung der Ambiguities „on-the-fly“ grösser als fünf sein (Glaus, 2006)
- Installation: gute Sichtbarkeit (keine Abschirmung durch Heckruder). Schräglage in Kurvenflügen wegen möglicher Abschattung von Satelliten tief halten, Optimierung hinsichtlich Multi-Path-Effekte

---

<sup>11</sup> [http://www.applanix.com/media/downloads/products/specs/POSAV\\_5\\_Specifications\\_2005.pdf](http://www.applanix.com/media/downloads/products/specs/POSAV_5_Specifications_2005.pdf)

- Basislinienlänge und vertikale Differenz Basis zu Rover: kurz halten, um Einfluss der Troposphäre zu reduzieren und damit die Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeit zu vereinfachen
- Berechnen der Lösung vor- und rückwärts: ein zweimaliges Prozessieren der Messungen und die Berechnung der kombinierten Lösung kann Rückschlüsse auf die Güte der Mehrdeutigkeitsbestimmung liefern (vgl. auch Glaus, 2006). Durch Variation von Randbedingungen (Startpunkt Initialisierung, Setzen der Elevation Mask, Auslassen von Messungen zu einem Satellit) können verschiedene Lösungen berechnet werden, um eine optimale Trajektorie zu erhalten.

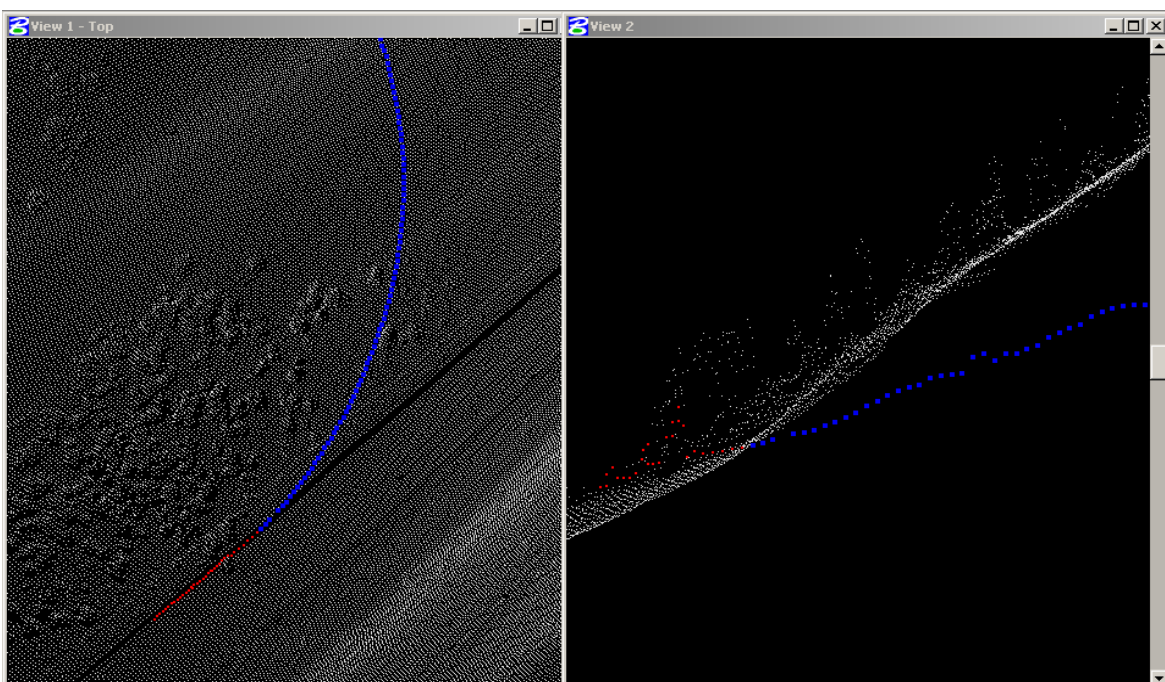
Weiterführende Literatur zu den Ursachen von Abweichungen beim GPS sind zu finden in (Han, 1997; Satalich, 2001; Bauer et al., 2003).

## IMS

(Skaloud und Schwarz, 2000) beschreiben die Ursachen von Abweichungen bei den IMS-Messungen wie folgt:

- (systematischer) Drift der Kreisel
- Nicht-Orthogonalität der IMS-Achsen
- Massstabsfaktor, Messrauschen
- weitere Faktoren wie zufälliger Drift, weisses Rauschen.

Zusätzlich zu den Messungen spielt aber auch beim IMS die Zuverlässigkeit der Bestimmung von Lage und Orientierung zum Zentrum des ALS-Systems eine bedeutende Rolle (vgl. Kapitel 2.4.5). Die sensorbedingten Abweichungen (Drifts) können primär durch die Kombination mit einem GPS-System reduziert werden. Weitere Möglichkeiten liegen in der Filterung der Rohmessungen, der Kalibrierung des IMS (Rechtwinkligkeit der Achsen) und in der Flugplanung, indem die Länge der Fluglinien beschränkt wird, da die Drifts abhängig sind von der Dynamik in den Beschleunigungsmessern (Skaloud, 1999).



**Abbildung 17** Eine einzelne inkorrekte IMS-Messung führt wegen Resampling und Interpolation von 32 auf 25000 Hz zu einem Drift-Effekt bei den ausgewerteten Punkten.

Weiss: Punkte ohne Auffälligkeiten, blau: wegedriftende Punkte, rot: Übergangsbereich. Der Effekt dauert nur während zwei Messungen des IMS.

## Integration der Sensoren

Da die Messungen der beiden POS-Sensoren im Kalman-Filter kombiniert werden, ergeben sich einige weitere Einflüsse auf die kombinierte Messunsicherheit der direkten Georeferenzierung:

- Zeitsynchronisation: Die Messungen von GPS, IMS und ALS finden zu unterschiedlichen Zeitpunkten statt und werden mit einer unterschiedlichen Frequenz aufgezeichnet. Die Kombination der Messwerte erfordert eine hohe Präzision bei der Systemkalibrierung bzw. bei der Registrierung des Zeitpunktes jeder Messung.
- IMS-Installation: Die Bestimmung der Rotationsmatrix bzw. des Translationsvektors zwischen Sensorzentrum und IMS über in situ Kalibrierung ist von besonderer Bedeutung, da bereits kleine Abweichungen in der Rotationsmatrix (insbesondere der Roll- und Pitch-Winkel) zu deutlichen, systematischen Abweichungen in Lage und Höhe zwischen benachbarten Flugstreifen führen.
- Kalman-Filter: Mit dem Verknüpfen der GPS- und IMS-Messreihen im Kalman-Filter werden die Vorteile der beiden Sensoren kombiniert und die geforderte kurz- und langfristige Stabilität der direkten Georeferenzierung erreicht. Der Kalman-Filter basiert auf Annahmen zur Dynamik der Sensorplattform. Die in den Filter einflussenden Messungen werden aufgrund ihrer Messunsicherheiten gewichtet. Diese Modelle sind zwar sehr ausgereift und erlauben im Allgemeinen eine zuverlässige Berechnung, sie sind trotzdem eine Vereinfachung der Realität, so dass nicht alle Situationen abgedeckt werden (Mohammed et al., 1999).
- GPS-Installation: Der Vektor vom Antennen- zu Sensor-Zentrum (Lever-Arm) muss terrestrisch eingemessen werden (oder in der Auswertung der POS-Daten durch Vergleich der IMS- mit der GPS-Dynamik geschätzt werden)

Um das Potential der POS-Sensoren auszunutzen, sind die Sensoren möglichst nahe zueinander (und insbesondere das IMS zum Scanner selber) anzuordnen. Die Verbindungselemente von IMS zu ALS sind sehr steif zu gestalten, um keine Abweichungen in der räumlichen Beziehung der Sensoren zu erhalten, da solche Abweichungen durch die Hebelwirkung zu grossen Variationen führen würden. Die Anordnung der Sensoren und die zeitliche Synchronisation sind im Rahmen der Systemkalibrierung zu bestimmen.

#### 2.4.5 Kombinierte Messunsicherheit

Zur Feststellung der Genauigkeit der geometrischen Lage sollen die Auswirkungen der Unsicherheiten jeder Messgrösse auf die bestimmte Koordinate betrachtet werden<sup>12</sup>. Die allgemeine Lasergleichung aus (Schenk, 2001) beschreibt den Zusammenhang der Sensoren, ihren Koordinatensystemen und Translationsvektoren wie folgt:

$$\vec{p} = R_N (R_M R_L \vec{r} + \vec{t}_L + \vec{t}_G) + \vec{t}_{GPS} \quad (2.3)$$

Wobei

$R_N$	<i>Drehmatrix aus den Messungen des IMS (Roll <math>\phi</math>, Pitch <math>\theta</math> und Heading <math>\psi</math>)</i>
$R_M$	<i>Einbaudrehmatrix des IMS hinsichtlich des Scanner-Systems (Boresight-Winkel)</i>
$R_L$	<i>Ablenkwinkel <math>\tau</math> des Laserstrahls im Laser Scanning System (= Scanwinkel)</i>
$r$	<i>Gemessene Distanz des Scanners</i>
$t_L$	<i>Translationsvektor vom IMS zum ALS-Zentrum (Boresight-Vektor)</i>
$t_G$	<i>Translationsvektor von der GPS-Antenne zum Zentrum des IMS</i>
$t_{GPS}$	<i>Translationsvektor vom erdfesten WGS84 zur Empfängerantenne (aktuelle Flugzeugposition)</i>

Die aktuelle Flugzeugposition  $t_{GPS}$  wird aus den Messungen der beiden GPS-Antennen abgeleitet. Das IMS liefert die Messungen für  $R_N$ .  $R_L$  und  $r$  werden vom ALS registriert. Der Translationsvektor  $t_G$  (Position GPS-Antenne) wird mittels terrestrischer Aufnahme bestimmt, lässt sich aber auch durch die Kombination der GPS- und IMS-Messungen schätzen. Die Boresight-Winkel in  $R_M$  werden im Rahmen der in situ Systemkalibrierung bestimmt (vgl. Kapitel 2.5.2). Der Translationsvektor  $t_L$  wird im Normalfall im Labor bestimmt.

Die kombinierte Messunsicherheit lässt sich abschätzen, indem die Matrix der partiellen Ableitungen der Funktion  $p$  gebildet wird. Für jeden Parameter werden die aktuellen Messwerte eingesetzt und Annahmen

<sup>12</sup> Da sich die Unsicherheit der Objekterfassung (Kapitel 2.4.1) nicht quantitativ in der Messunsicherheit niederschlägt, beziehen sich die Ausführungen auf die registrierten bzw. prozessierten Messgrößen.

zur Messunsicherheit getroffen. Für die Georeferenzierung liegt eine Genauigkeitsabschätzung aus dem Kalman-Filter vor. Somit kann für jeden beliebigen erfassten Punkt eine kombinierte Messunsicherheit geschätzt werden, die nicht absolut gültig ist (insbesondere wegen der mangelnden Zuverlässigkeit der vom POS ausgegebenen Standardunsicherheit). Die Methode erlaubt aber eine a priori Abschätzung, z.B. als Basis für eine Flugplanung, und eine flächendeckende Auswertung, so dass Anomalien aufgedeckt werden können.

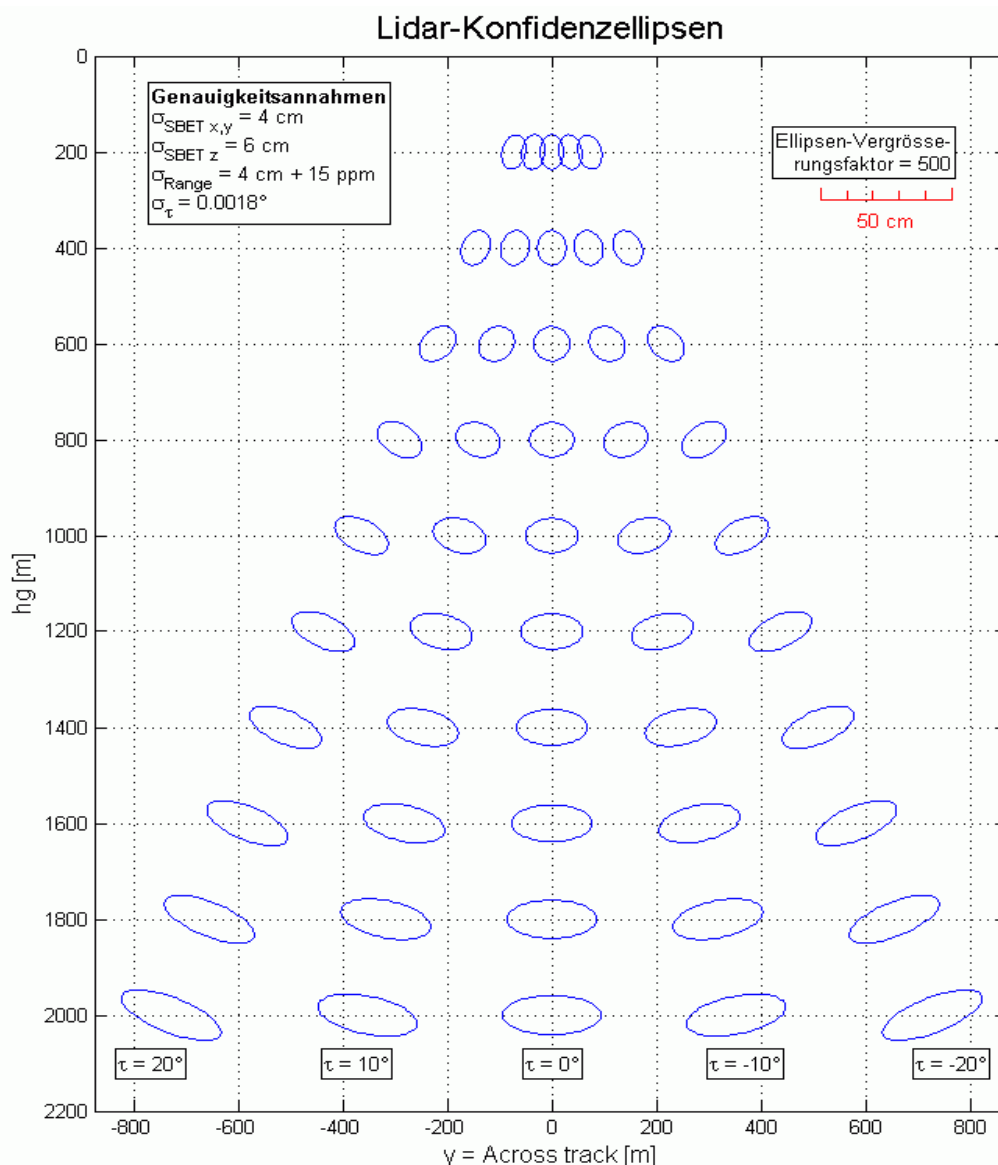
Aus der folgenden Tabelle lässt sich die Größenordnung der kombinierten Messunsicherheit für eine simulierte Situation erkennen. Die Beträge der Messunsicherheiten entsprechen den vorgängig aufgeführten Werten, Annahmen für aktuelle Messwerte von Heading und Pitch  $0.5^\circ$ , Roll  $1^\circ$  und für den Einbauwinkel  $\beta 0.005^\circ$ . Die Beispielwerte zeigen, dass die kombinierte Messunsicherheit asymmetrisch über die Scanlinie verteilt ist. L: Streifenanfang ( $-25^\circ$ ), M: Streifenmitte, R: Streifenende ( $+25^\circ$ ). Für detaillierte Ausführungen siehe (Schenk, 2001; Landtwing, 2005).

Flughöhe	Scanwinkel $\pm 25^\circ$	Messunsicherheit in x-Richtung (in Flugrichtung) [cm]	Messunsicherheit in y-Richtung (quer zur Flugrichtung) [cm]	Messunsicherheit in z-Richtung (Höhen- bestimmung) [cm]
<b>100 m</b>	L	4.2	4.4	7.1
	M	4.1	4.1	7.2
	R	4.2	4.5	7.0
<b>1000 m</b>	L	11.5	10.3	8.2
	M	9.7	10.1	7.2
	R	11.8	10.3	8.4
<b>2000 m</b>	L	21.9	19.1	11.5
	M	18.0	19.0	8.2
	R	22.6	19.2	12.1
<b>3000 m</b>	L	32.5	28.3	15.4
	M	26.6	28.1	9.2
	R	33.6	28.3	16.3

**Tabelle 4** Geschätzte kombinierte Messunsicherheiten für verschiedene Flughöhen (nach Schenk et al., 2001).

Aus dieser Tabelle wird deutlich, dass bei geringen Flughöhen die Unsicherheiten der DGPS-Lösung und der Rangebestimmung von grosser Bedeutung sind. Mit steigender Flughöhe und in Abhängigkeit des Scanwinkels nimmt der Einfluss dieser beiden Komponenten ab, dafür wächst der Einfluss von  $R_N$ ,  $R_M$ , und  $R_L$ . Dies lässt sich sehr gut in Abbildung 18 erkennen; hier sind die kombinierten Messunsicherheiten in y- und z-Richtung in Form von Konfidenzellipsen dargestellt.





**Abbildung 18: Ellipsenförmige Darstellung der kombinierten Messunsicherheit in der y/z-Ebene bei verschiedenen Messgrößen (Quelle Landtwing, 2005)**

Für jeden registrierten Punkt lässt sich also die kombinierte Messunsicherheit aufgrund von a priori Annahmen über Messunsicherheiten (wie Range oder Scanwinkel), Schätzungen der Unsicherheiten von prozessierten Messgrößen (GPS, IMS) und den aktuellen Messwerten ableiten. Da die Sensoren Messungen in unterschiedlicher Frequenz aufzeichnen, wirken sich die Abweichungen der Messgrößen unterschiedlich aus:

- Die Einbauparameter  $R_M$ ,  $t_L$  und  $t_G$  sind über eine oder mehrere Befliegungen konstant und wirken sich auf alle Punkte gleich aus.
- Die aktuelle Flugzeugposition  $t_{\text{GPS}}$  wird mit einer Frequenz von 10 – 20 Hz aufgezeichnet, die Abweichung einer Einzelmessung wirkt sich damit typischerweise auf mehrere benachbarte Scanlinien gleich aus. Da die kinematischen GPS-Messungen vor- und rückwärts ausgewertet, die meteorologischen Bedingungen in der Regel lokal gleich bleiben und die Trajektorie mit Hilfe der IMS-Messungen zusätzlich geglättet werden, ist die Unsicherheit der Flugzeugposition innerhalb eines Flugstreifens meist nur mit einer Drift behaftet.
- Die Drehmatrix  $R_N$  aus den Messungen des IMS wird pro Scanzeile mehrfach bestimmt, die systematischen und zufälligen Abweichungen jedes Messtupels werden durch den Kalman-Filter mit Hilfe weiterer Daten validiert und ebenfalls geglättet. Sie wirken sich damit auf benachbarte Punkte einer Scanlinie praktisch gleich aus.

- Die Abweichungen in den Messungen zur Bestimmung von Range  $r$  und Ablenkwinkel  $\tau$  ( $R_L$ ) wirken sich im Prinzip für jeden Punkt anders aus. Da aber die Resultate des Winkeldetektors (zumindest beim Optech-System) geglättet werden und die meteorologischen Bedingungen lokal praktisch identisch sind, werden sich die kombinierten Messunsicherheiten für benachbarte Punkte in  $x$ ,  $y$  und  $z$  sowohl in Richtung wie auch Betrag gleichen. Abweichungen von dieser Approximation treten insbesondere bei unterschiedlicher Reflektierbarkeit der angestrahlten Oberfläche, starken Schwankungen des Ranges oder bei einem anderen Auftreffwinkel auf.
- Grobe Fehler bei der Rangebestimmung sind zwar eher seltene Ereignisse, können grundsätzlich aber jederzeit auftreten. Im Gegensatz zur Winkelmessung kann hier nicht von kontinuierlichen Datenwerten über die Scanlinie ausgegangen werden, weshalb diese Fehlmessungen erst in den späteren Auswerteprozessen entfernt werden können (vgl. Kapitel 3.11.1).

Aus diesen Ausführungen kann geschlossen werden, dass die Punkte von Objekten mit beschränkter Grösse (Hausdach, Strasse, Brücke etc.) oder von einer kontinuierlichen Geländeform, welche in einem Flugstreifen erfasst werden, unabhängig von der äusseren Genauigkeit nur sehr kleine lokale Abweichungen zeigen (Korrelation). Dies kann für die Endanwendungen von grosser Bedeutung sein: Abstand von Hochspannungsleitern zum Gelände, Hangneigung und Fliessrichtung für hydrologische Berechnungen oder auch für das Ableiten von Gebäudemodellen profitieren von der hohen lokalen Präzision, auch wenn die äussere Genauigkeit die Anforderung nicht erfüllt. Bedeutende und vor allem störende relative Differenzen in den Modellen können aber dann auftreten, wenn die Streifen aufgrund mangelnder Kalibrierung oder ungenügender Georeferenzierung nicht zueinander passen (vgl. hierzu Kapitel 2.5.3).

#### 2.4.6 Anmerkung zur kombinierten Messunsicherheit

Die erzielbare Genauigkeit bei einer Datenerfassung aus geringer Flughöhe von 3-5 cm (Lage) und 5-10 cm (Höhe) ist für die meisten Applikationen genügend. Der Vermesser hat aber die Tendenz, immer noch präzisere Resultate erzielen zu wollen. Bei der Aufnahme von Aussenräumen macht diese Steigerung nur noch dann Sinn, wenn harte Oberflächen (Strassen, Eisenbahn-Trassen) bestimmt werden sollen. Auf weichen Oberflächen sind weitere Faktoren in der Analyse der Genauigkeit zu berücksichtigen:

- Die Höhe des Terrains kann bei Vorhandensein von Vegetation (Gras) nicht gleich genau bestimmt werden, wie bei einer harten Oberfläche. Es besteht die Tendenz, dass die Höhe des Terrains überschätzt wird, da offensichtlich auch dünne Grashalme durch ihre Masse genügend Licht reflektieren, um eine Messung auszulösen. Verschiedene Autoren (Cobby et al., 2001; Ahokas et al., 2003; Hodgson et al., 2004; Pfeifer et al., 2004; Gorte et al., 2005) haben versucht, diesen Effekt zu quantifizieren. (Oude Elberink et al., 2003) haben für die Qualitätsverbesserung von ALS-Daten ihr Modell für die Kalibrierung um zusätzliche Parameter für die jahreszeitlichen Schwankungen der Vegetation erweitert.
- Auf landwirtschaftlichen Nutzflächen liegt je nach Zeitpunkt der Befliegung ein Feld brach, es wurde kürzlich gepflügt (so dass Ackerfurchen in den Daten erkannt werden können), frisch ausgesät (wobei ein schweres Fahrzeug seine Spuren hinterlässt) oder die Vegetation ist schon ausgebrochen. In jeder Situation kann an der gleichen Stelle eine andere Höhe erfasst werden, wobei die Variationen im Dezimeter-Bereich liegen können.

Die Genauigkeiten der verschiedenen Sensoren stehen momentan in einem vernünftigen Verhältnis zueinander und passen zu den Anforderungen an Vermessungen im natürlichen Gelände. Eine Steigerung der Präzision *einer* Messung hat nur dann einen spürbaren Einfluss auf die kombinierte Messunsicherheit, wenn die Unsicherheit dieser Messung auf das Gesamtergebn entscheidend ist: eine bessere äussere Orientierung ohne Verbesserung der Distanz- und Winkelmessung hat in grossen Flughöhen praktisch keinen Einfluss auf die kombinierte Messunsicherheit. Im Bereich höchster Genauigkeitsanforderungen müssen zu operationellen Massnahmen wie geringe Flughöhe und kurze Basislinien auch die Modelle zur Eliminierung des Messrauschens aufgrund unterschiedlicher Reflektierbarkeit verfeinert werden.

## 2.5 Bestimmung und Reduktion von systematischen Einflüssen

Um das hohe Potential der geometrischen Qualität von ALS ausnützen zu können, ist das Kalibrieren der einzelnen Sensoren, ihrer Lage zueinander, der Zeitsynchronisation und somit des gesamten Systems von grosser Bedeutung. Die einzelnen Komponenten können im Labor unter verschiedenen Umgebungsbedingungen kalibriert werden. Ziel der Instrumentenkalibrierung sind die Überprüfung auf Einhaltung der Spezifikationen für diese Sensoren, sowie das Bestimmen der Korrekturwerte für die spätere Berücksichtigung der Einflüsse im Auswerteprozess. Da die Laborkalibrierung eine geeignete Umgebung bedingt, kann sie nur von den Systemherstellern vorgenommen werden. Die Systembetreiber müssen sich auf die Protokolle verlassen, welche bei jeder Kalibrierung erstellt werden. Neben den Komponenten wird im Labor auch das Gesamtsystem (insbesondere die Zeitsynchronisation und der Verschiebungsvektor  $t_L$ ) bestimmt. Die Systemkalibrierung im Feld dient vor allem der Bestimmung der Einbauparameter  $R_M$  und  $t_G$  und der Überprüfung des Gesamtsystems unter realen Bedingungen. Sie ist entsprechend durch die Betreiber eines ALS selber durchzuführen, wobei die Hersteller Richtlinien zum Messprogramm aufstellen, um die notwendige Überbestimmung für die Ableitung der Kalibrierwerte zu gewährleisten.

### 2.5.1 Labor-Kalibrierung Laser Scanner

Die Kalibrierung des Scanners und der Winkelabtastmessung kann teilweise im Labor erfolgen. Bei der Kalibrierung der Distanzmessung sind für Sensoren mit diskreter Echodetektierung insbesondere die in den Kapiteln 2.4.1 und 2.4.2 aufgeführten systematischen Abweichungen zu bestimmen:

- Der Schwellwert im Detektor ist so zu justieren, dass schwach reflektierende Oberflächen erfasst werden, ohne aber einen Überschuss an Messungen wegen Reflektion von Staubpartikeln o. ä. zu generieren.
- Der Detektor ist hinsichtlich Pulsrate (bei höheren Pulsraten ist weniger Energie pro Puls enthalten) und Laufzeit (bei grösseren Laufzeiten ist das Signal stärker gedämpft) zu kalibrieren, um die unterschiedliche Menge und Verteilung der reflektierten Energie zu berücksichtigen.
- Die Auswirkung der gemessenen Intensität auf die Distanzmessung (vgl. Kapitel 2.1.1) ist zu bestimmen. Hierzu muss die natürliche Hintergrundstrahlung sowie das Messrauschen eliminiert werden.

Beim ATLM3100 stellt Optech für die Bereinigung der Rohdistanz Korrekturwerte in Abhängigkeit von Pulsrate und Intensität zur Verfügung, die Werte liegen in einem Bereich von  $\pm 30$  cm. Die Bereinigung findet erst bei der Berechnung des Koordinatentripels statt, wobei in diesem Schritt dann auch meteorologische Korrekturen angebracht werden (sofern die entsprechenden Informationen während der Datenerfassung aufgezeichnet werden).

Bei der Kalibrierung der Winkelabtastmessung stehen die Bestimmung des Nulldurchgangs und die Kontrolle der Rechtwinkligkeit der Abtastebene im Vordergrund.

Da das IMS fix in das Gehäuse des ALS installiert ist, kann der Einbauvektor  $t_L$  des IMS bezüglich des Zentrums des ALS mit Subzentimeter-Genauigkeit im Labor bestimmt werden. Weil die Position von IMS- bzw. ALS-Zentrum nach dem Einbau in die Trägerplattform nicht mehr einsehbar ist, muss ein weiterer Referenzpunkt auf dem Gehäuse angebracht und der Vektor zum Sensorzentrum im Rahmen der Laborkalibrierung bestimmt werden. Die Lage der GPS-Antenne (Lever Arm) wird danach bezüglich dieses Referenzpunkts bestimmt.

Zusätzlich zu den Sensoren und ihrer Anordnung muss im Labor auch die Zeitmessung kalibriert werden, da aufgrund der hohen Messraten und der damit einhergehenden hohen Anforderungen an die Zeitmessung auch die Verzögerung aufgrund der Kabellänge von Sensoren zu Hauptrechner oder durch die analog/digital Umwandlung von Bedeutung sind (Ip et al., 2005).

Bei der Kalibrierung ist zu beachten, dass sie streng genommen nur unter herrschenden Bedingungen zum Zeitpunkt der Messung gelten. Bei der Komponentenkalibrierung ist deshalb darauf zu achten, dass typische Erfassungszyklen durchgespielt werden, so dass der Einfluss der Erwärmung des Systems beobachtet werden kann. Da die Kalibrierung mit der Zeit degradiert, ist sie in regelmässigen Abständen zu wiederholen.

### 2.5.2 In situ Systemkalibrierung

Nach dem Einbau eines ALS-Systems in die Trägerplattform muss vor dem Start der regulären Datenaufnahme eine in situ Systemkalibrierung durchgeführt werden. Dabei werden die GPS-Antenne mittels Tachymeter vermessen, die Rotationsmatrix zwischen IMS und Zentrum des Scanners (Boresight-Winkel) durch Zweilagennmessung bestimmt, sowie das Gesamtsystem unter realen Bedingungen überprüft. Bei ALS-Systemen, die für grosse Flughöhen ausgerichtet sind, muss auch die Rangemessung in situ kalibriert werden, da diese Distanzen im Labor üblicherweise nicht erreicht werden.

Hinsichtlich der Bedeutung für das Gesamtergebn stellt die Bestimmung der Rotationsmatrix  $R_M$  die höchsten Anforderungen an Genauigkeit und Sorgfalt. Schon kleine Abweichungen wirken sich aufgrund der Hebelwirkung wahrnehmbar auf die Punktwolke aus und können bei sich überlagernden Flugstreifen auch ohne zusätzliche terrestrische Messungen schnell erkannt werden (vgl. Abbildung 19). Dieser Umstand kann bei der Kalibrierung ausgenutzt werden indem ein beliebiges Gebiet zweimal in entgegengesetzter Richtung erfasst wird (2-Lageneffekt). Aus den Differenzen der Daten der beiden Streifen können die drei Installations-Winkel bestimmt werden (Schenk, 2001). Allerdings ist zu beachten, dass in flachem Terrain nur der Roll-Winkel eine Auswirkung hat (mit Maxima an den beiden Streifenrändern). Eine Abweichung des Pitch-Winkels kann nur entdeckt werden, wenn eine Neigung parallel zur Flugachse vorhanden ist, beispielsweise bei einem Satteldach. Die Abweichung des Heading-Winkels wirkt sich primär auf die planimetrische Lage bei grossen Scanwinkel aus, daher braucht es zur Bestimmung geeignete Objekte an den Streifenrändern. Bei diesem einfachen Kalibrierverfahren können auch allfällige Abweichungen in der Synchronisierung der Zeitmessung festgestellt werden, da sich diese bei oben genanntem Befliegungsmuster in Form eines horizontalen Versatzes äussern.

Da ALS keine zuverlässigen Angaben liefert, welches Objekt erfasst wird, sind für die automatisierte Berechnung der Kalibrierparameter zusätzliche Verfahren für die Zuweisung von Punkten aus verschiedenen Flugstreifen zu einer Fläche notwendig. Sofern aus der Punktwolke vorgängig die Terrainpunkte gefiltert werden, können für identische Teilflächen verschiedene statistische Parameter geschätzt, oder die zu den Punkten am besten eingepassten Ebenen bestimmt werden. Im Überlappungsbereich wird die Korrelation zwischen den beiden Flugstreifen bestimmt, aus welcher bei genügend grosser Zahl von Teilflächen zuverlässige Rückschlüsse auf die Boresight-Winkel gezogen werden können. Dieses Verfahren wurde von verschiedenen Autoren beschrieben (Burmans, 2002; Latypov, 2002; Toth, 2002; Filin, 2003). Die Schwierigkeit liegt darin, geeignete Flächen automatisch zu bestimmen. Hier kann die Segmentierung bzw. das Clustern der Punkte eines Streifens hilfreich sein (Filin, 2002; Vosselman, 2002). Als weiteres Verfahren zur Suche der Übereinstimmung zweier Oberflächen wird auch der von (Grün, 1985) entwickelte Least Square Algorithmus eingesetzt (vgl. hierzu Behan et al., 2000; Maas, 2000; Pâquet, 2003).

Zur kontinuierlichen Kontrolle der Kalibrierung kann in jeder Mission ein Querstreifen geflogen werden, der mehrere Fluglinien überschneidet, oder es wird am Anfang und Ende einer Mission ein Gelände mit geeigneter Topographie oder günstig angeordneten Gebäuden zweimal in entgegengesetzter Richtung überflogen.

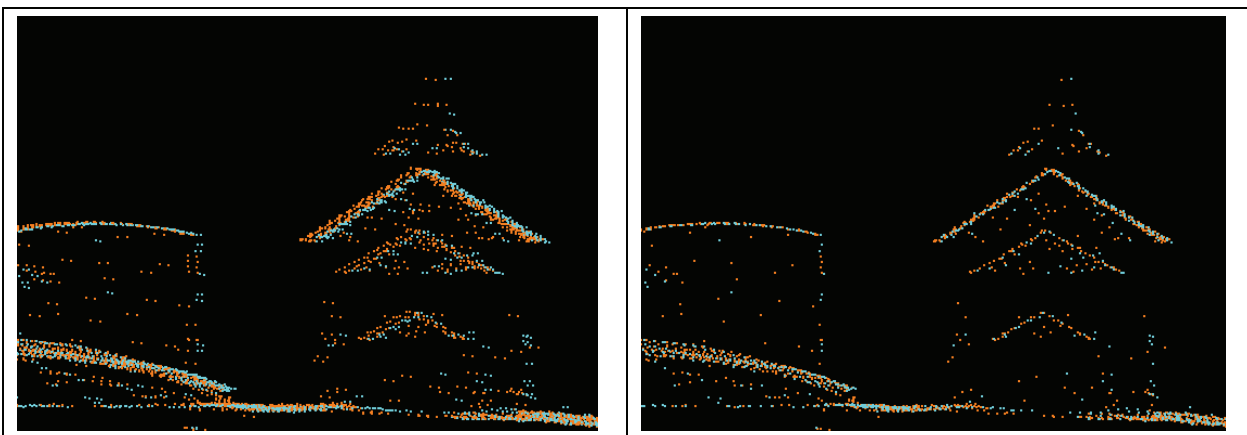


Abbildung 19 Mangelhafte Kalibrierung zeigt sich im horizontalen Versatz zweier Scanstreifen (blaue bzw. orange Punkte)

Linke Abbildung vor, rechte nach der Kalibrierung (Quelle Haebler, 2006)

### 2.5.3 Streifenausgleichung

Neben der Berechnung und Korrektur von systematischen Abweichungen wird bei Anwendungen mit sehr hohen Forderungen an die räumliche Genauigkeit auch verlangt, dass zufällige Abweichungen erkannt und reduziert werden. Die Prinzipien sind die gleichen wie im Kapitel 2.5.2 aufgeführt, allerdings wird das Modell um weitere Parameter erweitert: Verschiebungen und Driften in GPS- und IMS-Daten, Rangeabweichung wegen ungenügender meteorologischer Korrektur oder jahreszeitliche Schwankungen der Vegetationshöhe (Burmam, 2002; Oude Elberink et al., 2003). Die Verfahren basieren auf der Analyse einer gesamten Mission bis hin zu missionsübergreifenden Daten und können daher mit der photogrammetrischen Bündelblockausgleichung verglichen werden.

Mit zunehmender Komplexität des Modells steigt die Anzahl der zu analysierenden Flugstreifen, der Punkte und letztlich auch die Zeit für die Berechnung (Haebler, 2006).

## 2.6 Diskussion

Die Fortschritte der letzten Jahre im Bereich in situ Kalibrierung der ALS-Systeme und der Streifenausgleichung sind sehr erfreulich und haben einen wichtigen Beitrag für den Erfolg der Technologie geleistet. Trotzdem darf nicht darüber hinweg gesehen werden, dass die hier vorgestellten Modelle limitiert sind. In einigermaßen flachem Gelände mit homogenen Flughöhen und einigermaßen konstanten Ranges sind sie sicherlich geeignet, die kombinierte Messunsicherheit in eine Dimension zu bringen, die für viele Anwendungen genügend ist. Im hügeligen oder gar alpinen Gelände werden die Punkte im Überlappungsbereich zweier Streifen aber von unterschiedlichen Flughöhen (und damit Ranges) und mit anderen Auftreffwinkeln erfasst (Wack et al., 2005). Hier kann die Anwendung der Streifenausgleichung ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen systematischen Einflüsse zu falschen Korrekturen führen. Beim Zusammenbringen der Daten aus verschiedenen Missionen für das weitere Prozessieren sollten aber diese Kenntnisse verwendet werden, um zuverlässigere Punkte zu bevorzugen und weniger zuverlässige nur da zu verwenden, wo sonst Datenlücken entstehen. In diesen Situationen können störende lokale Diskrepanzen mittels Least Square Adjustment von Punkten auf geeigneten Oberflächen eliminiert werden. Ein deterministisches Modell zur ganzheitlichen Lösung dieser wichtigen Problematik unter Einbezug von Informationen aus dem Messprozess und der Topographie fehlt zurzeit noch.



### 3 Die ALS-Prozesskette

Die Messgrößen der Sensoren sind in einem mehrstufigen Verfahren miteinander zu kombinieren, um die 3D Punktwolke zu generieren bzw. die Endprodukte zu produzieren. Die verschiedensten Prozesse leisten daher einen bedeutenden Beitrag zu einer erfolgreichen Generierung von DGM aus Airborne Laser Scanning. Die einzelnen Teilprozesse sind geprägt durch die sehr unterschiedlichen Inhalte und Anforderungen; sie sind aber über Eingabe und Ergebnis eng miteinander verbunden.

Am Anfang und Ende der Prozesskette steht der Auftraggeber; er bestimmt aufgrund von Bedürfnissen die Anforderungen an die Produkte und er ist Empfänger der (Zwischen-) Resultate, welche er kontrolliert und – bei Konformität mit der Anforderung – akzeptiert. Der Kunde wird vielfach bei Entscheidungen von übergeordneter Bedeutung miteinbezogen, beispielsweise, wenn der Terminplan im Widerspruch zu den Flugbedingungen steht. Die Spezifikationen sind die Leitplanken, nach welchen alle Prozesse ausgerichtet werden.

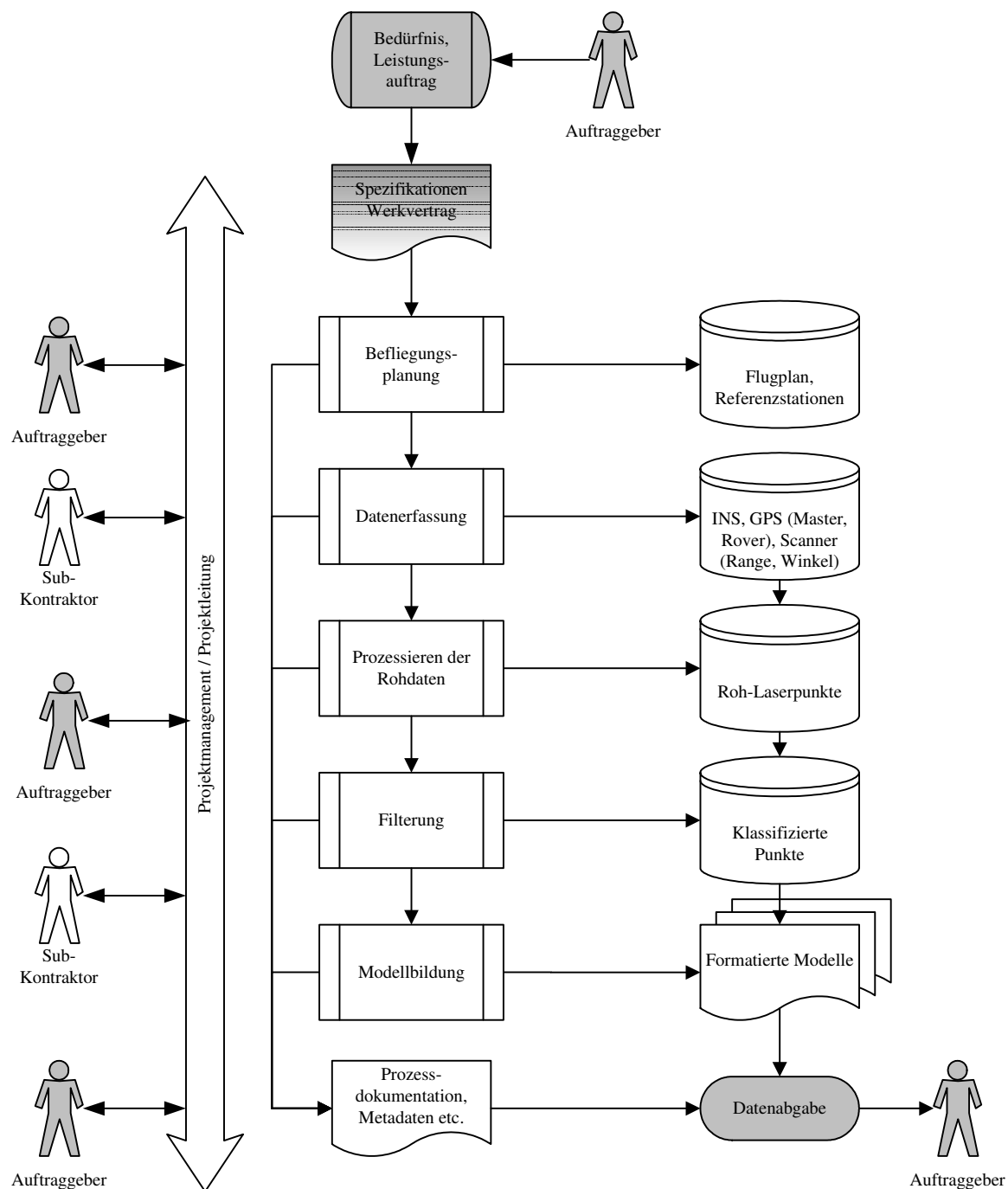


Abbildung 20 Die Hauptprozesse bei der Produktion von DGM mittels ALS

### 3.1 Produktspezifikation

Am Anfang einer Datenerfassung mit ALS steht ein (gesetzlicher) Leistungsauftrag<sup>13</sup> oder ein Bedürfnis aus einer Anwendung für ein DGM. Die Anforderungen des Auftraggebers dürfen nicht auf die Laser Scanning Technologie ausgerichtet werden, sondern es müssen präzise Aussagen über die benötigten Eigenschaften der Geodaten gemacht werden<sup>14</sup>. In der Praxis sind diese häufig sehr allgemein formuliert oder es werden gar nur die Anwendungsgebiete beschrieben, für welche der Datensatz tauglich sein muss. Damit wird aber (zu) viel Raum für (unterschiedliche) Interpretationen geboten. Eine Umfrage bei verschiedenen Auftraggebern (Vermessungsämtern) hat gezeigt, dass beim Produkt DTM die Genauigkeit und der durchschnittliche Punktabstand (bzw. horizontale Auflösung) in allen Fällen vorgegeben sind (vgl. Anhang). Der Befliegungszeitpunkt wird teilweise auch noch festgelegt. Es ist jedoch notwendig, dass nicht nur diese offensichtlichen Punkte spezifiziert werden, sondern dass das Produkt (als vereinfachte Abbildung der Realität) mit weiteren allgemein gültigen (Qualitäts-)Parametern von Geodaten (vgl. Kapitel 1.6.2) beschrieben werden, da diese häufig implizit bei einer Qualitätskontrolle des Auftraggebers zugrunde gelegt werden.

Es liegt auch im Interesse des Auftragnehmers, eine möglichst genaue Beschreibung der Charakteristiken in Form von Produktspezifikationen zu vereinbaren und diese im Fall von zu allgemeinen Vorgaben methoden- und herstellerneutral zu präzisieren. Mit diesem wichtigen Schritt wird sichergestellt, dass das Verständnis des geforderten Qualitätsniveaus von Auftraggeber und -nehmer übereinstimmt. Aufgrund der Produktspezifikationen können verschiedene Qualitätskontrollen vereinbart werden, die der Auftragnehmer während der Dauer des Projekts auszuführen und zu dokumentieren hat. Damit kann auf beiden Seiten der Aufwand für die Qualitätskontrollen optimiert werden.

Die mit dem Kunden vereinbarten Spezifikationen werden vom Auftragnehmer für die einzelnen Prozesse verfeinert und präzisiert. In Kombination mit den allgemeinen Prozessdokumentationen des übergeordneten QMS werden die ausführlichen internen Spezifikationen Bestandteil eines Projektmanagement-Plans (ISO 10006) bzw. eines Qualitätsplans (ISO 10005)<sup>15</sup>. Die technischen Spezifikationen beeinflussen die konkrete Ausgestaltung (Parametrisierung) der Prozesse beim Auftragnehmer (siehe Abbildung 21 und Tabelle 5).

Das Erarbeiten von detaillierten Spezifikationen ist eine komplexe Angelegenheit, ist doch neben den anwendungsorientierten Anforderungen des Kunden auch Rücksicht zu nehmen auf wirtschaftliche, rechtliche (Industrie-Normen und Verordnungen) und operationelle Aspekte. Aufgrund der Dynamik des Geodatenmarkts, der wachsenden Verbreitung von allgemein zugänglichen Geodateninfrastrukturen<sup>16</sup> und des steigenden Bekanntheitsgrads der Normenreihe ISO 19100 ist davon auszugehen, dass Spezifikationen künftig vollständiger und präziser die Bedürfnisse wiedergeben werden.

---

<sup>13</sup> Beispielsweise als Ebene Höhe in der Katastervermessung oder durch die Dokumentationspflicht von Flughindernissen

<sup>14</sup> Verständlicherweise tendieren die Auftraggeber dazu, diejenige Technologie oder Verfahren zu favorisieren, welche aktuell am meisten nachgefragt sind, oder welche über einen Zusatznutzen verfügen, beispielsweise wegen des erwarteten Entwicklungspotentials.

<sup>15</sup> In ISO 10005 werden als gleichwertige Begriffe auch Qualitätsmanagementplan und Qualitätssicherungsplan verwendet.

<sup>16</sup> Beispiele siehe <http://www.gsdi.org>, <http://www.ec-gis.org/inspire/>, [http://www.e-geo.ch/NGDI\\_d.htm](http://www.e-geo.ch/NGDI_d.htm) oder <http://www.gdi-de.org>



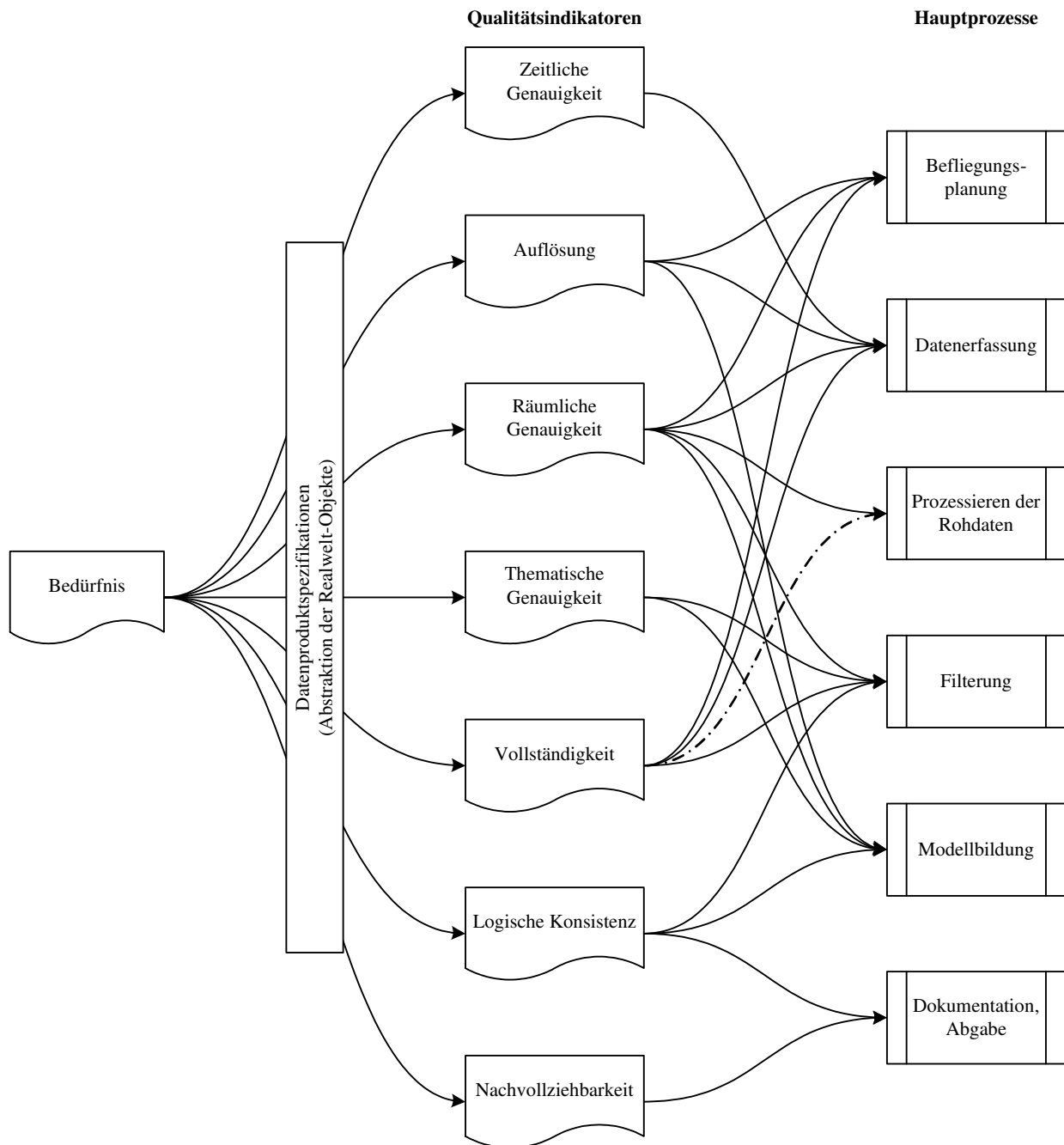


Abbildung 21 Einfluss eines Datenbedürfnis auf Spezifikationen und Prozesse

### 3.2 Flugplanung

Bei der Planung der Befliegung werden die Fluglinien anhand der Produktspezifikationen festgelegt. Dabei sind verschiedenen Randbedingungen zu beachten: Topographie (Berge und Täler), technische Möglichkeiten des ALS-Systems, Fluglinienlänge, Performance des Flugzeugs und letztlich auch wirtschaftliche Aspekte. Der Perimeter muss bei grossen Projekten in kleinere Einheiten unterteilt werden, um die Länge der Fluglinien zu beschränken. Zu lange Linien sind schwierig zu fliegen und die Abweichungen des Inertialsystems wachsen wegen mangelnder Dynamik stärker an (Skaloud, 1999; Mostafa et al., 2001b). Bei der Unterteilung des Perimeters kann in einem topographisch schwierigen Gelände auf die Geländerauigkeit Rücksicht genommen werden, in einfacheren Gebieten ist die höchste Effizienz Ausschlag gebend. Die horizontale Auflösung (Punktabstand am Boden) und die Genauigkeit werden primär über die Einstellungen am Sensor und die Wahl der Fluggeschwindigkeit bzw. -höhe

definiert. Die minimale Flughöhe wird einerseits in Vorschriften geregelt<sup>17</sup> und andererseits von der Flugzeugperformance und der Topographie beeinflusst.

Anforderungen und Einflüsse  Parameter der Flugplanung	Punktabstand (Auflösung) <sup>a</sup>		Vollständig-keit	Räumliche Genauigkeit	Andere		
	Quer	Längs	Erfassen einzelner Objekte <sup>b</sup>	Horizontal u. vertikal <sup>c</sup>	Topo- grafie	Max. Länge der Flug- linien	Wirt- schaft- lich- keit <sup>d</sup>
Beam Divergence	-	-	x	(x) <sup>f</sup>	-	-	-
Abtast-Winkel	x	-	(x)	x	-	-	x
Abtast-Rate	x	x	(x)	-	-	-	-
Pulsfrequenz	x	-	x	x	-	-	-
Flughöhe	x	-	x	x	x	-	x
Querüberlappung	(x) <sup>e</sup>	(x) <sup>e</sup>	(x) <sup>e</sup>	(x) <sup>g</sup>	x	-	x
Geschwindigkeit	(x)	x	-	-	x	x	x

**Tabelle 5 Matrix zu den in einer Flugplanung festzulegenden Parametern und ihr Wechselspiel mit Anforderungen und Einflussfaktoren**

#### Erläuterungen zur Tabelle 5:

Legende: ‚x‘: direkter Einfluss, ‚(x)‘: beschränkter oder indirekter Einfluss, ‚-‘: kein Einfluss

<sup>a</sup> Bei der Wahl der Parameter ist auf folgende innere Abhängigkeiten Rücksicht zu nehmen: bei oszillierenden Ablenkverfahren beeinflussen sich die maximalen Abtast-Winkel und Abtast-Raten. Die max. Pulswiederholrate ist durch die Flughöhe beschränkt (Laufzeit des Signals muss kürzer sein als der Abstand zwischen zwei Pulsen, um die Eindeutigkeit bei der Distanzmessung zu gewährleisten). Weiter muss bedacht werden, dass in gebirgigem Gelände die Flughöhe über Grund und damit die Streifenbreite bzw. der Punktabstand quer zur Flugrichtung variiert.

<sup>b</sup> Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Objekt detektiert wird, ist abhängig von der Grösse des Footprints, der ausgestrahlten Energie, der Flughöhe und des Punktabstandes. Mit zunehmender Flughöhe wächst zwar der Footprint, doch verringert sich gleichzeitig das Energieniveau (Anzahl Photonen pro m<sup>2</sup>) und die Streuungsverluste in der Atmosphäre nehmen zu.

<sup>c</sup> Eine vertiefte Ausführung zur räumlichen Genauigkeit ist im Kapitel 2.4.5 zu finden

<sup>d</sup> Die Wirtschaftlichkeit der Befliegung ist im Prinzip *der* zu optimierende Parameter; die anderen werden zwar zuerst bestimmt, aber aus den verschiedenen Varianten kommt im Normalfall die wirtschaftlichste zur Anwendung.

<sup>e</sup> Die Streifenüberlappung kann gebraucht werden, um eine höhere Punktdichte zu erzielen, die Homogenität des Punktmusters leidet aber darunter. Die Anforderungen an die Punktdichte sollten deshalb auf der einzelnen Fluglinie erfüllt werden, so dass die Streifenüberlappung gering gewählt werden kann.

<sup>f</sup> Ein grösserer Footprint macht das Detektieren der „korrekten“ Distanz bei flachen Auftreffwinkel oder inhomogener Reflektierbarkeit schwieriger.

<sup>g</sup> Eine höhere Streifenüberlappung ermöglicht eine zuverlässigere Streifenausgleichung.

Die Wahl der Parameter erfolgt meist in einem iterativen Verfahren, um Varianten zu vergleichen und den Aufnahmeprozess zu optimieren. Verschiedene kommerzielle Tools sind für diese Aufgabe verfügbar, welche auch die notwendige Flugzeit berechnen. Trotzdem sind in diesem für das Gesamtprojekt äusserst kritischen Prozess vor allem die Erfahrung und die Fähigkeit, den Blick für das Ganze zu behalten, von entscheidender Bedeutung. Die Abbildung 22 zeigt die Eingabemaske des Flugplanungstools „ALTM-Nav“ von Optech, in welchem alle relevanten Parameter pro Block erfasst werden können. Die Optimierung der Flugstreifen (Schalter „Optimize“) kann mithelfen, die Fluglinienlänge zu verkürzen, wobei allerdings die Topographie nicht berücksichtigt wird. Durch

<sup>17</sup> In der Schweizerischen Verordnung über die Verkehrsregeln von Luftfahrzeugen (VVR) wird unterschieden zwischen Flügen über dicht besiedelten Zonen (300 m) und übriges Gelände (150 m)

Berücksichtigung der Wendezeit werden die geschätzte Flugzeit (mittlerer Teil) und optional auch die Kosten der Befliegung (unterer Teil) ausgegeben, so dass die Wirtschaftlichkeit einer Konfiguration einfach beurteilt werden kann. Die technische Beurteilung hinsichtlich Topographie-Flugzeugperformance und der zu erwartenden räumlichen Genauigkeit wird nicht angeboten. Sie muss durch den Sachbearbeiter selber erfolgen.

The screenshot shows the 'Plan Survey Grid' window with the following sections:

- Buttons:** Add New Area, Remove Area, Draw Area, Edit Corners, Generate Box, Load from File.
- Active Area:** Area 1 of 1.
- Pass Orientation:** A slider set to 0 degrees.
- Flight Profile:**

Altitude (m AGL)	750
Pass Heading (deg)	73
Overlap (m)	79.317
Speed (m/s)	25.7
Turn Time (min)	4
Passes	6
Pass Spacing (m)	185.14
- LIDAR Settings:**

System PRF (kHz)	71
Scan Freq (Hz)	28
Scan Angle +/-	10
Desired Res (m)	0.334
Cross Track Res	0.209
Down Track Res	0.459
Swath (m)	261.49
- Camera Settings:**

Photo Overlap (%)	38
Line Spacing	1
Line Overlap (%)	63
Pixel Size X (m)	0.123
Pixel Size Y (m)	0.123
Trigger Dist (nmi)	0.17
Trigger Time (sec)	11.491
- Survey Totals:**

Total Passes	6	Total Length (km)	17.146	Swath Area (km <sup>2</sup> )	3.174
Total Frames	55	Total Flight Time	00:32:38	AOI Area (km <sup>2</sup> )	3.076
		Total Laser Time	00:11:07		
- Costs:**

<input type="checkbox"/> Use Swath Area	Cost per Acre	0	Area Cost	\$0
<input checked="" type="checkbox"/> Use AOI Area	Cost per Hour	0	Time Cost	\$0
- Buttons:** Apply, Help, Close.

Abbildung 22 Arbeitsfenster des Flugplanungstool ALTM-Nav von Optech

### 3.3 Flugvorbereitung und Systemkalibrierung

Mit der Flugplanung liegt das Gerüst für die Datenerfassung vor. Die Datenerfassung wird unterteilt in einzelne Missionen, wobei eine Mission jeweils durch Start und Landung des Flugzeugs definiert ist. Für jede Mission ist zu entscheiden, welches Gebiet bzw. welche Linien eines Gebiets in welcher Reihenfolge befliegen werden sollen. Die Missionsplanung erfolgt in enger Zusammenarbeit zwischen Bediener des Sensors (Operator) und Pilot, welcher für die Sicherheit (Wetter, Wind, Flugrestriktionen) verantwortlich ist. Der Operator seinerseits muss aufgrund der GPS-Konstellation (Anzahl Satelliten, PDOP) das verfügbare Zeitfenster definieren. Mit der Missionsplanung muss auch sichergestellt werden, dass die temporalen Bedingungen den Anforderungen des Pflichtenhefts entsprechen: Schnee, Stand der Vegetation (Belaubung), Wasserstand etc. Die Einflüsse auf die Wahl des Befliegungszeitpunkts sind in der folgenden Abbildung zusammengefasst.

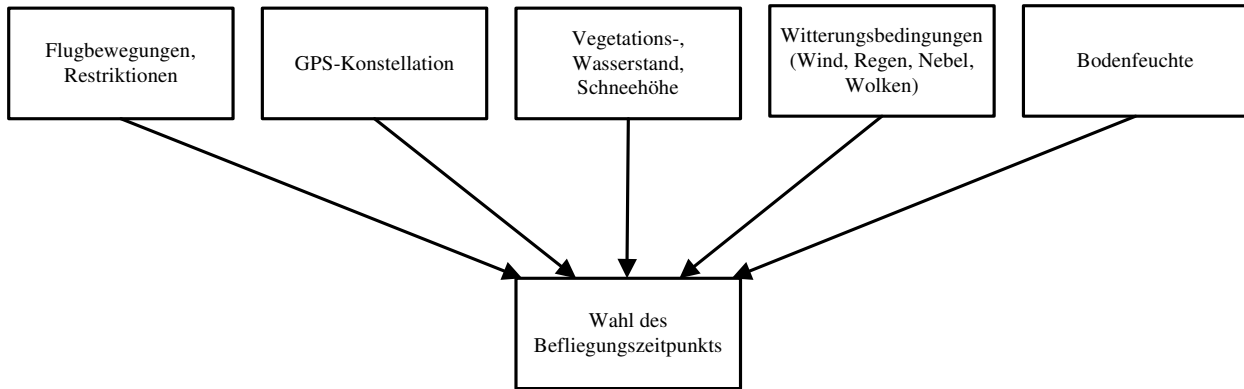


Abbildung 23 Die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Wahl des Befliegungszeitpunkts

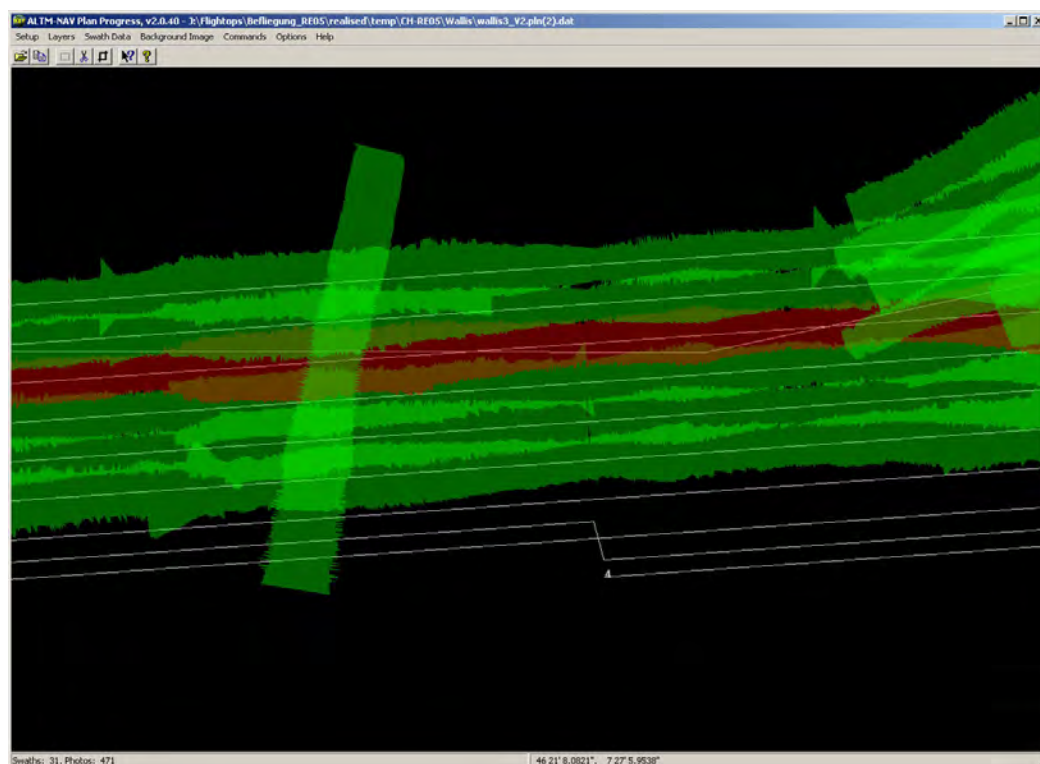
Bei der Missionsplanung dient die Dokumentation des Arbeitsfortschritts als wichtige Grundlage, da bei grösseren Projekten benachbarte Linien möglichst zeitnah zu einander erfasst werden sollen, um Abweichungen durch temporale Änderungen zu minimieren.

Wenn das ALS neu in ein Fluggerät eingebaut wird oder saisonale meteorologische Schwankungen (insbesondere Temperatur und Luftfeuchtigkeit) ausgeglichen werden müssen, erfolgt eine in situ Systemkalibrierung, wie sie in Kapitel 2.5.2 beschrieben ist.

### 3.4 Befliegung

Am Anfang einer Mission sind das GPS und das IMS zu initialisieren, um eine gute Basis für die Georeferenzierung zu schaffen. Dies dauert in der Regel wenige Minuten. Während des Transferflugs ins Projektgebiet selektiert der Operator die erste Fluglinie und überprüft die Einstellungen am System. Das Navigationssystem zeigt dem Piloten die verbleibende Distanz und den Kurs für den Anfangspunkt der nächsten Linie an. Sobald mit der eigentlichen Datenaufzeichnung gestartet wird, ist es Aufgabe des Piloten, das Fluggerät stabil in Lage und Höhe zu halten sowie Einflüsse von Wind möglichst sanft abzufangen. Der Operator steuert und überwacht die Sensoren und die aktuelle GPS-Konstellation. Er kontrolliert die Einhaltung der Flughöhe, die Verkippung (wegen Abschattung der GPS-Antenne) sowie den Arbeitsfortschritt. Das ALTM-Nav von Optech berechnet mit Hilfe der Real-Time-Navigationslösung, dem Scanwinkel und dem mittleren Range eine genäherte Abdeckung des Flugstreifens, so dass das Einhalten der Überlappungen und die Vollständigkeit der Datenaufzeichnung laufend kontrolliert werden kann (siehe Abbildung 24). Dies erlaubt dem Operator bei Problemen eine schnelle Reaktion noch während des Fluges (Wiederholung einer Linie, zusätzliche Linie zur Abdeckung einer Lücke). Diese Darstellung der Daten gibt aber keinen Eindruck, welche Objekte vom Scanner (nicht) erfasst wurden (beispielsweise bei einer Befliegung einer Hochspannungsfreileitung), oder ob die Laserimpulse die Vegetation penetrierend den Boden erreichen können. Ebenso wird der Einfluss der Topographie auf die Streifenbreite vernachlässigt.

Beim ALS handelt es sich im Gegensatz zur Luftbildkamera um einen aktiven Sensor (Kraus, 2002), daher ist der Zeitpunkt der Befliegung unabhängig von Tageslicht oder vom Sonnenstand. Eine Befliegung während der Nacht hat den Vorteil, dass die Windverhältnisse häufig günstiger sind und die Hintergrundstrahlung reduziert ist (Ingensand, 2006).



**Abbildung 24** Darstellung des Fortschritts in ALTM-Nav während der Datenaufzeichnung (rote Farbe gibt Hinweis auf möglicherweise ungenügende GPS-Qualität)

### 3.5 Berechnen der externen Orientierung

Nach erfolgreicher Befliegung wird für jede Mission zuerst die genäherte Trajektorie mittels der Messdaten der beiden GPS-Empfänger berechnet. Obwohl die aktuellen Software-Werkzeuge sehr ausgereifte Algorithmen bereitstellen, verlangt das Prozessieren der kinematischen Aufzeichnung ein gutes Verständnis über die Satellitenvermessung: durch die Drehungen des Fluggeräts (insbesondere am Ende einer Fluglinie) können einzelne Satelliten für kurze Zeit abgedeckt werden. Die Satellitenkonstellation variiert aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Fluggeräts, der grossen Distanzen und der Topographie stärker als bei anderen Anwendungen. Die Basislinienlänge ändert sich laufend und letztlich fehlen redundante Messungen. Indikatoren zeigen zwar die Güte der Lösung aus Sicht des Algorithmus an, doch zeigen Untersuchungen, dass diese Schätzungen häufig zu optimistisch sind (Landtwing, 2005). Eine bessere Abschätzung lässt sich machen, indem die Datenreihe nicht nur vorwärts, sondern auch rückwärts prozessiert wird. Sind die Ambiguitäten gleich oder ähnlich gelöst, unterscheiden sich die beiden Lösungen nicht wesentlich voneinander (vgl. auch Glaus, 2006). Eine externe Kontrolle der DGPS-Lösung kann erst nach Vorliegen der Punktwolke erfolgen.

In mehreren Iterationen werden die verschiedenen Parameter, Start- und Endpunkt der Berechnung und die für die Berechnung verwendeten Satelliten angepasst, um eine optimale Lösung zu finden, welche die Genauigkeitsanforderungen des Pflichtenhefts beziehungsweise die internen Bedingungen für diesen Prozess erfüllt. Die Messungen des Inertialsystems werden im Normalfall erst nach erfolgter Bestimmung der DGPS-Lösung in einem Kalman-Filter für eine lokale Verbesserung von GPS-Punkten, für die Verdichtung der Messreihe und für die Ergänzung der Trajektorie um die Orientierungswinkel verwendet. Die DGPS-Lösung wird im Kalman-Filter zur Abschätzung der IMS-Abweichungen verwendet. Alternativ gehen (bei Applanix) nur die Aufzeichnungen des GPS-Rovers und des Inertialsystems in den Kalman-Filter ein, wobei in diesem Verfahren das Inertialsystem als Unterstützung für die Berechnung der Ambiguitäten und bei etwaigen Cycle Slips Vorteile bietet. Durch den Wegfall der Referenzstation sind allerdings die atmosphärischen Einflüsse höher. Da momentan nur die eine oder die andere Variante des Kalman-Filters von der Applanix Software unterstützt wird, dürfte die Variante ohne GPS-Referenzstation höchstens bei sehr kurzen Basislinien und gleichzeitig schlechter GPS-Konstellation von Bedeutung sein.

Analog zur Berechnung der DGPS-Lösung werden die Messgrößen vom Kalman-Filter ebenfalls vor- und rückwärts ausgewertet und in einem „Smoother“ eine neue Standardunsicherheit geschätzt. Diese wird letztlich in einem weiteren Schritt für die Berechnung der als *Smoothed Best Estimated Trajectory* (SBET) bezeichneten externen Georeferenzierung verwendet. Das Resultat dieses Prozesses beinhaltet die Position und die Orientierung der Sensorplattform im WGS84 System und in einer Rate von maximal 200 Hz (beim Applanix POS AV 510). Für nähere Ausführungen zu den Prozessen und Algorithmen von Applanix wird verwiesen auf (Mostafa et al., 2001b).

### 3.6 Prozessieren der Rohdaten

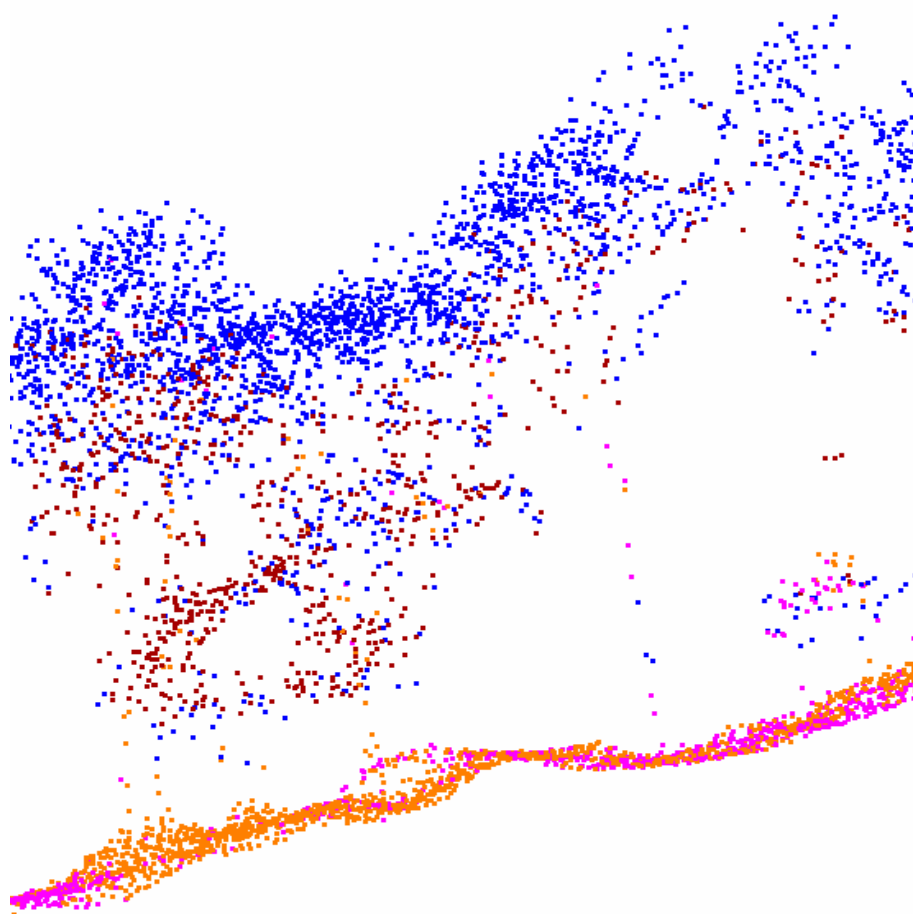
Sobald die SBET-Datei vorliegt, kann für jede Messgröße des Scanners (Range- und Winkelmessung) unter Berücksichtigung der Einflussgrößen (Kalibrierparameter sowie Druck, Temperatur) die 3D-Koordinate über polares Anhängen an die externe Georeferenzierung abgeleitet werden. Aufgrund der oben geschilderten Unsicherheiten bei der Bestimmung der Trajektorie werden häufig vorerst nur Abschnitte der Fluglinien zur Überprüfung der externen Orientierung, der Systemkalibrierung bzw. der Einbauparameter prozessiert. Der Sachbearbeiter untersucht dann die Punkte dieser Abschnitte auf Anomalien und erst nachdem dieser Test bestanden ist, wird die komplette Mission ausgewertet. Die Punkte liegen immer noch in einem globalen Bezugssystem vor (WGS84). Für die meisten Anwendungen sind die Punkte in ein lokales Projektionssystem zu überführen<sup>18</sup>. Die hierzu erforderlichen Schritte werden beispielhaft für einen Datensatz in der Schweiz aufgeführt: Der Unterschied von WGS84 zu einem lokal bestangepassten Referenzrahmen wie CHTRF95 sind an dieser Stelle in einem Bereich, welcher keinen messbaren Einfluss auf das Resultat hat. Die Transformation ins lokale Bezugssystem CH03+ (Bezugsrahmen LV95) erfolgt mit einer einfachen Translation (mit 3 bekannten Parametern  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ). Anschliessend werden die Punkte mittels Projektionsformeln ins kartesische Landeskoordinatensystem überführt. Bei der Umrechnung von WGS84 in CH03+ (LV95)-Koordinaten werden die ellipsoidischen GPS-Höhen beibehalten. Durch Einbezug der Geoidundulationen (Translationen) ergeben sich schliesslich orthometrische Höhen im Bezugssystem LHN95. Der resultierende Datensatz wird Punktwolke genannt, und da die Punkte nicht weiter verarbeitet sind, werden sie häufig als Rohpunkte bezeichnet (vgl. Abbildung 25).

Da die weitere Bearbeitung der Punktwolke wiederum sehr rechenintensiv ist und weil die Datenabgabe fast ausschliesslich in Kacheln erfolgt, werden die unbearbeiteten Rohpunkte auf Kacheln verteilt. Sie sind die Bearbeitungseinheit für alle nachfolgenden Prozesse.

---

<sup>18</sup> Da sich diese Verarbeitungsschritte deutlich von den traditionellen Vermessungsverfahren unterscheiden, sind existierende Höhenfixpunkte nicht immer als Kontrollpunkte geeignet, vgl. auch Kapitel 4.3.2

Weitere Informationen zu Bezugssystemen sind u. a. zu finden auf: <http://itrf.ensg.ign.fr/>, <http://www.euref-iag.net/> und <http://crs.bkg.bund.de/crs-eu/>



**Abbildung 25** Querschnitt durch die unfilterten 3D Punkte einer Baumgruppe

**Blau = erster von mehreren Returns, dunkelrot = dazwischen liegender, orange = letzter, Pink = erster und einziger Return**

### 3.7 Filterung der Punkte

Bei der Filterung werden Objekte (Punkte) mit gleichen Charakteristiken aus der nun kachelweise vorliegenden Punktwolke extrahiert und klassifiziert. Im allgemeinen Fall werden die Punkte, welche den gewachsenen Grund beschreiben, von Fehlmessungen und Messungen auf vertikalen Objekten (Vegetation, Kunstbauten etc.) separiert und als Terrainpunkte klassifiziert. Die Filteralgorithmen basieren auf unterschiedlichsten Verfahren. Einzelne orientieren sich an der Bildverarbeitung und sind deshalb auf Rastermodelle angewiesen, während andere die Punkte direkt verwenden. Für eine detaillierte Beschreibung der Filtertechniken wird auf den ISPRS Report „Comparison of Filters“ verwiesen (Sithole und Vosselman, 2003). Neuere Ansätze, basierend auf Segmentierung des Geländes oder der Scanlinien, sind beschrieben in (Abo Akel et al., 2005; Sithole und Vosselman, 2005; Tóvári und Pfeifer, 2005). Den Filtern zur Bestimmung des gewachsenen Grundes ist gemeinsam, dass sie nicht jede Situation korrekt interpretieren, wobei jeder Filter seine Stärken und Schwächen aufweist. Die Schwierigkeiten der Interpretation sind nicht erstaunlich, ist es doch auch für einen Sachbearbeiter nicht immer eindeutig zu erkennen, ob eine Struktur natürlich oder künstlich ist (siehe Abbildung 26). Sofern es sich also nicht um eine sehr einfache Topographie mit wenigen Kunstbauten handelt oder die Anforderungen an die Genauigkeit der Attributierung (Güte der Klassifizierung) sehr tief sind, muss das automatische Filtern visuell kontrolliert und manuell bereinigt werden. Die Homogenität der Produkte leidet durch die individuelle menschliche Interpretation der Klassifizierung (bei der Kontrolle und manuellen Bereinigung), wenn nicht sichergestellt ist, dass objektive, auf Spezifikationen aufbauende Richtlinien vorhanden und verstanden sind und identische Werkzeuge eingesetzt werden (vgl. auch Kapitel 3.11.2 bzw. Kapitel 4.7.3.).



**Abbildung 26** In das Gelände integriertes Haus – wo endet der gewachsene Boden?

Von den bisher publizierten Filteralgorithmen sind nur gerade zwei in kommerziellen Anwendungen verfügbar, aufgrund der Marktdominanz von TerraSolid mit ihrem Produkt TerraScan wird hier die Methode des darin enthaltenen Algorithmus näher erläutert (vgl. auch Axelsson, 2000). Der Algorithmus geht (etwas optimistisch) davon aus, dass lokale Minima immer Geländepunkte sind. In der ersten Iteration werden mittels Moving-Window die tiefsten Punkte über das Gebiet selektiert und damit eine grobe Dreiecksvermaschung<sup>19</sup> berechnet. Die Grösse des Such-Fensters richtet sich nach der erwarteten maximalen Gebäudegrösse, da ansonsten die grösseren Gebäude als Terrain erkannt würden. In jeder weiteren Iteration werden Punkte selektiert, die entweder unterhalb der jeweils entsprechenden Dreiecksfläche liegen oder welche sonst das Kriterium „natürliches Gelände“ nicht verletzen. Zur Beschreibung von „natürlich“ werden drei Parameter verwendet: die absolute Steigung des Geländes, der Winkel zwischen der Facette und der Linie, welche vom tiefsten Punkt der Facette zum aktuellen Punkt definiert ist. Als dritter Parameter wird die absolute Höhendifferenz zum nächstgelegenen Eckpunkt verwendet. Das TIN wird mit den neu selektierten Punkten verdichtet. Die Berechnung wird solange iteriert, bis keine Punkte mehr selektiert werden. Die Kriterien können an die Topographie angepasst werden. Der Algorithmus ist tolerant zu Unstetigkeiten, d.h. die Umgebung einer Unstetigkeit wie z.B. Stützmauer wird korrekt klassifiziert. Der Nachteil liegt darin, dass vertikale Objekte, die an mindestens einer Seite in den Boden übergehen (Brücken, Gebäude im steilen Gebiet) nicht zuverlässig erkannt werden. Die Funktionsweise des Algorithmus ist anhand eines Beispiels bei (Soininen, 2006) ausführlich dokumentiert.

Sowohl der Algorithmus von Axelsson wie auch andere Filter reagieren sehr empfindlich auf Ausreisser, insbesondere auf solche, die unter dem Gelände liegen, da die Algorithmen davon ausgehen, dass „tiefe“ Punkte vom Terrain stammen müssen. Unter dem Gelände liegende Punkte (negative Ausreisser) werden daher mit einer Ausreisser-Suche vor der Punktfilterung bestimmt und eliminiert (vgl. Kapitel 3.11.1). Die „positiven“ Ausreisser – beispielsweise eine Messung von einem Vogel – bereiten keine Probleme in der Terrainfilterung. Im Gelände mit nur sehr geringen Unstetigkeiten und wenig komplexen Siedlungsstrukturen erreichen die Filter eine sehr hohe Zuverlässigkeit in der Bestimmung von Terrainpunkten.

Neben der Filterung der Bodenpunkte interessiert aber auch die Erkennung von vertikalen Objekten (Flughindernisse, Gebäude, Vegetation, Hochspannungsfreileitungen), wobei die bisherige Erfahrung zeigt, dass die Zuverlässigkeit der automatischen Klassifizierung noch nicht den allgemeinen Anforderungen entsprechen und daher viel manuelle Bearbeitung notwendig ist (Kaartinen et al., 2005). Andererseits stehen bei dieser Filterung nicht die klassifizierte Punktwolke, sondern die abgeleiteten 3D-Objekte im Vordergrund. Für weitere Ausführungen wird verwiesen auf (Melzer und Briese, 2004; Tóvári und Vögtle, 2004; Wagner et al., 2004a; KI Team, 2005; Lüthy et al., 2006; Wang et al., 2006)

---

<sup>19</sup> Auch als Triangulated Irregular Network (TIN) bezeichnet



### 3.8 Modellbildung

In den meisten Anwendungsgebieten von DTM und DOM sind die Softwarewerkzeuge (noch) nicht auf die riesige Datenmenge der ALS-Sensoren ausgerichtet. Aus der klassifizierten Punktwolke ist daher die Oberfläche zu rekonstruieren und ein Modell abzuleiten. Die Anforderungen an die Modelle hängen sehr stark von den Anwendungsbereichen ab: In der hydrologischen Berechnung (beispielsweise für eine Hochwassergefahrenkarte) wird eine Dreiecksvermaschung bevorzugt, da hydrologisch relevante Objekte als Bruchkanten (beispielsweise aus gleichzeitig erfassten Luftbildern gemessen, vgl. Kapitel 2.3) eingefügt werden können. Zur Speicheroptimierung werden Punkte ausgedünnt, so dass Ebenen durch möglichst wenige Punkte zu beschreiben sind. Die Ausdünnung kann beispielsweise als Umkehrung zur oben beschriebenen Terrain-Filterung nach Axelsson erfolgen: Aus den Bodenpunkten werden iterativ Punkte in eine Dreiecksvermaschung eingefügt, bis die Differenz zwischen Ausgangsmodell und dem resultierendem TIN innerhalb der vorgegebenen Toleranz bleibt.

Für die meisten anderen Anwendungsgebiete wird ein Raster-Modell über Interpolation berechnet. Dank der hohen Punktdichte und der regelmässigen Verteilung der Punkte ist die Wahl der Interpolationsfunktion beim DOM weniger ein Problem als beim DTM (Lücken wegen extrahierten Objekten). Trotzdem ist ein gutes Verständnis über die Auswirkung einer Interpolationsfunktion notwendig, da die gleichen Eingangsdaten je nach Interpolation zu ganz anderen Rastermodellen führen, welche sich auf nachfolgende Berechnungen stark auswirken können. Die Wahl der Interpolationsmethode und der Zellgrösse ergibt sich wiederum aus den Produktspezifikationen: für Visualisierungen soll die Topographie (DTM) kontinuierlich dargestellt werden, was eher durch eine Spline oder Polynom-Approximation höheren Grades oder in Kombination mit einem Tiefpassfilter (Glättung) erreicht wird. Gebäude in einem DOM sollten sich aber eher durch scharfe Kanten auszeichnen, so dass eine Nearest Neighbour Interpolation bevorzugt wird. Da die Interpolation und Modellbildung verhältnismässig einfach zu berechnen sind, kann für jede Anwendung ein optimiertes Modell aus der Punktwolke gebildet werden.

Detaillierte Ausführungen zur Rekonstruktion und Modellbildung sind in (Li et al., 2005) zu finden, Vergleiche zwischen verschiedenen Interpolationsfunktionen und ihre Auswirkungen auf die Modelle haben (Smith et al., 2003) beschrieben.

### 3.9 Metadaten und Datenabgabe

Sobald die Daten alle Produktionsprozesse durchlaufen haben und sie auf die Konformität der technischen Spezifikationen geprüft sind, folgt die Abgabe an den Kunden. Da häufig das Abgabeformat nicht mit dem in der Produktion verwendeten Datenformat übereinstimmt, werden die Daten entsprechend der Schnittstellendefinition ausgegeben bzw. umformatiert. Falls bei der Filterung nicht mit der gleichen Kachelung gearbeitet wird wie als Abgabeeinheit vereinbart, sind die Daten zusammen zu fassen (Merge) oder auf die korrekte Ausdehnung zu beschneiden (Clip). Bei grösseren Projekten werden in der Regel Blöcke für Teillieferungen vereinbart, so dass die Datenabgabe und -inspektion gestaffelt erfolgen kann.

Neben den eigentlichen Geodaten werden immer häufiger auch strukturierte Metadaten Bestandteil von Datenlieferungen<sup>20</sup>. Der Inhalt der Metadaten richtet sich nach den Kundenvorgaben, doch werden sich in Zukunft die Norm ISO 19115 voraussichtlich stärker durchsetzen (vgl. auch Kapitel 4.2.4). Sie ist beispielsweise in der Industrienorm ED-98/DO-276 bereits als zu verwendender Standard referenziert.

Mit der Datenabgabe schliesst sich der Kreis vom Entwickeln der Produktspezifikation, über die Datenerfassung und Produktion zur Lieferung (vgl. auch Li et al., 2005)<sup>21</sup>. Im Allgemeinen führt der Auftraggeber eine eigene Prüfung der Daten durch, um die Einhaltung der Spezifikationen zu kontrollieren. Aufgrund gemachter Erfahrungen und aufgetretener Probleme ist davon auszugehen, dass die Spezifikationen für nachfolgende Aufträge verfeinert werden.

---

<sup>20</sup> Der gängige technische Bericht zum Abschluss eines Projekts enthält in etwa auch die Informationen, welche heute als Metadaten gefordert werden, er hat allerdings den Nachteil, dass die relevanten Informationen nicht strukturiert vorliegen und deshalb in einem Geodatenportal nicht abgefragt werden können.

<sup>21</sup> Dieser Produktionskreislauf ist schon aus Demings „Plan-Do-Check-Act“ bekannt, vgl. Kapitel 1.4.3

### 3.10 Datensätze

Eines der wesentlichen Merkmale einer ALS-basierten DGM-Erzeugung ist die grosse Anzahl an verschiedensten Datensätzen mit sehr heterogenen Eigenschaften. Sie entstehen in der Erfassung, Auswertung und Nachbearbeitung oder stammen aus externen Quellen. Einige Datensätze benötigen sehr viel Speicherplatz und haben keine zentrale Bedeutung im Produktionsprozess, andere benötigen nur einen Bruchteil davon, sind aber essentiell. Die riesige Datenmenge beeinflusst die Ausgestaltung der Produktionsprozesse insbesondere im Bereich der Qualitätskontrollen. Da der Prozessoutput in den meisten Fällen nicht direkt, sondern erst in einem später folgenden Prozess geprüft werden kann, kommt dem Datenmanagement eine zentrale Funktion zu. Das Datenmanagement muss zwei Ziele verfolgen:

1. die richtigen Daten zur richtigen Zeit am richtigen Ort verfügbar halten
2. den vorhandene Speicherplatz optimal auszunutzen

In der Abbildung 27 sind die anfallenden bzw. verwendeten Datensätze in verschiedene Kategorien unterteilt, wobei die Zusammenfassung primär aufgrund der Prozessstruktur erfolgt.

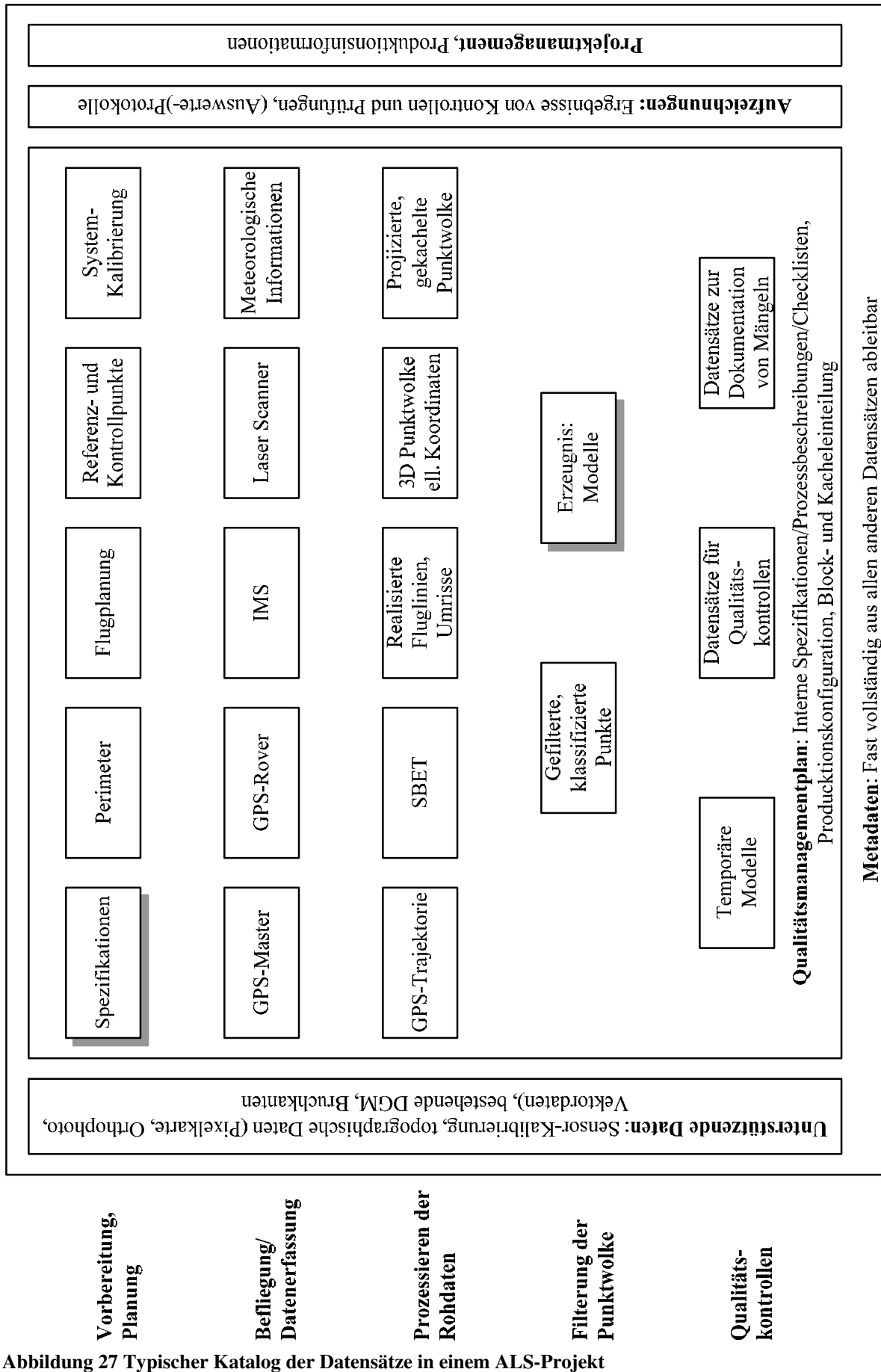


Abbildung 27 Typischer Katalog der Datensätze in einem ALS-Projekt

Die Aufstellung in Abbildung 27 ist vereinfacht, da an verschiedenen Stellen temporäre Datensätze anfallen, welche beispielsweise aus Umformatierung entstehen. Ein weiterer zu beachtender Aspekt sind die verschiedenen Software-Pakete. In einem Mehrbenutzerbetrieb muss sichergestellt werden, dass auf allen Arbeitsplätzen die jeweils gleichen Versionen installiert sind, da unterschiedliche Versionen abweichende Auswertelgorithmen beinhalten können.

### 3.10.1 Daten für die Planung und Vorbereitung der Arbeiten

Zur Vorbereitung der Arbeiten werden verschiedene Datengrundlagen benötigt. Es fallen in der Flugplanung und in der in situ Systemkalibrierung wesentliche Datensätze an. Es handelt sich typischerweise um Datensätze, die in linearen Dateien („flat Files“) abgelegt sind. Das anfallende Volumen ist vernachlässigbar, die Verwaltung verschiedener Versionen von gleichen Informationen ist bedeutender. Der Nachteil einer dokumentenbasierten Datenverwaltung wird hier deutlich sichtbar: in den für den Gebrauch der Software strukturierten Dateien fehlen teilweise Angaben zu temporaler Gültigkeit, Bezug zu Sensorplattform oder interne Qualitätsinformationen (vgl. Beispiel in Tabelle 6). Ohne weitere Massnahmen ist die Gefahr von Verwechslungen dieser Dateien sehr gross. Wegen ihrer Bedeutung sind die Flugplanung und Kalibrierwerte in einer gesicherten und strukturierten Umgebung abzulegen und mit zusätzlichen Angaben zu versehen. Bei den Referenz- und Kontrollpunkten ist die Gefahr der Verwechslung kleiner, aber es sind auch hier Massnahmen zur Gewährleistung der Integrität zu treffen. Zur Planungs- und Vorbereitungsphase gehören folgende Datensätze:

- Projektplanung
  - Produktspezifikationen
  - Technische Spezifikationen
  - Perimeter
  - Terminplan
- Flugplanung
  - Planung der Befliegung für vollständige Abdeckung des Perimeters
  - Zusätzliche Flugplanung für Systemkalibrierung
- Referenz- und Kontrollpunkte
  - Kalibrierflächen: Kontrollpunkte, -linien und -flächen für die in situ Systemkalibrierung. Sie können unter Umständen in mehreren Projekten verwendet werden.
  - Fixpunkte zur Verwendung als Referenzstation<sup>22</sup>
  - Kontrollpunkte für den Nachweis der räumlichen Genauigkeit. Weitere Angaben über die Herkunft, Zuverlässigkeit und Genauigkeit sind empfehlenswert, damit ihre Eignung in der Qualitätsprüfung sichergestellt ist.
- Systemkalibrierung, sie kann über mehrere Missionen oder ev. sogar Projekte konstant bleiben und beinhaltet im wesentlichen:
  - Boresight Winkel (Drehmatrix zwischen IMS und Laser Scanner)
  - GPS-Lever Arm
  - IMS-Lever Arm
  - Scanner Massstab und Versatz
  - Kompensation für Zeitsynchronisierung

---

<sup>22</sup> Mit der steigenden Verfügbarkeit automatischer GPS-Netzwerke (z.B. AGNES, SAPOS) mit ihren permanenten oder gar virtuellen GPS-Stationen nimmt die Bedeutung der Fixpunkte und Referenzstationen für Projekte in Zentraleuropa etwas ab.

```

AltmSerialNo= 04SEN162;
ImuType=      LN200A1;
ImuRate=     200;
ScannerScale= 1.0065;
ScannerOffset= 0.0136;
FirstPulseRange= -2.47;
SecondPulseRange= -2.47;
ThirdPulseRange= -2.47;
LastPulseRange= -2.47;
IMURoll=     0.021;
IMUPitch=    0.001;
IMUHeading=  0.000;
UserToImuEx= -0.045;
UserToImuEy= 0.035;
UserToImuEz= 0.000;
UserToImuDx= -0.090;
UserToImuDy= -0.008;
UserToImuDz= -0.096;
UserToRefDx= -0.051;
UserToRefDy= -0.030;
UserToRefDz= -0.488;
TimeLag=     0.0001555;
IntensityGainFor3070= 20;

```

**Tabelle 6** Dokument mit den Kalibrierinformationen eines ALS von Optech

### 3.10.2 Befliegung

Während der Durchführung der Befliegung werden von den verschiedenen Sensoren Messgrößen registriert und teilweise bereits ein erstes Mal von einer im Sensor integrierten Software verarbeitet. Die gespeicherten Messdaten sind die Träger der räumlichen Informationen und bilden damit die Basis für die weiteren Auswertungen. Wegen den hohen Kosten für die (üblicherweise von einem Unterauftragnehmer durchgeführten) Befliegung sind sie entsprechend wertvoll. Die Datensätze werden in binären Formaten abgelegt, die für die weitere Verarbeitung erst umformatiert werden müssen. Die ALS-Rohdaten und die Bilder von einer allfällig parallel dazu betriebenen Digital- oder Multispektralkamera sind sehr speicherintensiv. Nach Abschluss einer Mission werden die Daten mit entsprechender Software dekodiert und für die weitere Verarbeitung bereitgestellt. Neben diesen Messdaten und einigen Kommentaren des Operators sind aber trotz der grossen Auswirkung von mangelhaften Daten leider keine weiteren wesentlichen Hinweise zur Qualität der Datenerfassung oder zu den sensornahen Auswertungen vorhanden, sie sind in späteren Prozessen selber zu erstellen. Es werden folgende Datensätze unterschieden:

- GPS-Rohdaten Rover
- GPS-Rohdaten Master
- IMS-Rohdaten
- Laser Scanner Daten (Zeitstempel, Winkel, Range, Echo, Intensität)
- Bilder der Digital- oder Multispektralkamera
- Aufzeichnung der meteorologischen Bedingungen während der Datenerfassung (Einflussgrößen)

### 3.10.3 Prozessieren der Rohdaten

Der GPS-Auswerteprozess ist geprägt von der schwierigen Beurteilung der Qualität einer Lösung und den damit verbundenen mehrfachen Iterationen. Die Probleme und Ursachen wurden im Kapitel 2.4.4 im Detail beschrieben. Das iterative Verfahren bringt mit sich, dass oft gleichzeitig mehrere Versionen des an sich gleichen Datensatzes (Trajektorie oder gar berechnete Punktwolke) existieren und die letzte Version nicht automatisch die beste darstellt. Da die Log-Dateien von POSpac die verwendeten Parameter zur Berechnung der Trajektorie aus den Rohmessungen vollständig beinhalten und nur wenig Speicherplatz beanspruchen, ist es nahe liegend sie aufzubewahren<sup>23</sup>. Zu jeder Version sollten zusätzliche

<sup>23</sup> Es ist davon auszugehen, dass diese Möglichkeiten auch von anderen Herstellern unterstützt werden, leider werden keine diesbezüglichen Informationen publiziert.

Angaben über die Güte der Lösung und die Beurteilung durch den Sachbearbeiter abgelegt werden, so dass die Unterschiede allein anhand der Dokumentation feststellbar sind. Als weitere Metainformation lassen sich in diesem Prozess die Umrisse der tatsächlich erfassten Fläche zuverlässig bestimmen. Folgende Datensätze fallen in diesen Aktivitäten an:

- POS-Auswertung
  - GPS-Auswertung: DGPS-Lösung als Trajektorie (Koordinatentripel und Zeitstempel)
  - Kombination der DGPS-Lösung mit den IMS-Messgrößen im Kalman-Filter: SBET-Lösung als verdichtete und um Orientierungswerte erweiterte Trajektorie
- Realisierte Flugstreifen
  - genäherte Umrisse der Flugstreifen aus ALTM-Nav
  - präzise Abdeckung der Flugstreifen aus Start- und Endpunkten der Scanlinien ermittelt
- ALS-Auswertung:
  - Roh-Punktvolke (pro Flugstreifen)
  - Falls zur Verbesserung der Systemkalibrierung eine Streifenausgleichung berechnet wird, fallen neue Kalibrierwerte an
- Koordinatentransformation
  - 3D Punkte in Lage- und Höhenbezugssystem wie für Abgabe notwendig, in Kacheln organisiert
  - Transformationsparameter und Geoid
  - Pass- oder Hilfspunkte für die Einpassung in gezwängt gelagerte Systeme

Auch wenn die Datensätze in dieser Kategorie prinzipiell Zwischenprodukte darstellen, sind die Entscheide, die zu diesen Ergebnissen führen, in späteren Prozessschritten unter Umständen von Bedeutung. Es sind daher jeweils sorgfältige Überlegungen anzustellen, welche Datensätze in welchem Zustand gespeichert oder archiviert werden sollen. Grundsätzlich können anhand der originalen Messwerte und der Log-Dateien von POSpac und REALM<sup>24</sup> alle Ergebnisse dieser Prozesse jederzeit rekonstruiert werden. Daher sind diese Log-Informationen als wesentlicher Bestandteil der Projektdokumentation zu sehen (und entsprechend zu sichern). Die streifenweise vorliegenden, untransformierten Rohpunkte stellen hingegen keinen bedeutenden Mehrwert dar und können nach Prüfung Kalibrierung, externen Georeferenzierung und der Transformation vom System gelöscht werden. Bei der Filterung werden gelegentlich Punkte gelöscht, z.B. zur Reduktion der Punktdichte auf den geforderten Wert. Deshalb kann es sich lohnen, den Datenbestand nach dem Verteilen auf die Kacheln zu archivieren, so dass bei einer Fehlmanipulation der Zeitaufwand für die Rekonstruktion gering bleibt.

#### 3.10.4 Filterung der Punktvolke

In diesem Prozess können aufgrund der Iterationen in der Filterung die Daten in verschiedenen Zuständen vorliegen (vgl. Kapitel 3.7). Indem die manuelle Nachbearbeitung für eine Kachel immer auf der gleichen Datei erfolgt, besteht keine Gefahr von Verwechslungen. Der aktuelle Stand in der Produktion einer Kachel kann aber ohne zusätzliche Angaben nur durch visuelle Kontrolle beurteilt werden, da die Änderungen in den Daten aufgrund der Datenmenge nicht protokolliert werden. Die Prozessschritte sind daher sauber zu dokumentieren, damit keine nur aufwändig aufzudeckenden Mängel entstehen.

- Filterung: Punkte pro Kachel abgelegt, mit zusätzlichem Attribut „Punktklasse“
- Erzeugnis: aus den Punkten aufbereitete Modelle (DTM, DOM) gemäss den spezifizierten Eigenschaften (Inhalt, Referenzsystem, Datenmodell/Format, Zellgrösse)

#### 3.10.5 Unterstützende Daten

Mit unterstützenden Daten werden diejenigen Informationen verstanden, welche unabhängig eines spezifischen ALS-Projekts entstanden, aber bei der Datenproduktion von Bedeutung sind. Sie werden in der Regel während der Bearbeitung eines Projektes nicht verändert. Zu diesen Daten können insbesondere existierende topographische Datensätze wie digitale Kartenwerke, Orthophotos oder Vektordaten aus der

---

<sup>24</sup> REALM steht für „REsults of Airborne Laser Mapping“. Diese Software von Optech erzeugt die Punktvolke. Broschüre zu finden unter <http://www.optech.ca/pdf/Brochures/REALM.pdf>

Katastervermessung zugeordnet werden. Sie werden neben der Flugplanung hauptsächlich in der Qualitätskontrolle als Referenzinformation benutzt. Wo vorhanden können bestehende 3D-Informationen (Bruchkanten, Kontrollpunkte oder DTM) zur Kontrolle der räumlichen Genauigkeit eingesetzt werden.

### 3.10.6 Prozess-Aufzeichnungen

Bei der Kategorie Aufzeichnung handelt es sich um Datensätze von Sensoren und Log-Dateien von Auswertesoftware, welche nicht eigentliche Messgrößen darstellen und daher nicht direkt für die weitere Verarbeitung verwendet werden, aber unter Umständen sehr hilfreich sind zur Erzeugung der Dokumentation oder bei der Qualitätskontrolle (bzw. bei der Suche nach Ursachen für Abweichungen). Folgende Informationen sind von Bedeutung:

- Scanner-Protokoll: Meldungen des Systems, beflogene Linie mit Angaben zu den tatsächlichen Scanner-Einstellungen, Zeittags (Start- und Endzeit) und Statistiken des Scanner-System (beispielsweise Anzahl Impulse ohne Returns)
- POS: Angaben zu den beiden Sensoren (GPS, IMS), Meldungen des Systems, aktuelle Einstellungen
- Beobachtungsprotokoll: Angaben zu Flugzeug und Wetter, Beobachtungen des Operators
- Stationsprotokoll GPS-Master: Referenzpunkt (3D-Koordinaten, Angaben zum Bezugssystem, ev. Bezeichnung), Stativ- und Antennenhöhe, Aufzeichnung der meteorologischen Bedingungen und der Abdeckung des Horizontes
- Log-File der GPS-Auswertung: alle Angaben zu den Einstellungen in der Auswertung, Genauigkeitsabschätzung für Vorwärts-, Rückwärts- und kombinierte Lösung
- Log-File des Kalman-Filters: Angaben zu Einstellungen in der Auswertung, Genauigkeitsabschätzung
- Log-File der automatischen Datenfilterung: Welche Filtermethoden auf welcher Kachel bzw. welche Punktklassen angewandt, wann wie viele Punkte klassifiziert, Systemmeldungen

In Tabelle 7 ist ein Beispiele zu den Aufzeichnungen des Laser Scanners während der Befliegung aufgeführt, aus denen deutlich wird, wie viele Informationen eigentlich aufgezeichnet werden, aber für die Nutzbarmachung vorzugsweise gefiltert und in einem strukturierten Format abzulegen sind.

```

Flight Log
-----
Project Number: 0
S/N           : 0
Operator      : CAH
Pilot(s)     : LORENZ
Aircraft     : FKP
Airport      : KAPPELEN
Mission      : 050715A
[...]

                Weather
-----
Date          : July 15, 2005
Julian Day    : 196
Temperature   : 28
Visibility    : 30 KM
Clouds        : 3\8
Precipitation :
Wind Dir      : SUD WEST
Wind Speed    : 30 KNT
Pressure      : 1018

[...]

*****
04:50:11 GMT : Comment

LINE 30 START

*****
04:50:19 GMT : ACTIVATING LASER AND CAMERA

Plan          : C:/Program Files/ALTM-NAV/Plans/matterhorn/Matterhorn_v5.pln
Strip         : 30
Lat1          : 45.948
Lng1          : 7.644
Lat2          : 45.974
Lng2          : 7.943
Altitude      : 14581.263 ft GPS
Plan Hdg      : 83 deg T
Air Course    : 84.366 deg T
Air Speed     : 126.448 kts
PDOP          : 2.019
Satellites    : 8
PRF           : 50 kHz
Scan Freq     : 21.80 Hz
Scan Angle    : 23.00 deg
Eyesafety     : 80 m

*****
04:50:21 GMT : Husky Popup: 04:50:20 (113) Laser Emission On

```

**Tabelle 7 Auszug aus den Aufzeichnungen des Laser Scanners und aus den Kommentaren des Operators während der Befliegung (Quelle Swissphoto)**

### 3.10.7 Qualitätskontrollen

Die Qualitätskontrolle der Endprodukte kann aufgrund der wenig geeigneten Darstellung und der riesigen Datenmenge nur beschränkt direkt auf den Punkten erfolgen. Aus der 3D Punktwolke werden daher verschiedene Datensätze abgeleitet, welche für das Auffinden von Mängeln besser geeignet sind (vgl. auch Kapitel 4.7 und 4.9.1).

In der Verwaltung der Informationen aus den Qualitätskontrollen muss unterschieden werden zwischen den bedeutsamen Prüfprotokollen, Checklisten und den Hilfsdatensätzen. Die ersten beiden sind aufgrund der beschränkten Bewertung eines Prozessoutputs wichtig für die Suche nach Ursachen von Mängeln in



den nachfolgenden Prozessen und daher strukturiert abzulegen. Letztere sind teilweise sehr speicherintensiv, sind aber relativ einfach ableitbar und können daher nach Abschluss einer visuellen Prüfung wieder gelöscht werden.

### 3.11 Unsicherheiten in und aus den Prozessen

Neben den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Messunsicherheiten in der Datenerfassung beziehungsweise in den direkt damit verbundenen Algorithmen zur Erzeugung der Roh-Punktwolke treten auch in den Resultaten der anderen Produktionsprozesse Abweichungen von den korrekten Werten auf. Diese Abweichungen beeinflussen in vielen Fällen die Qualität der Endresultate, sofern sie nicht erkannt und korrigiert werden. Allen Prozessen gemeinsam sind folgende potentiellen Ursachen:

- Fehlmanipulationen und grobe Fehler des Sachbearbeiters
- Prozesse sind nicht stabil; die Resultate einer wiederholten Bearbeitung durch denselben Sachbearbeiter weichen voneinander ab
- Prozessanleitungen sind unvollständig, je nach Wissen des Sachbearbeiters resultieren andere Daten
- Unzureichende Dokumentation; Prozessschritte werden unter Umständen übersprungen oder gar unwissentlich wiederholt, Resultate von Prüfungen werden nicht beachtet oder falsche Grundlagedaten verwendet
- Datenvolumen, Kosten- und/oder Termindruck führen dazu, dass Kontrollen nicht oder nur unzureichend durchgeführt werden
- Personal ist unzureichend geschult
- Soll-Eigenschaften sind unzureichend spezifiziert

Die Auswirkungen dieser Mängel können offensichtlich sein, sind aber durch die Unterteilung der Datenverarbeitung in verschiedene Prozesse gerade in Bezug auf die Erzeugung der externen Georeferenzierung erst in nachfolgenden Prozessen (wenn überhaupt) erkennbar. Da sie jederzeit auftreten können, ist die Anzahl der Fehlmanipulationen durch entsprechende Massnahmen tief zu halten und ihre Auswirkungen sind durch geeignete Kontrollen so früh wie möglich aufzudecken. Das im Kapitel 4 vorgestellte Qualitätsmodell bildet eine geeignete Grundlage, um diese Forderungen aus dem Qualitätsmanagement zu erfüllen und die Effektivität der Prozesse zu steigern.

#### 3.11.1 Umgang mit Ausreissern in der Rangebestimmung

In Kapitel 2.4.5 wurden die Auswirkungen der Abweichungen von Sensoren und Auswertalgorithmen als kombinierte Messunsicherheit betrachtet. Dabei wurde gezeigt, dass grobe Fehler mit Ausnahme der Rangemessungen detektiert und im Auswerteprozess bereits bereinigt werden können. Die groben Fehler in der Distanzmessung führen zu Punkten, die entweder deutlich über der Oberfläche oder unter dem Terrain liegen. Da mitunter Objekte mit sehr geringen Querschnitten erfasst werden sollen (Antennen, Hochspannungsfreileitungen), kann die Suche nach diesen Ausreissern nicht auf den Scanlinien erfolgen, sondern es muss die Nachbarschaft vollständig analysiert werden.

Zum Auffinden von Ausreissern werden für jeden Punkt und seine Nachbarschaft statistische Werte berechnet. Die Dimension der zu analysierenden Fläche richtet sich nach der Punktdichte, wobei ein Optimum zwischen Anzahl Punkte (Stabilität der Lösung) und der Prozessgeschwindigkeit gesucht werden muss. Deshalb wird häufig ein sich dynamisch vergrößernder Suchbereich gewählt, bis eine minimale Anzahl Punkte erreicht ist. In die selektierten Punkte wird anschliessend eine Ebene interpoliert und die Lotdistanz des aktuellen Punktes auf die Ebene berechnet. Wird ein Schwellwert überschritten, wird der Punkt als Ausreisser klassifiziert. Der Schwellwert kann mit der Neigung der Ebene gegenüber der Horizontalen korreliert werden, so dass in flachem Gelände kleinere Toleranzen gelten als in geneigtem, und in sehr steilem Gelände der Algorithmus allenfalls gar nicht angewendet wird. Des Weiteren lassen sich für positive und negative Abweichungen ebenfalls unterschiedliche Schwellwerte definieren. Ein Beispiel eines Algorithmus zum Erkennen von Ausreissern ist in (Li et al., 2005) publiziert.

### 3.11.2 Abweichungen und Fehler bei Terrain-Filterung

Wie in Kapitel 3.7 beschrieben, beruhen die Algorithmen zur Filterung der Terrainpunkte auf gewissen Annahmen und statistischen Modellen, welche nicht immer korrekt sind. Die Betrachtungen beziehen sich wiederum auf den verbreiteten Algorithmus von Axelsson. Bei den Fehlern muss unterschieden werden zwischen Fehlern 1. Art und Fehler 2. Art. Bei beiden handelt es sich um eine *offensichtlich* falsche Filterung, wohingegen Abweichungen aufgrund der Nicht-Eindeutigkeit der Objekterfassung (Reflektion von Gelände oder von am Boden liegenden Ast) kaum erkennbar sind und daher nicht weiter in Betracht gezogen werden. Bei Fehlern 1. Art werden Punkte, die eigentlich auf dem Gelände liegen, nicht als solche erkannt. Bei Fehlern 2. Art werden Punkte fälschlicherweise dem Gelände zugewiesen. Falsche Klassifizierungen ganzer Objekte oder grösserer Flächen gehen vielfach auf folgende Ursachen zurück:

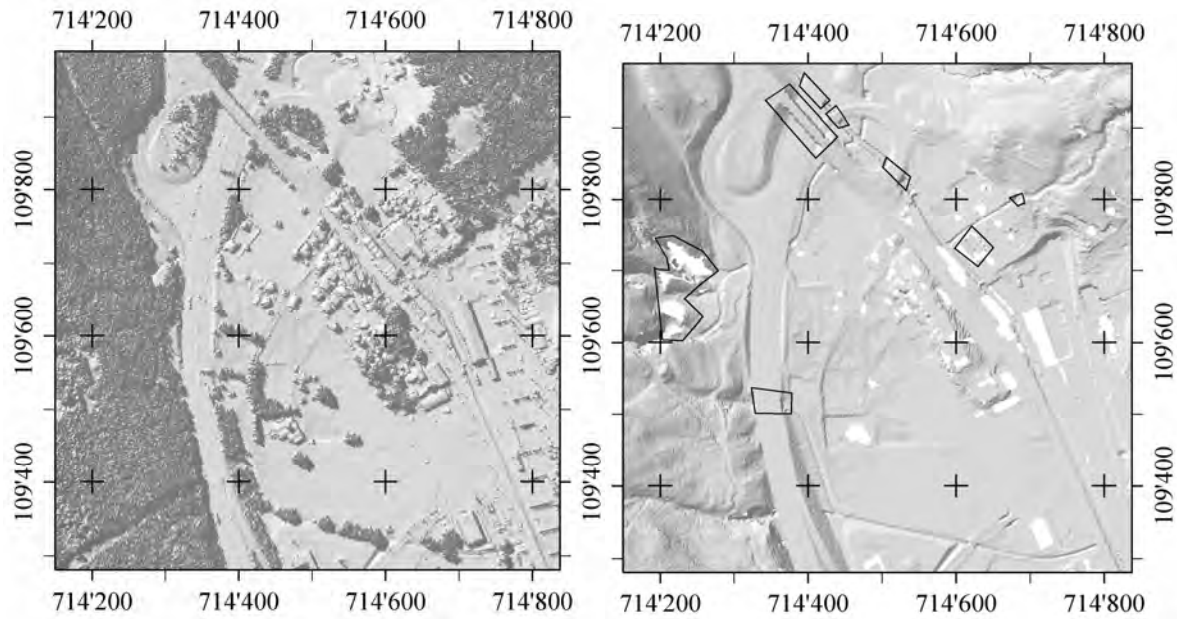
- Im initialen Such-Fenster ist der tiefstliegende Punkt kein Geländepunkt (insbesondere bei rauer Topographie)
- Im initialen Such-Fenster befindet sich gar kein Geländepunkt (grosse Industriebauten, Fichtenschonungen)
- Kunstbauten, die auf mindestens einer Seite kontinuierlich mit dem Gelände verbunden und kleiner als das Such-Fenster sind (Brücken, Galerien etc)
- Natürliche Geländeformen, die auf allen Seiten diskontinuierlich sind (Findling/Felsklotz)
- Punkte aus verschiedenen Flugstreifen, welche in der Lage und/oder Höhe nicht zusammen passen, so dass nur die Punkte des tiefstliegenden Streifens als Terrain erkannt werden
- Die lokale Punktdichte der Bodenpunkte ist wegen dichtem Buschwerk und Sträuchern sehr gering, das Rauschen aber verhältnismässig hoch
- Bei komplexen Strukturen im urbanen Raum

Ungeeignete Grenzwerte für maximale Steigung und absolute Höhendifferenz wirken sich im Normalfall bei einem erfahrenen Sachbearbeiter nur lokal oder gar auf einzelne Punkte aus. Da die Schwellwerte aber bei einem automatischen Ablauf für mehrere Kacheln gleich bleiben, wird es immer zu Abweichungen kommen, wenn die Topographie innerhalb der Bearbeitungseinheit stark variiert. Bei der Wahl der Grenzwerte muss ein Optimum zwischen Fehlern 1. und 2. Art gesucht werden, wobei Fehler 2. Art in einer visuellen Kontrolle häufig einfacher zu erkennen sind, da sie zu Artefakten führen. Bei tiefer Vegetation, die als Terrain klassifiziert ist, kann der Aufwand für die (manuelle) Bereinigung allerdings recht gross werden. Umgekehrt sind Fehler 1. Art weniger gravierend (punktuelle Auswirkung), oder dann über Punktdichteinformation auch eher einfach zu erkennen (lokal-regionale Auswirkung).

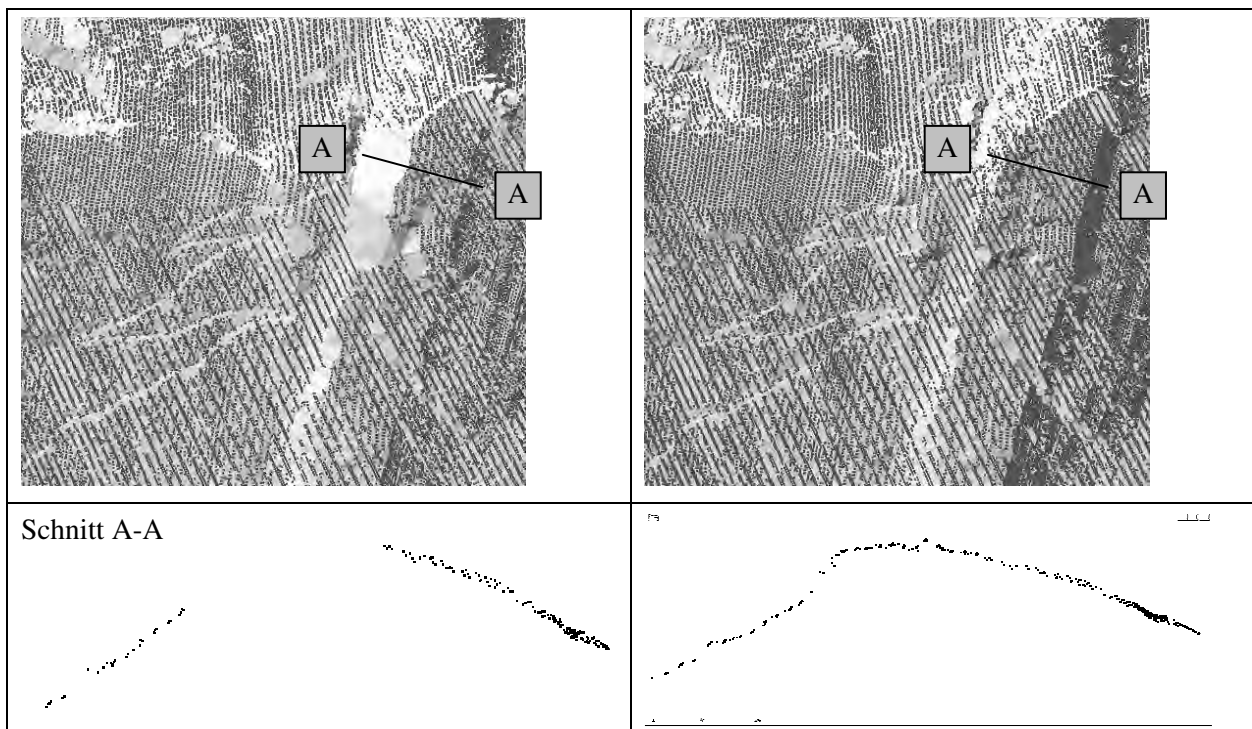
Die Fehler 1. Art treffen häufig in folgenden Situationen auf:

- Entlang eines spitzen Berggrats
- In tiefen Einschnitten, insbesondere wenn bewaldet
- Allgemein bei tiefer Punktdichte (beispielsweise wegen schlechter Penetration im Wald)
- In der näheren Umgebung eines nicht eliminierten negativen Ausreissers
- Bei (fast) senkrechten oder gar überhängenden Felswänden

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen Mängel einer rein automatischen DTM-Filterung. Die markierten Stellen im DTM in Abbildung 28 zeigen die Fehler in der Filterung: im Waldabschnitt auf der Westseite wurden keine Bodenpunkte erkannt (Fehler 1. Art), mehrere Brücken und ein Gebäude wurde unkorrekt als DTM klassifiziert (Fehler 2. Art). In Abbildung 29 wird die steile Bergkuppe in der automatischen Filterung nicht als Gelände erkannt.



**Abbildung 28 Fehler 1. und 2. Art bei der Klassifizierung eines DTM; links das DOM aus den 1. Returns abgeleitet, recht das entsprechende DTM (Quelle Swissphoto)**



**Abbildung 29 Fehler 2. Art bei der Klassifizierung eines DTM. Links: automatische Filterung, rechts manuell bereinigt.**

Da die Fehlerrate a priori unklar ist, lohnt es sich, für einen spezifischen Datensatz (hinsichtlich Auflösung und Topographie) anhand eines charakteristischen Testgebietes die optimale Parametrisierung des Filteralgorithmus zu ermitteln. Die Erfahrung zeigt, dass in städtischem Gebiet Fehler 2. Art mit weniger Aufwand für Korrekturen verbunden sind als Fehler 1. Art. In hügeligen, bewaldeten Regionen sollten hingegen Fehler 2. Art minimiert werden. Nichtsdestotrotz ist in praktisch allen Situationen unklar, wo die Fehler auftreten können. Es ist deshalb unabdingbar, dass die Klassifikation mit Hilfe geeigneter Darstellung visuell kontrolliert wird und falsche Punktattribute manuell bereinigt werden. Bei der Kontrolle und Verbesserung ist daran zu denken, dass auch bei einer detaillierten visuellen Inspektion nicht immer klar ist, ob eine Messung vom Gelände oder tief stehenden Objekten stammt. Daher muss

das Schwergewicht auf die korrekte Identifikation von eindeutig erkennbaren Objekten gelegt werden. Zur Reduktion des Einflusses aus der visuellen Interpretation erfolgt in der Regel eine unabhängige Endkontrolle (4-Augen-Prinzip).

Für weitere Ausführungen zu den Abweichungen und Fehlern bei der Filterung wird verwiesen auf (Thompson und Maune, 2001; Sithole et al., 2003; Moser und Reich, 2004; sowie Lüthy und Stengele, 2005).

### 3.11.3 Unsicherheit aus der Modellierung

Die Modellbildung aus den gemessenen Punkten hat dank der grossen Punktdichte zwar im Vergleich zur photogrammetrischen Datenerfassung deutlich an Bedeutung eingebüsst, trotzdem können je nach Interpolation aus den gleichen Eingangsdaten ganz unterschiedliche Modelle erzeugt werden. Solange die Anwendungen, welche ein DGM verwenden, unabhängig der gewählten Interpolationsmethoden in allen Fällen die gleichen Aussagen und Resultate liefern, sind die Methoden gleichwertig. Dies ist z. B. bei Visualisierungen der Fall, bei welchen ein Orthophoto als Textur auf das Terrain gelegt wird und die Geländeform vor allem über die Textur wahrgenommen wird. Die Interpolationsmethode beeinflusst das Resultat kaum.

Anders sieht die Situation bei der hydrologischen Berechnung von Gefahrenkarten aus, hier kommt der Interpolation eine sehr grosse Bedeutung zu. Im Prinzip gilt, dass für eine komplette Rekonstruktion der Schwingung des Geländes der Punktabstand weniger als die Hälfte der funktionalen Frequenz sein muss (Li et al., 2005). Da aber die meisten Algorithmen zur Rekonstruktion einer Terrainoberfläche nicht auf der Abtastung von Geländeschwingungen, sondern auf einer lokalen Analyse der Höhenpunkte beruhen, kann die Interpolation dazu führen, dass ein wichtiges Detail wie ein Entwässerungsgraben trotz theoretisch ausreichendem Punktabstand nicht abgebildet wird. Um diese Fälle zu verhindern, lohnt sich die Planung der horizontalen Auflösung (Punktabstand und Zellgrösse des Rasterdatensatzes), die sorgfältige Wahl der Interpolationsmethode oder die Ergänzung des Modells durch Bruchkanten.

Die Vorteile der hohen Auflösung gehen bei einer Reduktion der Auflösung (auch als Resampling bezeichnet) teilweise verloren, aber da viele Anwendungen nicht mit der grossen Datenmenge umgehen können, ist vielfach eine Reduktion der Punkte gefordert. Bei der in Kapitel 3.8 beschriebenen Ausdünnungs-Methode auf Punktebene kann durch die Wahl der Parameter die maximale Abweichung vorher/nachher bestimmt werden, so dass der Einfluss auf die vertikale Genauigkeit unter Kontrolle bleibt. Ein Resampling eines Rasterdatensatzes ist zwar effizienter, dafür variieren die Abweichungen mit der Geländerauigkeit, da die gebräuchlichen Rastermodelle aus Zellen konstanter Grösse aufgebaut sind. In der Umgebung von Geländesprüngen sind die Abweichungen eines Datensatzes mit reduzierter Auflösung am grössten.

## 3.12 Diskussion

Die Qualität eines DGM aus ALS hängt nicht nur von den eingesetzten Sensoren, den Auswertalgorithmen und der gewählten Konfiguration in der Datenerfassung ab, sondern zu einem bedeutenden Grad von den Auswerte-Prozessen. Wegen der grossen Datenmenge, der Trennung der Auswertung von der Datenerfassung und der Aufteilung der Auswertung in verschiedene Teilprozesse ist die Produktion eines DGM mittels ALS von einer starken räumlichen und zeitlichen Trennung der Prozesse geprägt. Ein Fehler in einem Prozess und seine Auswirkungen auf das Gesamtergebnis sind nicht zwingend am Ende der jeweiligen Aktivität erkennbar. Ein qualitativ hochwertiges, den (genau beschriebenen) Spezifikationen entsprechendes Produkt entsteht daher nur in einer klar definierten Prozesskette, in welcher die einzelnen Prozesse stabil sind und deren Eingangsdaten sowie Ergebnisse durch geeignete Kontrollen hinsichtlich der Erfüllung der externen und internen Spezifikationen geprüft sind.

Das Informationsmanagement nimmt wegen der grossen Menge an unterschiedlichen Messwerten, Parametern und Prozessdokumentationen und wegen der langen, aufgesplitterten Prozesskette einen wichtigen Stellenwert in der Qualitätssicherung ein. Der Aufbau und die Verwaltung von Metadaten erfolgen über strukturiertes Sammeln und Speichern von Prozessinformationen, welche vielfach automatisch erzeugt werden.

## 4 Qualitätsmodell für Airborne Laser Scanning

In den vorangegangenen Kapiteln ist klar geworden, dass bei ALS die Qualität der Produkte DTM und DOM von Spezifikationen, Messunsicherheiten der Sensoren, Filteralgorithmen, menschlicher Interpretation und verschiedensten weiteren Transformationen (Produktionsprozesse) abhängt. Es wurde erkannt, dass die häufig verwendete Angabe zur räumlichen Genauigkeit als alleinige Aussage zur Qualität eines DGM nicht ausreicht. Daher wird nun ein Qualitätsmodell entwickelt, welches als Bewertungs- und Beschreibungssystem für Geodaten aus ALS dienen soll<sup>25</sup>. Das Modell enthält neben der formalen Beschreibung auch konkrete Vorschläge für die Realisierung von DTM und DOM mittels ALS.

Das ALS-Qualitätsmodell beruht auf einer ganzheitlichen Betrachtung von Sensoren, Prozessen und Geodaten. Das Modell orientiert sich an den ISO-Standards der 9000-er und 19100-er Reihe (über Qualitätsmanagementsysteme bzw. Geodaten), ist aber hinsichtlich Realisierungsprozesse auf die Merkmale und spezifischen Eigenschaften der ALS-Technologie ausgerichtet. Nicht Bestandteil des ALS-Qualitätsmodells sind die Prozesse des Auftraggebers zur Erarbeitung und Abwicklung eines Projekts sowie weitere Prozesse einer Organisation, die sich nicht direkt auf die Realisierung eines Projekts auswirken wie beispielsweise die Geschäftsführung.

### 4.1 Aufbau des ALS-Qualitätsmodells

Das ALS-Qualitätsmodell ist als Mehrschalenmodell konzipiert (siehe Abbildung 30). Im Zentrum stehen die Anforderungen an das Produkt und die Qualitätsziele, welche das Produkt zu erfüllen hat. Die nicht-quantitativen Qualitätsmerkmale beschreiben in abstrahierter Form die Produkte (Produktdefinition) und die Dokumentation der Produktionsprozesse in Form von Metadaten zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit. Auf diesen übergeordneten Anforderungen bauen die technischen Spezifikationen der Produkte auf, welche mittels den im Kapitel 1.6.2 eingeführten quantitativen Qualitätsmerkmalen beschrieben werden. Alle Qualitätsmerkmale zu den Geodaten beruhen letztlich auf den Anforderungen aus den Endanwendungen und sind grundsätzlich methodenfrei zu beschreiben.

Zur Realisierung der Produkte sind strukturierte Prozesse notwendig. Die Aufteilung in Prozessgruppen richtet sich nach den Anforderungen der Organisation, hier erfolgt die Unterteilung in (technische) Realisierungs- bzw. Managementprozesse. Es ist davon auszugehen, dass die Teilprozesse in allgemeiner Art definiert, strukturiert und dokumentiert sind. Sie werden für einen konkreten Auftrag aufgrund der Produktspezifikationen und Qualitätsforderungen angepasst. Bei umfangreichen Projekten können die konkretisierten Prozesse in Form eines Projektmanagement- oder Qualitätsplans dokumentiert werden (ISO 9001).

Die beiden Bereiche Daten- und Prozessqualität sind komplementär zueinander: ohne Prozessqualität kann die geforderte Produktqualität kaum erreicht werden und umgekehrt sind in den Prozessen konkrete Forderungen in Form von Spezifikationen zur Parametrisierung der Prozesse notwendig. Aus diesen Grundlagen resultiert in der äussersten Schale des Qualitätsmodells der Geodatenatz (DTM und DOM), welcher die quantitativen und nicht-quantitativen Qualitätsmerkmale erfüllt und ausreichend dokumentiert ist.

Das hier vorgestellte ALS-Qualitätsmodell beschreibt die Möglichkeiten, wie die Qualitätsindikatoren für eine präzise technische Spezifikation primär im Umfeld von DTM und DOM als Geobasisdatensätze genutzt werden können und gibt auch Hinweise, wie diese Merkmale voneinander abhängen. Anschliessend werden Prüfungen zur Qualitätssicherung (Monitoring) und zur Qualitätskontrolle skizziert. Aufgrund der grossen Datenmenge und der Vielzahl von Datensätzen sind die Dokumentation der Produktion (Lenkung der Dokumente) und das Datenmanagement von besonderer Bedeutung.

---

<sup>25</sup> Vergleiche hierzu auch <http://www.ddgi.de>

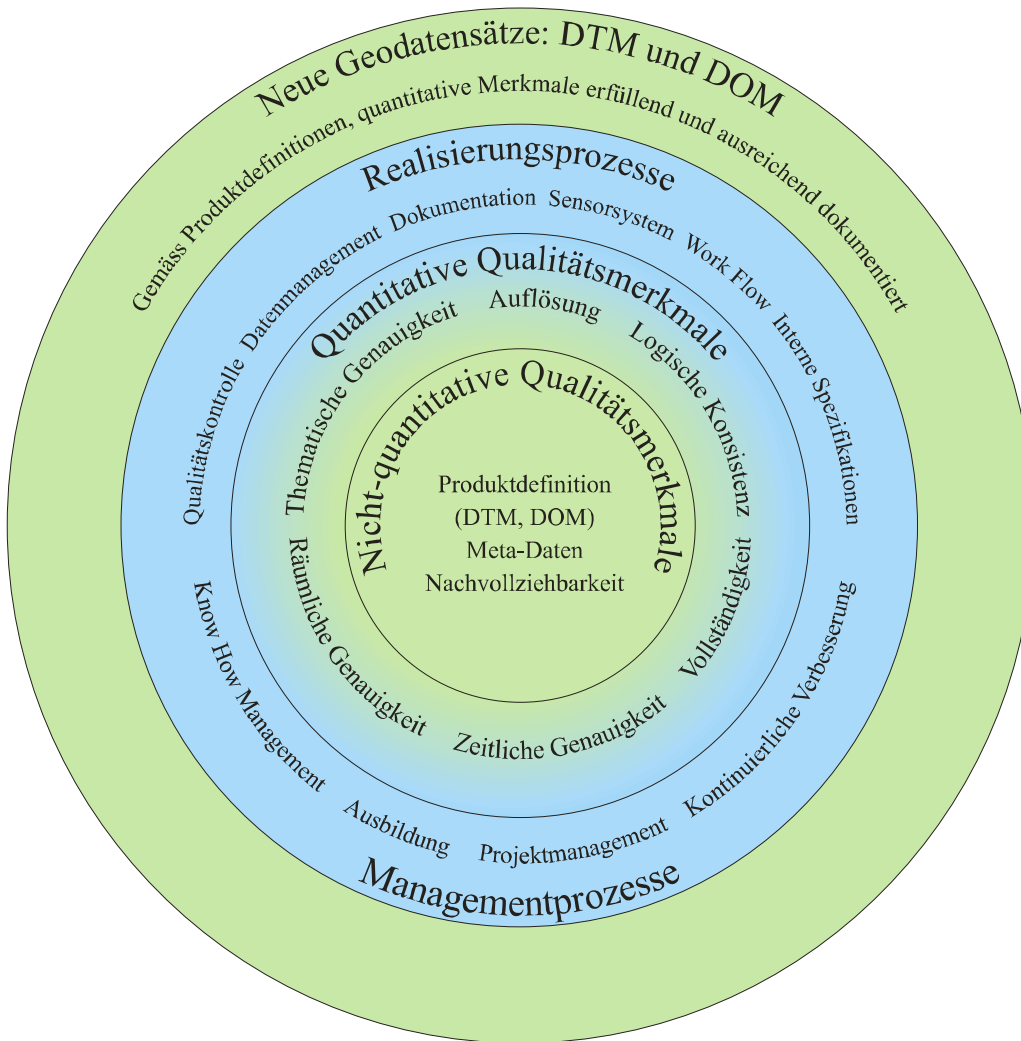


Abbildung 30 Der Aufbau des ALS-Qualitätsmodells

## 4.2 Nicht-quantitative Qualitätselemente

Die Beschreibung des räumlichen Schemas dient als zentrales Merkmal eines Datensatzes. Es resultiert aus der Abstraktion der Realwelt in ein Datenmodell, was aufgrund der Komplexität der geografischen Welt mit Vereinfachungen und Approximationen verbunden ist (siehe Kapitel 1.7.2). Die Datenmodelle für DTM und DOM sind zwar vergleichsweise einfach, aber auch bei diesen Datensätzen gibt es ganz unterschiedliche Vorstellungen über den Inhalt und die Ausprägung. Gerade beim Terrainmodell werden verschiedene Begriffe wie Geländemodell (DGM), Höhenmodell (DHM) oder Terrainmodell (DTM) verwendet, sie sind aber nicht klar voneinander abgegrenzt (Bartelme, 1995). Neben dem Datenmodell sind Regeln für die Interpretation der Begriffe DTM und DOM sowie Vorgaben für die Datenerfassung festzulegen.

### 4.2.1 Allgemeine Produktdefinitionen für DGM

Unabhängig von der inhaltlichen Definition eines Datensatzes sind allgemeine Charakteristiken des zu erzeugenden Produkts zu beschreiben. Diese Definitionen werden zusammen mit dem Datensatz als Metadaten bereitgestellt.

- Referenzsystem:

Das Referenzsystem ist mit Datum (Bezugsellipsoid, Lagerung), Kartenprojektion und Höhenbezugssystem, in welcher der Datensatz vorliegt, nach (ISO 19111) oder ähnlich zu beschreiben. Allfällige Projektions- und Transformationsvorschriften oder das verwendete Geoid sind ebenfalls zu dokumentieren, insbesondere falls der Datensatz in ein gezwängtes System überführt werden soll.

- **Modellbildung:**  
Ein DGM kann in unterschiedlichen Arten gespeichert werden: ein Rohdatensatz besteht aus geometrischen Primitiven wie Punkten, Bruchkanten oder gar 3D-Flächen. Damit kann jeder Anwender die am besten geeignete Interpolation für die Rekonstruktion eines DGM wählen. Bei eher geringer Anzahl von Punkten wird häufig eine Dreiecksvermaschung berechnet, in welcher eine bessere Genauigkeit des DGM durch Ergänzung mit Bruchkanten und Strukturlinien bei geomorphologisch bedeutenden Objekten erreicht wird (Bill, 1996). Wegen der viel höheren Auflösung der ALS-Datensätze sind für die meisten Anwendungen keine Bruchkanten als Ergänzung zu den Punkten notwendig (vgl. Exkurs in Kapitel 4.3.1). Viele Anwender bzw. Anwendungsprogramme sind aber nicht in der Lage, das grosse Datenvolumen in Form von Vektorobjekten (als Rohdaten oder als TIN) zu verarbeiten. Für diese ist ein über Interpolation der Punkte abgeleiteter Rasterdatensatz besser geeignet. Die Produktbeschreibung muss demzufolge definieren, in welchen geometrischen Elementen der Datensatz bereitgestellt wird oder mit welcher Interpolation Rasterdaten aufzubereiten sind.
- **Datenmodell:**  
Sollen die Modelle in Form von Punktwolken vorliegen, können beliebige Attribute mit jeder 3D-Koordinate abgelegt werden. Bei der Datenerfassung werden vom Sensor im Normalfall weitere Informationen wie Zeitstempel, Intensität und Echo-Nummer registriert. Ein systemneutrales Datenmodell und -format im Umfeld von ALS ist das in Tabelle 8 aufgeführte LAS-Format<sup>26</sup>, welches Angaben vom Sensor und die Punktklasse beinhaltet. Unter Umständen sind aber weniger oder zusätzliche Angaben über die Messunsicherheit (Landtwin, 2005) oder die Zuverlässigkeit einer Klassifizierung (DTM) von Interesse, so dass ein eigenes Datenmodell zu entwickeln und die entsprechende Schnittstelle zu dokumentieren ist. Sowohl TIN als auch Rastermodelle sind Datensätze mit reiner Koordinateninformationen, so dass kein Bedarf an Datenmodelldefinitionen besteht. Das Austauschformat muss allerdings festgelegt werden.

Item	Format	Size	Required
X	long	4 bytes	yes
Y	long	4 bytes	yes
Z	long	4 bytes	yes
Intensity	unsigned short	2 bytes	no
Return Number	3 bits	3 bits	yes
Number of Returns (given pulse)	3 bits	3 bits	yes
Scan Direction Flag	1 bit	1 bit	yes
Edge of Flight Line	1 bit	1 bit	yes
Classification	unsigned char	1 byte	yes
Scan Angle Rank (-90 to +90)	unsigned char	1 byte	yes
User Data	unsigned char	1 byte	no
Point Source ID	unsigned short	2 bytes	yes
GPS Time	double	8 bytes	yes

**Tabelle 8 Spezifikation des LAS-Formats für Punkt-Datensätze (Quelle <http://www.lasformat.org>)**

#### 4.2.2 Definition des Produkts „DTM“

In der ursprünglichen Definition beschreibt der Begriff DTM die „statistische Repräsentation der kontinuierlichen Geländeform mittels einer grossen Anzahl von Punkten“ (Miller et al., 1958). Zu dieser Definition haben sich etliche Derivate eingebürgert, die sich nicht stark voneinander unterscheiden (El-Sheimy et al., 2005). Da aber die Erfassung mittels ALS (unstrukturierte, hoch aufgelöste, grossflächig erzeugte Punktwolke) ganz andere Möglichkeiten bietet als die photogrammetrische oder gar terrestrische Datenerfassung, verlangt die neue Technologie auch eine präzisere Beschreibung. (Sithole et al., 2003) definieren das DTM als „natürlich gewachsenes Terrain“, wobei eine beliebige, dünne Auflage (z.B.

<sup>26</sup> <http://www.lasformat.org/>

Strasse) mit eingeschlossen wird. Häufig kann jedoch nicht einfach zwischen „natürlich gewachsen“, „mit Erde bedeckt“ (Tiefgarage) und „renaturiert“ unterschieden werden. Als geeignete Auslegung des Begriffs DTM (aus ALS-Punkten) wird nun folgende Definition vorgeschlagen: *Das DTM beschreibt den anstehenden Boden (bzw. den Wasserspiegel) und direkt aufliegende Verkehrsflächen. Das DTM ist frei von Vegetation, Brücken, Hochbauten und weiteren, vertikal aufragenden, künstlichen Objekten.*

Je nach Endanwendung sind Präzisierungen möglich oder gar notwendig wie beispielsweise:

- Behandlung von Deponien und Abbaugelände, welche von Punktfiler nicht als künstliche Objekte erkennbar sind. Es spricht aber auch nichts dagegen, sie im DTM zu belassen.
- Baugruben, Unterführungen oder Einfahrten in Tiefgaragen stören in Visualisierungen und sind unter Umständen nicht im DTM abzubilden.
- Brücken und Überführungen können für die Orthorektifizierung von Luftbildern eingesetzt werden und somit das DTM erweitern (vgl. auch FEMA, 2004).
- Gewässerhöhen sind einer natürlichen Schwankung unterworfen. Falls das DTM Höheninformationen zu Gewässern enthalten soll, muss damit gerechnet werden, dass die Höhen aufgrund der Messunsicherheit in sich nicht konstant sind („horizontale Fläche“) und gleichzeitig von der offiziell publizierten Gewässerhöhe abweichen. Sind konsistente Höhenangaben von Bedeutung, muss sichergestellt werden, dass der Wasserspiegel beim Zeitpunkt der Datenerfassung tiefer steht als der publizierte Wert und danach die Messungen auf Wasserspiegelniveau angehoben werden (konsistenter Uferverlauf).
- Wo der Geländeverlauf in einer luftgestützten Aufnahme nicht erkannt werden kann (Brücken, auskragende Bauten), sind die daraus resultierenden Punktlücken zu akzeptieren oder es werden bei Bedarf terrestrische Ergänzungsmessungen vorgenommen.
- Geröllhalden und grosse Felsbrocken sind gemäss obiger Produktdefinition Bestandteil des DTM. Sie führen jedoch zu einem starken Rauschen im Modell, weshalb sie teilweise nicht im Datensatz erwünscht sind. Für die Berechnungen von Naturgefahren sind sie jedoch von grossem Interesse.

Die Liste ist beliebig erweiterbar. Es ist jedoch zu bedenken, dass nie alle Fälle abgedeckt werden können und dass die Behandlung und Unterscheidung aller Spezialfälle kaum über automatische Verfahren erfolgen kann, weshalb mit steigenden Aufwendungen zu rechnen ist.

### 4.2.3 Definition des Produkts „DOM“

Das DOM ist in der Literatur nicht einheitlich definiert. (ED-98/DO-276, 2005) beschreibt das DOM als die Modellierung der topographischen Oberfläche, einschliesslich der Vegetation und künstlich geschaffenen Objekten. (Briese et al., 2002; Reiss, 2002; Smith et al., 2003) nennen es die höchste topographische Oberfläche, gesehen aus der Vogelperspektive. Bei (Masaharu und Ohtsubo, 2002) ist das DOM nur die Erweiterung von DTM um Gebäude und Vegetation. Teilweise wird im Umfeld von ALS das DOM mit den ersten registrierten Returns gleich gestellt (Smith et al., 2003; Wack et al., 2003; Wotruba et al., 2005), da es vielfach ohne weitere Bearbeitung aus diesen abgeleitet wird. Es gibt verschiedene Gründe, weshalb diese Definitionen nicht ausreichend sind: Neben Gebäuden und Vegetation existieren beliebige weitere Objektarten, die vom ALS registriert werden. Je nach Nutzer sind sie von Bedeutung oder stören. In der Realwelt können mehrere Objekte vertikal übereinander geschachtelt sein, so dass auch ein zweiter Return von einer Oberfläche reflektiert wird (Baum über Dach). Wird nur ein Laserpuls von einem Objekt reflektiert, ist es fragwürdig, von einem Ober-„Flächen“-Modell zu sprechen (Briese et al., 2002). Letztlich ist die Verknüpfung mit der Return-Information zu stark sensororientiert; ein DOM kann beispielsweise auch aus einem Full-Waveform ALS, Synthetic Aperture Radar oder aus Luftbildkorrelation erzeugt werden.

Für eine Verfeinerung einer allgemein gültigen Definition eines Oberflächenmodells sind einige Rahmenbedingungen zu beachten:

- Zeitlicher Bestand eines Objektes: vielfach sind Objekte nur temporärer Natur und daher für die meisten Anwendungen störend, wenn sie im DOM verbleiben. Beispiele für temporäre Objekte sind:
  - Verkehrsmittel: Eisenbahn, Lastwagen, Autos, Flugzeuge, Schiffe
  - Installationen: Baustellen, Jahrmärkte, Festzelt
  - Einjährige Vegetation



- Mit wachsender horizontaler Auflösung<sup>27</sup> der Sensoren werden immer mehr kleine (bzw. dünne) Objekte erfasst, die im Fall von Leitungen über eine gewisse Ausdehnung nicht mit dem Terrain verbunden sind und die nicht als Ausreisser entdeckt und entfernt werden können. Bleiben die Punkte im Datensatz bestehen, werden linienförmige Objekte bei einer Modellierung im 2.5D Raum (Raster, TIN) zu senkrechten Flächen, welche zu falschen Resultaten in nachfolgenden Anwendungen führen können. Davon betroffen sind insbesondere Visualisierungen, Sichtbarkeitsanalysen, Lärmsimulationen oder hydrologische Modellierungen. Umgekehrt sind andere Anwender unter Umständen an diesen 3D-Objekten besonders interessiert:
  - Hochspannungsfreileitungen, Fahrleitungen
  - Seilbahnen, Skilifte
  - Strassensignale
  - Überirdische Rohrleitungen
  - Antennen, Masten
- Häufig werden auch Objekte erfasst, die zum aktuellen Zeitpunkt für keine oder nur einzelne Anwendungen interessant sind, aber den visuellen Eindruck stören. Mit abnehmender Grösse der Objekte steigt zudem die Wahrscheinlichkeit, dass sie nur für eine befristete Zeit existent sind (siehe Beispiele in Abbildung 31):
  - Lagerplätze (Baufirmen, Industrie etc)
  - Kleininstallationen (wie Kinderspielplatz)
  - Campingplätze (Wohnmobile)
  - Niedrige Vegetation (Büsche, Sträucher)
  - Mauern, Zäune



**Abbildung 31** Verschiedene Beispiele von Objekten, die normalerweise im DOM stören

<sup>27</sup> Im Gegensatz zum Terrestrischen Laser Scanning mit punktförmigen Aufnahmen wird bei den sich bewegenden Aufnahmeplattformen wie ALS oder Zeilenkameras mit annähernd senkrechtem Winkel zwischen Sensorrichtung und Zielobjekten horizontale, nicht radiale Auflösung verwendet (Palmtree, 2005)

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Anforderungen der Anwendungen und basierend auf den Erfahrungen in verschiedenen Projekten soll das DOM künftig wie folgt definiert werden: *Das DOM beschreibt die Umhüllende der beständig sichtbaren Oberfläche. Temporäre Objekte sind – soweit eindeutig erkennbar – nicht Bestandteil des Modells.* Damit möglichst viele Anwendungen mit den Daten bedient werden können, ist zu empfehlen, dass die Objekte, welche aktuell von Anwendern verlangt sind, über Attribute der Rohpunkte in einzelne Klassen unterteilt werden (Gebäude für Lärmsimulationen, Vegetation für Biomasse, Mast/Leitungen für Freileitungsdokumentation etc).

Leider liegen die Stärken der Filteralgorithmen momentan hauptsächlich im Erkennen von Terrain (teilweise auch Gebäude und Vegetation), weshalb die meisten DOM-Objekte nur unzuverlässig automatisch klassifiziert werden können. Die manuelle Klassifikation von DOM-Punkten ist aber sehr zeitintensiv und daher kostspielig. Dazu kommt, dass viele kleinere Objekte ohne Hilfe von Orthophoto aus zeitgleich erfassten Luftbildern nicht zuverlässig erkannt und klassifiziert werden können. Objekte mit Punkten, die maximal 3 m über Grund liegen, sind meistens Fahrzeuge, urbane Kleinststrukturen oder nicht klassifizierbare Objekte und sollten deshalb automatisch ausgesondert werden (so dass sie bei Bedarf separat behandelt werden können). Die Schwierigkeiten des Filterns sollten aber nicht davon abhalten, ein Produkt zu definieren, das verschiedenen Anforderungen gerecht wird.

Die obige Definition des Produkts DOM als Geobasisdatensatz kann daher beispielsweise wie folgt präzisiert werden: *Die Punkte werden unterteilt in die Klassen Vegetation, Gebäude, niedrige Objekte (max. Höhe über Grund < 3 m) und andere.* Die niedrigen Objekte können in der hydrologischen Anwendung auf relevante Mauern analysiert und aus dem Datensatz extrahiert werden. Demgegenüber wird die Definition des DOM als Basis für die Freileitungsdokumentation beispielsweise wie folgt ergänzt: *Die Punkte, welche nicht weiter als 30 m von der Leitungsachse entfernt liegen, werden unterteilt in die Klassen Mast, Leitung, Vegetation, Gebäude, künstliche Objekte (wie Strassenlampen, Zäune, Spielplätze) und andere. Ausserhalb des 60 m breiten Korridors erfolgt keine Klassifizierung.*

#### 4.2.4 Nachvollziehbarkeit und Metadaten

Der Detaillierungsgrad der Dokumentation von Produktionsprozessen zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit hängt sehr stark von den Anwendungsgebieten ab. In der Flugnavigation sind die Forderungen sehr umfangreich: Die gesamte Prozesskette ist so zu dokumentieren, dass bei Anomalien oder nachträglich gefundenen Abweichungen später nachvollzogen werden kann, weshalb ein Modell an einer bestimmten Stelle den aktuellen Wert aufweist bzw. wo in der Prozesskette die Abweichung aufgetreten ist (ED-76/DO-200A). Die Forderung reicht von der Anwendung über die originalen Messungen zurück bis zu den technischen Spezifikationen. Auch wenn dieses Bedürfnis für viele Projekte zu weit reichend ist und damit zu unnötigen Kosten führen kann, lohnt sich eine vollständige, sorgfältige Dokumentation der Produktionsprozesse. Diese beinhaltet die Prozessbeschreibung im Generellen, die eingesetzten Sensoren (einschliesslich Kalibrierinformationen), die Algorithmen, die verwendeten Parameter und Prüfmethode, Resultate von Qualitätsprüfungen und diejenigen für die Qualitätsbeurteilung wertvollen Zwischenresultate, die nur mittels zeitaufwändigem Prozessieren wieder hergestellt werden können. Da die ALS-Daten vollständig digital prozessiert werden, liegt es nahe, wichtige Informationen automatisch zu extrahieren. Das strukturierte Ablegen dieser Daten kann bei der Qualitätskontrolle und allfälliger Ursachensuche sehr hilfreich sein (siehe auch Kapitel 4.8).

Es gibt aber noch weitere gute Gründe, die Produktion und die Prozesse ausführlich zu dokumentieren und als Metadaten zur Verfügung zu stellen: Je mehr Informationen offen gelegt werden, desto weniger können (lokal) schlechte Daten „versteckt“ werden. Von besonderem Interesse sind natürlich die Methoden und Resultate von den auf die Spezifikationen ausgerichteten Qualitätsprüfungen, so dass auf Auftraggeberseite nicht nochmals – so wie heute (unnötigerweise) üblich – die gleichen Tests an den gleichen Orten wie beim Auftragnehmer durchgeführt werden müssen. Prüfprotokolle und qualitätsbeschreibende Datensätze wie Punktdichtestatistiken oder Verteilung der Messunsicherheit über das gesamte Gebiet helfen mit, die Qualitätskontrollen auf Kundenseite zu reduzieren; die kritischen Stellen lassen sich gezielt untersuchen (vgl. Kapitel 4.9.1). Die offene Darlegung der Qualitätsprüfungen steigert das Vertrauen in den Auftragnehmer.

Als minimale Forderung empfiehlt sich, einen Metadatenkatalog aufzustellen, der für den gesamten Datensatz, oder – im Fall von unterschiedlichen Spezifikationen innerhalb eines Projektes – für die einzelnen Teilflächen erfasst werden muss. Sofern nicht bereits ein Metadatenkatalog vorgegeben ist,

kann das Modell von ISO 19115 genommen und auf die konkreten Bedürfnisse angepasst werden. In der Tabelle 9 sind diejenigen optionalen Informationsebenen aus ISO 19115 aufgeführt, die aus technischer Sicht des Auftraggebers interessieren und welche die Nachvollziehbarkeit gewährleisten. Da es sich hierbei um teilweise sensible Informationen über den Auftragnehmer handelt, müssen diese Angaben vertraulich behandelt und dürfen nicht an Dritte weitergegeben werden.

<b>Ebene der Metainformation</b>	<b>Inhalt</b>
Datensatz und Resultat orientierte Informationen (obligatorische Angabe)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identifikation eines Datensatzes (Produktbeschreibung)</li> <li>• Quellenangabe</li> <li>• Formatierung</li> <li>• Bezugssysteme etc.</li> </ul>
Prozessorientierte Informationen (optionale Angaben in ISO 19115)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Angaben zur Ausgestaltung der Prozesse</li> <li>• Übersicht der prozessorientierten Qualitätskontrollen</li> <li>• Kacheleinteilung</li> <li>• Eingesetzte SW und Algorithmen</li> </ul>
Sensororientierte Information (optional)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalibrierprotokoll zum Nachweis der Stabilität und Konformität der Datenerfassung (Details siehe Kapitel 4.7.4)</li> </ul>
Angaben zur Datenerfassung (optional)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flugplanung</li> <li>• Eingesetzter Sensor</li> <li>• Sensoreinstellungen</li> <li>• Meteorologische Informationen</li> <li>• Temporale Angaben</li> </ul>
Qualitätsbezogene Informationen (optional)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detaillierte Angaben zu Testmethoden</li> <li>• Verwendete Referenzdatensätze</li> <li>• Testresultate</li> </ul>

**Tabelle 9 Erweiterung der traditionellen Metainformation nach ISO 19115**

### 4.3 Quantitative Qualitätselemente (technischen Spezifikationen)

In vielen Organisationen hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass Qualität im Mittelpunkt des Denkens und Handelns stehen muss. Das konsequente Ausrichten auf die Qualität ist aber nur dann möglich, wenn Spezifikationen vorhanden sind, welche die Realisierung des Begriffs Qualität beschreiben. Wenn nicht klar ist, welche Eigenschaften (Qualität) ein Produkt aufzuweisen hat, können auch keine Prozesse und Qualitätskontrollen darauf ausgelegt werden. Die Erfahrung aus verschiedenen Projekten, das Studium von Ausschreibungsunterlagen und Diskussionen mit mehreren Auftragnehmern zeigen, dass das Schreiben von Spezifikationen für ALS-Produkte nicht trivial ist. Offensichtlich belassen es die Auftragnehmer mehrheitlich bei Angaben zu räumlicher Genauigkeit und Punktdichte, obwohl sicher weitere Anforderungen an die Produkte vorhanden wären. Die eingangs des Kapitels aufgeführten quantitativen Qualitätsmerkmale bilden die Grundlage für umfassendere technische Anforderungen (vgl. Einführung in Kapitel 1.6.3).

Auch wenn im Normalfall die Spezifikationen von Geodäten entwickelt und mehrheitlich von Geodäten gelesen werden, muss der Fokus auf die *Geodaten* und nicht auf Sensoren oder gar Ausgestaltung der Prozesse gelegt werden. Da in der Schweiz die Methodenfreiheit bezüglich der Ausführung der Arbeiten für die amtliche Vermessung gilt (Willmann, 2004), ist dieses Prinzip bei staatlichen Projekten (zumindest theoretisch) rechtlich zwingend. Auch wenn sich während der Erarbeitung von Spezifikationen nur eine einzige Technologie oder ein Auswerteverfahren als geeignet erweist, sollen zukünftige Entwicklungen nicht ausgeschlossen werden. Die Fokussierung auf die Produkte liegt damit auch im Interesse der Auftraggeber.

Im Folgenden werden zu den im Qualitätsmodell aufgeführten quantitativen Qualitätselementen Hinweise gegeben, wie sie im Umfeld von DGM (unter Berücksichtigung der Besonderheiten von ALS) inter-

pretiert und wie sie zur technischen Spezifikation eingesetzt werden können. Da Anforderungen nur dann Sinn machen, wenn sie kontrollierbar sind, werden Hinweise auf mögliche Qualitätskontrollen gegeben. Diese Prüfungen sollen möglichst automatisiert ablaufen, um den grossen Datenmengen gerecht zu werden und den Stichprobenumfang zu reduzieren. Quantitative und automatisierte Kontrollen reduzieren zudem den Spielraum von Interpretationen.

### 4.3.1 Auflösung

#### Vertikale Auflösung

Die vertikale Auflösung eines (Raster-)Datensatzes beschreibt das kleinste Intervall, in welchem die Z-Koordinaten erfasst, beziehungsweise gespeichert und verarbeitet werden (Diskretisierungsintervall). Da die gebräuchlichsten ALS-Systeme im diskreten Erfassungsmodus eine Auflösung der Rangemessung von 1-2 cm anbieten (vgl. Kapitel 2.3) und die Geoidmodelle bestenfalls auch in diesem Genauigkeitsbereich liegen<sup>28</sup>, macht es Sinn, die vertikale Auflösung konstant mit 1 cm zu spezifizieren.

#### Horizontale Auflösung

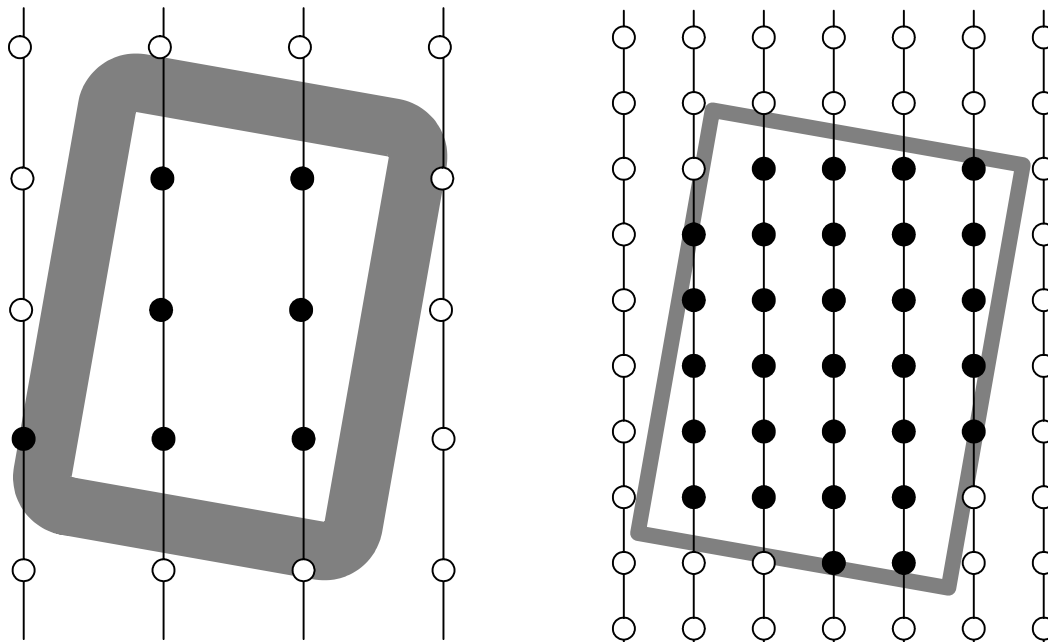
Der nominelle Punktabstand bei einer Datenerfassung mittels ALS bestimmt die maximale horizontale Auflösung der daraus abgeleiteten Terrain- und Oberflächenmodelle, ohne dass es zu einer „Unterabtastung“ kommt. Die Auflösung bestimmt die notwendige Distanz zwischen benachbarten Elementen, um sie eindeutig zu trennen und als eigenständige Objekte auszuweisen (Gutierrez et al., 2005). Bei Terrainmodellen ist häufig von Geländeschwüngen statt von Objekten die Rede, welche bei gegebenem Punktabstand detektierbar sind. Verschiedene Autoren (Frederiksen, 1981; Balce, 1987; Fritsch, 1992; Flotron und Kölbl, 2000; Li et al., 2005) beschreiben, wie Punktabstand, Geländerauigkeit und Genauigkeit eines DTM voneinander abhängen.

Die horizontale Auflösung eines Datensatzes ist per se eigentlich kein Qualitätsmerkmal, sie liefert aber wichtige Indikatoren für andere Qualitätselemente:

- *Vollständigkeit*: bei künstlichen Objekten (Gebäude, Antennen, Kanäle) liefert die Auflösung Hinweise über die Vollständigkeit der Objekterfassung. Die künstlichen Objekte können nicht mittels Schwüngen beschrieben werden, da sie im Normalfall durch Unstetigkeiten beim Übergang vom Gelände zum Objekt bzw. von Objekt zu Objekt geprägt sind. Die Anforderungen an die Vollständigkeit, beispielsweise für die Kartierung von Flughindernissen (insbesondere dünne Antennen), für die hydrologische Modellierung (Dammkrone vollständig enthalten) oder zum Ableiten von Gebäudemodellen (Modellierung von Dachaufbauten) sind sehr wichtige Randbedingungen für die Wahl der Auflösung.
- *Vertikale Genauigkeit*: je nach Geländerauigkeit und insbesondere kurzweiligen Variationen des Geländes kann nur eine hohe Auflösung die vertikale Genauigkeit eines aus den Punkten interpolierten Modells gewährleisten. Die Genauigkeit der diskret gemessenen Punkte hängt nicht von der Auflösung ab (Fritsch, 1992).
- *Horizontale Genauigkeit abgeleiteter Daten*: die ALS-Daten können als Punktwolke oder als interpoliertes Modell für das Ableiten von Objekten herangezogen werden. Die Lage-Genauigkeit dieser Objekte hängt von der horizontalen Auflösung ab, da im besten Fall für jeden Punkt nur die Aussage gemacht werden kann, ob er auf oder neben dem Objekt liegt. Anbetracht der Abdeckung einer Messung (Footprint) und der Reduktion des Footprints auf ein punktförmiges Objekt kann nicht gewährleistet werden, dass das Objekt im Zentrum des Footprints angestrahlt wurde. Eine höhere Auflösung verbessert zwar nicht die Aussage für den einzelnen Punkt, durch die Mittelbildung wird aber die Genauigkeit gesteigert. In Abbildung 32 markieren die gefüllten Punkte Messungen von einem Gebäude. Im Beispiel links ist die Unsicherheit der Begrenzung deutlich grösser als auf der rechten Seite, wo der Punktabstand nur halb so gross ist.

---

<sup>28</sup> Genauere Angaben sind zu finden für die Schweiz unter <http://www.swisstopo.ch> bzw. für Deutschland <http://www.geodatenzentrum.de>. Das globale Modell EGM96 ist hingegen nur auf 2-3 m genau.



**Abbildung 32** Auswirkung der horizontalen Auflösung auf die Vektorisierung eines Gebäudes

Die horizontale Auflösung lässt sich also in Form des Punktabstandes spezifizieren. Da beim DTM Punkte gefiltert werden, ist zu empfehlen, dass sich der Punktabstand auf das DOM oder die Rohmessungen bezieht. Die Spezifikationen richten sich nach den vertikalen Genauigkeitsanforderungen an das DGM in Abhängigkeit der Topographie, nach der Vollständigkeit und der horizontalen Genauigkeitsanforderung für Objekte, welche vom DGM abgeleitet werden. Die Auflösung soll in Form des mittleren Punktabstandes spezifiziert werden, wobei die Mittelung über eine Fläche von einer Hektare bis zu einem Quadratkilometer erfolgt. Zusätzlich kann – als Merkmal der Vollständigkeit – die grösste Fläche ohne Rohmessung festgelegt werden, so dass sichergestellt ist, dass die Punkte quer und längs der Flugrichtung in etwa gleichmässig verteilt sind.

Die Kontrolle bzw. der Nachweis des mittleren Punktabstandes kann über die statistische Analyse von Punktdichteraster (Anzahl Messungen pro Zelle) erfolgen, wobei sich die Zellgrösse nach dem Flächenkriterium richtet (ha, km<sup>2</sup>). Flächen (bzw. Zellen) ohne Messungen können nach dem gleichen Prinzip bestimmt und ausgewiesen werden.

### **Exkurs: Einfluss der horizontalen Auflösung auf die räumliche Genauigkeit**

Bei Daten aus ALS ist der Einfluss des Punktabstands auf die Höhengenaugkeit wegen der vergleichsweise hohen Punktdichte viel geringer als bei der photogrammetrischen Stereoauswertung. Dies wird anhand des folgenden Beispiels belegt: Das von (Flotron et al., 2000) beschriebene Verfahren wurde auf ein hoch aufgelöstes DTM im Bereich der Südrampe des San Bernardinopasses (Kanton GR) angewandt. Das DTM wurde aus den ALS-Punkten mit einem mittleren Abstand von ~ 50 cm über Triangulation zu einem 1 m Raster interpoliert. Die Topographie ist als eher rau zu bezeichnen, im untersuchten Gebiet liegt ein Schwemmkegel eines Bergbaches mit starkem lokalem Rauschen, daneben sind einige Geländesprünge (Strassentrasse) zu finden. In dieses Gelände wurde zuerst eine 2D-Gerade eingezeichnet. Danach wurden die Höhen des Geländes entlang dieser Linie abgegriffen und auf ein Profil von ca. 3870 m Länge übertragen, so dass der Abstand der Stützpunkte in etwa der Zellgrösse des Rasters entsprach. Daraus entstand ein Soll-Profil mit einer Auflösung von 1 m. Anschliessend wurde vom Anfangs- zum Endpunkt des Soll-Profiles eine direkte Verbindung (3D) gezogen und für jeden Geländepunkt die Abweichung zwischen Soll-Profil und der Geraden für jeden Stützpunkt des Profils bestimmt. In einem iterativen Verfahren wurde die Anzahl Stützpunkte der Geraden erhöht, bis der Abstand zwischen den Stützpunkten dem zweifachen Abstand des Soll-Profiles entsprach. Die Resultate in Tabelle 10 zeigen, dass der Genauigkeitsverlust, ausgedrückt als einfache Standardabweichung der Differenzen, zwischen bester Auflösung (1 m) und der reduzierten Auflösung von 7.5 m nur gerade 0.2 m beträgt.

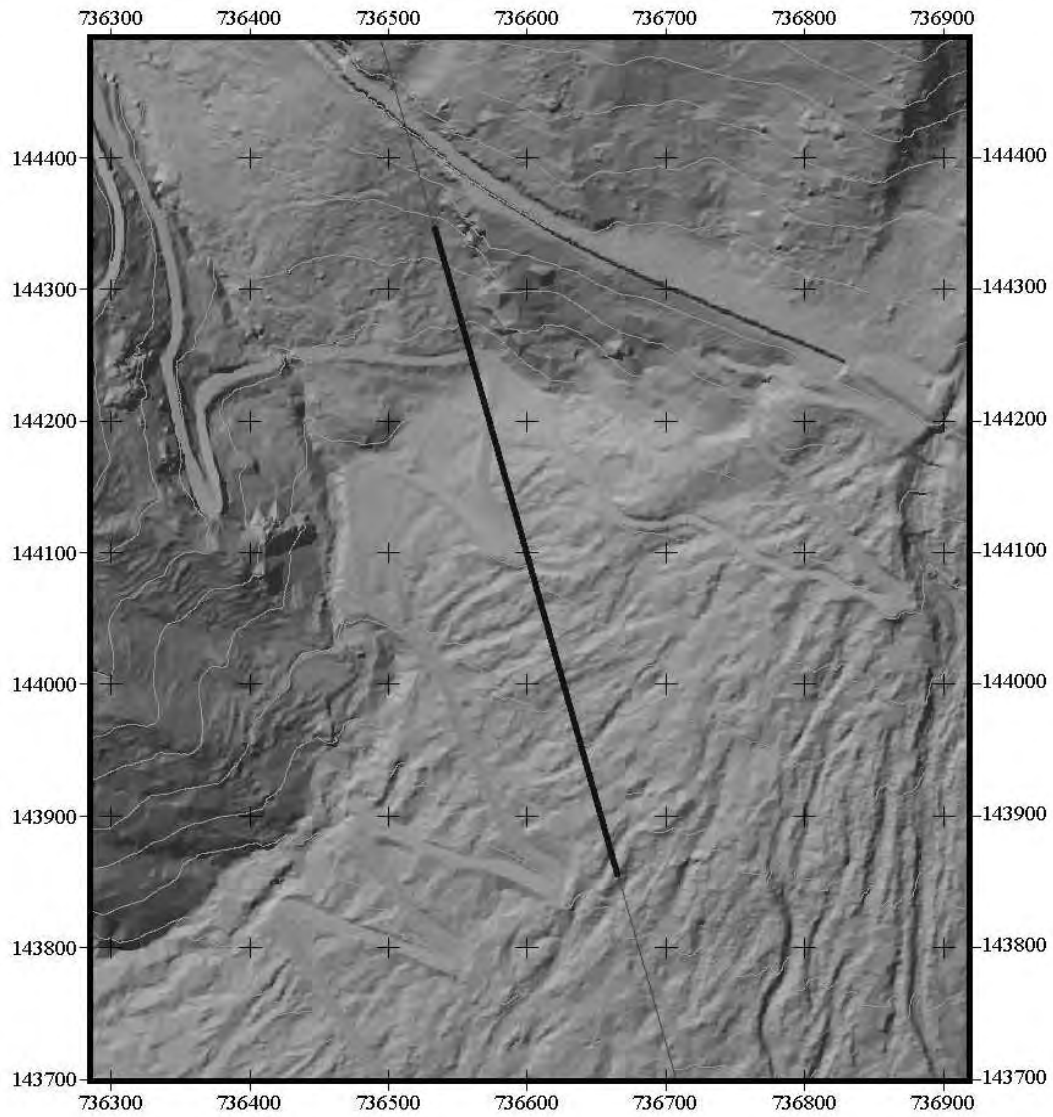


Abbildung 33 Situation mit 20 m Höhenkurven (Datengrundlage Swissphoto)

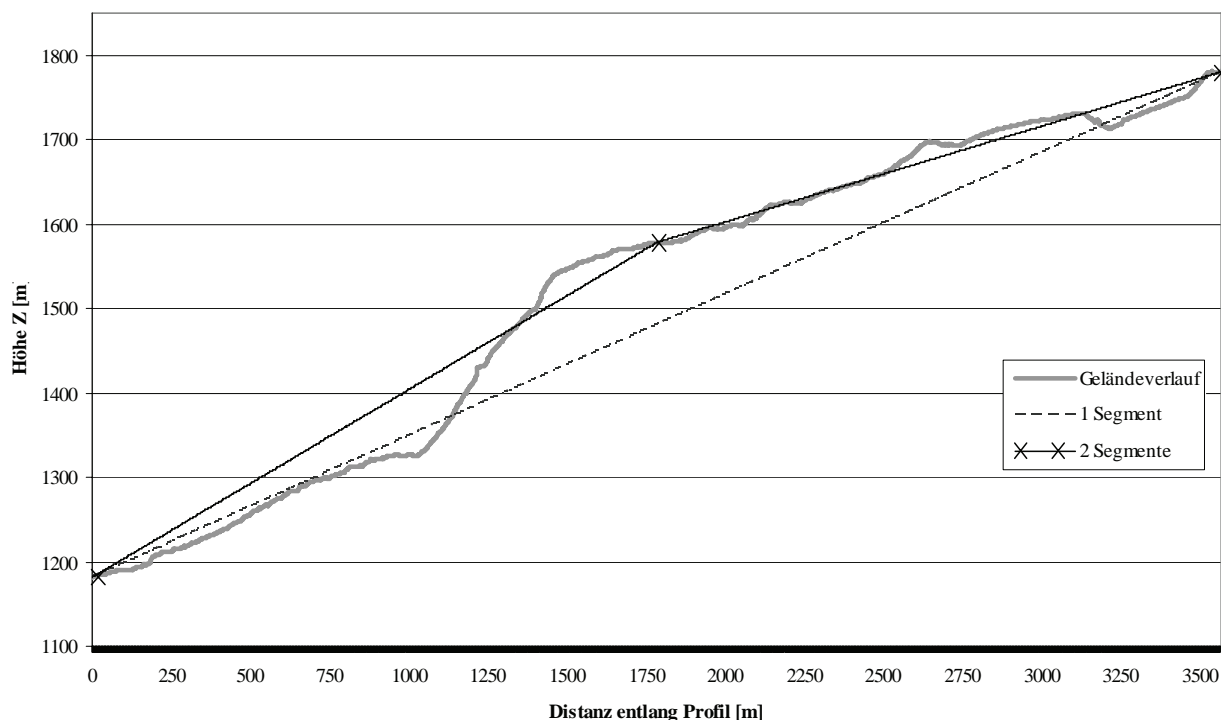


Abbildung 34 Geländeverlauf des Profils über die gesamte Distanz und die ersten beiden Iterationen

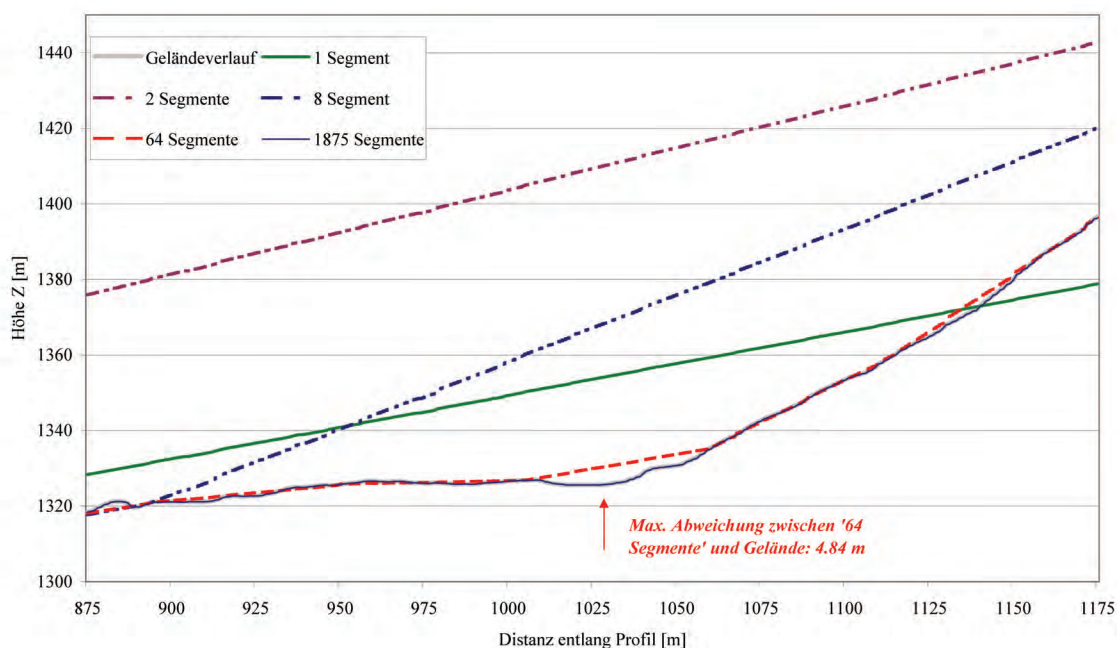


Abbildung 35 Ausschnitt aus Profil von m 875 bis m 1175

Anzahl Segmente	1 (= 2 Pkte)	2	8	64	512	1875
Segmentlänge [m]	3870	ca. 1935	ca. 484	ca. 60.5	ca. 7.5	2
Min. Differenz [m]	28.6	84.9	45.4	4.9	1.2	0.4
Max. Differenz [m]	114.8	34.5	35.4	4.1	3.4	1.5
Standardabw. der Differenzen [m]	43.6	26.2	13.8	1.2	0.2	0.1

Tabelle 10 Zusammenstellung der Resultate aus der Analyse des Soll-Punktabstandes

Der heute gebräuchliche mittlere Punktabstand von 1 bis 2 m kann damit auch die Frequenzen von rauer Topographie wiedergeben. Der Vorteil der homogenen Punktdichte ist jedoch zugleich auch ein Nachteil: in wenig rauer Topographie reichen deutlich weniger Punkte für eine präzise Beschreibung des Terrains aus. Die hohe Punktdichte führt damit zu einer unnötigen Redundanz („Oversampling“). Für hydrologische Anwendungen sind umgekehrt aber auch schmale Entwässerungsgräben im flachen Gelände von Bedeutung, welche mit einem Punktabstand von 2 m kaum ausgewiesen werden können („Undersampling“). Um eine ökonomisch und technisch optimale Mischung zwischen Under- und Oversampling zu finden, sind lokale Kleinstrukturen unter Umständen über photogrammetrische Stereoauswertung zu ergänzen. Sofern aus den ALS-Punkten nicht nur ein DTM abgeleitet werden soll, sondern über die Oberflächenpunkte auch weitere Objekte wie Hochspannungsfreileitungen, Bäume, Gebäudemodelle oder Flughindernisse zu erfassen sind, wird sich der Punktabstand nach den kleinsten zu detektierenden Objekten richten. Dabei darf aber nicht ausser Acht gelassen werden, dass ein geringer Punktabstand noch keine Garantie bietet, dass ein Objekt tatsächlich von einem Laserstrahl getroffen wird bzw. ein reflektiertes Signal als Echo detektiert wird (vgl. auch Kapitel 2.4.1). Eine horizontale Auflösung von weniger als 1 m führt dazu, dass Kleinstrukturen des Geländes erfasst werden, deren zeitliche Gültigkeit beschränkt ist (Dikau, 1989). Wenn diese Geländestrukturen von Bedeutung sind, muss die temporale Einschränkung bedacht werden und es müssen Überlegungen über den Nachführungszyklus angestellt werden.

### 4.3.2 Räumliche Genauigkeit

Die Definition der räumlichen Genauigkeit, insbesondere der vertikalen Genauigkeit, ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal für DTM und DOM. Nach der bereits zitierten Umfrage bei verschiedenen Vermessungsämtern wird die (vertikale) Genauigkeit immer als Indikator verwendet. ASPRS hat eine eigene Richtlinie für die Bestimmung der vertikalen Genauigkeit bei ALS-Daten publiziert (Flood, 2004) und im Vermessungswesen gilt der Nachweis der räumlichen Genauigkeit schon seit langer Zeit als wichtiges Qualitätsmerkmal (Caspary, 1992). Üblicherweise wird die räumliche Genauigkeit aufgrund von redundanten Messungen berechnet. Da die Messungen mit dem ALS nicht repetierbar sind, ist jeder Punkt nur *einfach* bestimmt. Zudem sind die ALS-Messungen zufällig über das Gelände verteilt, so dass eine unabhängige Bestimmung desselben Punktes äusserst aufwändig ist. Die Kontrolle der DGM-Genauigkeit aus ALS-Messungen erfolgt deshalb normalerweise im Vergleich mit einem interpolierten Modell. Es können vier verschiedene Methoden verwendet werden (siehe auch Tabelle 11):

1. Vergleich zwischen DGM und diskreten Kontrollpunkten: die Differenzen zwischen Höhenkontrollpunkten und interpoliertem Modell werden für die Berechnung einer empirischen Standardunsicherheit verwendet. Kontrollpunkte können zufällig über den Perimeter verstreut sein oder in Form von Kontrollflächen bzw. entlang von Profilen erfasst werden. Dieses Verfahren ist einfach in der Anwendung, aber kostspielig, wenn neue Punkte bestimmt werden müssen. Aufgrund des eher geringen Stichprobenumfangs kann nur bedingt eine flächenhafte Aussage erfolgen. Sogar grosse lokale Abweichungen können nur zufällig entdeckt werden.
2. Die Überlappung an den Streifenrändern kann genutzt werden, um aus benachbarten Streifen zwei unabhängige Modelle zu berechnen (Redundanz). Die Differenz der Modelle kann wiederum für die Berechnung einer empirischen Standardunsicherheit herangezogen werden. Dieses Verfahren kommt zwar ohne Kontrollpunkte aus, es kann aber keine systematischen Abweichungen nachweisen, welche beispielsweise durch falsche Stationskoordinaten der GPS-Referenzstation verursacht sein können. Eine geringe Standardunsicherheit aus der Streifenüberlagerung weist auf eine hohe Präzision (als Mass der Übereinstimmung zwischen mehreren Messungen) hin. Das Berechnen der Differenzen im Überlappungsbereich ist Bestandteil in praktisch allen Verfahren der Streifenausgleichung wie sie in Kapitel 2.5.3 vorgestellt wurden.
3. Die Genauigkeit kann aus den vollständig vorhandenen Informationen der Mess- und Auswerteprozesse deduktiv über einen beliebig grossen Perimeter als kombinierte Messunsicherheit bestimmt werden (vgl. Abbildung 36). Die Grössen zur Berechnung der Messunsicherheit stammen aus den Daten selber (tatsächliche Messwerte), können in Auswerteprozessen geschätzt werden (POS-Information) oder beruhen auf zusätzlichen Quellen wie Kalibrierinformationen, Erfahrungs- und Vergleichswerten. Der deduktive Ansatz hat den Vorteil, dass die Genauigkeitsinformation flächendeckend berechnet werden kann. Der Nachteil liegt wie bei dem Verfahren der Streifenüberlappung



darin, dass grobe Fehler nicht aufgedeckt werden. Die Zuverlässigkeit der Aussage hängt von der Übereinstimmung der getroffenen Annahmen mit den tatsächlichen Werten ab.

4. Sofern in der neu zu erfassenden Fläche bereits ein DGM vorliegt, kann dieses für eine flächenhafte Kontrolle verwendet werden (vgl. auch Meier und Nüesch, 2001). Typischerweise sind die Daten aber einige Jahre alt, so dass temporäre Änderungen zu fehlerhaften Differenzen führen. Zudem sind die Auflösung und die Genauigkeit des bestehenden Modells mit grösster Wahrscheinlichkeit schlechter als die des neuen, weshalb dieser Vergleich vor allem für grossflächige Plausibilitätskontrolle geeignet ist (beispielsweise Verkippung des gesamten Datensatzes).

Verfahren	Bezug der räumlichen Genauigkeit	Ausdehnung kontrollierter Fläche	Zuverlässigkeit der Aussage	Aufwand (Kosten)
<b>(Höhen-) Kontrollpunkte und -flächen</b>	Äussere, vertikal	Verstreut über den Perimeter, <i>lokale</i> Aussage	In Abhängigkeit des Stichprobenumfangs	Sehr hoch
<b>Redundanz in der Streifenüberlappung</b>	Innere (Präzision), vertikal und horizontal	Gleichmässig verteilte Bänder über gesamten Perimeter	Sehr hoch	Eher gering
<b>Deduktiv als kombinierte Messunsicherheit</b>	Innere (Präzision), vertikal und horizontal	Gesamte Fläche	Abhängig von Zuverlässigkeit der Parameter	Eher gering
<b>Vergleich mit bestehenden Geländemodellen</b>	Äussere, vertikal (horizontal kaum nachweisbar)	Kongruente Flächen	Abhängig von Genauigkeit, Auflösung und Alterung	Sehr gering

Tabelle 11 Methoden zur Bestimmung der räumlichen Genauigkeit

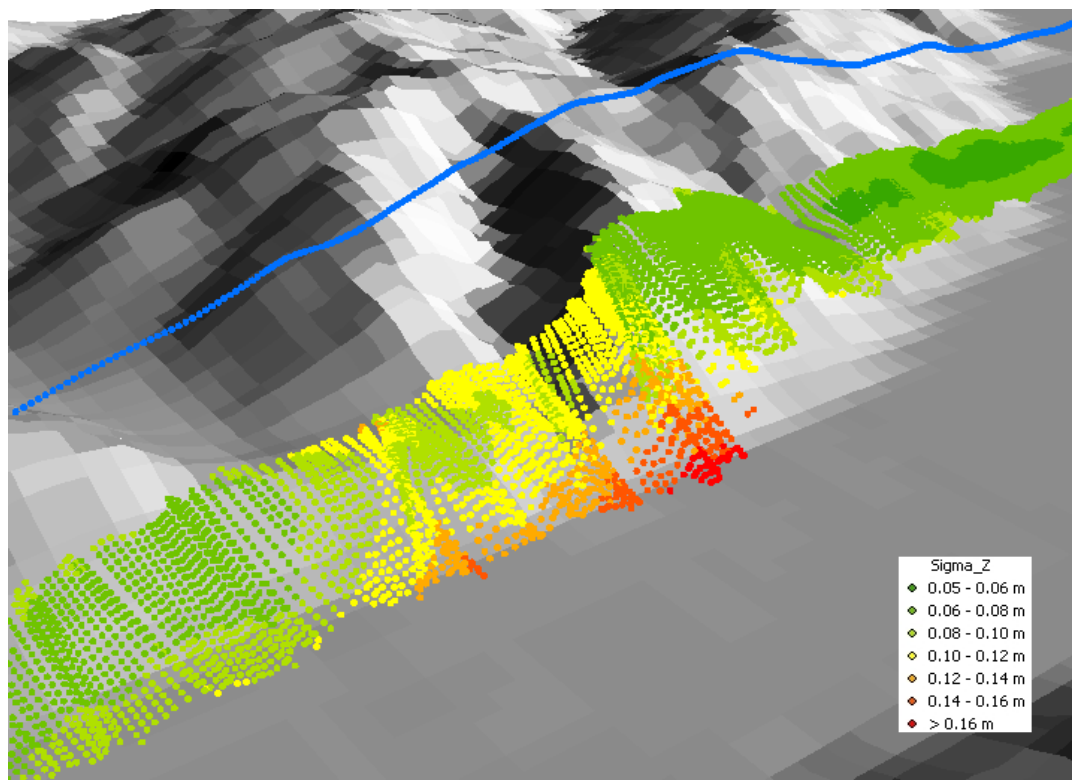


Abbildung 36 Beispiel der kombinierten Messunsicherheit, abgeleitet aus den Messwerten, Annahmen zur Messunsicherheit und der Standardunsicherheit der POS-Lösung (Quelle: Landtwing, 2005)

Aufgrund der verschiedenen Methoden und ihren Vor- und Nachteilen kann die räumliche Genauigkeit durch Angaben zur äusseren *und* inneren Genauigkeit spezifiziert werden. Beim Festlegen der Anforderungen sind die verschiedenen Fremdfaktoren, welche sich letztlich auf die räumliche Genauigkeit auswirken, zu kennen und gegebenenfalls zu berücksichtigen:

- *Geometrische Komponente:*
  - Zur Berechnung der vertikalen Komponenten sind die Vergleiche auf ebenen bzw. nur leicht geneigten Flächen zu bestimmen.
  - Das Bestimmen der horizontalen Genauigkeit mittels diskreten Kontrollpunkten ist häufig aufgrund mangelnder natürlicher topographischer Elemente, welche für die Zuweisung von Modell zu Realität notwendig wären, sehr schwierig (Flood, 2004). Umgekehrt zeigt es sich, dass die vertikale Genauigkeit mit der Geländeneigung korreliert (Kraus und Pfeifer, 1998) und die horizontale Genauigkeit daher bei bekannter Geländeneigung von der vertikalen ableitbar ist.
- *Temporale Komponente:* Die technologischen Fortschritte bei den Sensoren ermöglichen heute Punktgenauigkeiten im Bereich von wenigen cm. Es ist zu berücksichtigen, dass mit steigender räumlicher Genauigkeit die zeitliche Gültigkeit der Messung abnimmt. Die hohen Genauigkeiten machen daher primär für harte Oberflächen (Strassen, Parkplätze) Sinn, landwirtschaftliche Flächen sind durch die Veränderungen im Wasserhaushalt und Erosionsprozesse weniger dauerhaft (Dikau, 1989; Kölbl, 2001).
- *Messtechnische Komponente:* Der Einfluss der in Kapitel 2.4.2 aufgeführten Faktoren auf die Distanzmessung, insbesondere hinsichtlich Reflektion, führt zu grösseren Unsicherheiten auf dunklen, absorbierenden Flächen. Wenn keine Gründe aus der Endanwendung für eine andere Definition sprechen, soll sich die Genauigkeit auf gleichmässig reflektierende Flächen beziehen.
- *Punktdichte und Attributgenauigkeit:* Die Genauigkeitsanforderung soll sich auf Stellen mit homogener Punktdichte beziehen, also auf das offene Gelände. In bewaldeten Flächen ist die tatsächliche Auflösung der DTM-Punkte reduziert und die Zuverlässigkeit der DTM-Filterung erschwert. Die Vergleiche in Flächen mit reduzierter Auflösung oder unmittelbar neben Datenlücken (Kunstabauten) oder Bruchkanten haben wegen dem stärkeren Einfluss der Interpolation eine beschränkte Aussagekraft. Indessen können Kontrollpunkte, welche in Gelände mit dichter, tiefer Vegetation aufgenommen werden, eine Aussage über die Genauigkeit der Punktfilterung geben (vgl. auch Thompson et al., 2001).
- *Vollständigkeit:* Falls geforderte Objekte nicht vom ALS erfasst oder bei der Filterung eliminiert wurden, schlägt sich dies in einer reduzierten Genauigkeit nieder.

Diese Fremdfaktoren beeinflussen die Lage und Verteilung der Kontrollobjekte. Bei der Auswahl oder der Neu-Bestimmung der (Höhen-)Kontrollpunkte ist zu beachten, dass sie ebenfalls mit einer Standardunsicherheit behaftet sind. Da sie beim Vergleich mit dem DGM als „wahrer Wert“ verwendet werden, müssen sie mindestens dreimal genauer sein als das zu überprüfende Produkt (Zhang et al., 2002). Bei sehr hohen Genauigkeitsanforderungen ist darauf zu achten, dass bei orthometrischer Höhenbestimmung von Kontrollpunkten das Geoid in ausreichender Genauigkeit vorliegen muss (Ingensand, 2004). In diesen Fällen ist die Erfassung mittels GPS zuverlässiger, so dass die gleichen Transformationsschritte mit denselben Parametern und Modellen für die Kontrollpunkte wie für die ALS-Punkte durchgeführt werden.

Die Spezifikation der räumlichen Genauigkeit (aufgeschlüsselt in horizontale und vertikale Anforderungen) kann über verschiedene Komponenten erfolgen:

- *Äussere Genauigkeitsanforderung:* entweder im Sinne der Standardunsicherheit (wie  $u_z = 15$  cm) oder als Vertrauensintervall (z.B. 95 % der Kontrollpunkte  $\leq 30$  cm Abweichung zum DTM).
- *Innere Genauigkeitsanforderung:* zu beschreiben als Standardunsicherheit (Analyse der Streifenüberlappung) bzw. kombinierte Messunsicherheit. Bei letzterer sind allerdings die Standardunsicherheiten der einzelnen Komponenten gemeinsam zu vereinbaren. Alternativ können auch Bereiche mit „grossen“ Differenzen zwischen zwei oder mehr Flugstreifen ausgewiesen werden (beispielsweise Flächen ab  $50 \text{ m}^2$  mit einer Abweichung von mehr als 30 cm).

- *Topographie:*
  - Allfällige Präzisierung, ob die Genauigkeitsanforderung über das gesamte Gebiet konstant ist, oder ob je nach Oberflächenbeschaffenheit oder Geländerauigkeit unterschiedliche Anforderungen gelten (dies im Sinne der Toleranzstufen in der Schweizerischen Amtlichen Vermessung). Falls letzteres zutrifft, sind die Genauigkeiten nach den Gebietseinheiten zu berechnen (vgl. auch Zhang et al., 2002).
  - Angabe zur max. Geländeneigung in welcher die vertikale Genauigkeit bestimmt wird.
- *Prozesse:* Angaben zu anwendbaren Projektions- und Transformationsformeln (für Punkte aus ALS und Kontrollobjekte)

### 4.3.3 Thematische Genauigkeit

Bei der thematischen Genauigkeit ist praktisch nur die Qualität der Punktklassifizierung von Bedeutung. Die quantitativen Attribute wie Flugstreifen, Aufnahmezeitpunkt oder Intensität sind automatisch erfasste Eigenschaften jedes Punktes, bei denen davon ausgegangen werden muss, dass sie korrekt und zuverlässig sind. Falls die kombinierte Messunsicherheit als zusätzliches Attribut berechnet wird, sind Berechnungsverfahren und Annahmen zu den Standardunsicherheiten vorgängig zu validieren, so dass von korrekten Attributwerten (bzw. Berechnungen) ausgegangen werden kann.

Die Beschreibung der Anforderung an die Genauigkeit der Klassifizierung muss auf einem vollständigen Objektdatenkatalog basieren (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.2.3). Falsche Klassifizierungen (Fehler 1. und 2. Art) schlagen sich in der Modellbildung und in den anschliessenden Anwendungen nieder. Die Beurteilung der Klassifizierung erfolgt im Rahmen einer visuellen Kontrolle. Genau wie die automatische und manuelle Klassifizierung ist aber auch die visuelle Prüfung nicht frei von *Interpretationsfehlern*; es können Bereiche fälschlicherweise als unkorrekt beurteilt wie auch Falschklassifizierungen nicht erkannt werden. Daher sollte nicht nur die Klassifizierung selber, sondern wenn möglich deren Auswirkung auf das Modell spezifiziert werden:

- Fehler 1. Art führen zu Datenlücken. Diese können manchmal auf einen sehr dichten Baumbestand zurückgeführt werden. Für das offene Gelände (ev. auch für Laubwald) kann die akzeptierbare Grösse einer Lücke spezifiziert werden. Nicht erkannte Punkte entlang von Kreten oder in Einschnitten führen zu einer Einbusse der vertikalen Genauigkeit des triangulierten Modells, dies kann über die Differenz zum DOM nachgewiesen werden.
- Fehler 2. Art führen zu einer Reduktion der vertikalen Genauigkeit des interpolierten Modells. Falsch klassifizierte Punktgruppen können toleriert werden, wenn sie lokal die vertikale Genauigkeit nicht mehr als um einen bestimmten Faktor verschlechtern.

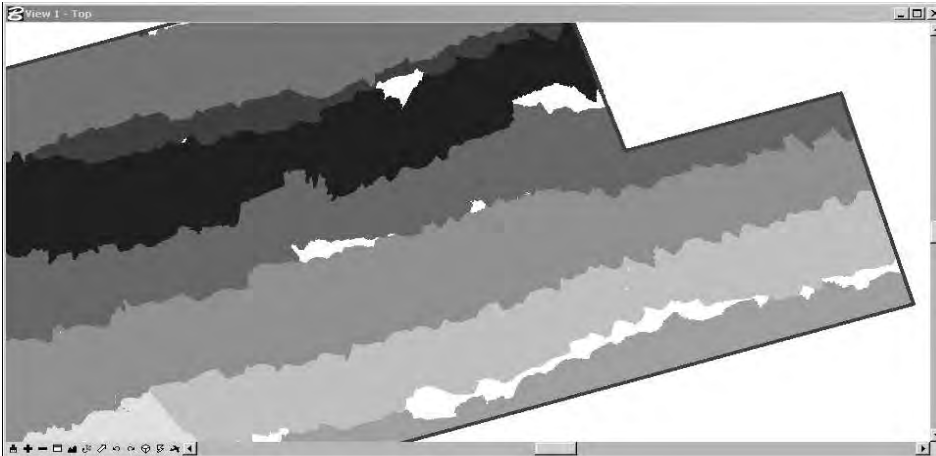
Einzelne, fälschlicherweise als Terrain klassifizierte Punkte können über statistische Methoden gefunden werden, wie sie in Kapitel 3.11.1 beschrieben sind. Einzelne, nicht als Terrain erkannte Punkte lassen sich dagegen kaum finden; sie haben aber keinen sichtbaren Einfluss auf das Resultat.

Beim DOM ist die korrekte Klassifizierung der Punkte insbesondere im Grenzbereich von zwei Objekten (Gebäude/Vegetation, Brücke/Terrain, oder Mast/Leitung) sehr schwierig. Hier ist bei den Anforderungen das Schwergewicht auf die Konsistenz und Vollständigkeit zu legen: einzelne Punkte klassifiziert als Gebäude in einem Wald sind offensichtlich falsch, ein Gebäude ist im Normalfall auch deutlich von einem Baum unterscheidbar. Umgekehrt können einzelne nicht natürliche Objekte wie z.B. Antennen sowohl von Gebäuden als auch Vegetation umgeben sein. Unter diesen Umständen macht es wenig Sinn, die Zuverlässigkeit der DOM-Klassifizierung höher als 95 % zu fordern. Die Klassifizierung von DOM-Objekten muss in einer visuellen Kontrolle, unter Umständen unterstützt mit weiteren Datensätzen oder einer Feldbegehung, beurteilt werden und ist daher sehr kostspielig.

### 4.3.4 Vollständigkeit

Die Vollständigkeit bezieht sich auf die zwei Aspekte „inhaltliche Vollständigkeit“ und „flächendeckende Erfassung“. In beiden kann es zu Mängeln kommen, indem zu viel (Überschuss) oder zu wenig Daten (Unterlassung) bereitgestellt werden, wobei die Unterlassung der gravierendere Fall ist. Sie wird verursacht durch Mängel in der Befliegung oder ist auf Fehler 1. Art in der Klassifizierung zurück zu führen (vgl. Kapitel 4.3.3). Flächenförmige Lücken in den Rohdaten treten dann auf, wenn ein angestrahktes Objekt wegen Absorption zu wenig Energie für eine Messung reflektiert oder wenn sich

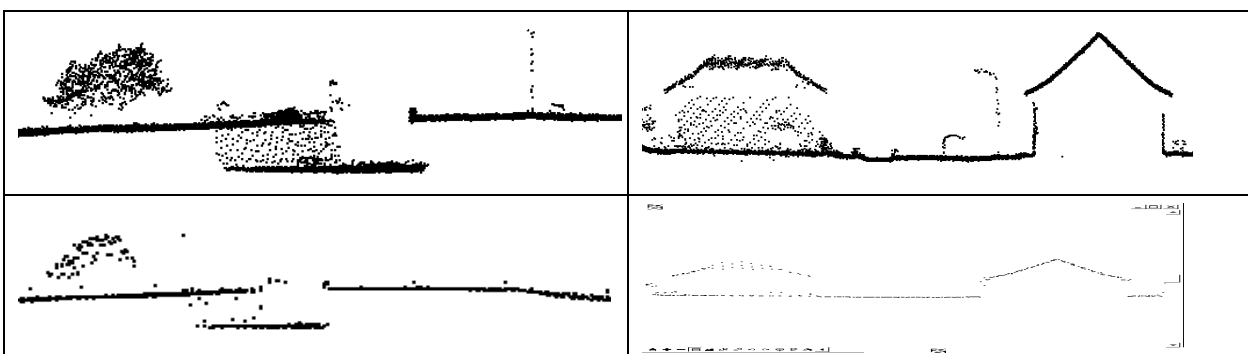
benachbarte Flugstreifen nicht überlappen. Dies kann passieren, wenn vom vorgegebenen Kurs bzw. der Flughöhe abgewichen wird oder wenn die Plattform zu stark von der Soll-Lage abweicht. Ein Mangel aus der Befliegung ist einfach zu erkennen, da er sich als linsenförmige, häufig grossflächige Datenlücke zwischen benachbarten Flugstreifen äussert (vgl. Abbildung 37). Bei der Begründung von lokalen Lücken ist die Grenze zwischen Systemverhalten, ungünstiger Bedingungen während der Befliegung (hohe Luftfeuchtigkeit) und zu stark absorbierender Oberfläche nicht so einfach zu ziehen (vgl. Kapitel 2.4.1). Lokale Lücken sind ebenfalls mittels Kontrolle der horizontalen Auflösung zu erkennen.



**Abbildung 37** Verschiedene Datenlücken zwischen benachbarten Flugstreifen aufgrund von starken Seitenwinden während der Befliegung

Ein Überschuss an Punkten ist zwar der seltenere Fall, nichtsdestotrotz kann er stören. Als lokaler Überschuss sind alle Punkte zu qualifizieren, die nicht ein Objekt beschreiben (Multi-Path-Effekte, Ausreisser). Dieser Überschuss führt zu einer Reduktion der räumlichen Genauigkeit. Ebenso kann ein regionaler Überschuss auftreten, wenn Daten ausserhalb des Perimeters oder wenn zu viele Punktklassen geliefert werden.

Die inhaltliche Vollständigkeit verlangt, dass alle topographischen Objekte und alle geforderten Attribute vorhanden sind. Die vollständige Beschreibung der Erdoberfläche ist wiederum von der Datenerfassung abhängig: Falls ein Objekt aufgrund der Grösse und Lage des Footprints gar nicht angestrahlt wird, kommt es nicht zu einer Datenlücke, da der ausgestrahlte Impuls von einem anderen Objekt zurück geworfen werden kann. Die unvollständige Beschreibung der Topographie ist eng mit der horizontalen Auflösung verbunden; je feiner die Auflösung, umso mehr Objekte können tendenziell abgebildet werden. Es gibt bei ALS bekanntlich keine Gewähr, dass ein Objekt erfasst wird, auch wenn es aufgrund des Punktabstandes und der Grösse des Footprints theoretisch angestrahlt wird (vgl. Kapitel 2.4.1).



**Abbildung 38** Zwei Beispiele von Differenzen in der Vollständigkeit aufgrund unterschiedlicher Auflösung und Flughöhen.

**Oben:** Flughöhe 600 m, Punktabstand 0.2 m, **unten** 1200 m/1.2 m

Der aus ALS resultierende Datensatz muss dem vereinbarten Datenmodell entsprechen, wenn er in Form einer klassifizierten Punktwolke vorliegen soll. Hier kann zur Erfüllung der Vollständigkeit geprüft werden, ob die geforderten Attribute für jeden Punkt auch tatsächlich vorliegen. Da die meisten Attribute

bereits während der Datenerfassung registriert werden und auch alle weiteren Attribute aufgrund der grossen Anzahl Objekte über automatisierte Verfahren vergeben werden müssen, ist die Vollständigkeit hinsichtlich dem Vorhandensein von Attributen von untergeordneter Bedeutung.

Das Kriterium Vollständigkeit soll im allgemeinen Fall dafür gebraucht werden, um die grösste Fläche ohne Messung (bzw. Datenlücken) festzulegen. Die Ursache der Datenlücke ist für die Qualität des Produktes von untergeordneter Bedeutung.

Die Kontrolle bzw. der Nachweis der Vollständigkeit kann über die statistische Analyse eines Punktdichterrasters erfolgen: das Raster wird klassifiziert nach „Messung vorhanden“ oder „keine Messung“. Anschliessend erfolgt die Überlagerung mit dem Perimeter (Zellen mit Messungen) bzw. mit Gewässern (Zellen ohne Messungen), um zu viele bzw. fehlende Punkte auszuweisen.

Für Spezialanwendungen wie Flughinderniskartierung oder Hochspannungsfreileitungen dient das Kriterium Vollständigkeit zur Beschreibung derjenigen Objekte, die im Endprodukt enthalten sein müssen (und damit vom ALS erfasst werden sollten)<sup>29</sup>. Da – wie erwähnt – die Flugplanung noch keine Garantie für die tatsächliche Erfassung aller theoretisch angestrahnten Objekte gibt, muss hier die Kontrolle mittels Vergleich zu bestehenden Datensätzen oder mittels Feldbegehung erfolgen.

#### 4.3.5 Zeitliche Genauigkeit

Die zeitliche Genauigkeit beschreibt einerseits die Genauigkeit einer Zeitmessung und andererseits die Übereinstimmung des zu einem Zeitpunkt  $t_0$  erfassten Objekts mit dem Zustand zum Zeitpunkt  $t_1$  (Aktualität der Daten). Im Umfeld von ALS ist von einer ausreichend präzisen Zeitmessung (GPS) bzw. Synchronisation auszugehen und die Aktualität der Daten aufgrund der Neu- oder Ersterfassung gegeben. Daher soll der Begriff vor allem dafür verwendet werden, die *Rahmenbedingungen* zum Zeitpunkt der Befliegung zu beschreiben:

- Bei einer Befliegung mit dem Ziel, ein „hochwertiges“ DTM zu erfassen, ermöglicht ein laubfreier Zustand eine viel bessere Penetration des Laserstrahls und damit eine höhere Punktdichte auf dem Waldboden mit dem entsprechend positiven Einfluss auf die Genauigkeit. In den Wintermonaten ist jedoch in vielen Laubwäldern mit Schnee zu rechnen, welcher die räumliche Genauigkeit der Messungen negativ beeinflusst (Abtasten einer nicht beständigen Oberfläche).
- Für die hydrologische Modellierung führt die Datenerfassung während Hochwasser zu einer unvollständigen Beschreibung der relevanten Objekte. Hier ist demzufolge der maximal erlaubte Wasserstand während der Befliegung ausschlaggebend als Kriterium der zeitlichen Genauigkeit.
- Für Glaziologen und Betreiber von Deponien oder Abbaugebieten ist der Zustand an Stichdaten wichtig, so dass Zeitreihen entstehen, in welchen jahreszeitliche Schwankungen eliminiert sind bzw. gezielt nachgewiesen werden können (Favey, 2001). Die Befliegung hat also regelmässig innerhalb des gleichen Zeitfensters zu erfolgen.
- Beim Erfassen von sich dynamisch ändernden Objekten wie Hochspannungsfreileitungen müssen parallel zur Befliegung die Stromlast und verschiedene meteorologische Daten (Globalstrahlung, Temperatur, Wind) aufgezeichnet werden. Der Durchhang der Seile hängt von diesen Bedingungen ab und die abgeleiteten Vektoren sind mit Hilfe dieser Zusatzinformationen für die weiteren Berechnungen auf Standardwerte zu korrigieren. Hier ist eine hohe relative zeitliche Genauigkeit (Synchronisierung) zwischen den Messstellen gefordert.

Für die beiden letztgenannten Anwendungen kann eine Aussage zur Gültigkeitsdauer der Daten gemacht werden. Dies ist bei den anderen Applikationen nicht ganz so einfach. Hier können nach Abschluss der Erfassung keine Angaben über die Aktualität der Daten gemacht werden. Es sind deshalb andere Prozesse notwendig, um eine Aussage über die temporale Gültigkeit der Objekte zu erhalten. In der amtlichen Vermessung der Schweiz gibt es für einige Objekte ein geregeltes Meldeverfahren (z.B. Fixpunkte, Parzellen, Strassen, Gebäude). Dies ermöglicht eine lokale Aktualisierung des DTM. Für die Aktualisierung aller Objekte des Datenbestandes ist eine periodische Nachführung geeignet. Aufgrund der Dynamik der Objekte, welche Bestandteil des jeweiligen Datenkataloges sind, kann ein Nachführungszyklus definiert werden.

---

<sup>29</sup> In diesen Anwendungen ist für die Qualitätsbeurteilung das Merkmal Vollständigkeit von grösserer Bedeutung als die räumliche Genauigkeit.

Da sich Forderungen hinsichtlich des Zeitpunkts der Befliegung widersprechen (laub- und schneefrei über grosse Gebiete im alpinen Raum) und von zusätzlichen Interessen beeinflusst sind (beispielsweise der Termin, an welchem Resultate vorliegen müssen), sind Kompromisse zu suchen oder in den Spezifikationen eindeutige Prioritäten zu setzen (Rieger et al., 2005).

Der Nachweis für das Einhalten der Spezifikation über die zeitliche Genauigkeit ist aufwändiger als für die anderen Qualitätsmerkmale. Zwar ist über den Zeitstempel für jeden Punkt aus ALS der Befliegungstag nachvollziehbar, aber aufgrund von jährlichen Schwankungen kann daraus nicht auf die tatsächlichen Verhältnisse geschlossen werden. Der aktuelle Stand der Befliegung, die Planung für die kommenden Tage ev. ergänzt mit aktuellen Bildern (z.B. von Webcams), kann aber regelmässig an den Auftraggeber kommuniziert werden, so dass die Prioritäten in der Datenerfassung laufend abgestimmt und die zeitliche Genauigkeit nachgewiesen werden können.

#### 4.3.6 Logische Konsistenz

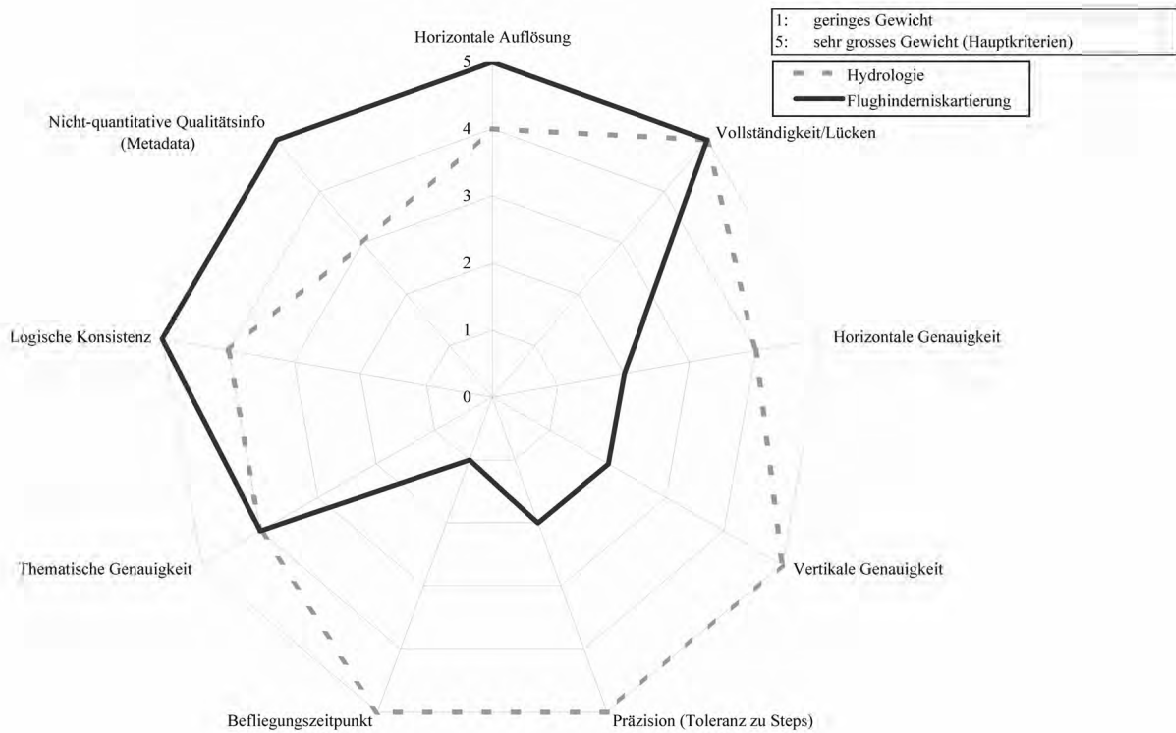
Unter dem Stichwort logische Konsistenz sind verschiedene Merkmale zusammengefasst, welche die Übereinstimmung zwischen erwarteten und realisierten Werten beschreiben:

- **Konzeptionelle Konsistenz**  
Sie beschreibt die Übereinstimmung mit dem konzeptionellen Schema; im Fall von DTM und DOM die Kongruenz der Modelle mit den Produktspezifikationen (was ist Bestandteil von DTM bzw. DOM?). Der Begriff kann aber auch dazu verwendet werden, um die Konsistenz der Daten in sich zu beschreiben. Diese ist beispielsweise verletzt, wenn das DTM höher als das DOM liegt. Eine andere Inkonsistenz tritt auf, wenn benachbarte Punkte aus zwei Streifen merklich voneinander abweichen. Am Streifenrand kommt es zu abrupten Übergängen in Form einer Stufe, welche nicht der Realwelt entsprechen.
- **Topologische Konsistenz**  
Die Topologie ist bei Rastermodellen mit der Definition der Zellgeometrie und -anordnung gegeben. Bei der Dreiecksvermaschung (nach Delaunay) sind die Vorgaben zur Erfüllung der Topologie ebenfalls gegeben. Im Normalfall werden bestehende und bereits geprüfte Algorithmen verwendet, so dass die Bildung der Topologie aus den Einzelpunkten nicht als Qualitätsmerkmal von Bedeutung ist.
- **Konsistenz des Wertebereichs**  
Soweit möglich können Wertebereiche für Attribute festgelegt werden. Typische Attribute mit einfach zu definierenden Wertebereichen sind die Lagekoordinaten der Daten einer Kachel (basierend auf Kacheleinteilung, Referenzsystem und Masseinheiten), die Höhenkoordinate oder die Punktklasse.
- **Formatkonsistenz**  
Das Format bezieht sich auf die Elemente der allgemeinen Produktdefinitionen: Referenzsystem, Interpolationsmethode, Kachel- und Zellgrösse eines Rastermodells oder die Übereinstimmung zwischen Datenmodell und Datenhaltung bzw. Datenaustauschformat.

Die logische Konsistenz dient somit nicht zur genaueren Spezifikation der Produkte. Es kann davon ausgegangen werden, dass alle aufgeführten Unterelemente bereits in den allgemeinen Produktspezifikationen beschrieben sind. Die logische Konsistenz ist aber von grosser Bedeutung bei der Qualitätskontrolle, da sie Möglichkeiten zur einfachen Prüfung auf Erfüllung der äusseren Rahmenbedingungen eröffnet (Plausibilitätskontrollen). Die inhaltliche Prüfung der eigentlichen Objekte erfolgt mit den beschriebenen Unterelementen.

#### 4.3.7 Vorschlag für technische Spezifikationen

Jedes nicht-quantitative und quantitative Qualitätsmerkmal ist je nach Anwendungsgebiet von höherer oder geringerer Bedeutung. Auf diese Besonderheiten ist Rücksicht zu nehmen, um nicht Eigenschaften zu spezifizieren, die eigentlich nicht verlangt sind, welche aber einen Einfluss auf die Kosten haben. In Abbildung 39 ist die Gewichtung an den Beispielen von Datenerfassung für die Hydrologie bzw. für die Kartierung von Flughindernissen gegenübergestellt. Hier wird deutlich, dass sich die Bedürfnisse nicht sehr stark decken und sich damit kaum ein Datensatz für *beide* Anwendungen lohnt.



**Abbildung 39** Gegenüberstellung der Bedeutung der Qualitätsmerkmale bei der Datenerfassung für Hydrologie bzw. zur Kartierung von Flughindernissen

Die Tabelle 12 enthält einen Vorschlag, wie die vorgängig erläuterten quantitativen Qualitätsmerkmale zur technischen Spezifikation eines DTM als Geobasisdatensatz verwendet werden können. Diese Anforderungen sind nicht als einzig richtige Beschreibung zu betrachten, sondern sollen Hinweise geben, wie die Qualitätsindikatoren für eine präzise Produktdefinition verwendet werden können. In der Abbildung 39 sind diese Anforderungen jeweils in der Gewichtung von 3 bis 4 einzustufen. Zur Vervollständigung werden zu jedem Merkmal die Prüfmethode und die annehmbare Qualitätsgrenzlage beschrieben.

<b>Merkmal</b>	<b>Spezifikation</b>	<b>Prüfmethode(n), Annehmbare Qualitätsgrenzlage(n)</b>
Vertikale Auflösung	Prozesse sind so auszugestalten, dass die vertikale Auflösung vom DGM 1 cm beträgt	Stichproben bei Trajektorie und Endresultate 100 %
Horizontale Auflösung	Der mittlere horizontale Abstand zwischen zwei Messungen beträgt 1 m.	Pro ha werden die Anzahl Messungen (jeweils erster Return) gezählt. 99 % bezogen pro 1x1 km Kachel (oder 1 ha in welchen das Kriterium nicht erfüllt werden muss)
Räumliche Genauigkeit	Die äussere vertikale Genauigkeit des DTM ist kleiner als 20 cm im offenen Gebiet bzw. kleiner als 1.5 m im bewaldeten Gebiet.	Die Genauigkeit ist mittels Kontrollpunkten auf ebenen Oberflächen (Neigung < 5 °) nachzuweisen. Für jeden Punkt wird die Differenz zum triangulierten DTM berechnet. Die Punkte werden unterschieden nach „offenes Gelände“ und „Wald“. 95 % der Punkte im offenen Gelände weisen weniger als 20 cm Differenz auf. 95 % der Punkte im bewaldeten Gebiet weisen weniger als 1.5 m Differenz auf.

Merkmal	Spezifikation	Prüfmethode(n), <i>Annehmbare Qualitätsgrenzlage(n)</i>
	Die innere vertikale Genauigkeit ist kleiner als 30 cm.	Die innere vertikale Genauigkeit wird mittels Analyse der Streifenüberlappung ausgewiesen, indem für jeden Streifen das DTM erzeugt wird und die Differenzen zwischen den Streifen berechnet wird. <i>Es dürfen keine Differenzen zwischen Flugstreifen auftreten, die über eine Länge von 50 m (in Flugrichtung) grösser als 30 cm sind.</i>
	Die äussere horizontale Genauigkeit ist kleiner als 40 cm.	Die horizontale Genauigkeit wird anhand von Kontrollpunkten auf geneigten Flächen (Neigung > 5 °) und unter Berücksichtigung der vorgängig bestimmten vertikalen Genauigkeit bestimmt. <i>95 % der Punkte im offenen Gelände weisen weniger als 40 cm Differenz auf.</i>
Thematische Genauigkeit	Die Genauigkeit der Klassifizierung (vollständiges Erkennen der Terrainpunkte) ist besser als 97 %	Datenlücken wegen mangelnder Filterung führen nicht zu Inkonsistenzen zwischen DOM und DTM. <i>Die Differenz von DTM - DTM darf nicht grösser sein als 0.6 m</i> Pro 10x10 m (100 m <sup>2</sup> ) werden die Anzahl DTM-Punkte gezählt. Zellen ohne Messungen ausserhalb des Siedlungsgebiets werden zusammengefasst und unterschieden nach offenem Gelände bzw. Wald. <i>97 % bezogen pro 1x1 km Kachel (300 Zellen, in welchen Kriterium nicht erfüllt werden muss).</i> <i>Ausserhalb der Siedlungsflächen hängen nicht mehr als 4 Zellen zusammen (keine Lücken &gt; 200 m<sup>2</sup>).</i>
	Die Genauigkeit der Klassifizierung (richtiges Ausscheiden der Oberflächenpunkte) ist besser als 97 %.	Die Anzahl der von der Ausreisser-Funktion <sup>30</sup> erkannten Punkte, die einen Abstand > 1.5 m zur interpolierten Ebene aufweisen. <i>97 % bezogen pro 1x1 km Kachel</i> Das DTM beinhaltet keine Objekte, die eindeutig als DOM-Elemente erkannt werden können <i>100 %</i>
Vollständigkeit	Die maximale Fläche ohne Roh-Messung darf 25 m <sup>2</sup> nicht überschreiten.	Pro 25 m <sup>2</sup> werden die Anzahl Messungen (jeweils erster Return) gezählt. Zellen ohne Messungen werden zusammengefasst und mit Hilfe von Orthophoto oder digitaler Landeskarte (Pixelkarte) unterschieden nach nicht reflektierend bzw. nicht erfasst. <i>Mit Ausnahme von nicht reflektierenden Flächen (dunkler Belag, Gewässer) dürfen pro ha nicht mehr als 5 Datenlücken enthalten sein</i>

<sup>30</sup> Der Algorithmus der Ausreisser-Funktion mit den notwendigen Parametern wie Suchradius, Interpolationsmethode etc. ist ebenso festzulegen.



<b>Merkmal</b>	<b>Spezifikation</b>	<b>Prüfmethode(n), <i>Annehmbare Qualitätsgrenzlage(n)</i></b>
Zeitliche Genauigkeit	Die Befliegung hat grundsätzlich in der laub- und schneefreien Periode zu erfolgen. In hydrologisch relevanten Flächen ist die Abwesenheit von Schnee höher zu gewichten als der Vegetationsstand. Die relevanten Flächen werden vom Auftraggeber ausgewiesen. In steileren Lagen, insbesondere in der Nähe zu Skigebieten, ist die Schneesituation aufgrund des kompakten Kunstschnees tiefer gewichtet als der Stand der Vegetation.	Für den generellen Nachweis über den Befliegungszeitpunkt werden pro Kachel die Flugtage ausgewiesen. <i>In kritischen Fällen ist das Vorgehen vom Auftraggeber und Auftragnehmer gemeinsam abzustimmen (Qualitätsgrenzlage wird fallweise in gemeinsamer Absprache unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen bestimmt).</i>
Logische Konsistenz	Aus der Kachelgrenze wird der Wertebereich für die X/Y-Koordinaten vorgegeben. Alle Punkte einer Kachel müssen diesen Wertebereich erfüllen (Konsistenz des Wertebereichs).	Ausweisen der minimalen und maximalen X- bzw. Y-Koordinate pro Kachel. <i>100 % (keine Punkte ausserhalb)</i>
	Alle DTM-Daten liegen im Bezugssystem (CH03+/LHN95) vor (Formatkonsistenz).	Vergleich mit Kontrollpunkte, von denen bekannt ist, dass sie im System (CH03+/LHN95) vorliegen. <i>100 % (keine Punkte mit Koordinaten in anderen Bezugssystemen)</i>
	Die DTM-Punkte liegen im Format LAS vor (Formatkonsistenz).	Prüfung mit LAS-Checker. <i>100 % (keine Punkte mit anderer Formatierung, Pflichtattribute erfasst).</i>
	Das DTM als Modell wird interpoliert über eine Dreiecksvermaschung nach Delaunay, die Zellgrösse beträgt 1 m.	Abnahme des Formatierungsprozesses, Dokumentation der automatischen Formatierung. Prüfung des Rasterdatensatzes hinsichtlich Bezugssystem und Rastergrösse. <i>100 % (alle Modelle mit 1 m Zellgrösse, keine Abweichungen nachweisbar).</i>

**Tabelle 12** Vorschlag für technische Spezifikationen eines DTM als Geobasisdatensatzes

## 4.4 Prozessqualität

Bereits in der Einführung zur Thematik wurde die Bedeutung der Strukturierung von Arbeitsschritten als Prozesse für die Generierung von DGM aus Airborne Laser Scanning beschrieben. Die Gestaltung der Tätigkeiten in Form von Prozessen vereinfacht die Adaption auf verschiedene Spezifikationen, so dass die geforderte Qualität erreicht, aber nicht deutlich übertroffen wird, da dies zu unnötigen Kosten führt (Prinzip der Wirtschaftlichkeit). Falls die in den technischen Spezifikationen vereinbarten Qualitätsmerkmale nicht erfüllt und daher die Daten vom Kunden nicht akzeptiert werden, sind oft mehrere Prozesse zu wiederholen. Dies führt zu unnötigen Zusatzkosten. Wenn aber die Tätigkeiten strukturiert sind und für jeden Prozess das erwartete Resultat vorgängig aufgrund der Kundenanforderungen definiert ist, sinkt die Wahrscheinlichkeit von ungenügender Qualität. Abweichungen vom Soll können frühzeitig erkannt und entsprechende Korrekturmassnahmen veranlasst werden.

Diese Forderung kann anhand des Qualitätsmerkmals „räumlichen Genauigkeit“ demonstriert werden: Die räumlichen Genauigkeit wird in verschiedenen Prozessen beeinflusst, auch wenn letztlich nur in einer Aktivität Daten erfasst werden und nur für die Endresultate die Anforderungen spezifiziert sind. Die

Abbildung 40 zeigt den Verlauf der „räumlichen Genauigkeit“ über die Hauptprozesse. Aus der Flugplanung (Flughöhe, Sensor-Konfiguration) resultiert eine erwartete Messunsicherheit, die in vielen Fällen kleiner ist als für das Endprodukt verlangt, da einerseits die Auftraggeber häufig die Flugplanung abnehmen und da die Auftragnehmer andererseits etwas Reserve einplanen. Der Spielraum kann auch als „Sicherheitszuschlag“ für die kostspielige und zeitaufwändige Datenerfassung verstanden werden (Reduktion der Gefahr einer Neubefliegung aufgrund ungenügender Genauigkeit). Bei der Datenerfassung nimmt die Genauigkeit nun eher wieder etwas ab (bzw. die Messunsicherheit zu), da auch unter nicht optimalen Bedingungen geflogen wird (z.B. ungünstiger PDOP während eines eigentlich optimalen Zeitfensters). Sofern die Prozesse stabil sind und die Sachbearbeiter über genügend Erfahrung verfügen, wird die Genauigkeit in den nachfolgenden Auswerteschritten nicht verändert. Die Iterationen beim Prozessieren der GPS-Daten werden abgebrochen, sobald das Ziel bzw. die intern geforderte Genauigkeit erreicht ist. Eine weitere Steigerung der Genauigkeit kann bei der Streifenausgleichung erzielt werden. Da dieser Prozess sehr wenig manuellen Aufwand verlangt, ist davon auszugehen, dass dieses Potential bei Bedarf ausgeschöpft wird. Im Prozess der Datenfilterung und Modellbildung wird die Genauigkeit eher wieder etwas abnehmen, da sich (grobe) Fehler in der Klassifizierung als Höhendifferenzen in der Modellierung fortpflanzen. Am Ende der Prozesskette ist die geforderte Qualitätsgrenzlage bei optimiertem Aufwand erfüllt. Die graue Linie in Abbildung 40 zeigt diesen gewünschten Verlauf, der von einem Auftragnehmer erreicht wird, welcher über geeignete Prozesse und die nötige Erfahrung verfügt.

Falls in allen Prozessen die räumliche Genauigkeit laufend verschlechtert wird (gestrichelte Kurve oben in Abbildung 40), gibt dies ein Indiz für unkontrollierte Prozesse, mit allfälligen hohen Kosten für (zu) späte Korrekturen. Ein Perfektionist versucht, die Genauigkeit in jedem Prozess gleich zu behalten oder sogar zu reduzieren (unterste, gestrichelte Kurve), so dass ein Produkt resultiert, welches die Anforderungen für dieses Merkmal deutlich übertrifft. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass die Kosten für die höhere Qualität entgeltet werden.

Eine stabile Prozesskette zeugt von geeigneten Werkzeugen, Prozessen und vorhandener Erfahrung, so dass ein finanzieller Erfolg resultiert. In einer solchen Umgebung können Resultate aus einer schlechten Befliegung in den nachfolgenden Prozessen wieder verbessert und die Abweichungen reduziert werden, so dass das Qualitätskriterium „räumliche Genauigkeit“ der Endprodukte in etwa der geforderten entspricht (strichpunktierte Kurve in Abbildung 40). Fallen die Abweichungen in der Datenerfassung zu gross aus, muss die Befliegung wiederholt werden oder das Projekt wird schlimmstenfalls abgebrochen.

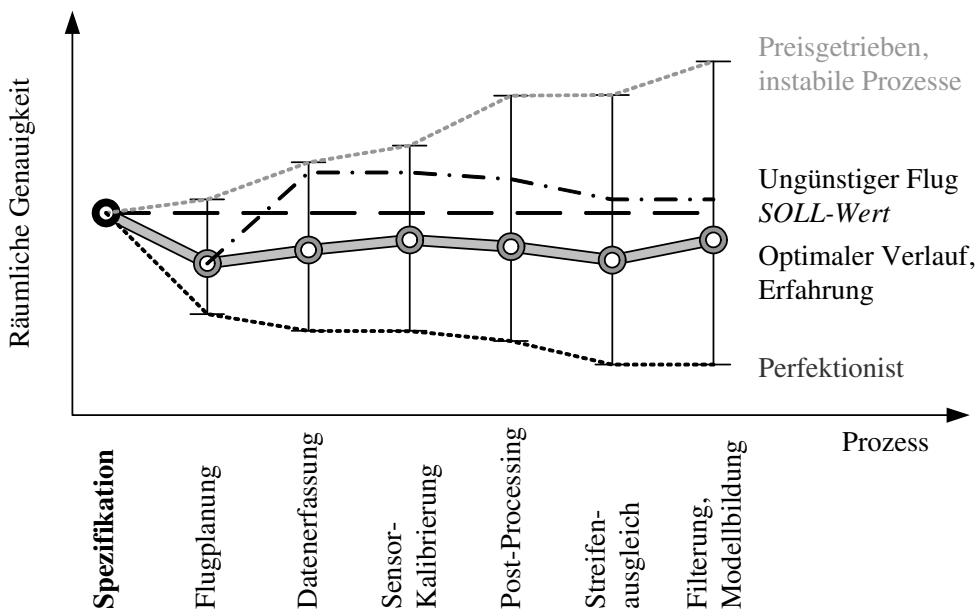


Abbildung 40 Verlauf der räumlichen Genauigkeit über die wichtigsten Prozesse

In den folgenden Abschnitten werden Anforderungen an die Produktionsprozesse beschrieben, bzw. die Bedeutung der Prozessqualität im Qualitätsmodell erläutert. Da etliche dieser Anforderungen im Generellen bekannt sein sollten und nicht auf die Produktion von Geodaten beschränkt sind, wird der Fokus auf jene Aspekte gelegt, welche einen grossen Einfluss auf die Resultate ausüben.

## 4.5 Realisierungsprozesse

Die Realisierungsprozesse beschreiben denjenigen Teil des firmenweiten QMS, welcher die auftragsbezogenen Prozesse beinhaltet, also die zur Erfüllung der vertraglich vereinbarten Leistungen (hier Erzeugung von Geodaten) notwendigen Tätigkeiten. Die bestmögliche Produktqualität (Potential der Realisierung) ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Sensorsystem, Algorithmen zur Auswertung der Messgrößen, Ausgestaltung des Arbeitsablaufes als Prozesse (einschliesslich effizienter Softwarewerkzeuge), Verfeinerung der Kundenanforderung auf die Teilprozesse, geeignete Testfälle zur Realisierung der Qualitätskontrollen, Datenmanagement und der Dokumentation der Produktion.

Die Bedeutung der Sensorsysteme und der damit verbundenen Werkzeuge zur Auswertung der Messwerte ist ausführlich im Kapitel 2 beschrieben. Die Eigenschaften des Sensorsystems bzw. der Auswertsoftware und ihr Beitrag an das Qualitätsmodell sind somit bekannt.

Der Arbeitsablauf (Workflow) in einem ALS-Projekt ist im Kapitel 3 erläutert. Die Güte der Umsetzung des Ablaufes in Prozesse ist entscheidend für das Erreichen der geforderten Qualität und den wirtschaftlichen Erfolg. Beim Design von Prozessen und Aktivitäten für ein firmenweites QMS sind daher folgende Anforderungen besonders zu berücksichtigen (vgl. auch Kamiske et al., 2003):

- Klar geregelte Verantwortlichkeit für alle Aktivitäten
- Effektivität (Wirksamkeit) im Hinblick auf vorgegebene Aufgaben und Ziele
- Effizienz (Wirtschaftlichkeit)
  - Das Resultat ist unabhängig von der durchführenden Person bei gegebener Konstellation gleich
  - Der Anteil der manuellen (repetitiven) Tätigkeiten ist reduziert
  - Es sind geeignete Werkzeuge (insbesondere Sensoren und Software) zur Erbringung der Leistung vorhanden
  - Die Werkzeuge zur Erbringung der Tätigkeiten sind so konfiguriert, dass nur die Parameter angepasst werden können, die von Bedeutung sind (Eliminieren potentieller Fehlerquellen)
  - Die Prozesse sind aufeinander abgestimmt
  - Prozesse werden bei Bedarf verbessert (Kontinuierlicher Verbesserungskreislauf)
- Kontrollierbarkeit durch die verantwortliche Person
  - Es sind geeignete Werkzeuge für die Kontrolle von Input und Output vorhanden
  - Geeignete Korrekturmassnahmen sind für wiederkehrende Fälle bekannt, sie können einfach eingeleitet werden
- Anpassungsfähigkeit an Veränderungen der geforderten Leistungen und technischen Anforderungen (Ableiten der internen Spezifikationen aufgrund der Kundenspezifikationen)
- Prozessdokumentation, Dokumentenlenkung
  - Die Prozesse sind dokumentiert
  - Die eingesetzten Sensoren und Softwarewerkzeuge sind geprüft und dokumentiert (Kalibrierinformationen, Resultate von Softwaretests)
  - Input und Output eines Prozesses sind definiert
  - Aktueller Fortschritt in der Produktion ist bekannt, so dass keine Schritte übersprungen oder doppelt ausgeführt werden

Diese Forderungen sind allgemein gültig, nicht nur für ALS-Projekte, und müssen daher nicht weiter diskutiert werden. Sie können auch als Kriterienkatalog für eine vereinfachte Prüfung des QMS eines (Unter-)Auftragnehmers herangezogen werden. Aufgrund der grossen Datenmengen, die bei ALS anfallen und der Schwierigkeit, die Qualität von Geodaten (bzw. von DTM und DOM) quantitativ zu prüfen, werden diese Elemente des Qualitätsmodells separat in den Kapitel 4.7 bzw. 4.8 behandelt.

## 4.6 Managementprozesse

Die Managementprozesse beschreiben innerhalb des ALS-Qualitätsmodells Aktivitäten, die eigentlich ausserhalb der Realisierungsprozesse angesiedelt sind, aber die eine starke Auswirkung auf die Realisierung und damit auf die Produktqualität ausüben.

### 4.6.1 Projektmanagement

Im Prozess Projektmanagement sind die übergeordneten Tätigkeiten für die Abwicklung eines Projekts angesiedelt. Von besonderer Bedeutung für die Qualität der Endprodukte sind dabei neben der Planung und Steuerung der internen Prozesse die Kontakte mit Auftraggeber und allfälligen Unterauftragsnehmern (vgl. auch Abbildung 20). Bei ALS-Projekten sind häufig mehrere Firmen an der Realisierung beteiligt, da insbesondere der Flugbetrieb nicht zu den Kernaufgaben der Betreiber von ALS-Systemen gehört. Bei nicht ortsansässigen Auftragnehmern kann ein lokaler Partner die Kommunikation mit dem Auftraggeber sicherstellen. Die Koordination mit dem Auftraggeber und den Unterauftragnehmern sowie die Überwachung ihrer Aktivitäten ist eine grundlegende Aufgabe des Projektmanagers. Die regelmässige Kommunikation mit den beteiligten Partnern kann mithelfen, unterschiedliche Interpretationen frühzeitig zu erkennen oder Schwierigkeiten gemeinsam zu diskutieren, bevor sie zu Problemen werden.

Vor Projektstart muss der Projektmanager alle vorhandenen Informationen zusammentragen und den Ablauf des Projekts planen. Die Resultate dieser Analysen und Planungen fliessen in einen Projektmanagementplan (ISO 10006) ein. Der Projektmanagementplan ist das übergeordnete Steuerungs- und Kontrollinstrument für den Projektmanager. Er gründet auf den vom Auftraggeber festgelegten Projektzielen, den Produktbeschreibungen, den technischen Spezifikationen und den Terminvorgaben. Falls die technischen Spezifikationen unzureichend sind oder keine Tests zum Nachweis der Anforderungen möglich sind, sollten diese Mängel mit dem Auftraggeber diskutiert werden. Auch wenn diese Gespräche in der Praxis viel Fingerspitzengefühl erfordern, müssen Unzulänglichkeiten noch vor Projektbeginn geklärt werden.

Als wesentlicher Bestandteil der Projektplanungsaktivität ist das Erstellen eines Qualitätsplanes zu sehen. Im Qualitätsplan werden die für die Realisierung notwendigen Prozesse und Aktivitäten definiert (vgl. auch Anforderungen in ISO 10005). Wo möglich wird auf bereits bestehende Prozesse und Testmethoden zurückgegriffen. Die einzelnen Prozessschritte werden dann auf die projektspezifischen Anforderungen angepasst (vgl. Beispiel in Kapitel 4.4), die Checklisten und Testfälle adaptiert sowie die zugehörigen Qualitätsgrenzlagen definiert. Der Qualitätsplan stellt die Verbindung zum firmenweiten QMS her, indem auf die entsprechenden Prozesse und Aktivitäten verwiesen werden.

Zur Gewährleistung der vereinbarten Qualität erstreckt sich der Qualitätsplan auch auf die Leistungen der Unterauftragnehmer. Der Qualitätsplan muss beschreiben, welche Qualität die Prozesse erfüllen müssen und wie die Prozessresultate geprüft werden. In besonderen Fällen wird auch die Ausgestaltung der Prozesse vorgegeben. Es wird damit sichergestellt, dass die Qualitätsforderungen des Auftraggebers auch für den Unterauftragnehmer gelten<sup>31</sup>. Regelmässige Audits bei den Unterauftragnehmern helfen mit, die Qualitätsverpflichtungen langfristig zu erfüllen. Ein vereinfachtes Audit kann auf den Forderungen an die Realisierungsprozesse aus Kapitel 4.5 basieren.

Nebst dem Qualitätsplan fliessen auch die Resultate der weiteren Planungsaktivitäten wie Ressourcen- und Terminplanung, Risikoabschätzung, Kommunikation oder Finanzen in den Projektmanagementplan ein. Der Detaillierungsgrad der Projektdokumentation ist abhängig vom Projektumfang, aber auch bei kleinen Projekten sollten die bestehenden Prozesse auf die technischen Anforderungen des jeweiligen Kunden angepasst werden (Projektkonfiguration).

### 4.6.2 Kontinuierliche Verbesserung

Der kontinuierliche Verbesserungsprozess (KVP) zielt darauf ab, dass das Personal bei der Abwicklung oder Überwachung von Aktivitäten Potentiale zur Prozessoptimierung erkennt und Verbesserung angestossen werden. Voraussetzung für eine kontinuierliche Optimierung ist einerseits die Sensibilisierung des Personals (Wille zur Verbesserung) und andererseits die konsequente Umsetzung von geeigneten Massnahmen. Es sollen Werkzeuge bereit stehen, um Mängel zu melden und es muss sichergestellt sein, dass insbesondere Verbesserungen, die ohne grossen Aufwand erzielt werden können, laufend umgesetzt werden. Der KVP kann aber auch im Rahmen einer Projektreview angestossen werden im Sinne von „lessons learned“. Diese Aktivität zielt eher auf strukturelle Probleme, welche weitergehende Massnahmen bedingen wie z.B. Re-Engineering eines Prozesses.

---

<sup>31</sup> Die Schwierigkeit bei der Zusammenarbeit mit Unterauftragsnehmern besteht häufig darin, dass nur beschränkt auf die Prozesse (und die Ressourcenplanung) Einfluss genommen werden kann. Klare Strukturen, Spezifikationen, Testmethoden und Qualitätsgrenzlage gewähren wenigstens die Einhaltung der Qualitätsanforderungen.

### 4.6.3 Ausbildung und Training

Zur Sicherstellung der korrekten Durchführung der Prozesse durch die Sachbearbeiter ist für eine ausreichende Ausbildung zu sorgen. Durch die häufig wenig eindeutige Unterscheidung zwischen richtig und falsch in den ALS-Prozessen ist ein ganzheitliches Verständnis über den Prozessablauf Voraussetzung. Beim Prozessieren der Daten sind ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen und Kenntnisse über Topographie und Geomorphologie von Vorteil. Abgesehen von der Vermittlung dieser Grundausbildung muss das eingesetzte Personal auf die Adaption der projektspezifischen Spezifikationen im Rahmen eines gesonderten Trainings geschult werden. Diese projektbezogene Ausbildung darf nicht unterschätzt oder gar vernachlässigt werden, da die mögliche Prozesseffizienz sehr stark von den Sachbearbeitern abhängt, insbesondere im Bereich der visuellen Kontrolle der Punktfiltrierung.

### 4.6.4 Know-how Management

Zur Unterstützung der Sachbearbeiter in der Ausgestaltung von projektspezifischen Aktivitäten und in der Beurteilung von Resultaten muss das vorhandene Wissen strukturiert gesammelt und mittels einfacher Möglichkeiten zur Verfügung gestellt werden. Für die Grundausbildung sind typischerweise allgemeine Schulungsunterlagen und Prozessbeschreibungen geeignet. Sie sind eher statisch und werden häufig erst nach grösseren Änderungen nachgeführt. Die gemachten Erfahrungen (bzw. gefundene Ursachen und mögliche Lösungen) bei konkreten Problemen fließen eher nicht in Handbücher ein. Um diese wichtigen Informationen in die Prozesse einfließen zu lassen, sind sie mit anderen Methoden zu verteilen. Mit den heute verfügbaren Web-Technologien sind verschiedene Möglichkeiten denkbar, welche eine schnelle Weitergabe und einen einfachen Zugriff mittels Suchfunktionen ermöglichen: User Foren, Mail-Listen oder eine Wiki-Wiki-Plattform<sup>32</sup>. Durch den begrenzten Benutzerkreis können diese Plattformen mit geringem Managementaufwand betrieben werden.

## 4.7 Qualitätsprüfung

Mit den Qualitätsprüfungen wird der Nachweis erbracht, dass der zu prüfende Datensatz die vereinbarten Qualitätsmerkmale erfüllt. Voraussetzung für eine effiziente Prüfung und für eine korrekte Bestimmung, ob der Datensatz die Prüfung besteht oder nicht, sind wiederum ausreichend detaillierte Spezifikationen und die *gemeinsame* Festlegung der Prüfmethode und der akzeptierbaren Qualitätsgrenzlage. Ohne geeignete Indikatoren und der Definition eines Qualitätsmasses variieren die angewandten Kontrollen und die Aussagen zur „Qualität“ eines Datensatzes individuell je nach Betrachter (und insbesondere je nach Position als Auftraggeber bzw. Auftragnehmer).

Es können drei Typen von Prüfungen unterschieden werden:

1. *Eingangsprüfung*: vor Start eines Prozesses wird kontrolliert, ob alle notwendigen Angaben und Daten vorhanden sind, um den Prozess durchzuführen. Die Qualität der Eingangsdaten wird bevorzugt über vorhandene Prüfberichte verifiziert, so dass keine zusätzlichen Kontrollen auf den Daten notwendig sind. Zur Unterstützung der Eingangsprüfung haben sich Checklisten bewährt.
2. *Zwischenprüfungen*: Die Kontrolle auf Einhaltung der Spezifikationen muss zeitlich so nah an einer Aktivität (bzw. an einem Teilprozess) wie möglich erfolgen. Im Idealfall ist die Prüfung Bestandteil des Prozesses, da der Aufwand für die Behebung eines Mangels viel geringer ist, je früher dieser festgestellt wird. Dies gilt insbesondere für die Datenerfassung. Durch die zeitliche Trennung der Datenerfassung und -auswertung und wegen den bereits diskutierten unvermeidbaren Abweichungen bei Messungen und der Datenverarbeitung kann bei der Produktion von DGM mittels ALS nicht nur die *Prozessqualität* geprüft werden. Es müssen vielmehr alle quantitativen Qualitätsmerkmale kontrolliert werden („Data Driven“).
3. *Endprüfung*: Vor Abgabe des Produkts an den Kunden ist der Nachweis zu erbringen, dass die Konformität erfüllt wird. Im Idealfall werden hier keine Prüfungen mehr durchgeführt, sondern es wird die Vollständigkeit der vorangegangenen Zwischenprüfungen und die Konformität der Resultate unabhängig von den am Produktionsprozess beteiligten Sachbearbeitern kontrolliert, ein Gesamtbericht verfasst und die Metainformation erzeugt.

---

<sup>32</sup> Bekanntestes Beispiel auf dieser Plattform ist die freie Enzyklopädie von Wikipedia (<http://www.wikipedia.org>)

### 4.7.1 Methoden der Qualitätsprüfungen

Die verschiedenen Methoden zur Prüfung von Geodaten nach ISO 19114 wurden im Kapitel 1.6.4 kurz vorgestellt. Diese Methoden und ihre Eignung für ALS werden nun konkretisiert:

- *Indirekte Prüfung:* Da die vollständigen Informationen über die Erzeugung der Daten und Produkte vorliegen, ist die indirekte Prüfung nicht von Belang.
- *Interne Prüfung:* Die Integration der Qualitätsprüfungen im Produktionsprozess haben zum Vorteil, dass verschiedene Eigenschaften wie Auflösung, Präzision, Vollständigkeit, zeitliche Genauigkeit (bei vorgegebenem Befliegungsfenster) und logische Konsistenz anhand der Objekte direkt abgeleitet und geprüft werden können. Das Vorhandensein der vollständigen Prozessdokumentation mit allen Zwischenresultaten muss genutzt werden, um eine umfassende, aber effiziente und damit kostengünstige Qualitätsbeurteilung zu erzeugen.
- *Externe Prüfung:* Die externe Prüfung ist insbesondere für den Nachweis der äusseren räumlichen Genauigkeit von grosser Bedeutung. Ohne zusätzliche Datensätze können nur Aussagen zur Präzision gemacht werden (vgl. Kapitel 4.3.2). Externe Datensätze wie z.B. topographische Karten kommen vielfach bei der Interpretation von internen Prüfungen zum Einsatz, insbesondere wenn die Qualitätsgrenzlage nicht erfüllt ist. Weiter sind diese Datensätze bei der visuellen Beurteilung der thematischen Genauigkeit sehr wichtig, da wie im Kapitel 4.3.4 erwähnt die Klassifizierung der Punkte mit Fehlern verbunden ist und die zusätzlichen topographischen Informationen bei der Interpretation hilfreich sind. Falls der Zeitpunkt der Befliegung aufgrund von äusseren Umständen (Pegelstand, Vegetation oder Schnee) abhängig ist, erfolgt die Prüfung ebenfalls mit externen Informationen.

Bei allen Methoden ist abzuwägen, ob eine **automatische** oder **manuelle** (bzw. visuelle), eine **vollständige** oder **Stichproben**-Prüfung am geeignetsten ist. Automatisierte Prüfungen sind zu bevorzugen, da sie in den Prozess integriert werden können und aufgrund der Datenmenge manuelle (bzw. visuelle) Prüfungen nur für Stichproben möglich sind. Vollständige Kontrollen sind nur für einzelne Prozesse wie Flugplanung vertretbar oder wenn die Kontrolle mittels Monitoring des Prozesses erfolgen kann. Leider sind automatische Prüfungen nur bedingt für die Kontrolle von Produkten aus ALS geeignet, da ihre Resultate in der Regel einer visuellen Interpretation bedürfen: Bei der Prüfung der horizontalen Auflösung bzw. der Vollständigkeit mittels der Punktdichte führen verschiedene tolerierbare Gründe dazu, dass Daten in der automatischen Prüfung als nicht-konform beurteilt werden, aber in der nachfolgenden visuellen Kontrolle trotzdem akzeptiert werden (wie Datenlücken wegen Gewässern).

Der visuellen Kontrolle der Geländemodelle kommt offensichtlich eine sehr grosse Bedeutung zu. Die visuellen Prüfungen durch einen Sachbearbeiter sind aber kritisch hinsichtlich der Objektivität (Interpretationsspielraum) und der Vollständigkeit. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der (Nicht-)Akzeptanz eines Qualitätsmerkmals in der manuellen Kontrolle sind die Grundlagen für die Entscheidung mit Angaben zum Merkmal oder geographischer Lage zu begründen. Nicht zu vergessen ist, dass automatisierte Prozesse und Prüfungen vor ihrer Anwendung mit geeigneten Tests auf die Richtigkeit und Zuverlässigkeit zu kontrollieren sind.

Gesamthafte Prüfungen sind bei der Erzeugung eines neuen Datensatzes (im Rahmen der Möglichkeiten) besonders zu empfehlen. Der Umfang der Stichproben wird aufgrund der oben erwähnten potentiellen Mängel, welche in automatischen Prüfungen festgestellt werden, festgelegt. Bei automatischen Prozessen mit einem grossen Fehlerpotential wie beispielsweise der DTM-Filterung ist eine vollständige visuelle Kontrolle des aus den Punkten interpolierten DTM empfehlenswert. Eine vollständige Prüfung der als Terrain klassifizierten Punkte würde zu einem sehr ungünstigen Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag führen. Mit der Kontrolle der in geeigneter Form visualisierten Daten kann sichergestellt werden, dass die thematische Genauigkeit nicht von bedeutenden Abweichungen beeinflusst ist.

### 4.7.2 Kontrollen im Prozessablauf

Basierend auf dem Vorschlag für technische Spezifikationen im Kapitel 4.3.7 werden geeignete Qualitätsprüfungen über den gesamten Prozessablauf vorgeschlagen. Für jedes Qualitätsmerkmal wird in Abhängigkeit des Prozesses die Prüfmethode bestimmt (vgl. auch Ackermann und Eslami, 1996). Im Allgemeinen gilt, dass die Prüfung eines Merkmals so früh wie möglich in der Prozesskette erfolgt. Automatische Prüfprozesse wie die Formatierung werden ausserhalb des konkreten Projekts getestet und dann nur noch mittels Stichprobenkontrolle validiert.

<b>Merkmal</b>	<b>Prozess</b>	<b>Methode</b>
Vertikale Auflösung	(Periodisch)	Manuell: Regelmässige Prüfung der Sensoren und Software-Tools.
	DTM-Filterung	Manuell, Stichproben
Horizontale Auflösung	Flugplanung	Manuell, vollständig: Vergleich berechneter Abstand zu Spezifikation
	Befliegung	Manuell, vollständig: Korrekte Einstellungen am System Monitoring: Flughöhe und -geschwindigkeit
	Transformation	Automatisch, vollständig: mittlerer Punktabstand
Räumliche Genauigkeit	Flugplanung	Manuell, vollständig: Abschätzung erwarteter Genauigkeit
	Befliegung	Monitoring: Sensorsystem (PDOP, Anzahl Satelliten)
	GPS/IMS-Prozessierung	Manuell, vollständig: Analyse geschätzter Genauigkeit aus der POS-Software
	Transformation	Automatisch, vollständig: deduktive Berechnung aus allen Messwerten
	DTM-Filterung	Automatisch, Stichprobe: Vergleich Kontrollpunkte mit gefiltertem DTM. Manuell, vollständig: Analyse der Punkte mit Differenz > dreifache Standardunsicherheit
Thematische Genauigkeit	DTM-Filterung	Automatisch, vollständig: Suche nach Datenlücken im DTM Manuell, vollständig: Analyse der gefundenen Messlücken, die grösser als der Schwellwert sind
		Manuell, Stichprobe <sup>33</sup> : Suche nach nicht eliminierten DOM-Objekten
		Automatisch, vollständig: Suche im DTM nach nicht erkannten, einzelnen Oberflächenpunkten
Vollständigkeit	Flugplanung	Manuell, automatisch: Überlagerung Fluglinien/Flugstreifen mit Perimeter
	Befliegung	Manuell, vollständig: Korrekte Einstellungen am System, Wahl der Fluglinien Monitoring: vom System berechnete Streifenabdeckung, meteorologische Situation (Luftfeuchtigkeit, Nebel)
	Transformation	Automatisch, vollständig: Aufdecken von Datenlücken im Perimeter
Zeitliche Genauigkeit	Flugplanung	Manuell, vollständig: Abschätzung zu geeignetem Flugtermin
	Befliegung	Monitoring: Umwelt/Vegetation, Wasserstand, Schneedecke/-höhe
Logische Konsistenz	Transformation und Datenabgabe	Automatisch, vollständig: Prüfung des X/Y-Wertebereichs pro Kachel
	DTM-Filterung	Automatisch, Stichprobe: Vergleich Kontrollpunkte mit bekanntem Bezugssystem
	Datenabgabe	Automatisch, Stichprobe: Prüfung des Formats
	(Periodisch)	Manuell: Prüfung der Algorithmen und Software-Tools, unabhängig vom konkreten Auftrag. Automatisch, Stichprobe: Prüfung der Zellgrösse und Ausdehnung eines Rasters

**Tabelle 13 Prozessbezogene Qualitätskontrollen zur Prüfung der Spezifikationen eines DTM**

<sup>33</sup> Einschränkung bezüglich Stichprobe: jede Kachel wird visuell geprüft, aber nicht jeder einzelner Zellwert

### 4.7.3 Werkzeuge zur Qualitätskontrolle

Durch die Segmentierung der Datenverarbeitung bei ALS in verschiedene Prozessschritte (vgl. Abbildung 20), welche mit Hilfe verschiedenster Software-Werkzeuge durchgeführt werden, sind die verfügbaren Werkzeuge zur Qualitätskontrolle je nach Prozess von sehr unterschiedlichem Umfang. Im Folgenden werden die Sensoren und Softwareprodukte hinsichtlich ihrer Prüfmöglichkeiten vorgestellt. Das ALTM-Nav von Optech erlaubt eine visuelle Prüfung der Abdeckung (Vollständigkeit). Da die Fluglinien aufgrund der gegebenen Parameter für einen gegebenen Perimeter automatisch generiert werden, sind die Kontrolle der Eingangsdaten und der Scannereinstellungen sowie eine 4-Augen-Kontrolle geeignete Werkzeuge. Eine unabhängige Prüfung der Vollständigkeit mittels Verschneidung von Perimeter und berechneten Flugstreifen ist nicht enthalten, kann aber als zusätzliche Kontrolle von Nutzen sein.

Während der Datenerfassung informiert das Optech-System den Operator über den Zustand der Sensoren, hinsichtlich Systemausfälle und ob die festgelegten Werte wie PDOP, Flughöhe, Geschwindigkeit etc. eingehalten werden. Daneben stellt das System weitere Informationen über die Aufzeichnung der Lasermessung zur Verfügung:

- zur Überprüfung der Streifen-Überlappung wird die Abdeckung des Flugstreifens auf dem Gelände aus den aktuellen Winkel- und Rangemessungen und der genäherten Orientierung aus dem IMS berechnet (vgl. Abbildung 24)
- zur Kontrolle der Messleistung des Systems werden statistische Angaben über Anzahl der Mehrfachreturns und der Laserpulse ohne detektierbares Signal geliefert

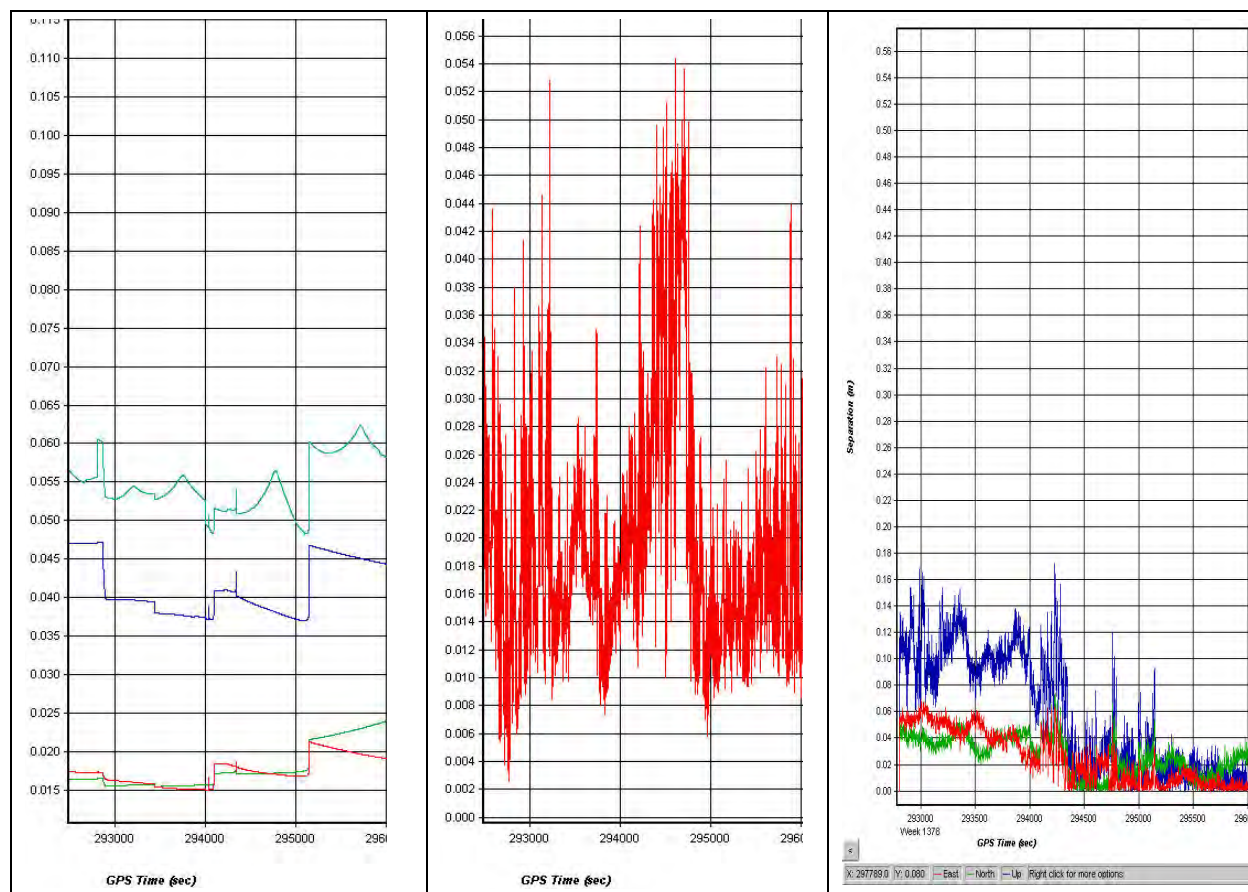
Diese Statistiken geben also einen recht umfassenden, generellen Eindruck vom Systemzustand. Allerdings kann sich der Operator damit kein Bild über die räumliche Verteilung von Datenlücken und die Verteilung der Reflektionen machen. Aussagen über die Penetration des Laserstrahls im Wald oder über die Vollständigkeit der Erfassung von Hochspannungsleitungen können nicht gemacht werden, obwohl sie von zentraler Bedeutung sind. Damit wird diese Kontrolle in der Prozesskette unnötigerweise weit nach hinten verlagert.

Für die Auswertung der GPS- und IMS-Messungen bietet Applanix zu seinen POS-AV Systemen das Software-Paket POSPac an<sup>34</sup>. POSPac enthält die Software zur Auswertung der DGPS-Lösung (POSGPS) und zur Kombination dieser Lösung mit dem IMS über einen Kalman-Filter (POSProc). POSPac verfügt über verschiedene Werkzeuge, um sowohl die Eingangsdaten wie die resultierende Trajektorie zu analysieren (siehe Abbildung 41). Aufgrund von Messredundanzen und Unsicherheitsmodellen wird die Standardunsicherheit der Trajektorie geschätzt. Diese kann zusammen mit weiteren Parametern wie PDOP oder der Differenz von Vorwärts- zu Rückwärtsprozessierung für eine Analyse dargestellt werden. Ebenso kann die Standardunsicherheit pro Messpunkt grafisch aufbereitet werden, so dass geprüft werden kann, ob allfällige grosse Abweichungen während des Scannens oder in einem Kurven- bzw. Transferflug erfolgten. Bei der Ausgabe der Trajektorie in ein neutrales Format können verschiedene Qualitätsindikatoren ausgegeben werden, so dass diese Informationen in den nachfolgenden Prozessen unabhängig von POSProc zur Verfügung stehen. Auch wenn erfahrungsgemäss die Qualitätsindikatoren viel zu optimistische Werte erzeugen (Landtwing, 2005) geben sie doch ein gutes Bild über das Vorhandensein von strukturellen Problemen und die Verteilung der räumlichen Genauigkeit. Die Qualitätsindikatoren von POSProc sind daher eine wichtige Basis für die deduktive, flächendeckende Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit.

---

<sup>34</sup> Homepage: <http://www.applanix.com/>





**Abbildung 41** Vergleich verschiedener Qualitätsindikatoren in POSGPS (Quelle Swissphoto)

**Links:** geschätzte Standardabweichung der DGPS-Lösung aufgrund PDOP/HDOP

**Mitte:** geschätzte Standardabweichung der Phasenmessungen (konkrete Messungen ausgewertet)

**Rechts:** Differenzen zwischen den beiden Lösungen vorwärts und rückwärts

**y-Achse:** Genauigkeit [m], **x-Achse:** zeitlicher Verlauf [s]

Für die Kontrolle der Filterung stehen in den verfügbaren Software-Paketen praktisch keine Werkzeuge zur Verfügung. Dies ist nicht überraschend, da einerseits der Fokus in der Entwicklung dieser Tools auf die Filteralgorithmen gesetzt wird und andererseits die Beurteilung der Qualität der Filterung sehr stark von den (schwierig quantifizierbaren) Anforderungen abhängt. Des Weiteren fehlen in den Standardwerkzeugen Möglichkeiten zur übergeordneten Kontrolle der Vollständigkeit der Erfassung (also nach dem Zusammenbringen von Daten aus mehreren Messflügen in die Kacheln) und zur Überwachung bzw. Steuerung des Arbeitsfortschrittes. Immerhin sind nun erste Tools auf dem Markt verfügbar, welche den Bereich Projekt- und Prozessmanagement umfassend abdecken und verschiedene Möglichkeiten zur Qualitätskontrolle an verschiedenen Stellen im Arbeitsablauf anbieten (Hug et al., 2004a; Niirst10, 2005).

Aus der Aufstellung in Tabelle 13 wird deutlich, dass die Resultate der automatischen Prüfung einer (visuellen) Interpretation bedürfen, falls das geforderte Qualitätsniveau nicht erreicht wird. An die visuelle Kontrolle wird der Anspruch gestellt, dass das Resultat unabhängig vom Sachbearbeiter ist und der gleiche Datensatz zu verschiedenen Zeitpunkten gleich beurteilt wird (Wiederholbarkeit der Prüfung). Um dieses Ziel zu erreichen, sind einige Randbedingungen zu beachten:

- es sind genügend und geeignete Datensätze für das Auffinden und Beurteilen des Sachverhaltes aufzubereiten,
- die visuelle Repräsentation der Datensätze muss immer gleich erfolgen (Anlegen eines konstanten Masstabes und Testumfeldes),
- es sind konkrete und klar definierte Prüfungen durchzuführen: das Bereitstellen einer Checkliste mit Angaben zur Qualitätsgrenzlage stellt die Vollständigkeit und die Zielorientierung sicher,
- die in automatisierten Prozessen gefundenen Mängel sind grafisch aufzubereiten, um eine effektive Prüfung zu ermöglichen,

- die Arbeitsschritte werden laufend dokumentiert, wobei insbesondere die zu einem Zeitpunkt gefundenen potentiellen Mängel (die dann entweder korrigiert oder akzeptiert werden) ausgewiesen und bei jedem Durchgang aktualisiert werden,
- in schwierig zu interpretierbaren Situationen wird der Datensatz zweifach geprüft (4-Augen Prinzip),
- ein ausführliches Training mit kontinuierlicher Weiterbildung garantiert das fachliche Fundament, welches mittels Referenzdatensätzen geprüft werden kann.

#### 4.7.4 Aufzeichnung der Qualitätsprüfung

Die Aufzeichnung der Resultate einer Qualitätsprüfung hat einen ebenso grossen Stellenwert wie die Prüfung selber. Mit dem Prüfprotokoll kann nachvollzogen werden, welche Kontrollen für welchen Datensatz bereits erfolgt sind und ob sie bestanden sind. Neben diesen Informationen zur Steuerung der Produktionsprozesse erlaubt eine gut strukturierte und vollständige Aufzeichnung der Qualitätsprüfung, dass auf Seiten des Kunden vor allem die aus einer Datenbank aufbereiteten Berichte kontrolliert werden müssen und nicht die Daten selber. Prüfungen auf den Daten können stichprobenweise erfolgen, so dass insgesamt viel weniger Aufwand betrieben werden muss. Im Bewusstsein, dass die Qualität von Geodaten nicht rein statistisch mess- und beurteilbar ist, muss zu Beginn eines Projektes der Interpretationsspielraum zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer abgeglichen werden.

Die Struktur der Datenablage kann sich an ISO 19115 (Metadaten) orientieren, so dass das Erzeugen eines Norm-konformen Berichts keine Umformatierung erfordert. Allerdings weist das Modell bei Datenerfassungen gewisse Schwächen auf, da die Entstehung des Datensatzes untergeordnet behandelt wird und da nur die abstrakten Testresultate, nicht aber der Entscheidungsweg beschrieben werden. Gerade die visuelle Beurteilung eines Gebietes durch einen Sachbearbeiter, welches in einer automatischen Prüfung als mangelhaft eingestuft wird, stellt eine wichtige raumbezogene Information dar. Sie ist daher zusätzlich zu den summarischen Testresultaten zur Verfügung zu stellen.

Zur Eliminierung der Schwächen von ISO 19115 hinsichtlich Dokumentation der Datenerfassung und aufgrund der doch recht kurzfristigen Veränderungen der Korrekturwerte aus der in situ Kalibrierung (vgl. Haebler, 2006) sollen die Kalibrierprotokolle der für einen Datensatz eingesetzten Sensoren Bestandteil der Metadaten werden. Dies erlaubt dem Auftraggeber, Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit der Datenerfassung zu ziehen. Das Kalibrierprotokoll enthält alle für die Nachvollziehbarkeit der Entstehung und den für einen Vergleich mit anderen Kalibrierungen notwendigen Angaben (nach Ingensand, 2005):

- Identifikation des Sensorsystems (Fabrikat, Serien-Nummer)
- Verweis auf die zugrunde liegende Laborkalibrierung
- Identifikation der Kalibriereinrichtung (welches Kalibrierfeld, wie viele Kontrollpunkte)
- Befliegungsinformationen (Flughöhe, Scannereinstellungen)
- Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftdruck und -feuchtigkeit, Wind)
- Messergebnisse
- Messunsicherheit der Messergebnisse
- Methodik zur Bestimmung der Messergebnisse, Auswertung der Trajektorie
- Datum und Visum von ausführender bzw. überprüfender Person

## 4.8 Datenmanagement

Durch die riesige Datenmenge und die heterogenen Datensätze kommt dem Datenmanagement eine grosse Bedeutung zu. In Kapitel 3.10 wurden bereits die beiden wichtigsten Ziele des Datenmanagements erwähnt: die richtigen Daten zur richtigen Zeit am richtigen Ort verfügbar halten und den vorhandenen Speicherplatz optimal ausnutzen. Ein ungenügendes Datenmanagement kann schwerwiegende Qualitätsmängel zur Folge haben, indem Prozesse zweifach durchgeführt oder übersprungen werden, wichtige Dokumentationen verloren gehen oder gar falsche Daten in einen Prozess eingehen. Es ist daher eine IT-gestützte Prozessumgebung notwendig, in welcher die Arbeitsschritte festgehalten werden und in welcher die korrekte Zuweisung von Datensätzen zu Projekten sichergestellt wird (vgl. auch Kapitel 4.9.2). Sie gewährleistet die Vollständigkeit, Zuverlässigkeit und Aktualität der sich in Bearbeitung befindlichen Daten (z.B. welche Systemkalibrierparameter bei welcher Datenerfassung). Neben diesen

wichtigen technischen Grundlagen ist für ein effizientes Datenmanagement eine klare Organisation notwendig.

Bei der Organisation der Daten muss zwischen Datensätzen unterschieden werden, welche in einer Datenbank und solchen, welche – häufig aus Performancegründen – als Dateien auf einem Datenserver gehalten werden. Die Speicherung in einer Datenbank bietet gegenüber der Datei-basierten Ablage den Vorteil, dass Informationen einfach gesucht und Attribute aus mehreren Tabellen mittels Relationen zueinander in Beziehung gebracht werden können. Die Mehrbenutzerfähigkeit von Datenbanken unterstützt die Verwaltung von prozessbezogenen Informationen in grösseren Projekten, an denen jeweils mehrere Sachbearbeiter beteiligt sind. Datensätze, welche nur kurzfristig vorhanden sind (wie temporäre Daten zur visuellen Qualitätskontrolle) oder viel Speicherplatz beanspruchen und trotzdem mehrfach geändert werden (insbesondere Punktwolke), werden bevorzugt auf einem Datenserver verwaltet.

Da mehrere Software-Werkzeuge von verschiedenen Anbietern für die Datenauswerteprozesse eingesetzt werden und da die Programme wie REALM oder POSpac keine standardisierte Datenbank unterstützen, können zur Zeit nicht alle notwendigen Informationen nur in einer zentralen Datenbank gehalten werden, wie dies zur Vereinfachung der Datenorganisation und zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit gewünscht wäre. Zumindest sollten aber die wesentlichen Informationen der Resultate dieser Programme in ein anwendungsneutrales Format exportiert und in einer Produktionsdatenbank abgelegt werden. Die in den Log-Protokollen enthaltenen Informationen (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7) sind zu filtern und können dann ebenfalls in der Datenbank abgelegt werden. Somit kann beispielsweise aus dem Zeitstempel eines Punktes über die Trajektorie die zugrunde liegende Mission und innerhalb der Mission der Flugstreifen mit den Angaben über die tatsächlichen und geplanten Lasereinstellungen gefunden werden. Diese Informationen können dem Sachbearbeiter in der Qualitätskontrolle mithelfen, die Ursachen für mangelhafte Daten zu finden (oder auch auszuschliessen).

Die Messwerte und Systemzustandsdaten aus den Sensoren werden während der Erfassung und den direkt damit verbundenen Auswertungen nach Missionen und Fluglinien organisiert. Erst für die Klassifizierung werden die Rohpunkte der Flugstreifen in projektbezogene Kacheln unterteilt. Die Unterteilung in starre Kacheln hat zwar den Nachteil, dass nicht beliebige Ausschnitte bearbeitet werden können. Dafür wird der Aufwand zur Dokumentation der Produktion reduziert, indem die prozessrelevanten Angaben (Status der Bearbeitung, Resultate von Qualitätskontrollen etc.) jeweils mit der Kachel verknüpft werden. Über Zuordnung von Kacheln zu Blöcken bzw. Regionen lassen sich übergeordnete Auswertungen ohne räumliche Selektion durchführen. Da aber die Anzahl der Datensätze ausserhalb der Datenbank sehr gross werden kann, ist eine strikte Organisation der Daten (Verzeichnisstruktur) und die Einhaltung von Namenskonventionen sehr wichtig.

## 4.9 Produktionssystem für ALS

Erstaunlicherweise fehlt bei allen kommerziell verfügbaren ALS-Sensoren ein Softwarepaket für die Verarbeitung der Punktwolke. Mit TerraScan (von TerraSolid) oder SCOP++ (von Inpho GmbH) sind immerhin zwei „off-the-shelf“ Produkte auf dem Markt für die Klassifizierung der Punkte. In diesem Kapitel werden drei wichtige Komponenten eines Produktionssystems für ALS-Daten beschrieben, welches die folgenden Managementprozesse unterstützen:

1. **Qualitätsmanagement:** Aufbereitung geeigneter Datensätze und Durchführung von automatisierten und visuellen Kontrollen.
2. **Projektmanagement:** aktuelle Informationen über den Stand der Produktion und Erzeugen von Qualitätsberichten
3. **Prozessmanagement:** automatische Verwaltung und Verarbeitung von Prozessen

Vergleichbare Ansätze zu einem Produktionssystem sind bei (Hug et al., 2004a; Niirst10, 2005) beschrieben, wobei in beiden Produkten dem Qualitätsmanagement nicht eine gleich bedeutende Stellung zugeräumt wird.

Die Architektur der Lösung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

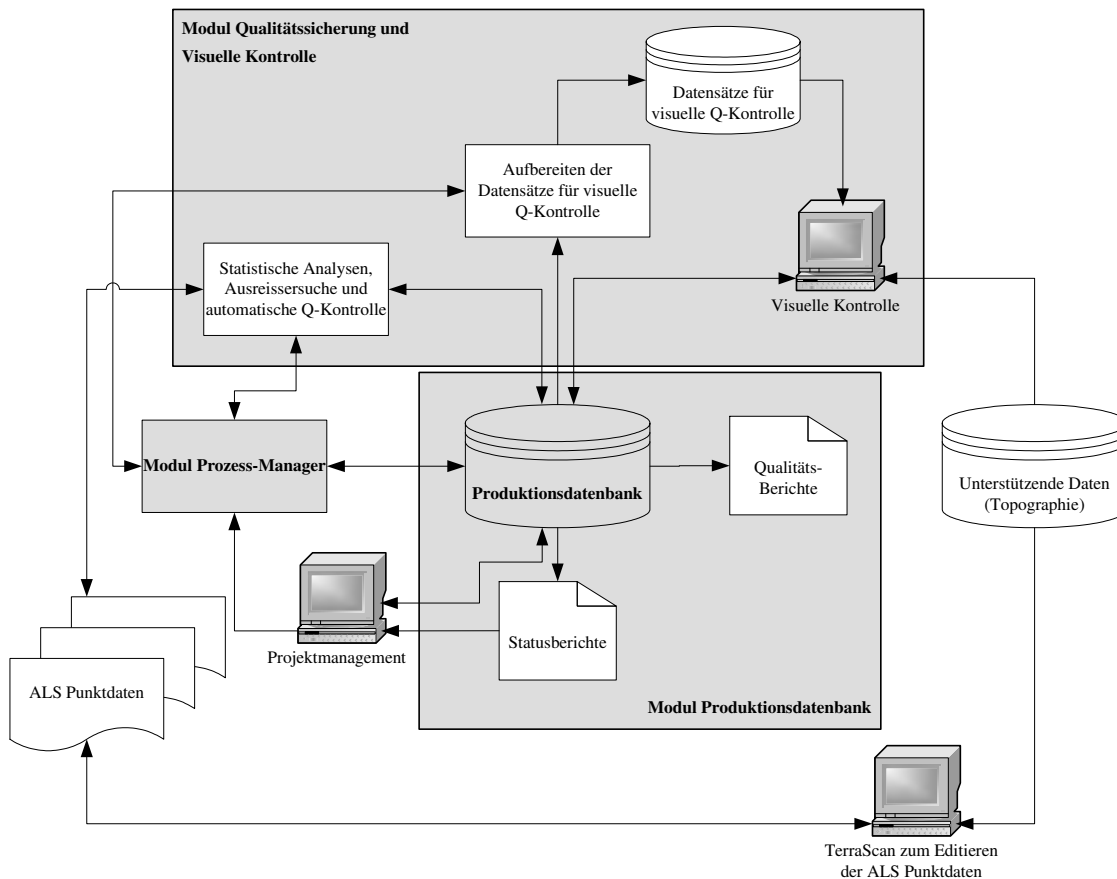


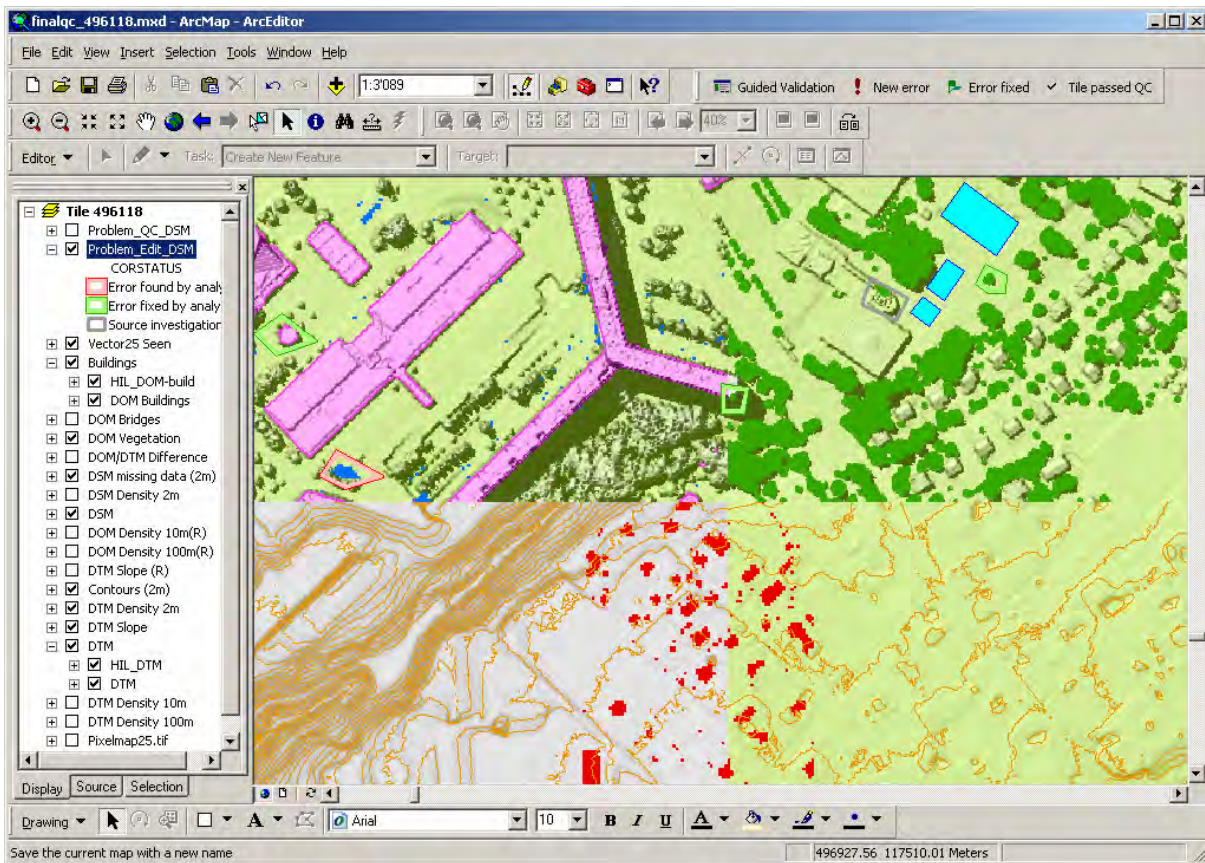
Abbildung 42 Architektur des Produktionssystem

#### 4.9.1 Modul Qualitätssicherung und Visuelle Kontrolle

Das Modul *Qualitätssicherung und Visuelle Kontrolle* zielt darauf ab, den Interpretationsspielraum des Sachbearbeiters bei der visuellen Qualitätsbeurteilung durch standardisierte Testmethoden und Fokussierung auf festgelegte Testfälle einzuschränken. Ohne diese Standardisierung braucht erfahrungsgemäss jeder Sachbearbeiter eigene Methoden und je nach Know-how, Wille und Einsatzbereitschaft werden nur gerade einzelne Visualisierungen mit mehr oder weniger geeigneter Symbolisierung erzeugt und gebraucht. Als Folge davon wird die gleiche Kachel je nach Sachbearbeiter unterschiedlich beurteilt. Im Modul Visuelle Kontrolle werden die Datensätze für die visuelle Prüfung einheitlich und den Qualitätsanforderungen entsprechend aufbereitet, dargestellt und mit zusätzlichen Informationsquellen wie Pixelkarte oder Orthophoto hinterlegt. In Ergänzung zu den visuellen Kontrollen beinhaltet das Modul auch alle statistischen Tests, welche zum quantitativen Nachweis der Konformität notwendig sind. Im Folgenden sind die wichtigsten Datensätze bzw. Berechnungen für die Qualitätssicherung und visuelle Kontrolle erläutert (vgl. auch Abbildung 43):

- DTM** *Aus den klassifizierten Punkten über Triangulation (Delaunay) und Interpolation abgeleitetes Terrainmodell. Die Triangulation erzeugt ein lückenloses DTM, so dass eine mangelhafte Filterung (z.B. im Wald) und tief liegende Punkte auch bei geringer Punktdichte erkennbar sind.*
- DOM** *Aus den klassifizierten Punkten abgeleitetes Raster, wobei der Höhenwert aus dem lokalen Maximum bestimmt wird und kleine Datenlücken aus den Nachbarschaftspunkten interpoliert werden. Die Maxima-Methode hat den Vorteil, dass Vegetation sehr voluminös wirkt und so Differenzen zum DTM deutlich hervor treten. Nicht eliminierte positive Ausreisser heben sich zudem durch dieses Verfahren in Kombination mit der Schummerung klar von der Umgebung ab.*
- Schummerung** *Auf der Basis DTM (bzw. DOM) wird eine Schummerung berechnet und ermöglicht in halbtransparenter Überlagerung eine plastische Wiedergabe des*

	<i>Basismodells. Die Schummerung dient zur allgemeinen Beurteilung der Datenqualität und hilft bei der Suche nach Ausreissern und Mängeln in der Punktklassifizierung. Die Schummerung hat den Nachteil, dass es zu sehr hellen bzw. zu dunklen Regionen kommen kann, welche nur eingeschränkt beurteilbar sind.</i>
<i>Höhen-Schichtlinien</i>	<i>Aus dem DTM werden Höhenlinien abgeleitet. Das Intervall richtet sich nach der lokalen Neigung, um relativ dichte, aber trotzdem noch gut lesbare Schichtlinien zu erzeugen. Diese erfüllen keine kartographischen Anforderungen, die Darstellung ist aber geeignet, um ein lokales Rauschen (ungenügende Übereinstimmung mehrerer Flugstreifen), nicht eliminierte Ausreisser oder unvollständig gefilterte DOM-Objekte zu erkennen.</i>
<i>Neigungsraster</i>	<i>Ähnlicher Zweck wie die Schummerung, jedoch nur für das DTM aufbereitet. Das Neigungsraster hat den Nachteil, dass in steilen Gebieten die Details schnell verloren gehen, kompensiert dafür an vielen Stellen die Nachteile der Schummerung.</i>
<i>Punktlichteraster</i>	<i>Aus den klassifizierten Punkten lassen sich Dichteverteilungen in verschiedenen Einheiten (Zellgrößen) berechnen. Die kleinste Einheit richtet sich nach dem vereinbarten durchschnittlichen Punktabstand. In der visuellen Kontrolle werden Zellen ohne Messungen ausgewiesen, so dass vom Filter nicht erkannte Terrainzonen, unvollständig eliminierte Gebäude oder fälschlicherweise als Fehlmessungen klassifizierte Punkte mit diesem Raster gut sichtbar werden. Größere Einheiten basieren auf den Forderungen nach mittlerem Punktabstand (z.B. pro ha). Sie helfen mit, strukturelle Mängel in der Datenerfassung aufzudecken.</i>
<i>Normalisiertes DOM</i>	<i>Logische Inkonsistenzen wie DTM höher als DOM werden einfach erkannt, wenn die <b>Differenz</b> DOM-DTM berechnet und mit einer geeigneten Symbolisierung dargestellt wird. Das normalisierte DOM unterstützt auch die Suche nach nicht permanenten DOM-Objekten wie Fahrzeuge oder jährlich wechselnde Vegetation.</i>
<i>Ausreisser</i>	<i>Die Funktion zur Bestimmung von Ausreissern wird direkt auf die Punkte angewandt (vgl. Ausführungen in Kapitel 3.11.1). Sie erkennt einerseits die groben Messfehler im DOM (positive und negative Abweichungen) und kann durch feinere Parametrisierung auch zur Eliminierung einzelner nicht erkannter DOM-Punkte im DTM eingesetzt werden.</i>
<i>Streifendifferenzen</i>	<i>Zum Nachweis der räumlichen Genauigkeit kann die Präzision der Daten durch Bildung der Differenz zwischen den einzelnen Streifen nachgewiesen werden. Aus den klassifizierten Geländepunkten wird über Triangulation pro Streifen ein DTM bestimmt. Aus zwei DTM wird die vertikale Differenz (und die empirische Standardunsicherheit) gerechnet, falls sich die beiden ausreichend überlappen.</i>
<i>Kontrollpunkte</i>	<i>Die Differenz zwischen genaueren Kontrollpunkten und dem DTM wird für alle Kacheln bestimmt, in welchen Kontrollpunkte vorhanden sind. Werte grösser als die geforderte Genauigkeit werden analysiert und der Sachbearbeiter selektiert eine kurze Bemerkung aus einer vorgegebenen Auswahl (nähe zu Bruchkante, geringe Punktdichte etc.)</i>
<i>Unterstützende Daten</i>	<i>Zusätzlich zu den aus der Punktwolke abgeleiteten Daten können verschiedene weitere Datensätze für die visuelle Prüfung geladen werden. Sie sind ausführlich im Kapitel 3.10.5 beschrieben. Die unterstützenden Daten können zu Problemen führen, wenn sie nicht eine ähnliche Aktualität aufweisen wie die ALS-Daten. Divergierende Informationen führen zu Unsicherheiten und zu einem grossen Aufwand bei der Ursachensuche (vgl. Problematik Lothar in Kapitel 5.3.2)</i>



**Abbildung 43 Visuelle Kontrolle der Punktklassifizierung durch Überlagerung verschiedener abgeleiteter Datensätze**

**Oben:** geschummertes DOM mit klassifizierten Gebäuden (links) bzw. Vegetation (rechts) thematisch hervorgehoben. Die Gewässer (blau) sind im Vektordatensatz enthalten. Die vom Sachbearbeiter manuell erfassten Polygone dokumentieren die erkannten (rot umrandet), korrigierten (grün) oder die aufgrund der vorhandenen Informationen als fraglich beurteilten Mängel (grau).

**Unten:** Neigungsraster vom DTM (links) und geschummertes DTM (rechts). Beide überlagert mit den Höhengleichlinien. In der Mitte sind die DTM-Datenlücken mittels PunktdichteraSTER (rot = keine Punkte) hervorgehoben.

Die Sachbearbeiter müssen intensiv geschult werden, damit sie die visuelle Kontrolle immer nach dem gleichen Schema durchführen (Objektivierung der Prüfung). Die am häufigsten auftretenden Probleme können mit einem einzelnen oder mit einer Kombination verschiedener der oben aufgeführten Datensätze erkannt werden. Wenn ein Verdacht auf systematische Mängel in der Datenerfassung besteht, können zusätzliche Datensätze wie die geplanten Fluglinien oder die ausgewertete Trajektorie zur Beurteilung dazu geladen werden. Als mangelhaft beurteilte Stellen werden vom Sachbearbeiter in einem eigenen Datensatz als Polygon erfasst, kommentiert und als Zustandsdokumentation als Bild gespeichert. Das Bild kann in TerraScan geladen werden, um die gefundenen Mängel einfacher zu lokalisieren. In der nachfolgenden Iteration kann der Sachbearbeiter die vorher erzeugten Polygone und Bilder wieder laden, so dass in der visuellen Kontrolle zielgerichtet diese Stellen nochmals geprüft werden (Vergleich vorher – nachher). Die mit Kommentaren versehenen Polygone aus der visuellen Prüfung können zur Dokumentation der Qualitätskontrolle zusammen mit den Daten an den Auftraggeber geliefert werden. Dies mit dem Ziel, dass der Kunde weiss, an welchen Stellen die Klassifizierung bereits verbessert wurde, aber unter Umständen das Modell immer noch nicht „schön“ aussieht<sup>35</sup>. Die Resultate der Prüfungen und der Entscheidung, ob die Qualitätsgrenzlage erfüllt ist, wird in der Produktionsdatenbank dokumentiert und festgehalten.

<sup>35</sup> Je nach Betrachter können diese Stellen mangels quantitativer Qualitätskriterien in der Filterung unterschiedlich interpretiert werden.

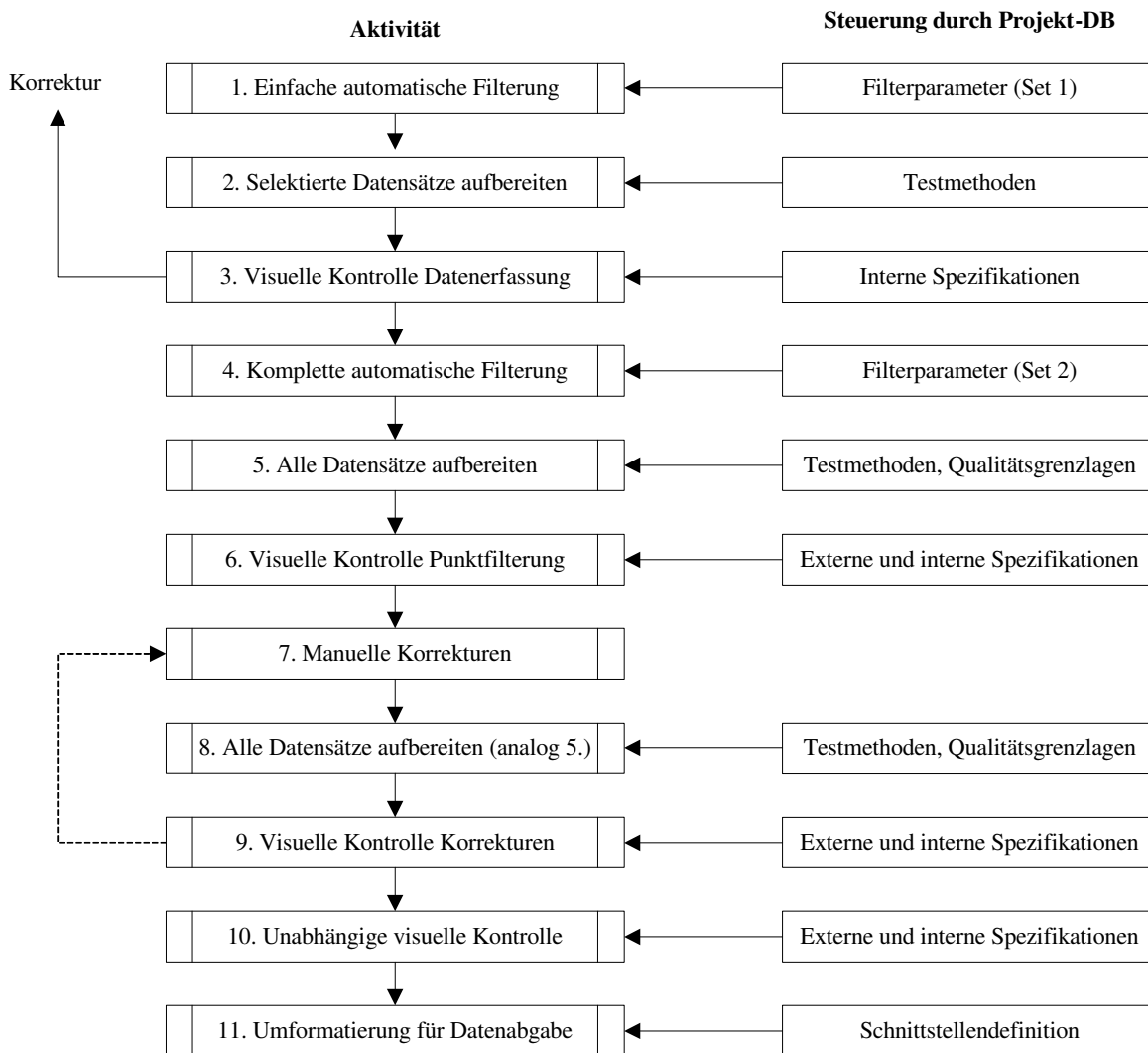
### 4.9.2 Modul Produktionsmonitoring

Das Modul Produktionsmonitoring umfasst eine Datenbank-basierte Haltung aller relevanten Informationen für das Projekt- und Qualitätsmanagement, Eingabemasken zur Festlegung von Prozessfolgen, Testfällen und verschiedene Auswertefunktionen. In der Datenbank werden somit alle Informationen abgelegt, die zur Überwachung, Steuerung und Dokumentation des Projekts notwendig sind. Etliche dieser Angaben können aus den vorhandenen Datensätzen abgeleitet und für eine statistische oder visuelle Beurteilung des Produktionsfortschritts verwendet werden. Statusinformationen zu einzelnen Prozessen, Missionen oder Kacheln werden bei interaktiven Arbeitsschritten durch die jeweiligen Bearbeiter erfasst. Automatisierte Prozesse wie z.B. das Modul Qualitätssicherung aktualisieren den Status nach Abschluss einer Aufbereitung direkt in der Datenbank. Zusätzlich zu den Statusinformationen kann die Konfiguration jedes Projekts in der Datenbank verwaltet werden.

Die Projektkonfiguration dient der Steuerung der Produktionsprozesse. Sie basiert auf dem Qualitätsplan und beinhaltet die Qualitätsmerkmale, formalisierte Testmethoden und die Qualitätsgrenzlagen für die einzelnen Prozesse. Weitere mögliche Angaben sind die Prozessabfolge, das Datenmodell bzw. die Schnittstellendefinition, die Festlegung von Wertebereichen, die Definition der Interpolationsmethoden und der Zellgrößen eines Endprodukts in Rasterform. Je besser diese Konfigurationsparameter formalisiert sind und damit in einer strukturierten Datenbank abgelegt werden können, umso mehr eignen sie sich als Steuergrößen für automatische Berechnungen. Aber auch nicht formalisierte Informationen (z.B. Produktdefinitionen) sind hilfreich, indem die Sachbearbeiter die Anforderungen des aktuell in Bearbeitung befindlichen Projekts kennen oder bei Unklarheiten einfach darauf zugreifen können.

Die Statusinformationen werden für jeden Prozess bzw. für jede Aktivität, die in der Projektkonfiguration definiert sind, verwaltet. Für die Bereiche Datenerfassung und Auswertung der Rohmessungen werden die Angaben pro Mission, für die Prozesse Punktfiltrierung und Modellbildung pro Kachel erfasst. Im Folgenden wird der Aufbau und Nutzen der Produktionsdatenbank für das Qualitätsmanagement im Bereich Punktfiltrierung/Modellbildung detaillierter beschrieben, da mehr Objekte als über die Befliegung zu verwalten sind und da der Prozess komplexer aufgebaut ist.

Zur Unterteilung des Projektperimeters in geeignete Bearbeitungseinheiten werden die Kacheln (Bearbeitungseinheit in der Punktfiltrierung) zu Blöcken zusammengefasst. Beide Einteilungen müssen das gesamte Projektgebiet lückenlos abdecken. Die Dimensionierung richtet sich nach den Abgabeeinheiten, können aber auch auf die Möglichkeiten der eingesetzten Software (Kacheln) oder auf die topographische Gliederung angepasst werden. Die Aktivitäten pro Kachel und die Reihenfolge der Abarbeitung dienen der Festlegung, welche Statuswerte gültig sind. Sie können in der Projektkonfiguration z.B. wie folgt vorgegeben werden:



**Abbildung 44 Definition des Ablaufs von kachelbasierten Aktivitäten und Steuermöglichkeiten mittels Produktionsdatenbank (Projektkonfiguration)**

Bei Beginn der Produktion eines Projekts (bzw. eines Blocks) enthält die Datenbank hinsichtlich des Produktionsfortschritts jeweils nur gerade die Angaben, welche Kacheln zu prozessieren sind. Nach jeder automatischen Filterung oder nach jedem Aufbereiten der Datensätze für die visuelle Kontrolle werden pro Kachel Prozessdatum und -zeit automatisch aktualisiert. Die Sachbearbeiter führen ihrerseits die Datenbank nach jedem Prozessschritt manuell nach. So kann der aktuelle Stand einer Kachel im Detail abgefragt oder der Produktionsfortschritt in einer grafischen Umsetzung übersichtlich dargestellt werden.

Die Definition der Testfälle für das aktuelle Projekt in der Projektkonfiguration dient der Generierung der grafischen Benutzeroberfläche zur Unterstützung der visuellen Kontrolle und Dokumentation der Resultate in der Produktions-Datenbank (vgl. Abbildung 45). Im Kopfteil werden Projekt, Art der Prüfung, Block und zu prüfende Kachel ausgewählt. Metainformationen zur aktuellen Kachel (insbesondere der Prozessverlauf und statistische Informationen) lassen sich jederzeit abrufen. Zum Starten der Prüfung werden die Daten in einen Viewer geladen und der untere Teil des Formulars wird eingeblendet. Für jedes konfigurierte Produkt des aktuellen Projektes wird ein Register erzeugt. Die Farbgebung gibt an, ob alle Prüfungen des Produkts bestanden sind (grün) oder nicht (rot). Aus den vorgegebenen Checks der aktuellen Prüfungsart wird eine Liste generiert, die der Sachbearbeiter dann abarbeitet. Für jeden Check wird das Resultat erfasst und im Fall von Nichterreichen der geforderten Qualität müssen zusätzliche Details (räumliche Ausdehnung und kurze Erläuterung) eingegeben werden. Wo automatische Prüfungen durchgeführt werden, können zur Unterstützung der visuellen Beurteilung die statistischen Angaben abgefragt werden. Die aktuell gültigen Spezifikationen und Qualitätsgrenzlagen lassen sich für jeden Qualitätsindikator anzeigen.



**Abbildung 45 Grafische Benutzerführung für die visuelle Prüfung**

Die Produktionsdatenbank mit den beiden Teilen Projektkonfiguration und Produktionsstatus sowie der Dokumentation von Qualitätsprüfungen sind durch die strukturierte Ablage aller prozessrelevanten Informationen *das* zentrale Führungsinstrument für den Projektmanager. Die einfachste Darstellung der Produktionsinformationen ist die grafische Umsetzung der Statusinformationen. Räumliche Clusters können Hinweise zu Schwierigkeiten eines Sachbearbeiters oder zu einer Region mit Schwachstellen in der Datenerfassung (z.B. schlechtere Penetration im Wald und dadurch Mehraufwand in der Filterung) geben. Die Anzahl der Iterationen für die manuelle Korrektur oder die Menge der beanstandeten Fehler in der Endkontrolle kann Hinweise auf die Effizienz eines Sachbearbeiters geben. Aus den Resultaten und Dokumentationen der Qualitätsprüfungen können verschiedene Berichte zuhanden des Auftraggebers generiert werden, die das Erfüllen der vereinbarten Qualität nachweisen (vgl. Abbildung 46 und Abbildung 47). Durch den Vergleich zwischen Projektplanung und tatsächlichem Fortschritt dienen die Informationen in der Datenbank auch als Frühwarnsystem hinsichtlich Einhaltung von Terminen und können damit wichtige Hinweise für den wirtschaftlichen Erfolg geben.


*Projekt LWN* **swissphoto** 

**Höhenvergleich GPS-TIN, Blatt 1185 DTM**

1/64	Punkt Nr.	GPS X ch03 [m]	GPS Y ch03 [m]	GPS Z ortho. [m ü.M]	TIN Z [m ü.M]	Diff. GPS-TIN [m]	Kommentar
1185423	99996188	581027.07	185522.43	700.68	700.55	<b>0.13</b>	
1185423	99996189	581023.93	185525.88	699.15	699.17	<b>-0.02</b>	
1185423	99996190	581021.64	185528.14	698.93	698.95	<b>-0.02</b>	
1185423	99996191	581019.55	185529.67	700.10	700.03	<b>0.07</b>	
1185423	99996192	581017.68	185531.60	701.20	701.38	<b>-0.18</b>	
1185423	99996193	581016.27	185532.81	701.52	701.58	<b>-0.07</b>	
1185423	99996194	581014.80	185534.56	701.66	701.55	<b>0.11</b>	
1185423	99996195	581010.51	185540.91	701.47	701.47	<b>0.00</b>	

**Mittelwert**      **0.06 m**  
**Standardabw.**    **0.10 m**  
 Minimalwert      -0.18 m  
 Maximalwert      0.52 m

Abbildung 46 Letzte Seite aus einem Bericht über die räumliche Genauigkeit (Quelle Swissphoto)

*Projekt LWN* **swissphoto** 

**Qualitätsbeurteilung Blatt 1226 DTM**

Kachel, Beschreibung	Punktdichte Pt/ha	Slopes	Differenz zu DHM25	Gesamtbewertung
<b>1226221</b> mittel felsig, eher steil, Gebirgswald, viel Geröll	Anzahl Punkte 2'221'324 0 - 1370    0.0 % 1370 - 3900    6.7 % > 3900    93.3 %  <b>Bewertung: 1</b>	50 - 70 ° -9999.0 % > 70 ° -9999.0 %  <b>Bewertung: 1</b>	5 - 10 m -9999.0 % > 10 m -9999.0 %  <b>Bewertung: 1</b>	gute Punktdichte im offenen Gelände; Fels- und Geröllgebiete schwierig  <b>Bewertung: 1</b>
<b>1226222</b> schwierig steil, 80% Wald, markante felsige Gewässerereinschnitte	Anzahl Punkte 1'478'464 0 - 1370    2.9 % 1370 - 3900    43.2 % > 3900    54.0 %  <b>Bewertung: 2</b>	50 - 70 ° -9999.0 % > 70 ° -9999.0 %  <b>Bewertung: 1</b>	5 - 10 m -9999.0 % > 10 m -9999.0 %  <b>Bewertung: 2</b>	sehr geringe Punktdichte wegen Wald und Felsen  <b>Bewertung: 2</b>
<b>1226223</b> mittel Streusiedlung, hügelig, 65% Wald, vereinzelt Fels	Anzahl Punkte 1'706'886 0 - 1370    0.0 % 1370 - 3900    36.2 % > 3900    63.8 %  <b>Bewertung: 2</b>	50 - 70 ° -9999.0 % > 70 ° -9999.0 %  <b>Bewertung: 1</b>	5 - 10 m -9999.0 % > 10 m -9999.0 %  <b>Bewertung: 1</b>	vereinzelt Datenlücken im Wald  <b>Bewertung: 2</b>
<b>1226224</b> mittel viel Streusiedlung, markante Gewässer, 10% Wald, vereinzelt Fels	Anzahl Punkte 2'354'832 0 - 1370    1.0 % 1370 - 3900    10.2 % > 3900    88.8 %  <b>Bewertung: 2</b>	50 - 70 ° -9999.0 % > 70 ° -9999.0 %  <b>Bewertung: 1</b>	5 - 10 m -9999.0 % > 10 m -9999.0 %  <b>Bewertung: 2</b>	Im Wald und auf Felsen sehr z.T. sehr geringe Punktdichte  <b>Bewertung: 2</b>

10.07.2006 Seite 6 von 16

Abbildung 47 Auszug aus einem umfangreichen Qualitätsbericht des Auftragnehmers pro Kachel (Quelle Swissphoto)

### 4.9.3 Modul Prozess-Manager

Die Aufbereitung der Datensätze für die Qualitätskontrolle wird mit den Informationen aus der Projektkonfiguration parametrisiert und gesteuert. Zur Automatisierung der Aufbereitung und zur Optimierung der vorhandenen Hardware-Ressourcen (Clients) dient der *Prozess-Manager*. Dieses Programm selektiert in der Produktionsdatenbank eine der Kacheln, welche einen entsprechenden Status aufweist, und bereitet aufgrund der Projektkonfiguration die Datensätze auf. Nach Abschluss der Aufbereitung wird der Status in der Datenbank aktualisiert und die Resultate der quantitativen

Qualitätsprüfungen werden eingefügt. Da für jeden Client die zu prozessierende Region und das zur Verfügung stehende Zeitfenster definiert werden kann, wird solange eine neue Kachel selektiert und prozessiert, bis entweder der Job abgearbeitet oder das Zeitfenster abgelaufen ist. Durch einen Lock-Mechanismus in der Produktionsdatenbank wird sichergestellt, dass zur Beschleunigung der Datenaufbereitung der Prozess-Manager auf beliebigen Clients laufen und somit mehrere Kacheln gleichzeitig prozessiert werden. Das Modul erlaubt durch diese Funktionen, dass die Rechnerressourcen über Nacht und über das Wochenende optimal ausgenutzt werden. Durch die parallele Verarbeitung der Kacheln eines Blocks auf mehreren Rechnern bleiben die Auswirkungen beim Ausfall eines Clients gering.



## 5 Analyse und Verbesserungsmöglichkeiten aus dem Projekt Landwirtschaftliche Nutzflächen

### 5.1 Einführung zum Projekt

Das Bundesamt für Landestopographie startete 1999 zusammen mit dem Bundesamt für Landwirtschaft ein Projekt mit dem Ziel, die Landnutzung im Vermessungskataster aufzudatieren<sup>36</sup>. Man hatte festgestellt, dass in verschiedenen Landesteilen die Katasterdaten dynamisch ändernder oder natürlicher Objekte wie z.B. Bäche oder Waldgrenzen nicht aktuell sind und in etlichen Fällen der Wald sich auf Kosten von Landwirtschaftsland ausbreitete. Da aber gleichzeitig die Subventionen an die Landwirte von der bewirtschafteten Fläche abhängen, sollte diese Rechtsunsicherheit durch eine Neuvermessung der landwirtschaftlichen Nutzflächen (LWN) eliminiert werden. Die Resultate eines Pilotprojekts zeigten, dass Airborne Laser Scanning zusammen mit Luftbildphotogrammetrie geeignete Technologien für die Neuvermessung sind (Meier et al., 2001). Aus den Laserdaten kann ein direkt gemessenes digitales Terrain- bzw. Oberflächenmodell (DTM, DOM) erzeugt werden. Aus den Differenzen zwischen diesen beiden Modellen lassen sich dann automatisiert Waldgrenzen „AWG“ ableiten. Aus den Luftbildern wird mithilfe des DTM ein digitales Orthophoto (DOP) berechnet, welches zur Validierung der AWG genutzt wird. Der Perimeter erstreckt sich über insgesamt 31'000 km<sup>2</sup>, wobei von der Gesamtausdehnung der Schweiz die Zonen über 2000 m. ü. M. (Gebiete nicht geeignet für die Landwirtschaft) sowie die Flächen einiger Kanton, welche bereits über ein DTM verfügen, nicht berücksichtigt wurden. Die Datenerfassung und das Prozessieren der Daten ist in fünf Realisierungseinheiten (RE) aufgeteilt. Swissphoto AG wurde vom Bundesamt für Landestopographie beauftragt, die Teilprojekte RE02-RE05 zu realisieren. Als Technologiepartner wurde in RE02-RE04 die amerikanische Firma TerraPoint unter Vertrag genommen. TerraPoint verfügte über das ALS-System (ALTMS 2536) und über die Erfahrung im Auswerten und in der Filterung der Punkte. RE05 wurde von Swissphoto ohne Technologiepartner realisiert, wobei zur Datenerfassung ein Optech ALTM3100 eingesetzt wurde. Die folgenden Ausführungen basieren hauptsächlich auf den Erfahrungen in RE02-RE04. Für weitere Informationen zu diesen Projekten wird verwiesen auf (Lüthy et al., 2005).

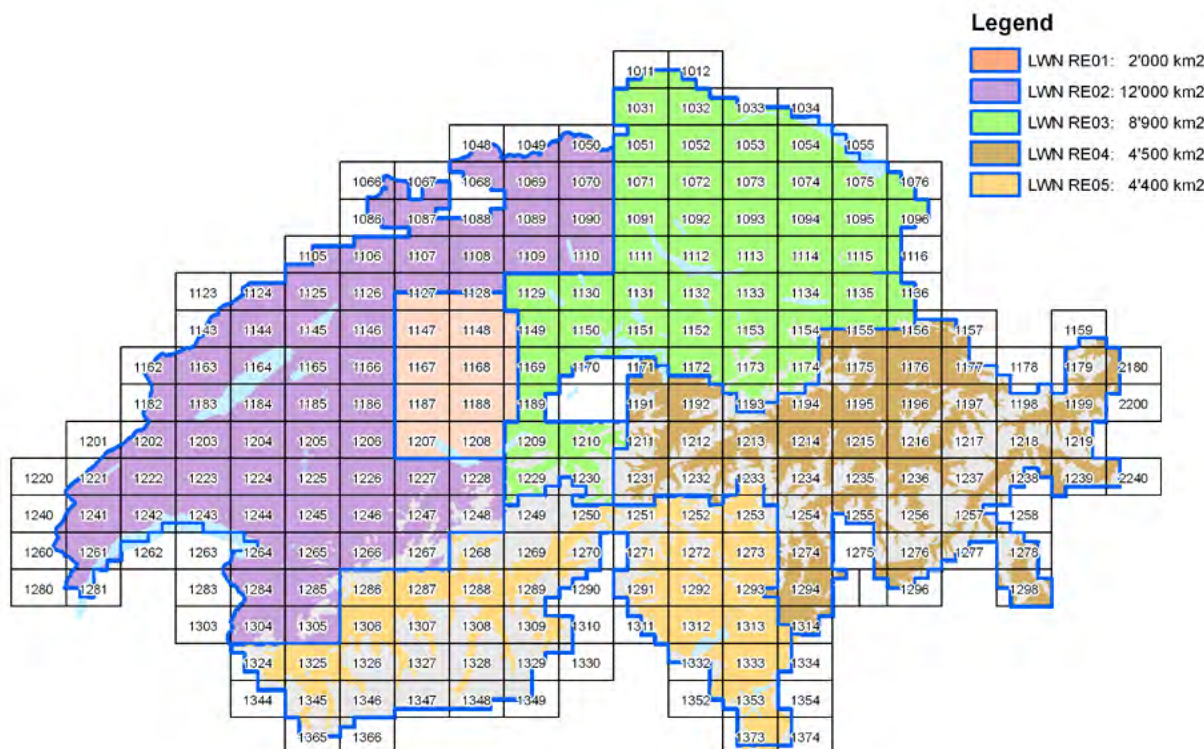


Abbildung 48 Die Abdeckung des Projekts LWN und die 5 Realisierungseinheiten

<sup>36</sup> Projekthomepage <http://www.cadastre.ch/de/projet/lwn/>

## 5.2 Erarbeiten der Spezifikationen

Der Auftraggeber hat in den Ausschreibungsunterlagen zu den Projekten verschiedene Kriterien zur Datenerfassung und den beiden Produkten DTM bzw. DOM spezifiziert (Swisstopo, 2000). Die Spezifikationen bildeten einen integralen, nicht verhandelbaren Vertragsbestandteil. Für die Datenerfassung wurden aufgrund der Anforderungen an die räumliche Genauigkeit die Rahmenbedingungen so festgelegt, dass die Befliegung in der laubfreien Periode zu erfolgen hat und die Schneehöhe nicht mehr als 10 cm betragen darf. Weitere Vorgaben betrafen die konzeptionelle Konsistenz, also Bezugssysteme, Transformationsalgorithmen, Datenformate und Kacheinteilung. Die Vollständigkeit wurde mittels Punktabstand vorgegeben; im DOM bzw. für das offene Gelände im DTM mit mittlerem und maximalem Punktabstand. Im bewaldeten Gebiet wurde für das DTM nur ein mittlerer Punktabstand vereinbart. Diese eindeutigen Anforderungen wurden insofern abgeschwächt, als verlangt wurde, dass Flächen ohne Messungen grösser als 50 m<sup>2</sup> auszuweisen seien, ohne darauf einzugehen, wie dieses Kriterium zur Qualitätsbeurteilung zu verwenden ist.

Die Beschreibung der Produkte DTM und DOM in den Ausschreibungsunterlagen beinhalteten relativ klare Angaben zur Produktspezifikation;

*„Im Bearbeitungsperimeter wird die direkte Erfassung des flächendeckenden digitalen Terrainmodells (anstehender Boden ohne Bewuchs und Hochbauten) mit Einzelpunkten und Bruchkanten in Anlehnung an die TVAV<sup>37</sup> (Art. 23) über das gesamte Gebiet, sowohl in der offenen Flur wie auch im Wald verlangt. Im überbauten Gebiet ist das digitale Terrainmodell aus den vorhandenen Messdaten sinnvoll abzuleiten. Wesentliche Kunstbauten, wie Brücken und Stützmauern, sind als Bruchkanten zu ergänzen um im Rahmen der geforderten Genauigkeit ein geometrisch korrekteres Orthophoto zu erhalten.“*

*„Das DOM hat die beständig sichtbare Oberfläche, also inklusive Vegetation (Wälder) sowie Bauten abzubilden. Jährlich wechselnde, nur zeitweise vorhandene Vegetation wie Getreide dürfen im DOM nicht enthalten sein.“*

In den Spezifikationen fehlten aber Angaben zur akzeptierbaren Qualitätsgrenzlage und sie waren insgesamt zu unpräzise formuliert, wie folgendes Beispiel zeigt: „Die verlangten Produkte müssen gemeinsam eine gute Qualität aufweisen, in sich kohärent und homogen sein“. Für das Produkt DOM zeigte sich in der Produktion schon bald, dass nicht alle Vorstellungen des Kunden in den Spezifikationen abgebildet waren. Masten und Freileitungen wurden zwar der beständig sichtbaren Oberfläche zugeordnet, aber als störend für nachfolgende Anwendungen bezeichnet. Umgekehrt waren verschiedene Bauten (Baustellen, Container etc.) nicht eindeutig als temporäre Objekte erkennbar. Ein weiteres Problem in der Handhabung der Spezifikationen entstand aus sensorbedingten Mängeln (vgl. Beispiele in Kapitel 1.4.1).

Die Beurteilung der Qualität des DTM war aufgrund der unvollständigen und unpräzisen Spezifikationen und mangels einheitlicher Testfälle ein Prozess, der sehr stark von der subjektiven Einschätzung des Sachbearbeiters geprägt war. Je nach Sachbearbeiter (in der Produktion *und* bei der Qualitätskontrolle auf Seiten des Auftraggebers) wurde die Qualität unterschiedlich beurteilt. Nach fast jedem Korrekturlauf beim Auftragnehmer wurden vom Auftraggeber Stellen bemängelt, die in seinen vorgängigen Qualitätskontrollen nicht als Mangel ausgeschieden wurden.

Diese unklare Situation hatte zur Folge, dass in RE02 über einen Zeitraum von fast zwei Jahren zwar eine Annäherung hinsichtlich des Qualitätsverständnisses stattfand, aber in allen Teillieferungen von DTM bzw. DOM vom Kunden Mängel reklamiert wurden, obwohl einzelne Kacheln mehrfach bereinigt wurden. Dass das Vertrauen des Auftraggebers in den Auftragnehmer trotzdem nicht verloren ging, äusserte sich darin, dass in diesem Zeitraum zwei weitere Realisierungseinheiten (RE03 und RE04) an Swisstopo vergeben wurden. Beide Vertragsparteien konnten aber mit dem Zustand nicht zufrieden sein und deshalb wurden die Spezifikationen in enger Zusammenarbeit erweitert und verfeinert. Die revidierten technischen Anforderungen basierten auf dem mittlerweile besseren Verständnis über Technologie, Prozesse und Daten. Der Raum für unterschiedliche Interpretationen wurde so gut wie möglich in Form von messbaren Kriterien eingeschränkt und die Qualitätskontrollen wurden aneinander angeglichen. Nachdem das Personal auf die neu vereinbarten Spezifikationen geschult worden war, sank

---

<sup>37</sup> Technische Verordnung der Amtlichen Vermessung

die Anzahl bemängelter Stellen pro Einheit und es wurden selten mehr als eine Iterationen benötigt, bis eine Abgabe vom Kunden akzeptiert wurde. Die unterschiedliche Interpretation von einzelnen Situationen konnte jedoch nie ganz eliminiert werden, sie beeinträchtigten den Projektfortschritt jedoch nicht spürbar. Einige Kartenblätter wurden gar in der ersten Verifikation schon vollständig akzeptiert. Innerhalb eines Jahres – also weniger als der ursprünglich geschätzten Dauer – konnten alle Daten von DTM und DOM im Teilprojekt RE02 neu produziert und vom Kunden akzeptiert werden. Die neuen Spezifikationen wurden selbstverständlich auch für alle nachfolgenden Realisierungseinheiten übernommen.

## 5.3 Datenerfassung

### 5.3.1 Flugplanung

Die Flugplanung war im Wesentlichen durch die schwierige Topographie in grossen Teilen der Projektfläche dominiert. Das eher flache schweizerische Mittelland zwischen Genfer- und Bodensee umfasste nur ca. 40 % der Fläche. Die restlichen Regionen – Jura, Alpenrandtäler (entlang Aare, Reuss, Rhein, Rhone und Tessin) und Alpen – waren topographisch sehr anspruchsvoll mit grossen Höhenunterschieden auf kurzen Distanzen und geprägt von stetig wechselnder Orientierung der Gebirgszüge (vgl. Abbildung 49). Weitere wichtige Randbedingungen für die Flugplanung waren die Kundenanforderungen hinsichtlich räumlicher Genauigkeit und Punktabstand sowie die Möglichkeiten des eingesetzten Systems (TerraPoint ALTM S2356 und Optech ALTM3100 in RE05) bzw. der Performance des Flugzeuges (Pilatus Porter PC6). Um viele kurze Fluglinien zu vermeiden und aufgrund der guten Steig- und Sinkleistung des PC6 wurde entschieden, die Befliegung nicht auf einer fixen Flughöhe pro Fluglinie, sondern in konstantem Abstand zum Gelände zu planen (ca. 1200 m). Die Flugrichtung wurde durch die Orientierung der grossen Täler bzw. der Gebirgszüge vorgegeben. Wo die Topographie eine konforme Datenerfassung verunmöglichte (Überschreiten der maximal erlaubten Flughöhe über kreuzenden Tälern), wurde die Befliegung mit Cross-Lines fallweise ergänzt. Häufig konnten diese Erweiterungen erst nach einer Sichtung der Daten festgelegt werden, da die grossen Ranges nicht zwingend zu Mängeln führten, sondern erst in Kombination mit ungünstigen Windverhältnissen oder hoher Luftfeuchtigkeit. Aus der heterogenen Flugplanung (vgl. auch Abbildung 50) folgte eine gute Verzahnung der verschiedenen Missionen und Flugstreifen, so dass Abweichungen wegen mangelhafter in situ Kalibrierung schnell erkannt werden konnten. Die Abbildung 51 mit einer Profildarstellung von 4 Fluglinien über dem Reusstal gibt einen guten Eindruck über die Anforderungen an den Piloten, welcher kontinuierlich die Flughöhe über Grund anzupassen hatte.

Im Vergleich mit einem anderen Projekt in Vorarlberg (Rieger et al., 2005), also in einer vergleichbaren Topographie, zeigt sich, dass in den LWN-Projekten die von einem Flugstreifen abgedeckte Fläche um den Faktor 1.5 grösser ist. Der Entscheid, die Flughöhe variabel dem Gelände anzupassen, führte somit zu einer deutlich ökonomischeren Datenerfassung gegenüber einer Befliegung auf konstantem Fluglevel.



Abbildung 49 Kanton Uri – Reusstal, Neigungsraster überlagert mit Schummerung: rot > 40 Grad geneigt

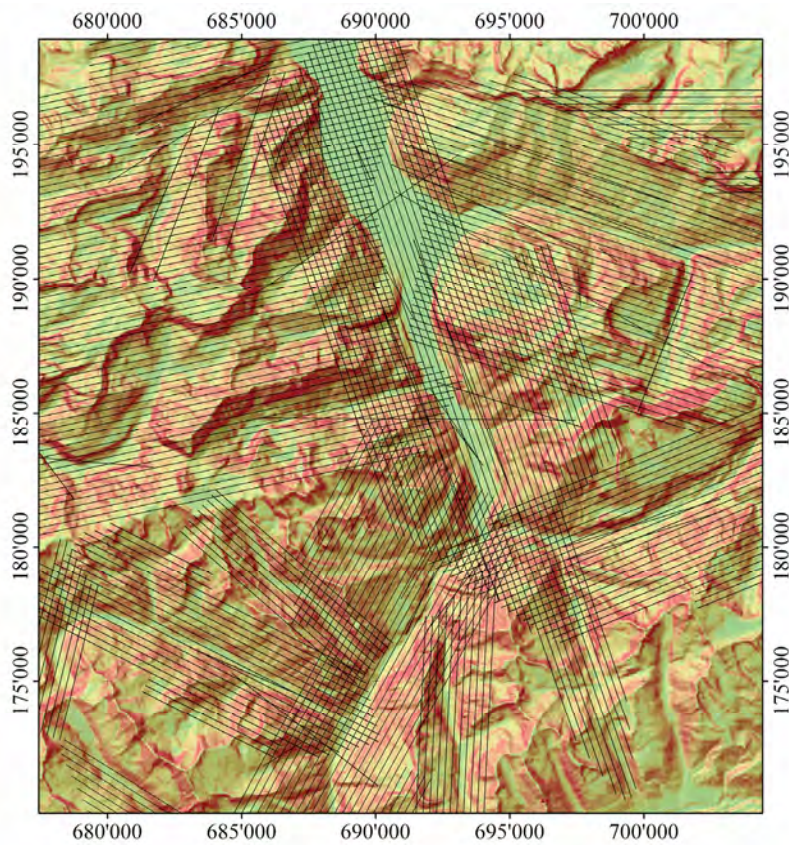
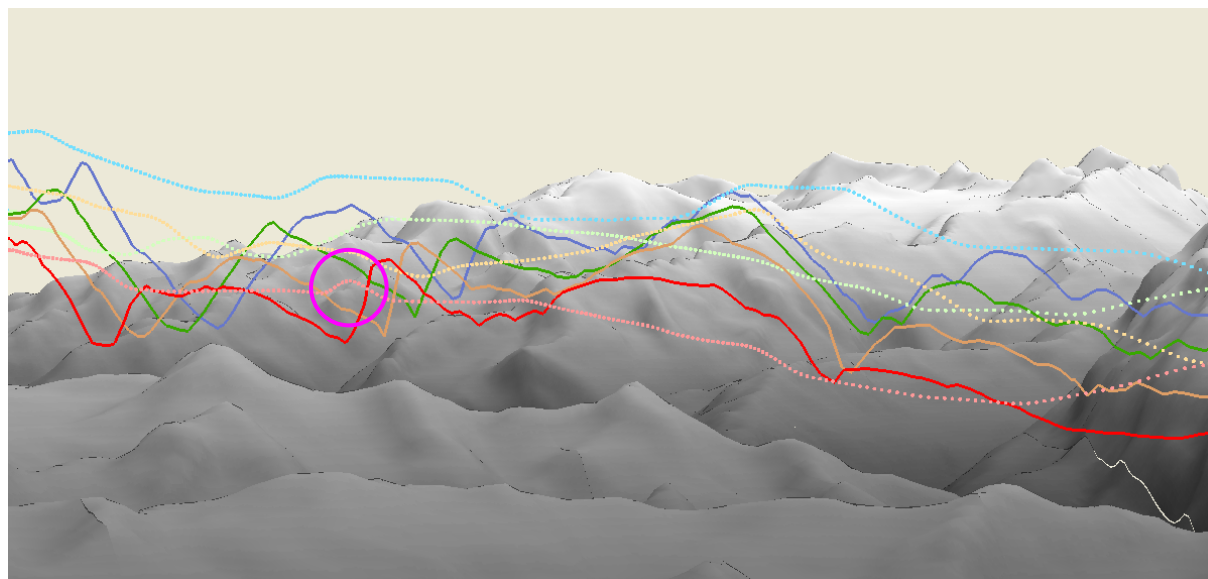


Abbildung 50 Geplante Fluglinien für den Bereich aus Abbildung 49.





**Abbildung 51** Profildarstellung mit der Überlagerung von geplanten (ausgezogene Linien) und geflogenen (punktierter Darstellung) Fluglinien.

Die „Abkürzungen“ auf der rosa Trajektorie verglichen mit der roten Flugplanung sind deutlich erkennbar, ebenso der durch Turbulenzen verursachte Höhengsprung (mit Kreis markiert).

### 5.3.2 Schwierigkeiten in der Befliegung

Die bereits im Kapitel 2.4.1 aufgeführten technischen Schwierigkeiten in der Datenerfassung im Projekt LWN wurden von weiteren Problemen überlagert. Im Winter 1999 wurden weite Teile der Schweiz vom Sturm „Lothar“ heimgesucht. Der Sturm zerstörte in mehreren Kantonen kleine bis grosse Waldflächen, wobei die Schadensflächen sehr heterogen verteilt waren und meistens als Schneisen ausgeprägt waren (keine Totalschäden). Beim Vergleich der Waldgrenzen aus DTM und DOM mit den Orthophotos, welche mehrheitlich aus Befliegungen vor dem Sturmereignis stammten, wurden somit deutlich abweichende Waldflächen festgestellt. Da aber gleichzeitig die Erfassung der Vegetation wegen ungenügender Sensitivität des ALS gestört war, musste fallweise entschieden werden, ob die Differenz auf mangelnde Aktualität (temporale Unterschiede, vgl. Kapitel 4.3.5) oder auf die technischen Mängel in der Datenerfassung zurückzuführen waren. Bis die Schadensflächen vollständig kartiert waren und als Entscheidungsbasis benutzt werden konnten, mussten die Ursachen mittels teurer Feldbegehungen eruiert werden. Sofern der Mangel auf die Datenerfassung zurück zu führen war, musste die Befliegung wiederholt werden.

Die grossen Höhenunterschiede auf kurzer Distanz, die Vorgaben bezüglich Befliegungszeitpunkt und die Entscheidung, in konstantem Abstand über Grund zu fliegen, führten dazu, dass nicht überall das Kriterium der maximal erlaubten Schneehöhe und der laubfreien Vegetation eingehalten werden konnte. Dies und die Mängel hinsichtlich der Vollständigkeit der Objekterfassung aufgrund der Verschmutzung der Optik führten zu mehreren Re-Flights. Allein in RE02 wurden in vier Perioden Re-Flights durchgeführt, welche zusammen praktisch den gleichen Umfang aufwiesen wie die Erstbefliegung. Die Datenerfassung erstreckte sich somit über einen Zeitraum von 2.5 Jahre. Da keine Befliegung weder bezogen auf die Fläche noch auf die Objekte vollständig war, mussten die Daten aus verschiedenen Zeiträumen miteinander kombiniert werden. Dies führte dazu, dass zeitliche Inkonsistenzen eingeführt wurden, die erst in ihren Auswirkungen auf das Produkt erkannt und dann – zumeist in aufwändiger manueller Arbeit – bereinigt werden mussten:

- Baustellen, Neubauten bzw. ursprüngliches Gelände, Baugrube, ev. im Bau befindlich
- Verschiedene Schneehöhen – vertikaler Unterschied zwischen benachbarten Streifen
- Geländeverschiebungen durch Strassen- und Bahnbau (insbesondere Bahn 2000)
- Temporäre Installationen für expo02

In den nachfolgenden Realisierungseinheiten RE03 und RE04 waren die Probleme insgesamt zwar kleiner, aber trotzdem noch nicht zur vollen Zufriedenheit gelöst. Die Verkürzung der Zeit zwischen der Datenerfassung und der Beurteilung durch einen Sachbearbeiter mit Kenntnissen über die charakteristische Topographie und Geomorphologie half, systematische Mängel in der Datenerfassung frühzeitig zu erkennen und entsprechende Massnahmen wie Reduktion der Flughöhe und Reinigung der Optik einzuleiten. Es zeigte sich aber auch, dass in Gebieten mit grosser Bautätigkeit die Beständigkeit (temporale Gültigkeit) von DTM und DOM kürzer ist als vielfach angenommen.

### 5.3.3 Erkenntnisse aus der Datenerfassung im alpinen Raum

Es wurde schnell klar, dass bei der Befliegung im alpinen Raum eine grosse Flexibilität und eine effiziente Logistik notwendig waren. Die Wetterbedingungen konnten sehr schnell umschlagen und die lokalen meteorologischen Entwicklungen waren schwierig vorherzusagen. Gleichzeitig herrschten auf relativ kurze Distanz oft unterschiedlichste Bedingungen. Da die Herbst- und Wintermonate im Mittelland häufig von einer kompakten Nebeldecke und in den Alpen von guten Flugbedingungen geprägt sind, musste der Nebel bei der Wahl der Flugplätze mit einbezogen werden.

Die nachfolgende Aufstellung enthält die wichtigsten Erkenntnisse aus der Datenerfassung für die LWN-Projekte. Sie sind geprägt durch die alpine Topographie und deshalb nicht auf beliebige andere Projekte übertragbar. Da ALS häufig auch in weniger anspruchsvollem Gelände eingesetzt wird, vereinfachen sich in diesen Projekten die Rahmenbedingungen für einzelne oder gar mehrere der aufgeführten Aspekte in der Flugvorbereitung und -planung:

- Störende Umwelteinflüsse bei der Datenerfassung
  - Restriktionen beim GPS wegen hoher Berge (beschränkte Sichtbarkeit)
  - Kleinräumlich stark unterschiedliche Wind- und Wetterverhältnisse
  - Eingeschränkte Möglichkeiten für Nachtmissionen
  - Wetter- und Schneebedingungen variieren stark auf kurze Distanzen, so dass Flugstreifen nicht vollständig beflogen werden können
  - Flugverkehr von Freizeitaktivitäten (wie Gleitschirme, Segelflugzeuge, Alpenrundflüge)
  - Ohne permanente GPS-Referenzstationen (wie AGNES oder SAPOS) kann nicht von kurzfristigen Wetterverbesserungen Gebrauch gemacht werden.
- Positive Einflüsse durch Umwelt
  - Lokal variable Wettersituationen reduzieren die Anzahl Tage mit gar keinen Flügen
  - Der Einfluss der Troposphäre auf das GPS-Signal kann reduziert werden, indem die Referenzstation in einer ähnlichen Höhe wie die Befliegung erfolgt betrieben werden kann.
- Strukturelle Schwierigkeiten mit dem ALS-System
  - Distanzmessung:
    - Variationen in der Rangemessung von 1300 bis 2200 m auf einer Scanlinie bei einer Befliegung auf 1500 m über Grund und einer Querneigung des Geländes von 30 Grad führen zu einer sehr ungleichen Verteilung der Messunsicherheit und zu Schwierigkeiten bei der Analyse von überlappenden Flugstreifen in der Streifenausgleichung.
    - Überschreiten der Soll-Flughöhe beim Befliegen von querenden, steilen Tälern führt potentiell zu Datenlücken (abnehmende Signalstärke)
    - Unterschreiten der Soll-Flughöhe führt zu Echo- oder Multi-Path-Effekten über Bergkuppen bzw. sehr stark reflektierenden Oberflächen
  - Beschränkungen des IMS: Änderungen verursacht von Windturbulenzen/Vibrationen über der Aufzeichnungsrate
  - Variation der Streifenbreite und damit auch des Punktabstandes infolge wechselnder Flughöhe
  - Variation des Punktabstandes in Flugrichtung wegen wechselnder Geschwindigkeit und Rotation um Pitch-Achse.
- Gegenmassnahmen
  - Sorgfältige und detaillierte Flug- und Missionsplanung
  - Querüberlappung bis zu 50 %

- Reduzierter Öffnungswinkel
- Wahl eines geeigneten Flugzeuges
- Pilot erfahren in der ALS-Befliegung und vertraut mit der Topographie
- Kopilot für die Beobachtung des Luftraums und zur Unterstützung bei der Sicherheitsbeurteilung (Abstand zum Terrain)
- Flexibilität in der Operation: wo und wann
- Erste Qualitätskontrolle der Daten möglichst während, oder wenigstens zeitnah zur Befliegung, um strukturelle Probleme bei der Objekterfassung zu erkennen und wenn nötig Cross-Lines oder Re-Flights zu definieren

Das alpine Gelände hat also verglichen mit flacher Topographie nicht nur Nachteile für die Datenerfassung, sondern auch einige Vorteile. Bei der Definition der Spezifikationen muss man sich aber bewusst sein, dass die Anforderung an die räumliche Genauigkeit bei grossflächigen Projekten in schwieriger Topographie tiefer liegen sollte, als in flacherem Gebiet. Eine Einschränkung oder das Festlegen von Prioritäten muss bezüglich laub- und schneefreien Verhältnisse akzeptiert werden, da die lokalen Unterschiede zu gross sind, um beide Kriterien auf grösseren Flächen gleichzeitig zu erfüllen.

## 5.4 Prozessieren der Messwerte

### 5.4.1 Ableiten der Punktwolke aus den Messungen

Nach dem Berechnen der Trajektorie und der Kontrolle der Bore-sight Kalibrierung wurden für die gesamte Mission die 3D-Punkte in ellipsoidischen Koordinaten berechnet. Für die Transformation in das Schweizerische Lage- und Höhenbezugssystem mussten die dafür vom Kunden zur Verfügung gestellten Programme umgeschrieben werden, da die verwendeten Algorithmen nicht für die Datenmenge von ALS ausgerichtet waren und daher nicht die benötigte Performance erbrachten. Die immer noch streifenweise organisierten Punkte wurden anschliessend an die Projektion auf ca. 3.28 km<sup>2</sup> grosse Kacheln (1/64-tel eines Landeskartenblattes 1:25'000) unterteilt. Die automatische Filterung der Bodenpunkte erfolgte mit dem im Kapitel 3 vorgestellten Algorithmus von Axelsson im Programm TerraScan. Aus den klassifizierten Punkten wurden das DTM und DOM aufbereitet sowie die horizontale Auflösung (Punktdichte-Verteilung) berechnet. Mit diesen Datensätzen wurde die Qualität der Datenerfassung kontrolliert (vgl. auch Kapitel 4.9). Falls Mängel hinsichtlich Vollständigkeit oder Kalibrierung festgestellt wurden, musste der Prozess oder schlimmstenfalls gar die Befliegung wiederholt werden. Sobald alle Kacheln eines Kartenblattes intern akzeptiert waren, d.h. die Konformität mit den vorgegebenen Spezifikationen in Qualitätskontrollen nachgewiesen wurde, konnten sie für die Datenabgabe vorbereitet werden (Zusammenfügen auf 13.125 km<sup>2</sup> grosse Kacheln (1/16-tel eines Landeskartenblattes), Umformatierung und Kopieren auf einen Wechseldatenträger).

Der gesamte Ablauf des Prozessierens der Messwerte ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

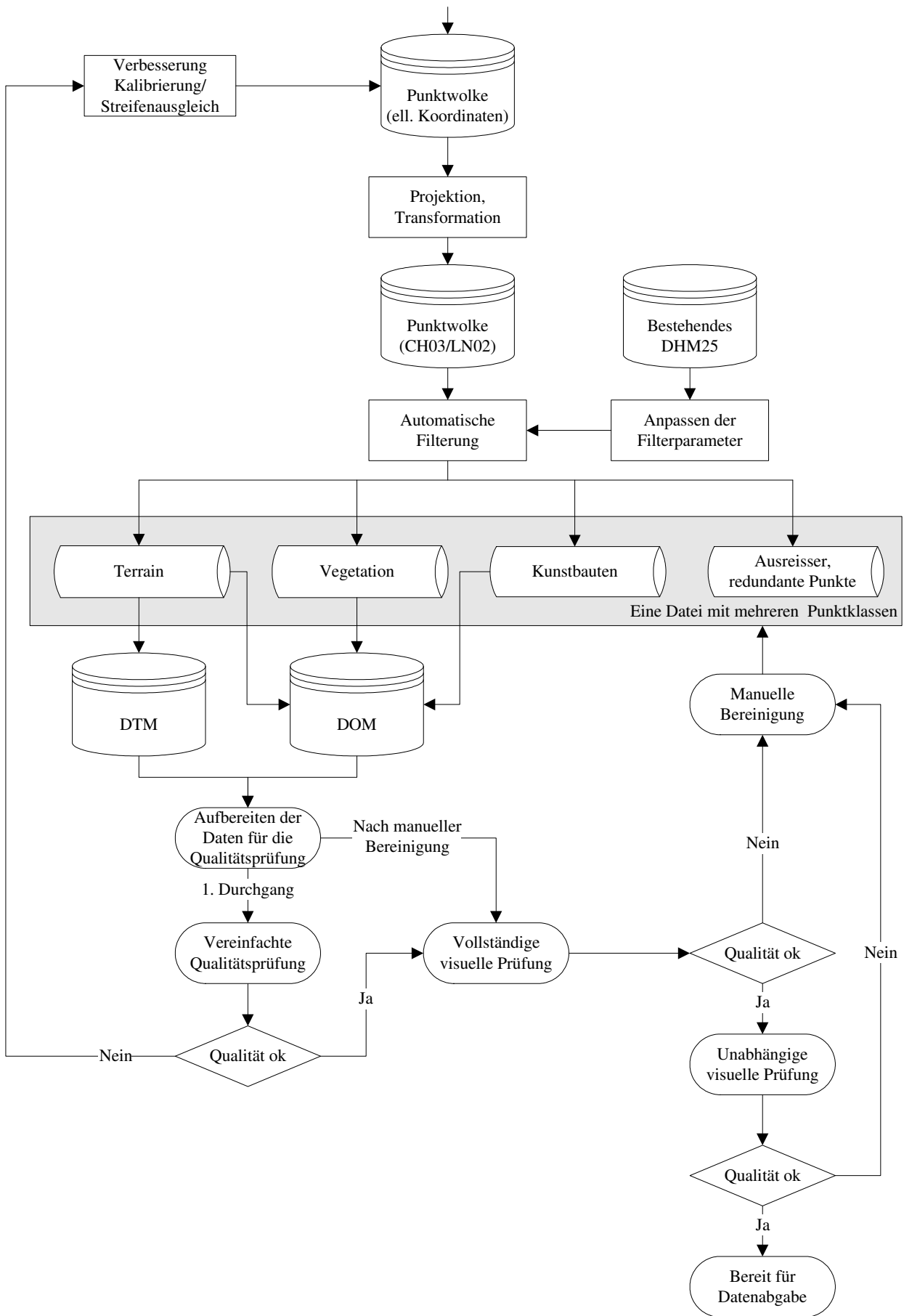


Abbildung 52 Die Prozessschritte in der Verarbeitung der Punktwolke

### 5.4.2 Klassifizierung der Punkte

Nach Akzeptanz der Datenerfassung wurden die Resultate der Filterung einer genaueren Prüfung unterzogen (siehe auch Kapitel 4.9.1 und 5.5.3). Der Sachbearbeiter markierte mangelhafte Stellen und korrigierte die Fehler in – häufig aufwändiger – manueller Arbeit. TerraScan bietet zwar etliche Werkzeuge zur effizienten Punktbearbeitung an, da aber oft die mangelhaften Stellen durch einzelne grobe Fehler beim Rangedetektor oder in einzelnen Scanlinien verursacht worden sind (siehe Abbildung 17), mussten die abweichenden Punkte einzeln selektiert und klassifiziert werden. Die Rate von eindeutig nicht korrekt zugewiesenen Terrainpunkten konnte durch die stetige Weiterentwicklung der Parameter und Optimierung der Klassifizierungswerkzeuge unter 3 % reduziert werden (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 3.11.2). Eine nahezu Fehler freie Klassifizierung wurde nur in flachem oder leicht hügeligem Terrain erreicht. Einzelne nicht gefilterte Gebäude oder nicht erkannte steile Geländepartien konnten jedoch sehr einfach gefunden und bereinigt werden. Nach jedem Korrekturdurchgang wurde eine neue visuelle Prüfung durchgeführt bis keine Mängel mehr entdeckt wurden.

Das DOM, definiert durch den ersten Return, musste für eine effiziente Nutzung auf Seiten der Endanwender unterteilt werden in die Klassen Terrain, Vegetation und Kunstbauten. Die Bearbeitung der DOM-Punkte erfolgte gemeinsam mit dem DTM, da eine gemeinsame Datenbasis genutzt werden sollte. Weil die Filterung der Gebäude weder mit Hilfe der Algorithmen noch den teilweise zur Verfügung gestellten Gebäudegrundrissen aus der Amtlichen Vermessung die Anforderungen erfüllten, war der manuelle Aufwand für die Bereinigung des DOM deutlich höher als beim DTM. Zusätzlich waren gemäss Spezifikationen auch nicht-temporäre Objekte gänzlich zu eliminieren. Die Beständigkeit eines Objektes konnte aber auch mittels Überlagerung von DOM und Orthophoto nur *einigermassen* zuverlässig erkannt werden.

Trotz des hohen Aufwandes (in der Klassifizierung und Qualitätskontrolle) musste der Auftraggeber akzeptieren, dass die gewünschte Zuverlässigkeit und Korrektheit der thematischen Attributierung des DOM („100 % der Punkte korrekt klassifiziert“) nicht erreichbar war, schon nur weil häufig nicht klar war, welches Objekt vom Scanner erfasst wurde. Er stimmte einer pragmatischen Herangehensweise (bzw. einer Minderung der Anforderungen) zu, um die anderen Projektziele nicht zu gefährden.

### 5.4.3 Ausbildung

Da die Effizienz der visuellen Kontrolle und der manuellen Korrektur sehr stark von der Erfahrung und der persönlichen Arbeitstechnik des Sachbearbeiters abhängt, sind die Schulung und das kontinuierliche Training ein zentrales Element der ALS-Produktion. Insbesondere als anfänglich die Filterung von DTM und DOM beim amerikanischen Partner angesiedelt war, zeigte sich, dass ein gutes Verständnis über die aktuell bearbeitete Region mit ihren topographischen und geomorphologischen Eigenschaften eine zwingende Voraussetzung für eine korrekte Interpretation der Daten war. In Trainings wurde dieses Wissen über die Geographie und Topographie weitergegeben. Geeignete Werkzeuge für die Korrektur verschiedener regelmässig auftretender Fehlertypen wurden allen Sachbearbeitern vorgestellt, um eine einheitliche Behandlung dieser Klassifizierungsfehler zu gewährleisten. In einer weiteren Schulung wurde das Fundament dafür gelegt, dass die homogenisiert aufbereiteten Daten unabhängig vom Sachbearbeiter in der visuellen Prüfung von bestimmten Merkmalen gleich benutzt wurden. Zur Steigerung der Nachhaltigkeit flossen die Beschreibung der Werkzeuge und Methoden ins Trainingsmanual ein. Bei der Kontrolle und Bereinigung der Punktklassierung zeigte sich auch, dass mehr Informationen aus der Datenerfassung und aus der Auswertung der Trajektorie sehr hilfreich gewesen wären, um einfacher mangelhafte Situationen, beispielsweise ungenügende Punktdichte wegen hoher Luftfeuchtigkeit oder zu grosser Flughöhe während der Befliegung, zu erkennen und geeignete Massnahmen zu treffen oder zumindest eine Rückmeldung zu geben.

### 5.4.4 ALS-Produktionssystem

Für die Abwicklung des Projekts LWN wurde eine Produktionsumgebung, wie sie in Kapitel 4.9 konzeptionell beschrieben ist, in leicht reduziertem Umfang realisiert. Das zuerst entwickelte Modul *Visuelle Kontrolle* ist aus dem Umstand heraus entstanden, dass bei TerraPoint jeder Operator seine eigenen Methoden zur visuellen Kontrolle von DTM und DOM gebrauchte. Visualisierungen wurden unsystematisch erzeugt, wobei häufig Darstellungen und Symbolisierungen verwendet wurden, die nicht geeignet waren zur Aufdeckung von Mängeln. Das ALS-Produktionssystem hatte nach der Einigung über

die Interpretation der Spezifikationen einen wesentlichen Anteil am schnellen Produktionsfortschritt. Die Produktionsumgebung wies durch die Systematisierung der Qualitätskontrolle gegenüber den bei TerraPoint eingesetzten Methoden etliche Vorteile auf:

- Reduktion des Aufwandes für immer wiederkehrende Tätigkeiten durch Automatisierung
- Effizienzsteigerung bei Datenaufbereitung und visueller Kontrolle
- Homogenisierung der Arbeitsweisen aller Sachbearbeiter
- Steigerung der Zuverlässigkeit der manuellen Tätigkeiten
- Reduktion des Speicherbedarfs durch Optimierung der benötigten Datensätze, der Vereinheitlichung der Datenablage und durch automatisches Löschen von nicht mehr benötigten Daten in der Produktion durch das Modul Prozess-Manager
- Einfache Dokumentation, Planung und Überwachung des Produktionsfortschritts
- Optimierung der vorhandenen Informatik-Ressourcen

Es war ursprünglich vorgesehen, dass alle qualitätsbezogenen Informationen in einer Datenbank gehalten werden sollten. Dies führte zum Aufbau einer Produktionsdatenbank, in welcher die Statusinformationen und die Resultate der automatischen Prüfungen erfasst und verwaltet werden sollten. Die Ergebnisse aus dem Vergleich der Höhenkontrollpunkte, Statistiken aus den Punktdichte- und Neigungsrastern sowie aus der Differenz zum bestehenden DHM25 (DTM mit 25 m Maschenweite) wurden daher in die Produktionsdatenbank importiert. Der Sachbearbeiter seinerseits interpretierte die Statistiken und ergänzte das Zahlenmaterial durch eigene Beobachtungen. Mit jeder Datenabgabe wurden pro Landeskartenblatt zwei Qualitätsreports generiert, einer mit den Angaben zur räumlichen Genauigkeit (Abbildung 46), ein zweiter mit einer kommentierten Gesamtbeurteilung (Abbildung 47). Aufgrund der unterschiedlicher Massstäbe in der Beurteilung der Daten (wegen des divergierenden Verständnisses über die technischen Spezifikationen), wurde diese Gesamtbeurteilung vom Auftragnehmer nach kurzer Zeit nicht mehr bei der eigenen Qualitätskontrolle herangezogen und die Beurteilung nicht mehr durch die Sachbearbeiter erfasst. Auch nach Vorliegen verbesserter Spezifikationen und erfolgter Abgleichung der Qualitätsvorstellungen wurde dieser Bericht nicht mehr aufgegriffen. Die Verifikationen beim Auftragnehmer wurden vollständig unabhängig der Beurteilung des Auftragnehmers durchgeführt.

Die realisierte Lösung war auf die Bedürfnisse, Anforderungen und Umstände im Projekt LWN ausgelegt. Besonders das Potential der gemeinsamen Nutzung von Testresultaten und der Dokumentation der Prozesse wurde infolge der nicht vorhandenen Kundenbedürfnisse nur ungenügend erschlossen. Konsequenterweise wurde der Aufwand auf Auftragnehmerseite reduziert, um genau diejenigen Dokumente zu erzeugen, welche vom Auftraggeber gefordert waren. Es sind verschiedene weitere Verbesserungen im Produktionssystem denkbar, um eine flexibel einsetzbare und modular erweiterbare Lösung zur Verfügung zu stellen (vgl. Ausführungen in Kapitel 4.9).

## 5.5 Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement spielt in Projekten dieser Größenordnung eine zentrale Rolle (Lüthy, 2004). Bevor die Arbeiten für die Flugplanung im ersten Projekt (RE02) aufgenommen wurden, musste ein Qualitätsplan entwickelt werden, in welchem alle Teilprozesse mit ihren Qualitätskontrollen und die Dokumentationen der Prüfungen dargelegt wurden. So wurde allen Beteiligten im Voraus klar gemacht, wer wann welche Prüfungen durchzuführen hat und wie sie zu dokumentieren sind. Bis auf den Vergleich mit Höhenkontrollpunkten und der Punktdichteverteilung waren die Ergebnisse der Kontrollen aber schwierig zu beurteilen hinsichtlich der Konformität mit den Anforderungen.

### 5.5.1 Kontrolle während der Befliegung

Die Möglichkeiten zur Überwachung der Datenerfassung waren sowohl beim TerraPoint ALS, als auch bei dem in RE05 eingesetzten Optech ALTM3100 recht bescheiden. Anfänglich konnte der Flugoperator nur gerade das Funktionieren des Laser Scanners und den Zustand des POS überwachen. Das Bild der parallel betriebenen Videokamera gab dem Operator einige Hinweise über das jeweils überflogene Gebiet bzw. über die meteorologischen Verhältnisse wie starker Dunst, Bodennebel, Schnee. Die Wahl der nächsten Fluglinie erfolgte in Absprache mit dem Piloten, welcher im Navigationsdisplay die Fluglinien

darstellen und selektieren konnte. Für jede Fluglinie erfasste der Operator bei Bedarf einige Hinweise über Witterung, Flughöhe oder Systemmeldungen in seinem analogen Flugrapport. Diese doch sehr umständliche Arbeitsweise führte teilweise dazu, dass Fluglinien verwechselt wurden und daher doppelt bzw. gar nicht befliegen wurden (was erst einige Zeit später bei der Filterung der Punktwolke aufgedeckt wurde).

Durch den Einsatz des Optech-Systems wurden einige dieser Probleme reduziert: der Operator konnte von seiner Konsole aus die nächste Fluglinie selektieren. Die aktuelle Abdeckung des Flugstreifens wurde aus den Messdaten näherungsweise berechnet und alle weiteren Informationen von Operator oder System wurden mit Zeitstempel versehen digital abgelegt (vgl. auch Abbildung 24 und Tabelle 7).

### 5.5.2 Kontrolle der Datenerfassung

Zur Prüfung der Qualität der Datenerfassung wurde die auf die Kacheln aufgeteilte Punktwolke automatisch klassifiziert, um Datensätze in einem gegenüber der Endkontrolle reduzierten Umfang für die visuelle Qualitätskontrolle aufzubereiten. Ziel dieser Prüfung (Prozess „Vereinfachte Qualitätsprüfung“ in Abbildung 52) war die Beurteilung der Qualität der Datenerfassung, insbesondere hinsichtlich Vollständigkeit der Daten und Güte der Systemkalibrierung. Bei der Vollständigkeit galt das Augenmerk einerseits allfälligen Datenlücken in bzw. zwischen den Flugstreifen und andererseits der inhaltlichen Vollständigkeit hinsichtlich Gebäude und Vegetation. Zur Beurteilung der Vollständigkeit wurden Punktdichteraster in verschiedenen Auflösungen und ein geschummertes DOM aufbereitet. Zum Nachweis der geometrischen Qualität der Datenerfassung wurde aus der Differenz zwischen Lagefixpunkten und DTM die äussere vertikale Genauigkeit berechnet. Für die Kontrolle der Sensorkalibrierung bzw. für das Aufdecken von Abweichungen zwischen benachbarten Streifen reichte diese einfache Prüfung jedoch nicht. Die zuverlässigsten Resultate wurden etwas überraschend im absoluten DOM erzielt: eine mangelhafte Sensororientierung führte zu zwei übereinander liegenden Ebenen von Punkten. Durch die Filterung wurde die untere zu Terrain klassifiziert, die obere verblieb im DOM. Das Differenzbild DOM-DTM zeigte in diesem Fall ein in etwa parallel zu den Flugstreifen verlaufendes Muster, welches über längere Distanzen nicht mehr mit topographischen Elementen erklärt werden konnte. Der Kontrolle der Datenerfassung kam damit eine bedeutende Stellung zu, da spätestens an dieser Stelle entschieden wurde, ob die Befliegung vollständig und abgeschlossen war oder ob noch zusätzliche Flüge für die Konformität mit den Spezifikationen notwendig waren. Die starke zeitliche und räumliche Trennung von Datenerfassung und Kontrolle verunmöglichten allerdings, dass gefundene Mängel bezüglich inhaltlicher Vollständigkeit umgehend zu Anpassungen in den Sensor- oder Flugparametern führten.

### 5.5.3 Visuelle Kontrolle der Endprodukte

Da die automatisiert berechneten, quantitativen Qualitätsindikatoren nur ein unvollständiges Urteil über die Qualität von DTM und DOM ermöglichten, kam der visuellen Kontrolle eine grosse Bedeutung zu. Trotz der standardisierten Umgebung und Abfolge der Prüfung bestand weiterhin die Schwäche der Subjektivität durch den Sachbearbeiter (Interpretation von Bildern); in mehrfachen Kontrollen der Kacheln durch den gleichen Sachbearbeiter wurden teils unterschiedliche Mängel festgestellt. Daher waren Sachbearbeiter angehalten, vor allem die erste Prüfung (Prozess „Vollständige visuelle Prüfung“ in Abbildung 52) sehr sorgfältig durchzuführen und alle eindeutig mangelhaften, aber auch alle zweifelhaften Stellen zu markieren. Dadurch sollten in nachfolgenden Kontrollen die Resultate der manuellen Korrektur geprüft werden. Nachdem alle Mängel bereinigt, geprüft und akzeptiert worden waren, erfolgte zur Abschwächung der Subjektivität eine unabhängige Kontrolle durch einen erfahrenen „Senior“-Sachbearbeiter (Prozess „Unabhängige visuelle Prüfung“ in Abbildung 52). Der Auftraggeber führte seinerseits verschiedene eigene Prüfungen durch, welche zwar inhaltlich sehr ähnlich zu jenen in der Produktion waren (Artuso et al., 2003), in welchen aber wegen anderen Voraussetzungen und Interpretationen neue Fehler gefunden und bemängelt wurden.

Die Diskussionen um die Interpretation der Spezifikationen mit der anschliessenden Präzisierung der technischen Anforderungen war eine wesentliche Voraussetzung für ein sich langsam angleichendes Qualitätsverständnis. Der Aufwand für die visuelle Prüfung war aber auf beiden Seiten beträchtlich. Er hätte insbesondere auf Seiten des Auftraggebers reduziert werden können, wenn zu den Spezifikationen entsprechende Testfälle und die Qualitätsgrenzlage präziser definiert worden wären. Eine weitere Verbesserung wäre durch den konsequenten Austausch der Prüfdokumentation erreichbar gewesen.

### 5.5.4 Resultate der quantitativen Qualitätsprüfungen

Die Auswertungen der quantitativen Qualitätsprüfungen für die Realisierungseinheiten RE02 – RE04 zeigen, dass Airborne Laser Scanning auch in sehr schwierigen topographischen Verhältnissen eine geeignete Technologie für das Erzeugen von DTM und DOM ist. Die hohen Anforderungen an die Punktdichte wurden praktisch über die gesamte Fläche erreicht und in den meisten Kacheln sogar deutlich übertroffen. Die räumliche Genauigkeit, bestimmt aus der Differenz zwischen sehr genauen Kontrollpunkten (aus GPS und tachymetrischer Bestimmung) und dem interpolierten DTM beträgt ca. 30 cm (1 Sigma), deutlich weniger als die geforderten 50 cm. Die grössten Differenzen sind auf geringe Punktdichten im DTM (bewaldete Flächen) und der Nähe von Kontrollpunkten zu Brücken und Stützmauern mit den daraus folgenden grossen interpolierten Flächen zurück zu führen. Die Standardunsicherheit der geometrischen Punktbestimmung mit ALS, berechnet aus den Kontrollpunkten ohne eindeutigen Einfluss durch die Interpolation, liegt bei 20 cm. Dies ist signifikant besser als aufgrund der vorgängig geschätzten kombinierten Messunsicherheit zu erwarten war (30-35 cm).

Realisierungseinheit	Projektfläche [km <sup>2</sup> ]	Anzahl Kacheln	Ø Punkt-abstand im DTM [m]	Räumliche Genauigkeit (1 σ) [m]	Anzahl Kontrollpunkte	Ø Punkt-abstand im DOM [m]
RE02	12'000	3780	1.15	0.30	5'937	1.10
RE03	8'900	3000	1.03	0.27	3'011	0.88
RE04	4'500	2660	0.91	0.34	1'294	0.77

Tabelle 14 Resultate der quantitativen Qualitätskontrollen für RE02-RE04

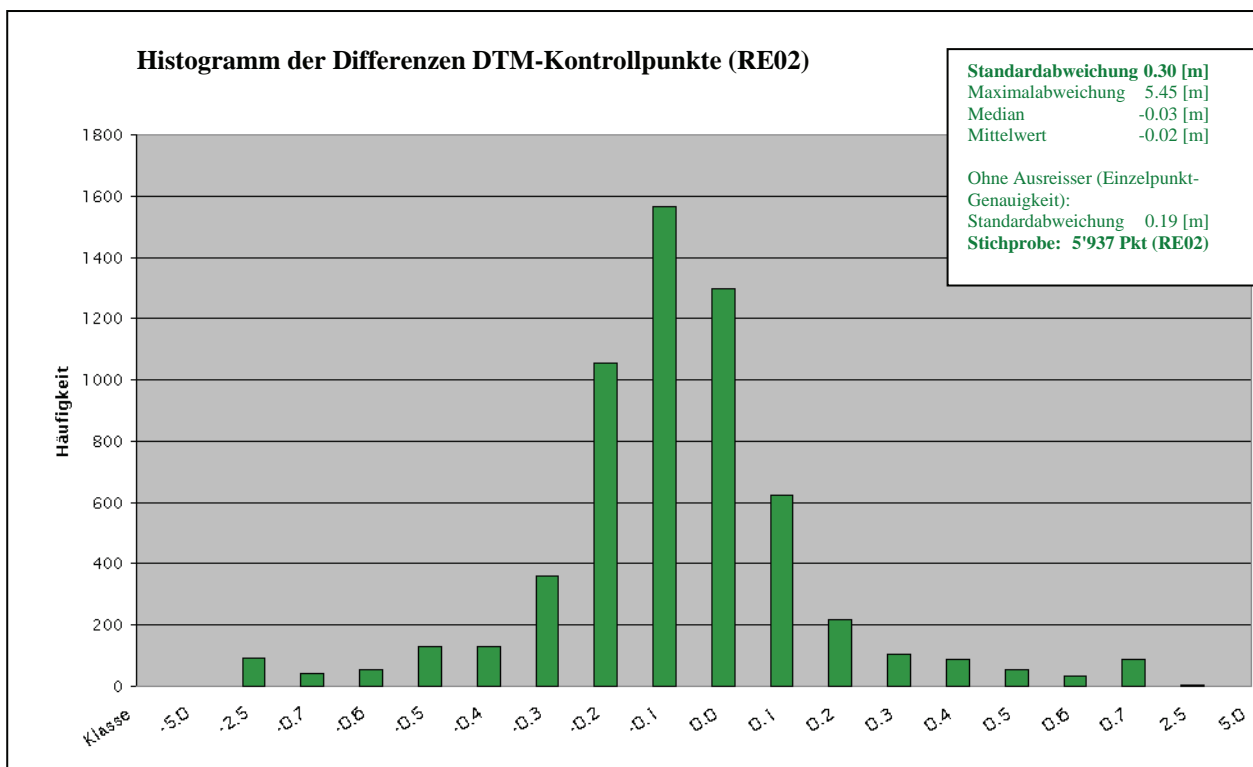


Abbildung 53 Histogramm der Differenzen zwischen interpoliertem DTM und Kontrollpunkten in RE02 (Quelle Swissphoto)



## 5.6 Diskussion der Erkenntnisse aus dem Projekt LWN

Bei der Produktion eines so umfangreichen Projektes mit ALS über eine Zeitspanne von mehreren Jahren treten die Stärken und Schwächen von Technologien und Prozessen deutlich hervor. In den obigen Ausführungen wurden die wesentlichen Probleme und die Massnahmen zu ihrer Reduktion beschrieben. Potential zur weiteren Verbesserung der Prozesse und zur Steigerung der Gesamteffizienz sind sicherlich in folgenden Bereichen vorhanden:

- Die verfeinerten Spezifikationen brachten gegenüber den ursprünglichen Anforderungen eine deutliche Erleichterung, trotzdem wären weitere Präzisierungen entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4 wünschenswert gewesen:
  - Die Inkonsistenz bezüglich des Befliegungszeitpunkts (Schnee- und Laubfrei) muss zwingend eliminiert, bzw. Prioritäten für die divergierenden Ziele gesetzt werden.
  - Die Qualitätsgrenzlage darf insbesondere bei der Punktklassifizierung nicht unrealistisch hoch angesetzt werden („100 % der Punkte korrekt klassifiziert“)
  - Die gemeinsame Vereinbarung über Testfälle mit eindeutigen Kriterien zur Akzeptanz eines Tests sowie ein Austausch der Prüfdokumentation führt zu einer deutlichen Reduktion des Aufwandes für die Qualitätskontrolle beim Auftraggeber und zu weniger Iterationen für Korrekturen auf Seiten Auftragnehmer.
- Prüfung näher an die Prozesse bringen oder gar in Prozesse integrieren: die häufig durch räumliche bzw. zeitliche Trennung und die grosse Datenmenge begründete Verzögerung zwischen Datenerfassung und ihrer vollständigen Kontrolle führt dazu, dass systematische Mängel viel zu spät entdeckt werden. In der Zeit zwischen erstem Auftreten und Aufdecken bzw. Korrektur wird im Normalfall die kostenintensive Datenerfassung weitergeführt, welche im schlechtesten Fall vollständig zu wiederholen sind. Eine erste Sichtung der Daten muss daher in der Feldoperation erfolgen.
- DTM Filterung: Etliche Probleme in der DTM-Filterung sind nicht durch Schwächen des Filters verursacht, sondern mit Ausreissern in der Datenerfassung und systematischen Abweichungen (unzureichende Kalibrierung) begründet. Der manuelle Korrektur-Aufwand kann erfolgreich reduziert werden, wenn die Menge der Ausreisser reduziert oder mit geeigneten Algorithmen vorgängig an die Punkt-Filterung erkannt und eliminiert wird. In hügeligem oder steilem Gebiet hilft die Streifenausgleichung, verbliebene systematische Abweichungen aus der Kalibrierung zu reduzieren und der manuelle Aufwand für das Anpassen der Punkte verschiedener Flugstreifen fällt praktisch weg.
- Attributierung des DOM: Das Bereitstellen von zusätzlichen Angaben im DOM weist einige Vorteile auf, eine zuverlässige und flächendeckende Erfassung ist aber sehr schwierig und kostspielig. Geeigneter wären eine rein automatische Attributierung und eine situationsbezogene, manuelle Klassifizierung von den für eine konkrete Anwendung gebrauchten Objekten. So werden keine Hochspannungsmasten eliminiert, die in einer Anwendung stören, in einer anderen aber zwingend gebraucht werden.
- Der kontinuierliche Verbesserungsprozess kann erst dann zum Tragen kommen, wenn Prozesse stabil und dokumentiert sind. Die Abwicklung von Projekten erfolgt häufig unter Termindruck, welcher die Stabilisierung von neuen Prozessen und der kontinuierlichen Verbesserung wenig Raum lässt. Man kann und muss gerade bei längerfristigen Projekten regelmässig eine Review durchführen, um Potentiale zur Verbesserung zu erkennen und Massnahmen zur Umsetzung einzuleiten.



## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

### 6.1 Schlussfolgerungen

Airborne Laser Scanning hat sich in den vergangenen Jahren als geeignete Technologie für das Erstellen von hoch aufgelösten und genauen Digitalen Terrain- und Oberflächenmodellen bewiesen. Gegenüber der klassischen photogrammetrischen Stereoauswertung weist ALS verschiedene Vorteile auf:

- Datenerfassung ohne Kontrollpunkte und Signalisierung von Passpunkten (direkte Georeferenzierung)
- Höhere Punktdichte und damit bessere vertikale Genauigkeit der abgeleiteten Produkte
- Penetration der Vegetation im laubfreien Zustand bei gleichzeitig hoher Qualität des DOM
- Befliegung unabhängig von den Lichtverhältnissen
- Hoher Automatisierungsgrad

Als wesentlicher Nachteile sind die Komplexität der einzelnen Sensoren und des Sensorsystems, die strikte Trennung von Datenerfassung und -auswertung sowie der hohe Aufwand zur Filterung von DTM und DOM aus der Punktwolke zu nennen. Die lange Prozesskette, die räumliche Separation von Erfassung und Auswertung, die grosse Datenmenge, der bedeutende Rechenaufwand und die damit einhergehende zeitliche Separierung erschweren die Arbeit zusätzlich. Zwischen den technischen Möglichkeiten, den Vorstellungen eines Auftraggebers, des potentiell hohen Automatisierungsgrades und den realisierten Produkten in verschiedenen Projekten gibt es aufgrund dieser Schwierigkeiten grosse Differenzen:

- Das technische Potential von ALS lässt sich zurzeit nur unter optimalen Bedingungen und in einfacher Topographie vollständig ausnutzen. Wirtschaftliche Zwänge führen aber dazu, dass eine Datenerfassung auch unter nicht optimalen Bedingungen durchgeführt wird.
- Fehlendes Wissen über Teilprozesse und mangelnde Einblicke in die Black Box der Sensoren und der Auswertesoftware verhindern ein schnelles Aufdecken von Mängeln und haben minderwertige Daten zur Folge.
- Die Behebung von Fehlern in den Daten ist meist mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden.
- Das unstrukturierte Abscannen der Oberfläche hat zur Folge, dass das DTM bzw. die benötigten Objekte aus der Punktwolke gefiltert werden müssen. Allerdings kann aus den Punkten nicht immer eindeutig auf das angestahlte Objekt geschlossen werden.
- Die Steigerung von Auflösung und räumlicher Genauigkeit führen zu einer kürzeren Gültigkeitsdauer der erfassten Daten:
  - Mit steigender Auflösung werden Details erfasst, die nur für eine gewisse Zeitspanne existieren und wie im Fall von Verkehrsmitteln (Autos, Züge etc.) als eindeutig nicht beständige, störende Objekte im DOM gar in aufwändiger manueller Arbeit zu eliminieren sind.
  - Die höhere räumliche Genauigkeit macht nur auf harten Oberflächen (Kunstabauten) Sinn, da das Terrain sich durch äussere Einflüsse (Feuchtigkeitsgehalt, landwirtschaftliche Nutzung, Erosionsprozesse) kontinuierlich verändert. Abgesehen davon liegt die Zuverlässigkeit der Einzelmessung auf Vegetation tiefer, da aufgrund des unstrukturierten Erfassungsprozesses und der Grösse der abgetasteten Fläche pro Messung keine Klarheit über das tatsächlich registrierte Objekt besteht, sondern über Algorithmen nachträglich geschätzt werden muss.
- Den Auftraggebern fehlt die Erfahrung, wie sie ihre Vorstellungen über ein Produkt in klar definierte *und* messbare Anforderungen umsetzen können. Auftragnehmer haben zwar durch ihre Erfahrung einen Wissensvorsprung, tragen aber zu wenig dazu bei, dass klare Spezifikationen aufgestellt werden.
  - Technische Spezifikationen, bestehend aus Kriterien (Elemente zur Bestimmung der Datenqualität), aus der Identifizierung eines Qualitätsmasses und den Verfahren zur Bestimmung der Datenqualität sowie aus der akzeptierbaren Qualitätsgrenzlage, sind geeignete Werkzeuge, um die geforderte Qualität eines Geodatensatzes zu beschreiben und um die Erfüllung der Qualität nachzuweisen.

Wie bei allen anderen Messverfahren kommt es auch bei ALS zu Abweichungen zwischen „wahrem“ Wert und gemessenem Wert. Diese Messunsicherheiten beziehen sich sowohl auf die einzelnen Messgrössen als auch auf die daraus abgeleiteten Grössen wie z.B. die 3D-Koordinate eines Punktes (Unsicherheitsfortpflanzung): Bei nicht harten Oberflächen kann häufig nicht präzise nachgewiesen

werden, von welchen Objekten eine Messung registriert wurde. Auch die automatischen und manuellen Methoden zur Filterung der Punktwolke sind mit Unsicherheiten behaftet. Obwohl es sich bei ALS um eine komplett neue Technologie zur Erfassung und Erzeugung von Geländemodellen handelt, wurden mehrheitlich die Qualitätskriterien zur Beurteilung eines DTM aus der Photogrammetrie übernommen: räumliche Genauigkeit und Punktdichte. Die aus ALS generierten Modelle eröffnen aber ganz andere Möglichkeiten und sind als Produkte kaum mehr mit den DTM der letzten Generation vergleichbar. Deshalb sind weitere Parameter zur Spezifizierung von hoch aufgelösten DTM und DOM notwendig.

Das in dieser Arbeit beschriebene Qualitätsmodell, welches auf der mehrjährigen Erfahrung in der Produktion von grossflächigen, hoch aufgelösten Geländemodellen mittels ALS und in der Entwicklungserfahrung von Anwendungen im Bereich dreidimensionaler Geodaten basiert, beschreibt in einem ganzheitlichen Ansatz die notwendigen Grundlagen für ein effektives und effizientes Generieren von digitalen Geländemodellen mittels Airborne Laser Scanning. Das Modell beruht auf dem in Qualitätsmanagementsystemen bekanntem Grundsatz, dass in einem ersten Schritt das Zielprodukt mit seinen Qualitätsanforderungen definiert werden müssen. Die Anforderungen werden mit nicht-quantitativen und quantitativen Merkmalen beschrieben und gehen im Pflichtenheft (technische Spezifikationen) in die vertragliche Vereinbarung zwischen Auftragnehmer und Auftraggeber ein. Die nicht-quantitativen Merkmale bestehen aus den übergeordneten Produktinformationen (welche Elemente der Realwelt sind Bestandteil des DTM?), den erforderlichen Metadaten sowie der notwendigen Dokumentation des Produktionsprozesses zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit. Die quantitativen Merkmale beinhalten die messbaren Qualitätskriterien, welche auf den Vorgaben der ISO Norm 19113 aufbauen. Folgende quantitativen Qualitätselemente fliessen in das Qualitätsmodell ein:

- Auflösung (horizontal und vertikal)
- Räumliche Genauigkeit
- Thematische Genauigkeit
- Vollständigkeit
- Zeitliche Genauigkeit
- Logische Konsistenz

Alle Indikatoren haben eine wichtige Bedeutung zur Beschreibung der Qualität digitaler Geländemodelle. Sie werden mit Hilfe geeigneter Prüfmethode und mittels Definition des akzeptierbaren Qualitätsniveaus präzisiert und parametrisiert. Auch wenn wie im Fall der thematischen Genauigkeit statistische und damit einfache Verfahren zur Bestimmung der Datenqualität fehlen, ist eine präzise Beschreibung der Qualitätsanforderung aufgrund der grossen Komplexität der Datenauswertung und der Filterung der Punktwolke von grosser Bedeutung. Die statistischen Prüfungen eignen sich für grossflächige Prüfungen einzelner Qualitätselemente (insbesondere räumliche Genauigkeit, Vollständigkeit der Datenerfassung und horizontale Auflösung). Sie sind allerdings bei Unterschreiten der Qualitätsgrenzlage ebenfalls mittels visueller Beurteilung zu überprüfen, da es eine Vielzahl von begründeten Abweichungen geben kann. Die grosse Bedeutung der visuellen Kontrolle der Daten verlangt nach einer standardisierten Prüfumgebung, in welcher für jedes Qualitätselement geeignete Visualisierungen der Punktwolke angeboten werden, um so die Vollständigkeit der Tests zu gewährleisten und die Subjektivität der Bildinterpretation durch den Sachbearbeiter zu reduzieren.

Zur Reduktion des Prüfaufwandes auf Seiten der Auftraggeber und zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit sind die eingesetzten Methoden und die Prüfergebnisse ausreichend zu dokumentieren. Werden durch den Auftraggeber und Auftragnehmer gemeinsam Spezifikationen und Prüfmethode festgelegt und werden diese von beiden Seiten annähernd identisch interpretiert (gleicher Massstab angelegt), kann sich die Abnahme der Daten beim Auftraggeber vorwiegend auf die Kontrolle der Testdokumentation stützen. Eine vollständige statistische und visuelle Kontrolle ist nur noch für eine Stichprobe (d.h. für einzelne Kacheln) notwendig.

Das Erreichen der geforderten Qualität ist allerdings weniger ein Resultat von möglichst umfangreichen und optimierten Kontrollen, sondern wird nur durch den Einsatz von geeigneter Ausrüstung (Sensoren, Algorithmen) und der Anwendung von standardisierten Prozessen durch geschultes Personal erreicht. Die Realisierungsprozesse sind typischerweise im Rahmen eines firmenweiten Qualitätsmanagementsystems für den allgemeinen Fall beschrieben und werden projektbezogen auf die konkreten Spezifikationen

ausgerichtet. Fehlen standardisierte Prozesse, ist die Gefahr gross, dass sich Fehler einschleichen, weil einzelne Tätigkeiten unvollständig ausgeführt oder gar vergessen werden.

Als letzte Säule im Qualitätsmodell kommen die Managementprozesse zum Tragen. Sie sind weniger für den kurzfristigen technischen Erfolg eines Projektes verantwortlich, sondern für das finanzielle Ergebnis durch geeignete Ressourcenplanung und -einsatz sowie für die professionelle Zusammenarbeit mit den Kunden (Projektmanagement). Der mittel- und langfristige Erfolg wird durch die stetige Weiterentwicklung von Prozessen (kontinuierlicher Verbesserungsprozess) und Personal (Schulung und Training) erreicht.

Das Konzept des vorgestellten Qualitätsmodells ist – obwohl auf die Produktion im Umfeld von ALS ausgerichtet – durch die ganzheitliche Herangehensweise für beliebige weitere Methoden in der Datenerfassung und für beliebige Datensätze übertragbar. Die nicht-quantitativen Qualitätsmerkmale werden insbesondere bei der Erfassung von vektorbasierten Datensätzen sicher eine bedeutendere Rolle einnehmen<sup>38</sup>. Bei den quantitativen Merkmalen wird die Auflösung nur gerade bei anderen Bild-gebenden Verfahren noch zu berücksichtigen sein, dafür steigen bei Vektordaten die Anforderungen hinsichtlich thematischer Genauigkeit und logischer Konsistenz.

Die vorgestellten Testmethoden sind, im Gegensatz zu den Spezifikationen, auf die eingesetzten Sensoren und Auswerteverfahren anzupassen. Der propagierte Grundsatz, dass soweit möglich interne und auf statistischen Verfahren basierende Prüfungen zu erarbeiten sind, gilt selbstredend in allen Fällen. Es ist zu hoffen, dass der Nutzen einer Abstimmung der Testmethoden zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer und die ausführliche Dokumentation der Prüfergebnisse mittelfristig erkannt und das Einsparpotential realisiert wird.

Das Modell kann aber nicht nur für das Verhältnis zwischen Datenproduzent und Datenprovider genutzt werden, sondern soll auch den Endanwendern durch die umfassende Beschreibung als Leitfaden dienen. Aus der Nutzersicht gewinnen sicher noch weitere Kriterien wie Verfügbarkeit oder Aktualität an Bedeutung, welche zwar nicht per se als Qualitätsmerkmal zu betrachten sind, welche aber auf die Qualität der Resultate aus der konkreten Anwendung einen bedeutenden Einfluss haben können. Da üblicherweise nicht mehrere Datensätze mit gleicher Verfügbarkeit und Aktualität, aber unterschiedlichen Qualitätsmerkmalen zur Auswahl stehen, sind Kompromisse bei der Wahl der Datengrundlagen und damit auch bei den Endprodukten zu erwarten. Umfangreiche Metadaten helfen mit, die optimale Wahl zu treffen.

## 6.2 Ausblick

Die Basistechnologien (Sensoren und Auswertelgorithmen) werden sich in den kommenden Jahren sicherlich noch stark weiterentwickeln. Aufgrund der natürlichen Grenzen (kürzere temporale Gültigkeit eines Objekts mit wachsender Auflösung und räumlicher Genauigkeit) ist zu hoffen, dass insbesondere die Zuverlässigkeit der Sensoren ansteigt. Die Erfahrungen im Projekt LWN haben aber gezeigt, dass Massnahmen in anderen Bereichen von grösserer Bedeutung für eine effiziente und effektive Projektabwicklung sind. In den nachfolgenden Kapiteln werden einige dieser potentiellen Verbesserungen vorgestellt.

### 6.2.1 Monitoring des Scannens

Die bedeutendste Schwachstelle im Gesamtprozess ist sicherlich die Datenerfassung. Momentan werden beim Optech-System zwar einige und auch wichtige Informationen in Echtzeit aufbereitet und dargestellt. Aus dem Scanwinkel und der Flughöhe über Grund wird eine genäherte räumliche Abdeckung des Flugstreifens dargestellt, die Variation des Geländes wird zurzeit aber nicht berücksichtigt. Weit schwerwiegender ist aber eine inhaltlich unvollständige Datenerfassung, verursacht durch ungenügende Reflektivität des angestrahlten Objektes oder Dämpfung des Signales. Es fehlen bei Optech detaillierte Angaben vom Scanvorgang während der Datenerfassung: welche Objekte werden erfasst, wie stark ist der

---

<sup>38</sup> Dies wird an der Abstrahierung einer Strasse in einen Geodatensatz sehr schnell klar; je nach Anwendungsgebiet ist ein Strassenobjekt als Fläche (Katastervermessung), Linie (Lärmsimulation) oder Netzwerk (Navigationssysteme) zu betrachten. Damit variieren auch die Erfassungsrichtlinien.

Penetrationsgrad im Wald. Diese Mängel können deshalb erst viel später in der Prozesskette entdeckt werden.

Aufgrund der Probleme in der Erfassung der Vegetation und dunkler Oberflächen im Projekt LWN wurde von TerraPoint eine Software entwickelt, welche den Datenstrom des Laser Scanners analysiert und grafisch aufbereitet. Es hat sich gezeigt, dass ein zur Laufzeit aufbereitetes Intensitätsbild oder eine geschummerte Schrägansicht geeignete Darstellungen für das Erkennen von Mängeln in der Datenerfassung sind. Durch Wahl des ersten oder letzten Returns kann sowohl die Vollständigkeit des DOM wie auch die erwartete Qualität des DTM (Penetration des Waldgebiets) sehr einfach kontrolliert werden. Trotz intensiver Arbeit wurde das Tool aber während des Projekts LWN nie eingesetzt, die beiden Abbildungen sind im Play-Back Modus entstanden. Es ist zu hoffen, dass auch andere Anbieter diese Idee aufnehmen und entsprechende Lösungen entwickeln.



Abbildung 54 Beispiel eines Intensitätsbildes aus einem Flugstreifen (Playback-Modus)

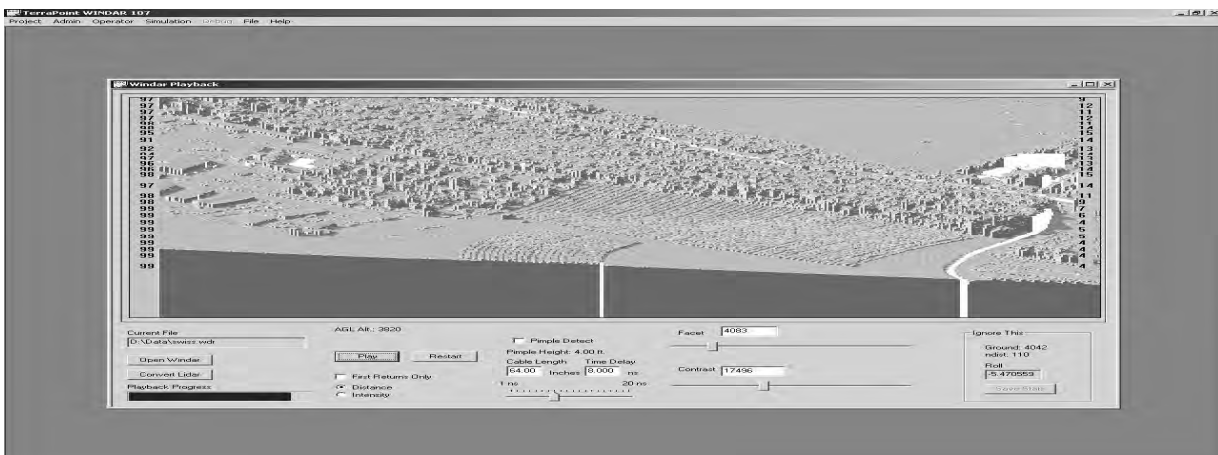


Abbildung 55 3D-Darstellung der Datenerfassung zur Beurteilung der Vollständigkeit in der Erfassung. Weiss: Flächen ohne Messungen.

### **6.2.2 Automatische Selektion der optimalen Punkte im Überlappungsbereich**

Nach dem Wechsel von der streifen- in die kachelbasierte Datenhaltung werden die Punkte aller Streifen als geometrisch gleich genau behandelt. Bei TerraScan sind Ansätze vorhanden, dass Punkte eines Flugstreifens mit einem tieferen Gewicht versehen werden können. Dies macht Sinn, wenn beispielsweise klar ist, dass der gesamte Streifen durch eine schlechte POS-Lösung beeinflusst ist. In dieser Situation lassen sich die Punkte des schlechten Flugstreifens im Überlappungsbereich mit anderen Streifen „ausschneiden“. Die Berechnung der kombinierten Messunsicherheit zeigt aber, dass mit steigendem Scanwinkel vor allem die Genauigkeit quer zu den Flugstreifen abnimmt. Dieser Effekt wird überlagert von der wachsenden Messunsicherheit in der Distanzbestimmung bei flacherem Auftreffwinkel (siehe Abbildung 16). Durch eine Bestimmung der kombinierten Messunsicherheit für Segmente oder Flächen jedes Streifens und der räumlichen Überlagerung dieser Informationen von allen Missionen und Streifen können die jeweils zuverlässigsten und genauesten Punkte automatisch selektiert werden (vgl. Abbildung 36). Dieses Verfahren kann bei schwierigen topographischen Bedingungen die manuelle Bereinigung deutlich reduzieren.

### **6.2.3 Filterung der Terrainpunkte**

Zur Unterstützung der visuellen Kontrolle kann der Filteralgorithmus eine Zuverlässigkeit der Punkt-klassifizierung angeben. Wie in Kapitel 3.7 beschrieben, wird die topologische Beziehung eines Punktes zu seinen Nachbarschaftspunkten mittels dreier Kriterien beurteilt. In der heutigen Programmversion von TerraScan bleibt am Ende des Filterprozesses nur die Information Terrain- oder Nicht-Terrainpunkt. Aufgrund der aktuellen Parameter bei der Klassifizierung eines Punktes in Verhältnis zu der erlaubten Toleranz könnte aber auch eine Angabe zur Zuverlässigkeit der Klassifizierung für jeden Punkt angegeben werden. Durch die grafische Umsetzung dieser Informationen lassen sich problematische Zonen schneller entdecken. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass eine hohe Zuverlässigkeit auch Punkten zugewiesen wird, die aufgrund falscher Annahmen als Terrain klassifiziert sind (der tiefste Punkt innerhalb des ersten Suchfensters wird immer als Bodenpunkt vorausgesetzt).

### **6.2.4 Echtzeit-Datenauswertung**

Mit dem weiteren Ansteigen der Rechnerkapazitäten und Verbesserungen in der Positions-Bestimmung (Übermittlung des DGPS-Korrektursignals in Echtzeit) ist es denkbar, dass Teile der Auswerteprozesse während der Datenverarbeitung abgewickelt werden. Allerdings haben alle heute zum Einsatz kommenden Übermittlungsmethoden (Funk, GSM, UMTS etc.) einige Schwächen (Skaloud, 2006). Fraglich ist zum heutigen Zeitpunkt zudem, wie gross der Nutzen einer partiellen Echtzeit-Datenauswertung ist, sofern nicht die gesamte Prozesskette abgewickelt werden kann.

### 6.3 Dank

Die vorliegende Arbeit ist während der Bearbeitung der LWN-Projekte bei der Swissphoto AG (Regensdorf) initiiert worden. Herr Prof. Dr. H. Ingensand vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich hat sich bereit erklärt, mein Doktoratsstudium zu leiten und zu unterstützen. Ich bedanke mich für seinen Einsatz, die vielen interessanten Diskussionen und Anregungen. Herrn Prof. Dr. M. Schilcher von der Technischen Universität München danke ich für die Übernahme des Ko-Referates.

Einen besonderen Dank gebührt Herrn T. Grünenfelder und Herrn Dr. R. Stengele von der Swissphoto AG, welche mich zu dieser Arbeit motivierten und mir den Freiraum zur Verfügung stellten. Für die kritischen Diskussionen, Ideen und fachliche Durchsicht der Arbeit gilt der Dank den Kollegen bei der Swissphoto AG. Insbesondere möchte ich mich bei Stephan Landtwing, Stephan Meile und Martin Schmits für den intensiven Erfahrungsaustausch bedanken.

Ich danke meinen Kollegen am IGP Herrn Prof. Dr. Alain Geiger, Maja Haberecht, Timo Kahlmann, Adrian Ryf, Thorsten Schulz und Hans-Martin Zogg für die intensiven Diskussionen, die motivierenden Worte und die fachlichen Beiträge. Ebenso danke ich Susanna Naldi und Hanspeter Oesch für die organisatorische Unterstützung.

Mein Dank gilt auch Andreas Fellmann für die kritische Durchsicht der Arbeit.

Die Arbeit wäre ohne die Unterstützung durch meine Frau Patricia nicht möglich gewesen. Ihr, den Kindern und meinen Freunden möchte ich für die Geduld, Motivation und Förderungen in dieser Zeit besonders danken.



## 7 Literaturverzeichnis

- (Aalders, 2002) Aalders, H.J.G.L., 2002. The Registration of Quality in a GIS. In: W. Shi, P. Fisher und M.F. Goodchild (Herausgeber), *Spatial Data Quality*. Taylor & Francis, London and New York, pp. 186-199.
- (Abo Akel et al., 2005) Abo Akel, N., Katrin, K., Filin, S., Sester, M. und Doytsher, Y., 2005, Dense DTM Generalization Aided by Roads Extracted from LiDAR Data, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXVI, part 3/W19 p. 54-59
- (Ackermann et al., 1996) Ackermann, R.J. und Eslami, A., 1996, Quality control procedure for Photogrammetric digital mapping, In *International archives of photogrammetry and remote sensing*; vol XXXVI, part B2 p. 12-17
- (Ahokas et al., 2003) Ahokas, E., H. Kaartinen und Hyypä, J., 2003, Quality Assessment of Airborne Laser Scanner Data, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXIV, part 3/W13
- (Ahokas et al., 2004) Ahokas, E., Kaartinen, H. und Hyypä, J., 2004, A Quality Assessment of repeated Airborne Laser Scanner Observation, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXV, part B3
- (Al-Bayari et al., 2002) Al-Bayari, O.A., Al-Hanbali, N.N., Barbarella, M. und Nashwan, A., 2002, Quality assessment of DTM and Orthophoto generated by Airborne Laser Scanning system using automated Digital Photogrammetry, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXIV, part 3A
- (Artuso et al., 2003) Artuso, R., Bovet, S. und Streilein, A., 2003, Practical Methods for the Verification of countrywide Terrain and Surface Models, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXIV, part 3/W13
- (Axelsson, 2000) Axelsson, P., 2000, DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models., In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXIII, part B4 p. 111-118
- (Balce, 1987) Balce, A.E., 1987. Determination of Optimum Sampling Interval in Grid Digital Elevation Models (DEM) Data Acquisition. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 53(3): 323-330.
- (Baltsavias, 1999a) Baltsavias, E.P., 1999a. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2/3): 199-214.
- (Baltsavias, 1999b) Baltsavias, E.P., 1999b. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2/3): 164-198.
- (Bartelme, 1995) Bartelme, N., 1995. *Geoinformatik Modelle, Strukturen, Funktionen*. Springer, Berlin etc., XII, 414 pp.
- (Bauer et al., 2003) Bauer, M. und Wanninger, L., 2003. *Vermessung und Ortung mit Satelliten GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. Wichmann, Heidelberg, 392 pp.
- (Behan et al., 2000) Behan, A., Maas, H.-G. und Vosselman, G., 2000. Steps toward quality improvement of airborne laser scanner data. *Annual Conference of the Remote Sensing Society*, Leicester.

- (Bill, 1996) Bill, R., 1996. Grundlagen der Geo-Informationssysteme - Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen, Band 2. Wichmann, Heidelberg, 463 pp.
- (Briese et al., 2002) Briese, C., Pfeifer, N. und Dorninger, P., 2002, Applications of the robust Interpolation for DTM Determination, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIV, part 3A
- (Burmam, 2002) Burmann, H., 2002, Laser Strip Adjustment for Data Calibration and Verification, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIV, part 3A
- (Caspar, 1992) Caspar, W., 1992. Qualitätsmerkmale von Geo-Daten. Zeitschrift für Vermessungswesen, 117(7): 361-367.
- (Cobby et al., 2001) Cobby, D.M., Mason, D.C. und Davenport, I.J., 2001. Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 56(2): 121-138.
- (Cocard, 1995) Cocard, M., 1995. High precision GPS processing in kinematic mode. Volume 52, Zürich.
- (Cramer, 2003) Cramer, M., 2003. Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (4): 267-278.
- (Davis et al., 1997) Davis, T.J. und Keller, P.C., 1997. Modelling uncertainty in natural resource analysis using fuzzy sets and Monte Carlo simulation: slope stability prediction. International Journal of Geographical Information Science, 11(5): 409 - 434.
- (Deming, 1986) Deming, W.E., 1986. Out of Crisis. Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Cambridge.
- (Dikau, 1989) Dikau, R., 1989. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: J. Raper (Herausgeber), Three dimensional applications in Geographical Information Systems. Taylor & Francis, London, New York, Philadelphia, pp. 51-77.
- (ED-76/DO-200A, 1998) ED-76/DO-200A:1998, Standards for processing aeronautical data. Eurocae, Paris.
- (ED-98/DO-276, 2005) ED-98/DO-276:2005, User requirements for terrain and obstacle data (Draft). Eurocae, Paris.
- (El-Sheimy et al., 2005) El-Sheimy, N., Valeo, C. und Habib, A., 2005. Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications. Artech House remote sensing library. Artech House Inc., Norwood, MA, 250 pp.
- (Favey, 2001) Favey, E., 2001. Investigation and improvement of Airborne Laser Scanning Technique for monitoring surface elevation changes of glaciers. Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 148 pp.
- (FEMA, 2004) FEMA; 2004, Guidelines for Digital Elevation Data. Version 1, [http://www.ndep.gov/NDEP\\_Elevation\\_Guidelines\\_Ver1\\_10May2004.pdf](http://www.ndep.gov/NDEP_Elevation_Guidelines_Ver1_10May2004.pdf), letzter Zugriff: 13. Juni 2006
- (Filin, 2002) Filin, S., 2002, Surface Clustering from Airborne Laser Scanning Data, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIV, part 3A

- (Filin, 2003) Filin, S., 2003. Recovery of Systematic Biases in laser Altimetry Data Using Natural Surfaces. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(11): 1235-1242.
- (Fisher, 1998) Fisher, P., 1998. Improved Modeling of Elevation Error with Geostatistics. *Geoinformatica*, 2(3): 215 - 233.
- (Flach et al., 1999) Flach, P., Keller, L. und Zaugg, F., 1999. Prozessorientiertes Qualitätsmanagement in der geodätischen Praxis. IGP Bericht Nr. 288, ETH Zürich, Zürich.
- (Flood, 2004) Flood, M., 2004, ASPRS Guidelines - Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data, [http://www.asprs.org/society/committees/lidar/Downloads/Vertical\\_Accuracy\\_Reporting\\_for\\_Lidar\\_Data.pdf](http://www.asprs.org/society/committees/lidar/Downloads/Vertical_Accuracy_Reporting_for_Lidar_Data.pdf), letzter Zugriff: 14.10.2005
- (Flotron et al., 2000) Flotron, A. und Kölbl, O., 2000. Precision terrain models for civil engineering, European Organisation for experimental photogrammetric research, Frankfurt am Main.
- (Frederiksen, 1981) Frederiksen, P., 1981. Terrain analysis and accuracy prediction by means of the Fourier transformation. *Photogrammetria*, 36(4): 145-157.
- (Fritsch, 1992) Fritsch, D., 1992. Zur Abschätzung des kleinsten Diskretisierungsintervalls bei der DGM-Datenerfassung. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 117(7): 367-377.
- (Glaus, 2006) Glaus, R., 2006. Kinematic Track Surveying by Means of a Multi-Sensor Platform, ETH Zürich, Zürich, 184 pp.
- (Gorte et al., 2005) Gorte, B., Pfeifer, N. und Oude Elberink, S., 2005, Height texture of low vegetation in Airborne Laser Scanner data and its potential for DTM correction, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXVI, part 3/W19 p. 150-155
- (Grün, 1985) Grün, A., 1985. Adaptive Least Squares Correlation - A Powerful Image Matching Technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 14(3).
- (GUM, 1995) GUM, 1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). ISO International Organization for Standardization, Geneva.
- (Gutierrez et al., 2005) Gutierrez, C.M., O'Neill, M. und Jeffrey, W.A., 2005. Proceedings of the 2nd NIST LADAR Performance Evaluation Workshop. NIST LADAR Performance Evaluation Workshop, National Institute of Standards and Technology.
- (Haebler, 2006) Haebler, B., 2006. Airborne Laser Scanning für Digitale Höhenmodelle. Diplomarbeit, ETH Zürich, Zürich.
- (Han, 1997) Han, S., 1997. Quality-control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real-time GPS kinematic positioning. *Journal of Geodesy*, 71(6): 351-361.
- (Heister, 2005) Heister, H., 2005. Zur Messunsicherheit im Vermessungswesen. *Geomatik Schweiz*, 103(11/12): 604-607, 670-673.
- (Hodgson et al., 2004) Hodgson, M.E. und Bresnahan, P., 2004. Accuracy of Airboren Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3): 331-339.

- (Hofmann-Wellenhof 2001) Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. und Collins, J., 2001. GPS: Theory and Practice. Springer, Wien, New York.
- (Hug, 1996) Hug, C., 1996. Entwicklung und Erprobung eines abbildenden Laseraltimeters für den Flugeinsatz unter Verwendung des Mehrfrequenz-Phasenvergleichsverfahrens. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, 122 pp.
- (Hug et al., 2004a) Hug, C., Krzystek, P. und Fuchs, W., 2004a, Advanced Lidar Data Processing with LAStools, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXV, part B8
- (Hug et al., 2004b) Hug, C., Ulrich, A. und Grimm, A., 2004b, Litemapper-5600 A waveform digitizing LiDAR Terrain and vegetation mapping system, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXV, part B3 p. 24-29
- (Hutton et al., 2005) Hutton, J. und Mostafa, M., 2005. 10 Years of Direct Georeferencing for Airborne Photogrammetry. GIS/GeoBit, 18(11): 33-41.
- (Ingensand, 2004) Ingensand, H., 2004. Einführung in die Geodätische Messtechnik, Skript ETH Zürich.
- (Ingensand, 2005) Ingensand, H., 2005. Geodätische Sensorik, Skript ETH Zürich.
- (Ingensand, 2006) Ingensand, H., 2006. Meteorological Aspects in Terrestrial Laser-Scanning Technology. Proceedings of the 12th FIG Symposium on Deformation Measurement, Baden (AT).
- (Ip et al., 2005) Ip, A.W.L., El-Sheimy, N. und Mostafa, M.M.R., 2005, System performance analysis of INS/DGPS integrated system for mobile mapping system (MMS), file:///E:/unterlagen/laserscanning/ext\_orientation/Ip\_SystemPerformanceGpsIns.pdf, letzter Zugriff: 20.10.2005
- (ISO 9000, 2000) ISO 9000:2000, Quality management systems - Fundamentals and vocabulary. ISO International Organization for Standardization, Geneva.
- (ISO 9001, 2000) ISO 9001:2000, Quality management systems - Requirements. ISO International Organization for Standardization, Geneva.
- (ISO 10005, 2003) ISO 10005:2003, Quality management - Guidelines for quality plans. ISO International Organization for Standardization, Geneva.
- (ISO 10006, 2003) ISO 10006:2003, Quality management systems - Guidelines for quality management in projects. ISO International Organization for Standardization, Geneva.
- (ISO 19111, 2003) ISO 19111:2003, Geographic information - Spatial Referencing by Coordinates. ISO International Organization for Standardization, Geneva.
- (ISO 19113, 2004) ISO 19113:2004, Geographic information - Quality Principles. ISO International Organization for Standardization, Geneva.
- (ISO 19114, 2003) ISO 19114:2003, Geographic information - Quality evaluation procedures. ISO International Organization for Standardization, Geneva.
- (ISO 19115, 2003) ISO 19115:2003, Geographic information - Metadata. ISO International Organization for Standardization, Geneva.
- (ISO, 2005) ISO; 2005, The ISO Survey-2004, <http://www.iso.org/iso/en/prods-services/otherpubs/pdf/survey2004.pdf>, letzter Zugriff: 31.10.2005

- (Jakobsson, 2002) Jakobsson, A., 2002. Data Quality and Quality Management - Examples of Quality Evaluation Procedures and Quality Management in European National Mapping Agencies. In: W. Shi, P. Fisher und M.F. Goodchild (Herausgeber), Spatial Data Quality. Taylor & Francis, London and New York, pp. 217-229.
- (Jekeli, 2001) Jekeli, C., 2001. Inertial navigation systems with geodetic applications. Walter de Gruyter, Berlin.
- (Kaartinen et al., 2005) Kaartinen, H. et al., 2005, Accuracy of 3D city models: EuroSDR comparison, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXVI, part 3/W19 p. 227-232
- (Kamiske et al., 2003) Kamiske, G.F. und Brauer, J.-P., 2003. Qualitätsmanagement von A bis Z Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements. Hanser, München, 431 pp.
- (Katzenbeisser, 2003a) Katzenbeisser, R., 2003a, About Calibration of LIDAR Sensors, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIV, part 3/W13
- (Katzenbeisser, 2003b) Katzenbeisser, R., 2003b, Echo Detection, [www.toposys.de](http://www.toposys.de), letzter Zugriff: 24.06.2005
- (KI Team, 2005) KI Team; 2005, LSDC - Eine neuartige Software zur Klassifizierung von Airborne Laserscan Daten basierend auf Künstlicher Intelligenz, [http://www.kiteam.de/LSDC\\_leaflet\\_german.pdf](http://www.kiteam.de/LSDC_leaflet_german.pdf), letzter Zugriff: 23. März 2006
- (Kölbl, 2001) Kölbl, O., 2001, Technical Specifications for the Elaboration of Digital Elevation Models, [http://www.intesagis.it/specifiche/Doc\\_wg03/DTM16I\\_Spec\\_Apr01.pdf](http://www.intesagis.it/specifiche/Doc_wg03/DTM16I_Spec_Apr01.pdf), letzter Zugriff: 06.06.2006
- (Kraus et al., 1998) Kraus, K. und Pfeifer, N., 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 53(4): 193-203.
- (Kraus, 2002) Kraus, K., 2002. Laser-Scanning - ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, (10).
- (Kraus et al., 2004) Kraus, K., Briese, C., Attenwenger, M. und Pfeifer, N., 2004, Quality Measures for Digital Terrain Models, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXV, part B2
- (Kuhlmann, 2003) Kuhlmann, H., 2003. Kalman-Filtering with Coloured Measurement Noise for Deformation Analysis. Proceedings of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini.
- (Kyriadikis et al., 1999) Kyriadikis, P.C., Shortridge, A.M. und Goodchild, M.F., 1999. Geostatistics for conflation and accuracy assessment of digital elevation models. International Journal of Geographical Information Science, 13(7): 677-707.
- (Landtwing, 2005) Landtwing, S., 2005. Airborne Laser Scanning- Genauigkeitsinformationen für den Auswertungsprozess. Diplomarbeit, ETH Zürich, Zürich, 83 pp.
- (Latypov, 2002) Latypov, D., 2002. Estimate relativ lidar accuracy information from overlapping flight lines. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 56(4): 236-245.

- (Li et al., 2005) Li, Z., Zhu, Q. und Gold, C., 2005. Digital Terrain Modelling: Principles and Methodology. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington DC, 323 pp.
- (Lohmann et al., 1999) Lohmann, P. und Koch, B., 1999. Quality Assessment of Laser-Scanner-Data. Sensors and Mapping from Space 1999, IPG Hannover.
- (Lohr et al., 1995) Lohr, U. und Eibert, M., 1995. The TopoSys Laser Scanner-System. Photogrammetric Week 95, Stuttgart, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (Lüthy, 2004) Lüthy, J., 2004, How to evaluate the Quality of Airborne Laser Scanning Data, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXVI, part 8/W2 p. 313-317
- (Lüthy et al., 2005) Lüthy, J. und Stengele, R., 2005, 3D Mapping of Switzerland - challenges and experiences, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXVI, part 3/W19 p. 42-47
- (Lüthy et al., 2006) Lüthy, J., Landtwing, S., Heil, E. und Angst, D., 2006. Airborne Laser Scanning for Airport Terrain and Obstacle Mapping - A limited feasibility study, Swissphoto, Regensdorf, CH.
- (Maas, 2000) Maas, H.-G., 2000, Least-squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN structure, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIII, part B3 p. 548-555
- (MacDonald, 2005) MacDonald, D., 2005, Fast kinematic ambiguity resolution in GrafNav Version 6.03, <http://www.waypnt.com/html/fastambiguity.pdf>, letzter Zugriff: 25.11.2005
- (Masaharu et al., 2002) Masaharu, H. und Ohtsubo, K., 2002, A filtering method for Airboren Laser Scanner data for complex terrain, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIV, part 3A
- (Maune, 2001) Maune, D., 2001. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. ASPRS, 540 pp.
- (Meier et al., 2001) Meier, E.H. und Nüesch, D.R., 2001. Genauigkeitsanalyse von hochauflösenden Gelände- und Oberflächenmodellen. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (6): 405-416.
- (Melzer et al., 2004) Melzer, T. und Briese, C., 2004. Extraction and Modeling of Power Lines from ALS Point Clouds. Talk: Austrian Association for Pattern Recognition (ÖAGM), Hagenberg, Österreichische Computer Gesellschaft.
- (Miller et al., 1958) Miller, C.L. und Laflamme, R.A., 1958. The Dgital Terrain Model - Theory & Application. Photogrammetric Engineering, 24: 433-442.
- (Mohammed et al., 1999) Mohammed, A.H. und Schwarz, K.-P., 1999. Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS. Journal of Geodesy, 73(4): 193-203.
- (Moser et al., 2004) Moser, M. und Reich, J., 2004. DGM zur Herstellung von Hochwassergefahrenkarten, Workshop der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), Stuttgart.
- (Mostafa et al., 2001a) Mostafa, M.M.R. und Hutton, J., 2001a. Direct positioning and orientation systems. How do they work? What is the attainable accuracy? Gateway to the New Millenium (ASPRS Annual Conference), St. Louis (Missouri), American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.

- (Mostafa et al., 2001b) Mostafa, M.M.R., Hutton, J. und Reid, B., 2001b. GPS/IMS Products - the Applanix approach. Photogrammetric Week 01, Stuttgart, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- (NCDCDS, 1988) National Committee for Digital Cartographic Data Standards, N., 1988. The proposed standard for digital cartographic data. *The American Cartographer*, 15: 9-140.
- (Niirst10, 2005) Niirst10; 2005, GeoCue Version 2.0 Workflow Management, letzter Zugriff: 13. Februar 2006
- (OGC, 2005) OGC; 2005, History of OGC, <http://www.opengeospatial.org/about/?page=history>, letzter Zugriff: 19.10.2005
- (Optech, 2004) Optech, 2004. REALM - Processing Manual.
- (Oude Elberink et al., 2003) Oude Elberink, S., Brand, G. und Brügelmann, R., 2003, Quality Improvement of Laser Altimetry DEM's, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXIV, part 3/W13
- (Palmateer, 2005) Palmateer, J., 2005. Ladar Angular Resolution, Proceedings of the 2nd NIST LADAR Performance Evaluation Workshop. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- (Pâquet, 2003) Pâquet, R., 2003, A Method to Predict Accuracy of Least Squares Surface Matching for Airborne Laser Scanning Data Sets, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXIV, part 3/W13
- (Parrish et al., 2005) Parrish, C.E., Tuell, G.H., Carter, W.E. und Shrestha, R.L., 2005. Configuring an airborne laser scanner for detecting airport obstructions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(1).
- (Pereira et al., 1999) Pereira, L.M.G. und Wicherson, R.J., 1999. Suitability of laser data for deriving geographical information. A case study in the context of management of fluvial zones. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2/3): 105-114.
- (Petzold et al., 1999) Petzold, B., Reiss, P. und Stössel, W., 1999. Laser scanning-surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2/3): 95-104.
- (Pfeifer et al., 2004) Pfeifer, N., Gorte, B. und Oude Elberink, S., 2004, Influences of vegetation on Laser Altimetry - analysis and correction approaches, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXVI, part 8/W2
- (Radtke, 1997) Radtke, P., 1997. Ganzheitliches Modelle zur Umsetzung von Total Quality Management. Dissertation, TU Berlin.
- (Raggia, 2001) Raggia, L., 2001. Ein Modell für die Qualität räumlicher Daten zur Bewertung der photogrammetrischen Gebäudeerfassung. Dissertation, Universität Bonn, Bonn, 93 pp.
- (Reiss, 2002) Reiss, P., 2002. High-quality DTMs. *GIM International*, 16(11): 40-43.
- (Rieger et al., 2005) Rieger, W., Seebacher, M., Würländer, R. und Bauerhansl, C., 2005. Erstellung eines Laser-DHM für Voralberg 2002-2005. *Internationale Geodästische Woche Obergurgl 2005*, Obergurgl, Herbert Wichmann.

- (Roesler, 2000) Roesler, G., 2000, NovAtel OEM4 kinematic test results, <http://www.waypnt.com/html/fastambiguity.pdf>, letzter Zugriff: 25.11.2005
- (Satalich, 2001) Satalich, J., 2001. Error sources in airborne GPS positioning techniques. Gateway to the New Millenium (ASPRS Annual Conference), St. Louis (Missouri), American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
- (Schenk, 2001) Schenk, T., 2001. Modeling and analyzing systematic errors in airborne laser scanners, Technical Notes in Photogrammetry, OSU, No. 19, Columbus, OH, pp. 39.
- (Schenk et al., 2001) Schenk, T. und Csathó, B., 2001. Modellierung systematischer Fehler von abtastenden Laseraltimetern. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (5): 361-373.
- (Schilcher et al., 1996) Schilcher, M., Aumann, G. und Holzmann, W., 1996. Qualitätsanforderungen und Standards für Geodaten, Technische Universität München, Geodätische Institut, Fachgebiet Geoinformationssysteme, München.
- (Schulz et al., 2004) Schulz, T., Zogg, H.-M. und Ingensand, H., 2004. Terrestrisches Laserscanning und seine Anwendungen in der Ingenieurvermessung. 14th International Conference on Engineering Surveying, Zürich, geomETH.
- (Schwarz et al., 2004) Schwarz, K.-P. und El-Sheimy, N., 2004, Mobile Mapping Systems - State of the Art and Future Trends, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXV, part B5
- (Seghezzi, 1996) Seghezzi, H.D., 1996. Integriertes Qualitätsmanagement - das St. Galler Konzept. Hansen, München/Wien.
- (Sithole et al., 2003) Sithole, G. und Vosselman, G., 2003. Report: ISPRS Comparison of Filters, Departement of Geodesy, Delft.
- (Sithole et al., 2005) Sithole, G. und Vosselman, G., 2005, Filtering of airborne laser scanner data based on segmented point clouds In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXVI, part 3/W19 p. 66-71
- (Skaloud, 1999) Skaloud, J., 1999. Optimizing Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/GPS. Dissertation, University of Calgary, Calgary, 156 pp.
- (Skaloud et al., 2000) Skaloud, J. und Schwarz, K.-P., 2000. Accurate Orientation for Airborne Mapping Systems. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66(4): 393-401.
- (Skaloud, 2006) Skaloud, J., 2006. Reliability of Direct Georeferencing Phase 0 - An overview of the current approaches and possibilities, EuroSDR Commission 1.
- (Smith et al., 2005) Smith, B. und Lane, T., 2005. An Assessment of Vertical Accuracy of Optech's ALTM 3100 Airborne Laser Scanning System. Map Middle East 2005, Dubai, UAE.
- (Smith et al., 2003) Smith, S.L., Holland, D.A. und Longley, P.A., 2003, Investigating the Spatial Structure of Error in Digital Surface Models Derived from Laser Scanning Data, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIV, part 3/W13



- (Soininen, 2006) Soininen, A., 2006, Ground Classification, [http://www.terrasolid.fi/ENG/Presentations/ground\\_classification.ppt](http://www.terrasolid.fi/ENG/Presentations/ground_classification.ppt), letzter Zugriff: 30.03.06
- (Swisstopo, 2000) Swisstopo, 2000. Projekt LWN RE2:Westschweiz. Ausschreibungsunterlagen (Pflichtenheft). swisstopo.
- (Taylor, 1997) Taylor, J.R., 1997. An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements. University Science Books, Sausalito, California, 327 pp.
- (Thompson et al., 2001) Thompson, G. und Maune, D., 2001, Issue 7: Light Detection and Ranging (LIDAR) Specifications, [http://www.ncfloodmaps.com/pubdocs/issue\\_papers/IP07-lidar\\_spec.pdf](http://www.ncfloodmaps.com/pubdocs/issue_papers/IP07-lidar_spec.pdf), letzter Zugriff: 13. Juni 2006
- (Toth, 2002) Toth, C.K., 2002, Calibrating Airborne Lidar Systems, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIV, part Part 2 p. 475-480
- (Tóvári et al., 2005) Tóvári, D. und Pfeifer, N., 2005, Segmentation based robust interpolation - a new approach to laser data filtering In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXVI, part 3/W19 p. 79-84
- (Tóvári et al., 2004) Tóvári, D. und Vögtle, T., 2004, Object Classification in Laserscanning Data, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXVI, part 8/W2
- (Vosselman, 2002) Vosselman, G., 2002, On the estimation of planimetric offsets in laser altimetry data, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIV, part 3A
- (Wack et al., 2003) Wack, R., Schard, M., Barrucho L, Lohr, U. und Oliveira, T., 2003, Forest inventory for eucalyptus plantations based on airborne laserscanner data, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXIV, part 3/W13
- (Wack et al., 2005) Wack, R. und Stelzl, H., 2005, Laser DTM Generation for South-Tyrol and 3D-Visualization, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXVI, part 3/W19 p. 48-53
- (Wagner et al., 2003) Wagner, W., Ulrich, A. und Briese, C., 2003. Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, (4): 223-235.
- (Wagner et al., 2004a) Wagner, W., Eberhöfer, C., Hollaus, M. und Summer, G., 2004a, Robust Filtering of Airborne Laser Scanner Data for Vegetation Analysis, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXVI, part 8/W2
- (Wagner et al., 2004b) Wagner, W., Ulrich, A., Melzer, T., Briese, C. und Kraus, K., 2004b, From Single-Pulse to Full-Waveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXV, part B3
- (Wang et al., 2004) Wang, C., Hu, Y. und Tao, V., 2004, Identification and risk modeling of airfield obstructions for aviation safety management, In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing; vol XXXV, part B8

- (Wang et al., 2006) Wang, Y., Weinacker, H. und Koch, B., 2006. Automatic non-ground Objects Extraction based on Multi-Returned LIDAR data. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, (2): 127-137.
- (Waypoint, 2005) Waypoint; 2005, Kinematic Surveys, <http://www.waypnt.com/hkin.html>, letzter Zugriff: 25.11.2005
- (Wechsler, 2000) Wechsler, S.P., 2000. Digital Elevation Model (DEM) Uncertainty: Evaluation and Effect on Topographic Parameters. PhD, State University of New York, New York.
- (Wehr et al., 1999) Wehr, A. und Lohr, U., 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54(2/3): 68-82.
- (Willimann, 2004) Willimann, K., 2004. Amtliche Vermessung und Geographische Informationssysteme, Skript ETH Zürich.
- (Wotruba et al., 2005) Wotruba, L., Morsdorf, F., Meier, E.H. und Nüesch, D.R., 2005, Assessment of sensor characteristics of an airborne laser scanner using geometric reference targets, In *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*; vol XXXVI, part 3/W19 p. 1-6
- (Zhang et al., 2002) Zhang, J. und Goodchild, M.F., 2002. Uncertainty in Geographical Information. *Research Monographs in Geographical Information Systems*. Taylor & Francis, London, 266 pp.
- (Zollondz, 2002) Zollondz, H.D., 2002. Grundlagen Qualitätsmanagement: Einführung in Geschichte, Begriffe, Systeme und Konzepte. Oldenbourg 2002, München.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Schematische Darstellung eines Prozesses .....	4
Abbildung 2	Verfeinerter, generischer Prozessablauf .....	6
Abbildung 3	Überblick über die Informationen zur Datenqualität nach ISO 19113 .....	9
Abbildung 4	Der Prozess Qualitätsprüfung und Dokumentation nach ISO 19114 .....	10
Abbildung 5	Die Prüfmethode nach ISO 19114 .....	12
Abbildung 6	Digitales Oberflächen- und Terrainmodell .....	13
Abbildung 7	Messprinzip eines ALS-Systems .....	15
Abbildung 8	Gesendeter und empfangener Impuls beim Laser Scanning .....	16
Abbildung 9	Penetration des Laserstrahls durch Vegetation .....	17
Abbildung 10	Differenz in der Distanzbestimmung .....	17
Abbildung 11	Einfluss des Geländes und Scanwinkels auf das reflektierte Signal .....	18
Abbildung 12	Multi-Path-Effekt durch Reflektion an einer Gebäudefassade .....	25
Abbildung 13	Unterschiedliche Erfassung desselben Baumes im Winter 2001 bzw. 2003 .....	25
Abbildung 14	Datenlücken auf Dächern und Strassen .....	26
Abbildung 15	Einfluss der Reflektion auf die Distanzmessung .....	27
Abbildung 16	Einfluss des Auftreffwinkels und der Hangneigung auf die Messunsicherheit .....	28
Abbildung 17	Effekt einer einzelnen inkorrekten IMS-Messung .....	30
Abbildung 18:	Ellipsenförmige Darstellung der kombinierten Messunsicherheit .....	33
Abbildung 19	Mangelhafte Kalibrierung mit horizontalen Versatz zweier Scanstreifen .....	36
Abbildung 20	Die Hauptprozesse bei der Produktion von DGM mittels ALS .....	39
Abbildung 21	Einfluss eines Datenbedürfnis auf Spezifikationen und Prozesse .....	41
Abbildung 22	Arbeitsfenster des Flugplanungstool ALTM-Nav von Optech .....	43
Abbildung 23	Die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Wahl des Befliegungszeitpunkts .....	44
Abbildung 24	Darstellung des Fortschritts in ALTM-Nav während der Datenaufzeichnung .....	45
Abbildung 25	Querschnitt durch die ungefilterten 3D Punkte einer Baumgruppe .....	47
Abbildung 26	In das Gelände integriertes Haus .....	48
Abbildung 27	Typischer Katalog der Datensätze in einem ALS-Projekt .....	51
Abbildung 28	Fehler 1. und 2. Art bei der Klassifizierung eines DTM .....	59
Abbildung 29	Fehler 2. Art bei der Klassifizierung eines DTM .....	59
Abbildung 30	Der Aufbau des ALS-Qualitätsmodells .....	62
Abbildung 31	Verschiedene Beispiele von Objekten, die im DOM stören .....	65
Abbildung 32	Auswirkung der horizontalen Auflösung .....	69
Abbildung 33	Situation mit 20 m Höhenkurven .....	70
Abbildung 34	Geländeverlauf des Profils .....	71
Abbildung 35	Ausschnitt aus Profil vom m 725 bis m 1200 .....	71
Abbildung 36	Beispiel der kombinierten Messunsicherheit .....	74
Abbildung 37	Verschiedene Datenlücken zwischen benachbarten Flugstreifen .....	76
Abbildung 38	Beispiele von Differenzen in der Vollständigkeit der Objekterfassung .....	76
Abbildung 39	Gegenüberstellung der Bedeutung der Qualitätsmerkmale .....	79
Abbildung 40	Verlauf der räumlichen Genauigkeit über die wichtigsten Prozesse .....	82
Abbildung 41	Vergleich verschiedener Qualitätsindikatoren in POSGPS .....	89
Abbildung 42	Architektur des Produktionssystem .....	92
Abbildung 43	Visuelle Kontrolle der Punktklassifizierung .....	94
Abbildung 44	Definition des Ablaufs von kachelbasierten Aktivitäten .....	96

---

Abbildung 45	Grafische Benutzerführung für die visuelle Prüfung .....	97
Abbildung 46	Letzte Seite aus einem Bericht über die räumliche Genauigkeit .....	98
Abbildung 47	Auszug aus einem umfangreichen Qualitätsbericht des Auftragnehmers.....	98
Abbildung 48	Die Abdeckung des Projekts LWN und die 5 Realisierungseinheiten .....	101
Abbildung 49	Kanton Uri – Reusstal, Neigungsraaster überlagert mit Schummerung .....	104
Abbildung 50	Geplante Fluglinien für den Bereich aus Abbildung 49.....	104
Abbildung 51	Überlagerung von geplanten und geflogenen Fluglinien .....	105
Abbildung 52	Die Prozessschritte in der Verarbeitung der Punktwolke .....	108
Abbildung 53	Histogramm der Differenzen zwischen DTM und Kontrollpunkten in RE02 .....	112
Abbildung 54	Beispiel eines Intensitätsbildes aus einem Flugstreifen (Playback-Modus) .....	118
Abbildung 55	3D-Darstellung der Datenerfassung zur Beurteilung der Vollständigkeit .....	118

## 9 Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1	Qualitätsparameter von Geodaten.....	8
Tabelle 2	Erläuterungen zum Prozess der Qualitätsprüfung.....	11
Tabelle 3	Zusammenstellung der bedeutendsten Sensor-Charakteristiken.....	22
Tabelle 4	Geschätzte kombinierte Messunsicherheiten für verschiedene Flughöhen .....	32
Tabelle 5	Matrix zu den in einer Flugplanung festzulegenden Parametern.....	42
Tabelle 6	Dokument mit den Kalibrierinformationen eines ALS von Optech .....	53
Tabelle 7	Auszug aus den Aufzeichnungen des Laserscanners.....	56
Tabelle 8	Spezifikation des LAS-Formats für Punkt-Datensätze .....	63
Tabelle 9	Erweiterung der traditionellen Metainformation nach ISO 19115 .....	67
Tabelle 10	Zusammenstellung der Resultate aus der Analyse des Soll-Punktabstandes.....	71
Tabelle 11	Methoden zur Bestimmung der räumlichen Genauigkeit .....	73
Tabelle 12	Vorschlag für technische Spezifikationen eines DTM als Geobasisdatensatzes .....	81
Tabelle 13	Prozessbezogene Qualitätskontrollen der Spezifikationen eines DTM .....	87
Tabelle 14	Resultate der quantitativen Qualitätskontrollen für RE02-RE04.....	112

## 10 Anhang

### 10.1 Glossar und Abkürzungen

<i>AGNES</i>	<i>Automatisches GPS-Netz Schweiz</i>
<i>ALK</i>	<i>Automatisierte Liegenschaftskarte</i>
<i>ALS</i>	<i>Airborne Laser Scanning</i>
<i>ALTM-Nav</i>	<i>Softwareprodukt von Optech zur Flugplanung und zur Steuerung/Überwachung der Datenerfassung</i>
<i>ASPRS</i>	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
<i>Auftreffwinkel</i>	<i>Winkel zwischen Lichtstrahl und Oberfläche des angestrahlten Objekts</i>
<i>AWG</i>	<i>Automatisiert generierte Waldgrenzen</i>
<i>Beam Divergence</i>	<i>Die Beam Divergence eines elektromagnetischen Strahles bezeichnet den Öffnungswinkel des Sendestrahls. Sie wird auch als innerer Öffnungswinkel bezeichnet.</i>
<i>Boresight Winkel</i>	<i>Drehwinkel zwischen IMS und Laser Scanner</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i>
<i>CEN</i>	<i>Comité Européen de Normalisation</i>
<i>CH03</i>	<i>Schweizerisches Bezugssystem der Amtlichen Vermessung, 1903 festgelegt und eingeführt</i>
<i>CH03+</i>	<i>Schweizerisches Bezugssystem der neuen Landesvermessung 1995</i>
<i>CHTRF95</i>	<i>Dreidimensionaler Referenzrahmen basierend auf dem Schweizerischen GPS-Landesnetz und dem permanenten GPS-Netz AGNES. Die Koordinatensätze sind im Bezugssystem CHTRS95. CHTRF95 ist gemäss Festlegung im zeitabhängigen System CHTRS95 ein Datensatz, welcher sich auf den Zeitpunkt <math>t_0 = 01.01.1995</math> bezieht.</i>
<i>DB</i>	<i>Datenbank</i>
<i>DGM</i>	<i>Digitales Geländemodell, Übergeordneter Begriff für ein dreidimensionales Modell zur Repräsentation der Erdoberfläche</i>
<i>DGPS</i>	<i>Differentielles GPS</i>
<i>DHM25</i>	<i>Digitales Höhenmodell der Schweiz, abgeleitet aus den Höheninformationen der Landeskarten 1:25'000</i>
<i>DOM</i>	<i>Digitales Oberflächenmodell: beschreibt i. A. die sichtbare Erdoberfläche und beinhaltet dadurch auch Kunstbauten und Vegetation</i>
<i>DOP</i>	<i>Digitales Orthophoto</i>
<i>DTM</i>	<i>Digitales Terrainmodell: beschreibt den dreidimensionalen Verlauf der Erdoberfläche, ohne Kunstbauten und Vegetation</i>
<i>EDBS</i>	<i>Einheitliche Datenbankschnittstelle</i>
<i>EFQM</i>	<i>European Foundation of Quality Management</i>
<i>Expo02</i>	<i>Schweizerische Landesausstellung 2002</i>
<i>FEMA</i>	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
<i>Genauigkeit (äussere)</i>	<i>Qualitatives Mass der Übereinstimmung zwischen erwartetem und realisiertem Wert</i>
<i>Genauigkeit (innere)</i>	<i>Präzision</i>
<i>GIS</i>	<i>Geo-Informationssystem</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>GUM</i>	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
<i>IMS</i>	<i>Inertiales Messsystem</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organisation for Standardization</i>


<i>ISO 9000</i>	<i>ISO Norm zu Qualitätsmanagementsystem</i>
<i>ISO 19100</i>	<i>ISO Normenreihe über Geodaten</i>
<i>ISPRS</i>	<i>International Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
<i>KVP</i>	<i>Kontinuierlicher Verbesserungsprozess</i>
<i>LAS</i>	<i>Das LAS Dateiformat ist ein öffentliches Datenformat für die Speicherung und den Austausch von ALS Daten. Das binäre Format kann als Alternative zu proprietären Formaten oder den speicherintensiven ASCII Austauschformaten verwendet werden.</i>
<i>Lever Arm</i>	<i>Verschiebungsvektor zwischen GPS-Antennen- und ALS-Zentrum bzw. IMS- und ALS-Zentrum</i>
<i>LHN95</i>	<i>Schweizerischer Höhenbezugsrahmen, im Zug der LV95 entstanden. Streng orthometrische Höhen unter Zuhilfenahme des Geoidmodells der Schweiz entstanden.</i>
<i>LN02</i>	<i>Schweizerische Landesnivellementsnetz, wurde mit der Festlegung des Schweizerischen Höhensystems 1902 konzipiert</i>
<i>LV95</i>	<i>Schweizerische Landesvermessung 1995 (Ablösung der Landestriangulation)</i>
<i>LWN</i>	<i>Landwirtschaftliche Nutzfläche; Projekt der swisstopo zur Aktualisierung der landwirtschaftlichen Nutzflächen</i>
<i>Messabweichung</i>	<i>Der Begriff drückt aus, dass eine Messung nur im Idealfall mit der Messgrösse übereinstimmt</i>
<i>Messunsicherheit</i>	<i>Dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgrösse zugeordnet werden können. Geeignete Parameter sind Standardabweichung oder Konfidenzintervall.</i>
<i>Mission</i>	<i>Falls sich die Datenerfassung über mehrere Flüge erstreckt, werden die einzelnen Befliegungen als Mission bezeichnet.</i>
<i>OGC</i>	<i>Open GIS Consortium</i>
<i>Operator</i>	<i>Mitglied der Flugbesatzung, bedient das ALS-System</i>
<i>PDOP</i>	<i>Position Dilution of Precision</i>
<i>Präzision</i>	<i>Mass der Wiederholbarkeit einer Messung unter vergleichbaren Umständen</i>
<i>Pixelkarte</i>	<i>Digitale Landeskarte im Rasterformat (vgl. auch <a href="http://www.swisstopo.ch">http://www.swisstopo.ch</a>)</i>
<i>PCS</i>	<i>POS Computer System</i>
<i>POS</i>	<i>Positionierungs- und Orientierungssystem. Besteht bei ALS aktuell aus einem GPS-Empfänger und einem IMS</i>
<i>POSPac</i>	<i>Softwarepaket von Applanix zur Prozessierung der POS-Daten</i>
<i>Punktwolke</i>	<i>Unstrukturierte Sammlung punktförmiger Objekte, bei ALS nach der Auswertung und Kombination aller Messgrössen auch als Roh-Punktwolke bzw. klassifiziert als gefilterte Punktwolke bezeichnet</i>
<i>QMS</i>	<i>Qualitätsmanagementsystem</i>
<i>Qualität</i>	<i>Nach ISO 9000: Realisierte Beschaffenheit bezüglich Qualitätsanforderung</i>
<i>Qualitätsgrenzlage</i>	<i>akzeptierbare Datenqualität</i>
<i>Qualitätsmodell</i>	<i>Umfassende Beschreibung derjenigen Elemente, welche für die Erfüllung der vereinbarten Spezifikationen notwendig sind</i>
<i>RE</i>	<i>Realisierungs-Einheit, Bezeichnung für die 5 Teilprojekte RE01 –Re05 bei LWN.</i>
<i>REALM</i>	<i>Optech-eigene Software „<u>RE</u>results of <u>A</u>irborne <u>L</u>aser <u>M</u>apping“ zur Berechnung der Punktwolke</i>
<i>SAPOS</i>	<i>Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung</i>
<i>SBET</i>	<i>Smoothed Best Estimated Trajectory</i>
<i>SNR</i>	<i>Signal-to-Noise-Ratio</i>


---

<i>SR</i>	<i>Scanrate</i>
<i>Standardabweichung</i>	<i>Quantitatives Mass für den Begriff Messunsicherheit</i>
<i>Standardunsicherheit</i>	<i>Als Standardabweichung ausgedrückte Unsicherheit des Ergebnisses einer Messung</i>
<i>SW</i>	<i>Scanwinkel</i>
<i>TC</i>	<i>Technical Commission</i>
<i>TerraScan</i>	<i>Software der Firma TerraSolid zur Filterung der Punktwolke</i>
<i>Testfall</i>	<i>Ein Testfall beschreibt einen elementaren, funktionalen Test, welcher der Überprüfung einer z.B. in einer Spezifikation zugesicherten Eigenschaft eines Testobjektes dient.</i>
<i>TOF</i>	<i>Time of Flight</i>
<i>TIN</i>	<i>Triangulated Irregular Network (Dreiecksvermaschung)</i>
<i>TQM</i>	<i>Total Quality Management, nach Duden ein ganzheitlicher Managementansatz, mit dessen Hilfe nicht nur die Qualität von Produkten und Gütern eines Unternehmens gesichert werden soll, sondern auch alle anderen relevanten Elemente.</i>
<i>Trajektorie</i>	<i>Aus den POS-Sensoren berechnete Flugbahn</i>
<i>WGS84</i>	<i>World Geodetic System 1984</i>



## 10.2 Fragebogen für Auftraggeber

	
<b>Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand</b>	
<b>ETH Zürich</b>	
Dipl. Ing Jürg Lüthy Insitut für Geodäsie und Photogrammetrie ETH Hönggerberg 8092 Zürich	
Fax: +41 1 633 1101 Tel: +411 633 3695 Email: juerg.luethy@geod.baug.ethz.ch	
<h3>Qualitätsmanagement von Laserscanning-Daten</h3>	
<h4>Fragebogen Auftraggeber Laserdaten</h4>	
Firma/Institution: .....	
Bereich: .....	
Ansprechpartner: .....	
Seit wann werden Aufträge für Laserdaten erteilt? .....	
Wieso wird Technologie eingesetzt? .....	
.....	
Welche funktionalen Anforderungen <sup>1</sup> wurden definiert? .....	
.....	
Welche technischen Spezifikationen <sup>2</sup> wurden festgelegt? .....	
.....	
.....	
.....	
Wer hat die Anforderungen/Spezifikationen entworfen? .....	
Wurde ein Sachverständiger dazu bei gezogen? .....	
.....	
<hr/> <sup>1</sup> z.B. Wozu sollen Daten dienen/weiterverwendet werden, Befliegungszeitraum, welche Produkte werden benötigt <sup>2</sup> z.B. Höhen- und Lagegenauigkeit, Punktdichte, welche Objekte gehören nicht ins DSM, bzw. DTM	



**Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand** **ETH Zürich**

Haben andere Ämter/Abteilungen die Projekte mitfinanziert? .....

Wie wurden Projekte ausgeschrieben (nach WTO, EU, usw)? .....

3 wichtigsten Kriterien für Zuschlagserteilung

1. ....

2. ....

3. ....

Welche Produkte wurden verlangt:

<input type="checkbox"/> Nur Befliegung	<input type="checkbox"/> Kalibrierte Rohdaten	<input type="checkbox"/> Intensitätsbild
<input type="checkbox"/> Letzer Return	<input type="checkbox"/> Bereinigtes DTM	<input type="checkbox"/> DTM als Raster (Zellgrösse: [m])
<input type="checkbox"/> 1. Return	<input type="checkbox"/> Bereinigtes DSM	<input type="checkbox"/> DSM als Raster (Zellgrösse: [m])

Weitere Produkte:.....

Welche Eigenleistungen wurden erbracht:

<input type="checkbox"/> GPS-Permanent-Station	<input type="checkbox"/> Kalibrier- oder Kontrollflächen	<input type="checkbox"/> Kontrollpunkte
<input type="checkbox"/> Prozessieren von DSM	<input type="checkbox"/> Prozessieren von DTM	<input type="checkbox"/> Verifikation der Produkte

Weitere Eigenleistungen: .....

Nach welchen Kriterien wurden Laser-Daten abgenommen

<input type="checkbox"/> Höhengenaugigkeit erfüllt	<input type="checkbox"/> Punktdichte DTM erfüllt	<input type="checkbox"/> Korrektes Filtern DTM
<input type="checkbox"/> Lagegenauigkeit erfüllt	<input type="checkbox"/> Punktdichte DSM erfüllt	<input type="checkbox"/> Korrektes Filtern DSM

Weitere untersuchte Kriterien?.....

.....

Welche Konfidenzintervalle liegen diesen Abnahmekriterien zugrunde?

<input type="checkbox"/> 1 $\sigma$	<input type="checkbox"/> 2 $\sigma$	<input type="checkbox"/> andere: .....
-------------------------------------	-------------------------------------	--

Erzielte Genauigkeiten?                      Höhengenaugigkeit.....

Lagegenauigkeit .....

Berechnungsmethode/-nachweis: .....

Erzielte mittlere Punktdichte: .....



Geodätische Messtechnik - Prof. Dr. H. Ingensand

ETH Zürich

Erfahrungen aus den Projekten (z.B. hinsichtlich Terminplan, zugesicherte vs. erhaltene Datenqualität)

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Wie hoch waren die Eigenleistungen im Vergleich zu den externen Kosten? ..... (EL) : (FL).....

Zufriedenheit mit den Resultaten bzw. mit der Technologie?.....

.....  
.....  
.....

Wofür werden die Daten nun eingesetzt?.....

.....

Ertrag aus Lizenzgebühren/Abgaben (ev. verglichen mit Aufwand) .....

.....

Weitere Bemerkungen

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Besten Dank für Ihre Bemühungen!

Alle Antworten werden vertraulich behandelt und Resultate werden nur anonymisiert oder in Absprache publiziert.

Zürich, 2. September 2004

### 10.3 Zusammenfassung der Antworten auf den Fragebogen

Es wurden insgesamt 23 Auftraggeber für ALS-Befliegungen und –Datenauswertungen angeschrieben, 7 Fragebogen wurden ausgefüllt (Rücklaufquote 30 %). Unter diesen 7 Auftraggebern befinden sich aber wichtige Landesvermessungsämter aus Österreich, Deutschland und der Schweiz.

<b>Verlangte Produkte:</b>	<b>Anzahl Antworten</b>
DTM (bzw. DGM)	7
DOM	4
1. Return	4
Kalibrierte Rohdaten	4
Digitales Wasseroberflächenmodell	1

<b>Funktionalen Anforderungen:</b>	<b>Anzahl Antworten</b>
Befliegungszeitraum	6
Basis für Orthophoto	2
Eignung für Hydrologie	3

<b>Technische Anforderungen:</b>	<b>Anzahl Antworten</b>
Punktdichte oder Auflösung	7
Höhengenauigkeit	7
Lagegenauigkeit	4
Überlappung der Flugstreifen	1
Produktspezifikationen	5

<b>Kriterien zur Anahme der Daten:</b>	<b>Anzahl Antworten</b>
Höhengenauigkeit erfüllt	7
Lagegenauigkeit erfüllt	6
Punktdichte DTM erfüllt	5
Punktdichte DOM erfüllt	2
Korrektes Filtern DTM	7
Korrektes Filtern DOM	3
Konsistenzbedingungen	2 (Punktklassen, Formatierung)
Vollständigkeit (Lücken)	3

## Lebenslauf

**Jürg Lüthy** Geboren am 02. Oktober 1971

Heimatort: Schöffland AG

Verheiratet, 3 Kinder

## Schulbildung

2004 – 2007	Berufsbegleitendes Doktoratsstudium	ETH Zürich, Professur H. Ingensand (Geodätische Messtechnik)
1991 – 1996	Studium Kulturtechnik und Vermessung	ETH Zürich
WS 1995/96	Auslandsemester (Erasmus-Programm) Erarbeiten der Diplomarbeit in Raumplanung und Vermessung	Universität Dortmund (Erasmus) Prof. W.A. Schmid (Planung) und H. Ingensand (Vermessungswesen)
1990	Eidgenössische Maturität, Typ B	
1984 – 1990	Gymnasium	KS Zürich-Wiedikon
1978 – 1984	Primarschule	Aesch (ZH)

## Beruflicher Werdegang

Seit 2007	Aris AG
2001 – 2002	Firma TerraPoint Ltd (Houston, USA)/Swissphoto AG, projektbezogener Auslandaufenthalt
1996 – 2006	Swissphoto AG
1996 – 1999	Adasys AG
1994 – 1996	ETH Zürich, Professur H. Ingensand (Werkstudent)
1990 – 1992	Organisation Kolb AG (Werkstudent)