TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung

Änderungsdetektion in urbanen Gebieten durch objektbasierte Analyse und schritthaltenden Vergleich von Multi-Aspekt ALS-Daten

Marcus Hebel

Dissertation

2012

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung

Änderungsdetektion in urbanen Gebieten durch objektbasierte Analyse und schritthaltenden Vergleich von Multi-Aspekt ALS-Daten

Marcus Hebel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:		Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Wunderlich
Prüfer der Dissertation:	1.	Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Stilla
	2.	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. R. Westermann
	3.	Hon.-Prof. Dr. rer. nat. M. Tacke, Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Die Dissertation wurde am 03.05.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 07.09.2012 angenommen.

Kurzfassung

Eine Automatisierung der Änderungsdetektion in urbanen Gebieten kann durch die zeitversetzte Erfassung und den Vergleich von Fernerkundungsdaten erfolgen. Dabei werden besondere Anforderungen an die eingesetzte Sensorik und die Methodik zur Datenauswertung gestellt, wenn ein sofortiges Vorliegen der Ergebnisse notwendig ist. Solche Randbedingungen bestehen z.B. bei der Unterstützung von Hubschrauberpiloten im Rahmen von Überwachungsaufgaben oder Rettungseinsätzen.
In der vorliegenden Arbeit wird die Eignung des flugzeuggetragenen Laserscannings (engl. Airborne Laser Scanning, ALS) zur Lösung dieser Aufgaben untersucht. ALS bietet hierfür flexible Möglichkeiten der direkten 3D-Datenerfassung in niedrigen Flughöhen bei variablen Geschwindigkeiten. Eine Besonderheit des hier verfolgten Ansatzes ist die Betrachtung von Multi-Aspekt ALS-Daten, die sich durch die Verwendung eines in Schrägsicht vorausblickenden Laserscanners ergeben. Diese Sensorkonfiguration ist im Hinblick auf die oben genannten Anwendungen erforderlich und ermöglicht außerdem eine für ALS sonst untypische Erfassung von Fassadenflächen.
Im ersten Teil dieser Arbeit wird eine Methodik vorgestellt, durch die sowohl eine Kalibrierung des Sensorsystems als auch eine Zusammenführung der Multi-Aspekt ALS-Daten eines urbanen Gebiets erzielt werden. Die dazu beschriebene Vorgehensweise ist insbesondere auch für die hier untersuchte Schrägsicht des Laserscanners geeignet. Im Zuge einer objektbasierten Analyse der einzelnen Punktwolken werden planare Flächenstücke mit Hilfe eines Segmentierungsverfahrens identifiziert, das ein Flächenwachstumsverfahren mit einem RANSAC-Schätzverfahren kombiniert. Anschließend werden homologe Flächenstücke anhand geometrischer Attribute ausfindig gemacht. Mit Hilfe einer neuartigen Methode können Planaritätsbedingungen für diese Zuordnungen in lineare Gleichungssysteme überführt werden, durch deren Lösung sich einerseits die Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems und andererseits die Angleichung der ALS-Datensätze durchführen lässt.
Der zweite Teil der Arbeit behandelt die während einer erneuten Befliegung stattfindende Änderungsdetektion, die auf den zuvor vereinheitlichten Referenzdaten aufbaut. Es wird eine neue Herangehensweise für den schritthaltenden Vergleich von ALS-Daten vorgestellt, bei der es sich um eine Erweiterung des Konzepts der Belegungsgitter handelt. Anstelle eines Vergleichs von Punktwolken werden dabei 3D-Raumbereiche entlang der Ausbreitungswege der Laserpulse bezüglich der Zustände *leer*, *belegt* und *unbestimmt* bewertet. Das dazu vorgeschlagene Vorgehen basiert auf der Wissensrepräsentation und Informationsfusion entsprechend der Dempster-Shafer Evidenztheorie, wobei Änderungen als Konflikte in der Raumbelegung erkennbar werden. Zusätzlich werden Objektmerkmale ausgewertet, um Änderungsereignisse verschiedenen Kategorien zuzuordnen.
Im dritten Teil der Arbeit werden die durchgeführten Experimente zur Systemkalibrierung, Datenregistrierung und Änderungsdetektion vorgestellt und detailliert diskutiert. Die Kalibrierung des verwendeten ALS-Experimentalsystems konnte bei allen erfassten urbanen Gebieten zuverlässig vorgenommen werden. Das erarbeitete Verfahren zur schritthaltenden Änderungsdetektion wurde ebenfalls erfolgreich anhand realer Multi-Aspekt ALS-Daten validiert, wofür ein ausgewähltes urbanes Gebiet im Abstand eines Jahres jeweils entlang mehrerer Flugrichtungen erfasst wurde.

Abstract

The identification of changes in urban areas is a common approach used for damage inspection, traffic monitoring, or documentation of urban development. The implementation of an automatic change detection procedure requires the acquisition and comparison of multitemporal remote sensing data. Special requirements must be met by the sensors and the methods used for data processing if the results are intended to support short-term operations, such as airborne surveillance of urban areas, terrain-referenced navigation, or detection of rapid changes. Examples for these scenarios can be found in semi-automatic flight guidance for helicopters, landing operations in urban terrain, obstacle avoidance, search and rescue missions, emergency services, or disaster management.

In this thesis, airborne laser scanning (ALS) is employed to cope with the tasks of automatic change detection. ALS belongs to the group of established technologies for directed data acquisition. In contrast to other remote sensing techniques, it delivers instantaneous 3D measurements which enables the immediate interpretation of these data. Novel to the proposed approach is the consideration of multiview ALS scans that are acquired with an oblique forward-looking laser scanner. In addition to advantages in terms of data coverage, this configuration fulfills the requirements of the above-mentioned applications.

The first part of this thesis presents a methodology to be used for the calibration of ALS systems and the alignment of multiview ALS scans of urban areas. Although applicable to classical nadir configurations, the presented approach is particularly suited to data from an oblique forward-looking laser scanner. A combination of a region-growing approach with a RANSAC estimation technique is used to extract planar shapes. Homologous planar shapes in overlapping point clouds are identified with regard to several geometric attributes. A new method is presented for transferring the planarity constraints into systems of linear equations to achieve both the boresight calibration of the ALS system and the alignment of multiple data sets.

ALS scans that were obtained in the first step represent a solid basis and reference for change detection, which is addressed in the second part of the thesis. The presented framework for online comparison of ALS data extends the concept of occupancy grids known from robot mapping. In this approach, sections of 3D space are labeled *empty*, *occupied* or *unknown* with the intention to identify conflicting information. However, instead of interpolating the data on raster cells, occupancy conflicts are identified at the exact positions of the measured 3D points. The proposed change detection method is based on the representation of uncertainty and belief according to the Dempster-Shafer theory of evidence. Additional attributes are considered in order to decide whether changes are of man-made origin or occurring due to seasonal effects.

In the last part of this thesis, experimental results of system calibration, data registration and change detection are presented and discussed in detail. All experiments regarding the calibration of the ALS system were successfully performed for widely different types of urban terrain. The concept of online change detection was validated using data of an urban test site where multiview ALS data were acquired at an interval of one year.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung **iii**

Abstract **iv**

Inhaltsverzeichnis **v**

Liste der verwendeten Abkürzungen **ix**

Abbildungsverzeichnis **xi**

1 Problemstellung **1**
1.1 Änderungserkennung in urbanen Gebieten . . . 1
1.2 Anforderungen an die Datenerfassung und -auswertung . . . 2
1.3 Registrierung multitemporaler 3D-Daten . . . 5
1.4 Kalibrierung eines ALS-Systems . . . 6
1.5 Vergleich von Multi-Aspekt ALS-Daten . . . 6
1.6 Ziele der vorliegenden Arbeit . . . 8
1.7 Übersicht . . . 9

2 Stand der Forschung und eigener Beitrag **11**
2.1 Segmentierungsverfahren für 3D-Punktmengen . . . 11
2.1.1 Literaturübersicht . . . 12
2.1.2 Gewählter Ansatz und eigener Beitrag . . . 13
2.2 Koregistrierung überlappender 3D-Punktmengen . . . 14
2.2.1 Literaturübersicht . . . 14
2.2.2 Gewählter Ansatz und eigener Beitrag . . . 15
2.3 Geometrische Kalibrierung von ALS-Systemen . . . 16
2.3.1 Verwandte Arbeiten . . . 17
2.3.2 Beitrag dieser Arbeit . . . 18
2.4 Bewertung der Qualität von ALS-Daten . . . 18
2.4.1 Verwandte Arbeiten . . . 19
2.4.2 Beitrag dieser Arbeit . . . 20
2.5 Änderungserkennung in urbanen Gebieten . . . 20
2.5.1 Sensortechniken . . . 21
2.5.2 Vergleich von Laserdaten . . . 21
2.5.3 Belegungsgitter und ihre Verwendung in der Robotik . . . 22

3 Technische Grundlagen der ALS-Datenerfassung **25**
3.1 Airborne Laser Scanning . . . 25
3.1.1 LASER . . . 25
3.1.2 Laserentfernungsmessung . . . 26
3.1.3 Laserscanner . . . 28

3.1.4 Sensorträger . . . 28
3.1.5 Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) . . . 29
3.1.6 Inertiales Navigationssystem (INS) . . . 30
3.1.7 Direkte Georeferenzierung . . . 31
3.1.8 Koordinatensysteme . . . 33
3.2 Fehlerquellen . . . 35
3.2.1 Geodätisches Datum und Koordinatensystem . . . 35
3.2.2 Globales Navigationssatellitensystem . . . 35
3.2.3 Inertialsensoren . . . 36
3.2.4 Synchronisierung . . . 37
3.2.5 Entfernungsmessung . . . 37
3.2.6 Größe der ausgeleuchteten Fläche (Footprint) . . . 37
3.2.7 Steuerung der Ablenkung (Scan) . . . 38
3.2.8 Hebelarme . . . 38
3.2.9 Relativausrichtung der Systemkomponenten (Boresight) . . . 38
3.2.10 Zusammenfassung (Fehlerquellen) . . . 39

4 Methoden zur Analyse von Multi-Aspekt ALS-Daten 41
4.1 Datenstrukturen für 3D-Punktmengen . . . 41
4.1.1 2.5D-Rasterung . . . 42
4.1.2 Dreiecksvermaschung (TIN) . . . 42
4.1.3 Baumstrukturen . . . 43
4.1.4 Abfolge von Scanzeilen . . . 45
4.2 Segmentierungsverfahren für 3D-Punktmengen . . . 46
4.2.1 Lokale Hauptkomponentenanalyse (PCA) . . . 47
4.2.2 Region Growing . . . 49
4.2.3 RANSAC-basierte Ebenensegmentierung . . . 51
4.2.4 Scanzeilenauswertung und Gruppierung . . . 55
4.2.5 Merkmalsextraktion und Zuordnung von Ebenensegmenten . . . 60
4.3 Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems . . . 63
4.3.1 Kalibrierung durch Kreuzbefliegung eines (beliebigen) Stadtgebiets . . . 64
4.3.2 Kalibrierung mit Hilfe von Referenzflächen . . . 66
4.4 Registrierung von 3D-Punktmengen . . . 67
4.4.1 Das Standardverfahren: ICP . . . 67
4.4.2 Angleichung planarer Flächenstücke . . . 69
4.4.3 Geländebasierte Navigation . . . 70
4.5 Änderungserkennung im Stadtgebiet . . . 71
4.5.1 Vorbemerkungen . . . 71
4.5.2 Erstellung einer Datenbasis für den späteren Vergleich . . . 73
4.5.3 Modellierung der Raumbelegung: Die Dempster-Shafer Theorie . . . 75
4.5.4 Kombination von Evidenzen . . . 77
4.5.5 Detektion von Änderungen als Belegungskonflikte . . . 79
4.5.6 Berücksichtigung zusätzlicher Attribute . . . 80

5 Experimente 83
5.1 Eingesetztes Sensorsystem . . . 83
5.1.1 RIEGL LMS-Q560 (Version 2006) . . . 84
5.1.2 Applanix POS AV 410 . . . 84
5.1.3 Sensorträger Bell UH-1D . . . 86
5.2 Messkampagnen und Testgelände . . . 87

5.2.1 München (TUM Stammgelände) . . . 89
5.2.2 Rendsburg . . . 90
5.2.3 Kiel . . . 91
5.2.4 Ettlingen (IOSB Gelände) . . . 92
5.2.5 Ruschberg . . . 92
5.2.6 Abenberg . . . 93
5.2.7 Auswirkung eines Boresight-Fehlers in der Praxis . . . 94
5.3 Implementierung und Laufzeit der Verfahren . . . 94
5.4 Ergebnisse der Experimente . . . 96
5.4.1 Ergebnisse der ALS-Systemkalibrierung und Koregistrierung . . . 96
5.4.2 Ergebnisse der Änderungsdetektion . . . 102

6 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse 107
6.1 Technische Eignung des ALS . . . 108
6.1.1 Vorzüge der 3D-Datenerfassung . . . 108
6.1.2 Besonderheiten der aktiven Beleuchtung . . . 109
6.1.3 Realisierbarkeit der Echtzeit-Prozessierung . . . 110
6.2 Bewertung der unterschiedlichen Segmentierungsverfahren . . . 111
6.3 Güte und Stabilität der Kalibrierung . . . 113
6.3.1 Notwendigkeit der Boresight-Kalibrierung . . . 113
6.3.2 Einfluss weiterer Fehlerquellen . . . 113
6.3.3 Empfohlenes Vorgehen zur Kalibrierung eines ALS-Systems . . . 115
6.4 Bewertung der Ergebnisse der Änderungserkennung . . . 115
6.4.1 Vor- und Nachteile des gewählten Ansatzes . . . 116
6.4.2 Saisonale Veränderungen der Vegetation . . . 117
6.4.3 Unterschiedliche Arten detektierter Änderungen . . . 118

7 Zusammenfassung und Ausblick 121
7.1 Zusammenfassung . . . 121
7.2 Ausblick . . . 124

Literaturverzeichnis 129

Lebenslauf 139

Liste der verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung	Seite
2D	Zweidimensional	11
3D	Dreidimensional	5
ALS	Airborne Laser Scanning	2
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	86
BBA	Basic Belief Assignment, Basismassefunktion	76
BSP	Binary Space Partitioning	45
C/A	Coarse/Acquisition	30
cw-Laser	Continuous Wave Laser, Dauerstrichlaser	26
DGM	Digitales Geländemodell	42
DGPS	Differential Global Positioning System	19
DOM	Digitales Oberflächenmodell	42
DOP	Dilution of Precision	36
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989	33
FEM	Finite-Elemente Methode	43
GIS	Geoinformationssystem	21
GLONASS	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema	29
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem	19
GPS	Global Positioning System	19
GSM	Global System for Mobile Communications	85
IBN	Image Based Navigation	70
ICP	Iterative Closest Point	14
IMU	Inertial Measurement Unit	30
INS	Inertiales Navigationssystem	30
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar	21
IOSB	Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung	92
IRLS	Iteratively Reweighted Least Squares	52
LADAR	Laser Radar, Laser Detection and Ranging	26
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation	25
LiDAR	Light Detection and Ranging	2
LUT	Lookup-Tabelle	111
MLS	Mobiles Laserscanning	28
PCA	Principal Component Analysis	47
PCS	Position and Orientation Computing System	85
PPK	Post Processed Kinematic	30
RANSAC	Random Sample Consensus	51
RINEX	Receiver Independent Exchange Format	85
ROI	Region of Interest	53
RTK	Real Time Kinematic	19
SA	Selective Availability	30
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung	30
SAR	Search and Rescue	3
SAR	Synthetic Aperture Radar	21

Abkürzung	Beschreibung	Seite
SBAS	Satellite Based Augmentation System	30
SBET	Smoothed Best Estimate of Trajectory	86
SPS	Standard Positioning Service	19
TERCOM	Terrain Contour Matching	70
TFR	Terrain-Following Radar	70
TIN	Triangulated Irregular Network	42
TLS	Terrestrisches Laserscanning	12
TRN	Terrain Referenced Navigation	70
TUM	Technische Universität München	89
UTC	Universal Time Coordinated, Koordinierte Weltzeit	33
UTM	Universale transversale Mercator-Projektion	34
WGS84	World Geodetic System 1984	33

Abbildungsverzeichnis

1.1 Dokumentation von Veränderungen (Fotografie) . . . 2
1.2 Beispiele für mobiles Laserscanning mit sofortiger Datenauswertung . . . 3
1.3 SAR-Hubschrauber im Einsatz in urbanem Gebiet . . . 4
1.4 Unterschiedliche Randbedingungen (Zeitpunkte t_1 und t_2) . . . 7

3.1 LASER: Schematische Darstellung . . . 26
3.2 Prinzip der optischen Abstandsmessung . . . 27
3.3 Aufbau eines Laserscanners . . . 28
3.4 Messprinzip beim flugzeuggetragenen Laserscanning (ALS) . . . 29
3.5 Anbringung der Sensoren am Sensorträger . . . 32
3.6 Abbildung der Erdoberfläche mittels UTM-Projektion . . . 34
3.7 Zusammenhänge und Fehlerquellen im ALS-System . . . 39

4.1 Strukturen für 3D-Punktwolken: 2.5D-Rasterung und TIN . . . 42
4.2 Suchbäume für 3D-Punktwolken: Octree und k-d Baum . . . 44
4.3 Entfernungsmessung und Scanvorgang in $\mathbb{L}$ (Scanzeile) . . . 46
4.4 Nachbarschaft eines Datenpunkts $\boldsymbol{p}_i$ und Kovarianzellipsoid . . . 47
4.5 Unterscheidung der Einzelpunkte aufgrund von Nachbarschaften . . . 48
4.6 Gebietswachstum (Region Growing) innerhalb der Punktwolke P . . . 49
4.7 Lokale Verteilung der Höhenwerte in ALS-Punktwolken urbaner Gebiete . . . 50
4.8 Extraktion planarer Regionen in einer unregelmäßigen Punktwolke . . . 55
4.9 Scanzeilensegmentierung in $\mathbb{L}$ und Gruppierung in $\mathbb{W}$ . . . 56
4.10 Zwei zu verschmelzende Geradensegmente in $\mathscr{L}$ . . . 58
4.11 Homologe Ebenensegmente C_a und C_b in unterschiedlichen Punktwolken . . . 63
4.12 Zuordnung homologer Ebenen in ALS-Daten P_D und Referenz bzw. Modell P_M . . . 69
4.13 ALS zur geländebasierten Navigation über urbanen Gebieten . . . 70
4.14 Übersicht über die verschiedenen Verarbeitungswege (t_1 und t_2) . . . 72
4.15 ALS-Datenerfassung und 3D-Voxelgitter . . . 74
4.16 Befüllen der Voxelgitter $\mathbf{V}_{\mathtt{P}}$ und $\mathbf{V}_{\mathtt{R}}$ . . . 75
4.17 Longitudinale und transversale Distanz von $\boldsymbol{q}$ zu $\boldsymbol{p}$ . . . 76
4.18 Verhältnis der Massen entlang des verlängerten Laserstrahls ($d_y = 0$) . . . 77
4.19 Massen der Zustände *leer*, *belegt* und *unbestimmt* in der Umgebung von $\boldsymbol{p}$ . . . 78
4.20 Mögliche Konflikte zwischen Referenzdaten und einer aktuellen Messung . . . 79
4.21 Verhältnis der Massen bei Vegetation ($d_y = 0$) . . . 81
4.22 Distanzen von $\boldsymbol{q}$ zur lokalen Ebene durch $\boldsymbol{p}$ (Klasse $\mathbf{A}$) . . . 82
4.23 Masse des Zustands *belegt* in der Umgebung von $\boldsymbol{p}$ (Klasse $\mathbf{A}$) . . . 82

5.1 Bell UH-1D mit seitlich angebrachter Sensorplattform . . . 86
5.2 Details der Sensorinstallation am Sensorträger . . . 87
5.3 Befliegung des TUM Stammgeländes am 09.10.2006 . . . 89
5.4 Befliegung des TUM Stammgeländes am 02.09.2009 . . . 89

5.5 Befliegung eines Wohngebiets in Rendsburg am 22.04.2008 90
5.6 Befliegung der Kieler Altstadt am 23.04.2008 91
5.7 Befliegung des IOSB-Standorts in Ettlingen am 01.09.2009 92
5.8 Befliegung von Ruschberg am 01.09.2009 92
5.9 Befliegung von Abenberg am 18.04.2008 93
5.10 Befliegung von Abenberg am 31.08.2009 93
5.11 Details des Ruschberg-Datensatzes nach der direkten Georeferenzierung 95
5.12 Zwischenergebnisse der Auswertung von „München (TUM) 2006“, Überflug 1 97
5.13 Zuordnung homologer Ebenensegmente („Abenberg 2008“) 98
5.14 Details des Ruschberg-Datensatzes nach der Boresight-Kalibrierung 99
5.15 Streuung der berechneten Boresight-Winkel 100
5.16 Kenngrößen zur Bewertung lokaler Diskrepanzen 100
5.17 Passgenauigkeit nach Boresight-Kalibrierung und Koregistrierung 101
5.18 Referenzdatensatz „Abenberg 2008“ und Datenfenster „Abenberg 2009“ 103
5.19 Visualisierung der Belegung der Voxelgitter $\mathbf{V}_{\mathtt{P}}$ und $\mathbf{V}_{\mathtt{R}}$ („Abenberg 2008“) 104
5.20 Ergebnisse der schritthaltenden Änderungserkennung („Abenberg 2009“, Überflug 1) . 105

6.1 Beispiel für Multi-Aspekt Bilddaten: Stammgelände der TUM 108
6.2 Besonderheiten der aktiven Sensorik (Laserscanning) 110
6.3 Typische Segmentierungsfehler beider Verfahren 112
6.4 Schließen von Informationslücken und Änderungserkennung („Abenberg 200x“) 117
6.5 Unterschiedliche Arten detektierter Änderungen (Teil 1) 119
6.6 Unterschiedliche Arten detektierter Änderungen (Teil 2) 120

1 Problemstellung

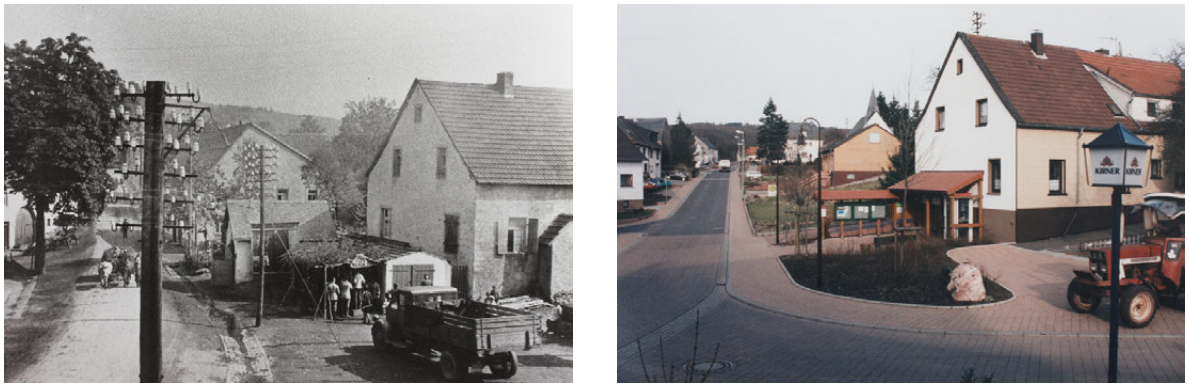
1.1 Änderungserkennung in urbanen Gebieten

Die Untersuchung von Änderungen in urbanen Gebieten ist aus verschiedenen Gründen von Interesse. Eine Unterscheidung der mit der Änderungsdetektion typischerweise verfolgten Ziele kann zum Beispiel auf den jeweiligen Ursachen oder auf den jeweils betrachteten Zeiträumen basieren. Bei der Betrachtung der Zeitskalen können Änderungen grob in drei Kategorien eingeteilt werden. Diese Einteilung ist vom Autor mehr oder weniger willkürlich gewählt, da die Übergänge zwischen den Kategorien fließend sind.

Als *langfristige* Effekte können all diejenigen Änderungen gelten, die sich in Zeiträumen von vielen Jahren abspielen. In diesem Zusammenhang ist oftmals die Untersuchung der Stadtentwicklung von Interesse, wobei Themen wie Bebauung, Erschließung und Flächennutzung im Vordergrund stehen. Aus einer stetigen Stadtentwicklung entsteht zum Beispiel die Notwendigkeit einer nachhaltigen Infrastrukturplanung (Verkehr, Energie, Trinkwasser, Kommunikation), für die die erforderlichen Planungsgrundlagen bereitgestellt werden müssen. In jüngster Zeit hat in dieser Betrachtung auch der Klima- und Umweltschutz einen hohen Stellenwert erhalten, wie es sich etwa in der Einrichtung von Umweltzonen zur Verbesserung der Luftqualität zeigt. Weitere Beispiele sind in der Verringerung von Schallemissionen und in ökologischer Wasserwirtschaft zu finden (z.B. Bodenentsiegelung, Grundwasserschutz).

Mittelfristige Veränderungen eines urbanen Gebiets treten dagegen in Zeitintervallen von einigen Tagen, Wochen oder Monaten auf. Die Ursachen der in dieser Kategorie anzutreffenden Änderungen können einerseits durch menschliche Einflüsse verursacht, andererseits aber auch natürlichen Ursprungs sein. Im erstgenannten Fall kann zum Beispiel von einzelnen Bau-, Umbau- oder Rückbaumaßnahmen an Gebäuden oder Straßen die Rede sein. Ein besonderes Interesse an automatischer Änderungserkennung besteht hierbei aufgrund der Notwendigkeit zur regelmäßigen Aktualisierung bestehender Datenbanken. Auch zeitlich begrenzte Veranstaltungen können zu den mittelfristigen Veränderungen gezählt werden. Eine Untersuchung dieser Ereignisse kann zur Dokumentation und zur Verbesserung der zukünftigen Planung dienen. Zur Gruppe der natürlichen Einflüsse gehören Wetterphänomene oder saisonale Änderungen wie etwa der Wandel von Vegetation im Lauf der Jahreszeiten. Hierbei kann ebenfalls eine quantitative Analyse gewünscht sein, zum Beispiel zur verbesserten Steuerung von Laubberäumung und Winterdiensten.

Auch *kurzfristig* eintretende Veränderungen in einem urbanen Gebiet haben ihre Ursache entweder in menschlichem Handeln oder in (meist spontanen) Naturereignissen. Während Transportvorgänge (d.h. die Bewegung von Personen und Objekten) zu den absehbaren Ereignissen gehören, fallen in diese Kategorie auch alle unvorhersehbaren Vorgänge, die dann meist den Charakter eines Unfalls, eines Anschlags oder einer Katastrophe haben. Hierzu zählen beispielsweise Gebäudeeinstürze, Explosionen oder Brände. Im extremsten Fall kann ein Erbeben, eine Hangrutschung, ein Tsunami oder ein schwerer Sturm innerhalb weniger Sekunden oder Minuten einen Großteil der Bauwerke und der urbanen Infrastruktur beeinträchtigen. Bei solchen Vorkommnissen kommt der Analyse von Fernerkundungsdaten eine große Bedeutung zu, da dadurch zum Beispiel eine sofortige Bewertung der Situation im Sinne einer Schadensanalyse ermöglicht wird.



(a) (b)

Abbildung 1.1: Ein Beispiel für die Dokumentation von Veränderungen: (a) Fotografie des Weiherplatzes in Ruschberg ca. 1928. (b) Der gleiche Ort im Jahr 1999 (eigenes Werk).

Neben der erfolgreichen Koordination von Rettungseinsätzen im Katastrophenfall kann die Detektion kurzfristig eingetretener Veränderungen auch bei polizeilichen Überwachungsaufgaben eine wichtige Rolle spielen. Ein Beispiel hierzu ist die Kontrolle der Bewegung von Fahrzeugen und Personen, etwa bei Großveranstaltungen.

Zur Detektion von Veränderungen in einem urbanen Gebiet werden Daten von mindestens zwei unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 und t_2 benötigt. Dies können beispielsweise lokale Fotografien eines bestimmten Ortes sein, wie es in Abbildung 1.1 gezeigt wird. Die großflächige Erfassung urbaner Gebiete wird jedoch klassischerweise durch hochaufgelöste Luftbildaufnahmen realisiert. In den verschiedenen zuvor genannten Anwendungsbeispielen haben sich mittlerweile auch andere Sensortechnologien etabliert (siehe auch Abschnitt 2.5.1). Eine dieser Technologien ist das flugzeuggetragene Laserscanning (engl. Airborne Laser Scanning, ALS), dessen Einsatz Thema dieser Arbeit ist und dessen technische Details in Abschnitt 3.1 erläutert werden. Kurz gesagt wird beim ALS eine auf der Emission und Detektion von Laserlicht basierende Methode zur Entfernungsmessung verwendet (engl. Light Detection and Ranging, LiDAR). Eine flächige Abtastung des Geländes wird zum Beispiel durch steuerbare Ablenkspiegel an einem fliegenden Sensorträger realisiert, wobei dessen Position synchron durch hochgenaue Navigationssensoren gemessen wird. Im Gegensatz zu anderen Messmethoden ermöglicht diese Technik eine direkte dreidimensionale Abtastung des urbanen Gebiets, die unabhängig von der natürlichen oder einer zusätzlichen künstlichen Beleuchtung ist. ALS ist damit besonders auch für die angesprochene schnelle Erfassung von Fernerkundungsdaten zur Bewertung kurzfristig eingetretener Veränderungen geeignet.

1.2 Anforderungen an die Datenerfassung und -auswertung

Die Verarbeitungskette sieht bei vielen Anwendungen im Bereich der Photogrammetrie und Fernerkundung eine zeitliche Trennung zwischen Datenerfassung und der eigentlichen Datenauswertung vor. Ein typisches Beispiel im Zusammenhang mit der dreidimensionalen Erfassung urbaner Gebiete ist die Erstellung von Stadtmodellen. Auch hierfür ist der Einsatz von ALS gängige Praxis (siehe z.B. Rieger [2008]). Die Erfassung größerer Stadtgebiete ist in diesem Fall sorgfältig im Vorfeld planbar. So kann zum Beispiel die Flugroute für eine lückenlose Abdeckung festgelegt werden, und die Standorte von Referenzstationen zur hochgenauen satellitengestützten Positionsbestimmung können optimal gewählt werden. Die während der Befliegung anfallenden Rohdaten des Lasersensors und der Navigationssensoren werden für die anschließende Verwendung gespeichert, aber zum Zeitpunkt der Erfassung nicht weiter ausgewertet. Die eigentliche Auswertung der

(a)

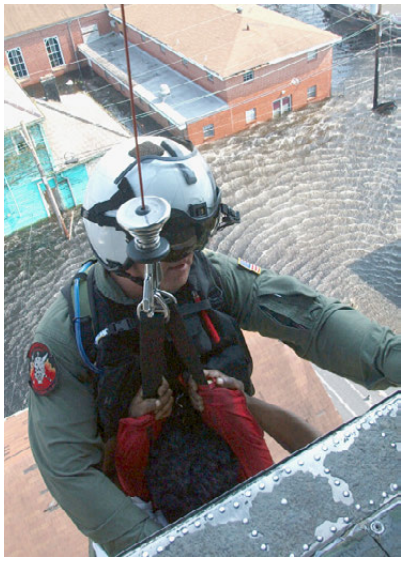
(b)

Abbildung 1.2: Beispiele für mobiles Laserscanning mit sofortiger Datenauswertung: (a) Bell 206 mit HELLAS Hinderniswarnsystem. Mit freundlicher Genehmigung von S. Albrecht (Bildurheber). (b) Autonom gesteuerte Fahrzeuge bei der DARPA Urban Challenge 2007. Bild: Regierung der Vereinigten Staaten (gemeinfrei).

angefallenen Datenmenge findet typischerweise zu einem späteren Zeitpunkt und an einem anderen Ort statt, wobei in Zwischenschritten häufig auch Informationen verworfen werden (z.B. die vorhandene genaue Kenntnis der Sensortrajektorie). Zudem werden die Laserdaten in den allermeisten Fällen abgesehen vom Scanwinkel in Nadirsicht (d.h. senkrecht von oben) erfasst. Bei der Stadtmodellerstellung steht typischerweise die Erfassung von Dachlandschaften im Vordergrund, und durch Nadirsicht besteht unabhängig von der Flugrichtung die geringste Wahrscheinlichkeit von Abschattungen.

In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich eine deutliche technische Weiterentwicklung auf dem Gebiet des Laserscannings gezeigt. Die mittlerweile verfügbaren Sensoren zeichnen sich durch hohe Genauigkeit, hohe Datenraten und große Zuverlässigkeit aus. Dennoch können bislang nur wenige Beispiele gefunden werden, in denen mobile Laserscanner für die Datenerfassung innerhalb von Echtzeitanwendungen eingesetzt werden. Eines dieser Beispiele ist das HELLAS Hinderniswarnsystem für Hubschrauber (Schulz et al. [2002]), dessen Hauptanwendung in der automatischen Erkennung von Hochspannungsleitungen und -masten zur sofortigen Alarmierung des Hubschrauberpiloten liegt (Abbildung 1.2a). Andere vielversprechende Forschungsleistungen zeigen sich beispielsweise bei der autonomen Steuerung von Fahrzeugen, wobei oft Laserscanner als Hauptsensoren eingesetzt werden (Markoff [2010], Young [2011], Abbildung 1.2b). Anwendungen dieser Art bedingen zwangsläufig die unmittelbare bzw. schritthaltende Auswertung der anfallenden Sensordaten. Ähnliche Einsatzbereiche von ALS können im Monitoring städtischer Gebiete oder auch in der geländebasierten Navigation von Hubschraubern oder autonomen Fluggeräten gesehen werden. Konkrete Beispiele sind zukünftig realisierbare Pilotenassistenzsysteme für Hubschrauber zur Unterstützung des Piloten bei Flug- und Landemanövern, z.B. im Rahmen von Luftrettungseinsätzen (engl. Search and Rescue, SAR, siehe Abbildung 1.3). Die direkte Unterstützung des Hubschrauberpiloten erfordert neben der unmittelbaren Bewertung der Messdaten auch möglichst eine vorausblickende Sensorik. Die ansonsten für die ALS-Datenerfassung übliche Nadirsicht ist hierbei also meist ungeeignet. Auch beim bereits angesprochenen Katastrophenmanagement kann die sofortige Datenanalyse sehr wichtig sein, da die Daten des Geschehens möglichst schnell vorliegen müssen, aber die Rohdatenmenge sich aufgrund ihrer Größe nicht für eine Übermittlung zur koordinierenden Stelle eignet. Stattdessen müssen schon bei der Datenerfassung alle relevanten Informationen extrahiert werden, um dann nur diese über eine Funkstrecke zu übertragen.

(a)



(b)

Abbildung 1.3: SAR-Hubschrauber im Einsatz in urbanem Gebiet: (a) Bell UH-1D SAR während eines Rettungseinsatzes in Hamburg-Eimsbüttel. Bildurheber: S. Koppehel (einige Rechte vorbehalten). (b) SAR-Einsatz im September 2005 in New Orleans nach Hurrikan Katrina. Bildurheber: J. C. Pugh, U.S. Navy (gemeinfrei).

Ein besonderer Fall liegt bei der Verwendung von ALS zur schnellen Erkennung von Änderungen in einem urbanen Gebiet vor, da hierbei zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 ($t_1 < t_2$) unterschiedliche Randbedingungen auftreten:

- Zeitpunkt t_1: Die Erstellung einer Datenbank mit Referenzdaten für den späteren Vergleich ist nicht zeitkritisch. Hierbei können die gleichen Randbedingungen angenommen werden, die auch bei der Datenerfassung zur Stadtmodellerstellung zugrunde gelegt werden. Das heißt insbesondere, dass das betreffende urbane Gebiet mehrfach und entlang verschiedener Überflugrichtungen erfasst werden kann, wobei die dabei gespeicherten Rohdaten nachträglich optimiert und prozessiert werden können. Die Verwendung eines schräg nach vorne geneigten Laserscanners hat in diesem Stadium den Vorteil einer gleichzeitigen Erfassung von Dachlandschaften und Häuserfassaden, wobei zur Vermeidung von Verdeckungen idealerweise verschiedene Ansichten kombiniert werden (Multi-Aspekt Daten).

- Zeitpunkt t_2: Während der eigentlichen Mission (z.B. eines Rettungshubschraubers) sollen Änderungen des urbanen Gebiets zur bestehenden und mitgeführten Datenbank erkannt werden, wobei eine schritthaltende Prozessierung der aktuellen ALS-Daten angestrebt wird. Durch den Vergleich zu einem früheren Zustand können die für die Mission relevanten Änderungen sofort erkannt und an eine Bodenstation übermittelt werden (z.B. die Art und Schwere von Schäden an Gebäuden nach einem Erdbeben). Abhängig von der Art der Mission ist in diesem Stadium mit zusätzlichen Schwierigkeiten zu rechnen, etwa mit dem Sichtverlust durch Rauch- oder Staubwolken sowie mit Ungenauigkeiten oder einem Ausfall der satellitengestützten Positionsbestimmung. Zur Erkennung von Gefahren in der weiteren Flugbahn des Hubschraubers oder zur Auswahl geeigneter Landeplätze ist auch in dieser Phase ein schräg nach vorne gerichteter Laserscanner von Vorteil.

Die Behandlung beider Fälle erfordert eine angepasste Methodik, die sich z.B. von den gängigen Vorgehensweisen zur Stadtmodellerstellung unterscheidet. Dies gilt unter anderem aufgrund

der Multi-Aspekt Datenerfassung und aufgrund der zum Zeitpunkt t_2 bestehenden Notwendigkeit einer schritthaltenden Auswertung. Die Unterschiede werden in Kapitel 2 weiter erläutert.

1.3 Registrierung multitemporaler 3D-Daten

Die automatische Erkennung von Änderungen in urbanen Gebieten auf der Basis von ALS-Daten setzt eine räumliche Zuordenbarkeit der zu verschiedenen Zeitpunkten (t_1 und t_2) erfassten 3D-Punktwolken voraus. In der Realität zeigen sich jedoch immer gewisse Ungenauigkeiten, zum Beispiel bei der Entfernungsmessung oder bei der Bestimmung der Sensorposition und aller Orientierungen. Diese Ungenauigkeiten führen auch beim ALS zu Abweichungen zwischen den einzelnen Datensätzen, die den direkten Vergleich der Daten erschweren. In einem der ersten Schritte ist daher meist eine gegenseitige Ausrichtung der unterschiedlichen Datensätze erforderlich. Für diesen Vorgang hat sich in der Literatur der Begriff „Registrierung“ etabliert, obwohl damit oft bereits schon die Erstellung der Laser-Punktwolke aus den einzelnen Entfernungsmessungen gemeint sein kann. Der Klarheit halber wird daher gelegentlich auch von „Koregistrierung“ gesprochen, wenn es um die Angleichung mehrerer zusammenhängender Datensätze geht.

Zur Koregistrierung von Punktwolken lassen sich Standardverfahren in der Literatur finden, allerdings ergeben sich beim ALS und zusätzlich auch durch die in Abschnitt 1.2 genannten Randbedingungen weitere Probleme, die für die Änderungserkennung gelöst werden müssen:

- Durch die diskontinuierliche Abtastung des Geländes mit einzelnen Entfernungsmessungen entstehen Punktwolken mit diskreten 3D-Punkten. Bei einem erneuten Überflug mit geänderter Flugbahn ergibt sich in der Regel eine andere Verteilung der Messpunkte auf Objekten der Szene, da der Scanvorgang üblicherweise einem festen Ablauf folgt (dem *Scanmuster*). Das bedeutet, dass praktisch nie die gleiche Position der Szene mehrfach als Datenpunkt in den ALS-Daten auftaucht, weshalb insbesondere auch keine eindeutige Punkt-zu-Punkt Zuordnung zwischen überlappenden Datensätzen möglich ist.

- Ein schräg nach vorne geneigter Laserscanner erlaubt zwar eine detaillierte Erfassung von Fassaden, die ansonsten in Nadirsicht nur unzureichend abgebildet werden. Die Schrägsicht führt allerdings auch dazu, dass von der Sensorposition aus gesehen hinter Gebäuden Abschattungen entstehen. In Abhängigkeit von der Flugrichtung können lokal stark unterschiedliche Punktdichten vorliegen. Im Extremfall sind Regionen mit hoher Punktdichte gerade invers zu abgeschatteten Bereichen im jeweils anderen Datensatz, was eine zuverlässige Koregistrierung zusätzlich erschwert.

- Eine schritthaltende Datenanalyse mit dem Ziel der Änderungserkennung erfordert eine kontinuierliche Überprüfung und gegebenenfalls eine Korrektur der Registrierung zwischen den 3D-Daten des momentan erfassten Datenstroms und der vorhandenen Datenbank (dem Referenzdatensatz). Dabei können in den aktuell gemessenen Daten anstelle einer Gesamtpunktwolke nur Daten innerhalb eines gleitenden Zeitfensters betrachtet werden, welches zum Beispiel jeweils nur um einige Sekunden zurückreicht.

Diese zusätzlichen Besonderheiten müssen bei der (schritthaltenden) Koregistrierung von Multi-Aspekt ALS-Daten berücksichtigt werden, bevor das eigentliche Problem der automatischen Änderungserkennung gelöst werden kann. Da die Ursache für den Versatz von ALS-Punktwolken oft in einer ungenauen Positions- und Lagebestimmung für den fliegenden Sensorträger begründet liegt, kann die Fähigkeit zur schritthaltenden Registrierung umgekehrt auch zur geländebasierten Navigation verwendet werden. Das heißt, dass nicht nur die neu gemessenen Laserpunkte an die Referenzdaten angeglichen werden, sondern mit ihnen auch die angenommene Position und Ausrichtung des Sensors bzw. des Flugzeugs, welches den Sensor trägt, korrigiert werden.

1.4 Kalibrierung eines ALS-Systems

Die Messdaten eines ALS-Systems unterliegen sowohl zufälligen Messabweichungen (Rauschen) als auch den Einflüssen einer Vielzahl systematischer Fehlerquellen, die mehr oder weniger deutlich in Erscheinung treten können. Als Beispiele sind etwa eine fehlerhafte Synchronisation von Laserscanner und Navigationssensoren, ein Bias in der Entfernungsmessung, unpräzise Steuerung der Scanspiegel oder Ungenauigkeiten bei der Ausrichtung der Sensoren am Sensorträger zu nennen. Abschnitt 3.2 setzt sich detailliert mit den möglichen Fehlerquellen auseinander. Die meisten systematischen Einflüsse können unabhängig von der eigentlichen Datenerfassung quantifiziert und minimiert werden. Auswirkungen einer Sensorfehlstellung auf die Passgenauigkeit überlappender Datensätze lassen sich dagegen erst anhand der ALS-Daten selbst erkennen und bestimmen, woraus sich aber die Möglichkeit einer zukünftigen Berücksichtigung dieser Einflüsse ergibt. Das ALS-System kann dazu anhand der mehrfach erfassten Daten eines geeigneten Gebiets kalibriert werden (vgl. Literaturübersicht in Abschnitt 2.3). Ein unkalibriertes ALS-System würde zusätzlich zu einer fehlerbehafteten Lokalisierung der Datensätze auch zu nichtlinearen Verzerrungen innerhalb der resultierenden Punktwolken führen, die sich nicht allein durch die im vorherigen Abschnitt angesprochene rigide Koregistrierung korrigieren ließen.

Es muss berücksichtigt werden, dass die zu kalibrierenden Parameter nur dann hinreichend genau anhand der gemessenen Daten bestimmt werden können, wenn sich andere (z.B. zufallsverteilte) Einflüsse auf die Datenerfassung bei diesem Vorgang separieren und minimieren lassen. Dazu kann mit dem ALS-System regelmäßig und unter kontrollierten Bedingungen ein Testfeld mit ausgewählten und bekannten Kalibrierkörpern erfasst werden. In der Regel wird ein auf diese Weise kalibriertes geodätisches Messsystem nicht ungeplant verändert, weshalb die einmal gefundenen systematischen Parameter über einen längeren Zeitraum stabil bleiben.

Eine andere Situation liegt vor, wenn das verwendete Fluggerät nicht primär zur topographischen Erfassung, sondern vielmehr zur Bewältigung anderer Aufgaben eingesetzt wird (z.B. für Such- und Rettungseinsätze). Hierbei ist es von Vorteil, wenn die Sensoren ebenso wie die weiteren für den Einsatz erforderlichen Vorrichtungen (z.B. Bergungsgeräte) an verschiedenen Stellen installiert oder sogar unter den verfügbaren Fluggeräten ausgetauscht werden können. Außerdem ist aufgrund der äußeren Umstände mit einer deutlich größeren mechanischen Beanspruchung des Sensorträgers zu rechnen. Beide Faktoren führen jedes Mal zu einer neuen Relativorientierung der Systemkomponenten und damit zur Notwendigkeit einer Neukalibrierung des ALS-Systems, die idealerweise in situ während des Einsatzes oder unmittelbar davor geschehen soll. Außerdem sollte dies möglichst unabhängig vom Scanmuster des Laserscanners und insbesondere auch bei solchen ALS-Konfigurationen möglich sein, die von der reinen Nadirsicht abweichen.

1.5 Vergleich von Multi-Aspekt ALS-Daten

Bei der Verwendung eines kalibrierten ALS-Systems und bei schritthaltender Koregistrierung der aktuellen Messungen zu einem Referenzdatensatz stellt sich im nächsten Schritt die Frage, wie auf Basis der korrekt positionierten ALS-Daten ein (ebenfalls schritthaltender) Vergleich zwischen beiden Zuständen des urbanen Gebiets durchgeführt werden kann. Eine einfache Differenzbildung der ALS-Daten ist nicht zielführend, da aus den in Abschnitt 1.3 genannten Gründen ohnehin keine identischen 3D-Punkte in den einzelnen Punktwolken zu erwarten sind. Außerdem kommt es durch die Schrägsicht zu Lücken in der Geländeabdeckung und damit zu Bereichen, für die prinzipiell keine Aussage getroffen werden kann.

Da das urbane Gebiet und seine darin enthaltenen Objekte durch unregelmäßig verteilte Entfernungsmessungen lückenhaft abgetastet werden, werden korrekte Zuordnungen zwischen mehreren Datensätzen erst z.B. durch eine objektbasierte Analyse ermöglicht (Segmentierung, Klassifizierung). Beim Vergleich der Daten kann dann auch eine spezifische Aussage über die Art

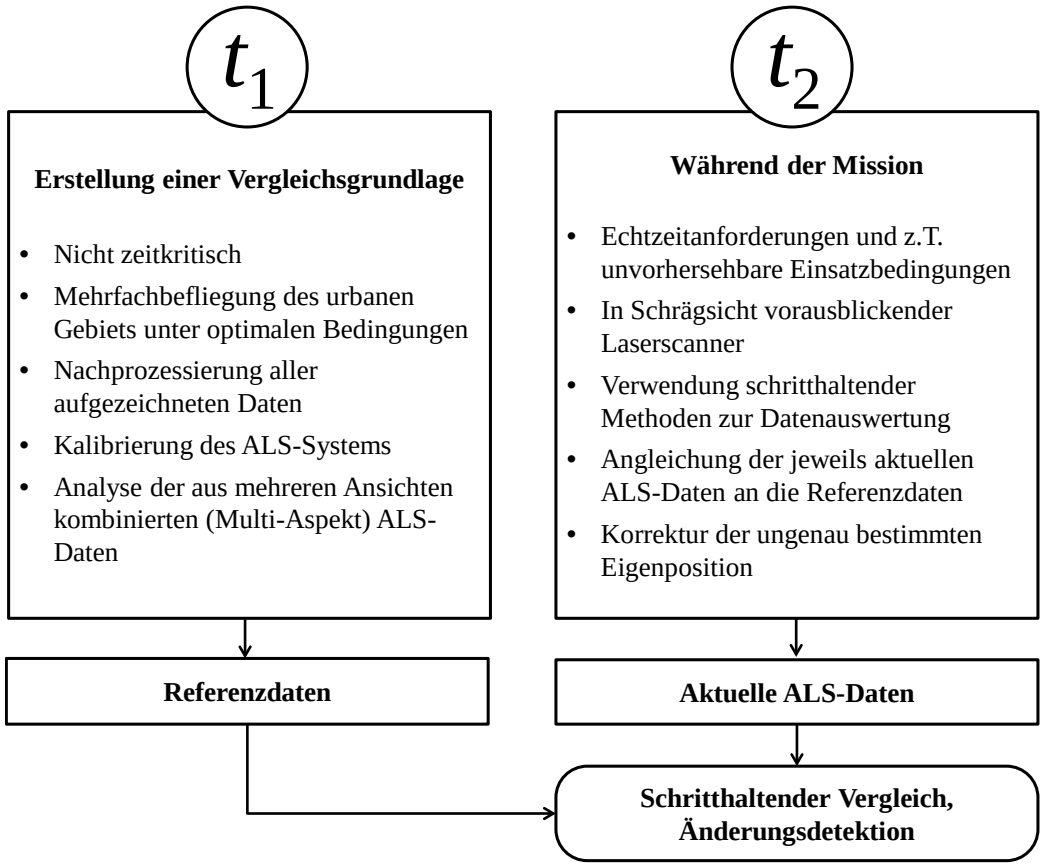


Abbildung 1.4: Unterschiedliche Randbedingungen und Aufgaben bei der Ersterfassung (t_1) und während der Mission (t_2).

der eingetretenen Veränderungen gemacht werden. Die dazu notwendigen Segmentierungsverfahren können neben geometrischen Zusammenhängen zum Beispiel auch spektrale Eigenschaften der abgetasteten Objekte berücksichtigen. Im Kontext der beiden in Abschnitt 1.2 genannten Gruppen von Randbedingungen (t_1: Erfassen optimaler Referenzdaten, t_2: schritthaltende Änderungserkennung) müssen folgende Unterschiede berücksichtigt werden:

- Zeitpunkt t_1: Bei der Erstellung einer Vergleichsgrundlage besteht keine Echtzeitanforderung an die Verarbeitung. Daher kann ein Segmentierungsverfahren verwendet werden, welches im Anschluss an die vollständige Abtastung des relevanten Stadtgebiets auf der kompletten Datenmenge operiert.

- Zeitpunkt t_2: Da zur Durchführung des Vergleichs während der Mission eine schritthaltende Auswertung angestrebt wird, besteht nur die Möglichkeit, die unmittelbar aus dem jeweils aktuellen Datenbestand zu erkennenden Objektzusammenhänge zu verwerten. Dieser aktuelle Datenbestand beinhaltet typischerweise nur die innerhalb eines gleitenden Zeitfensters erfassten ALS-Daten, wobei die räumliche Anordnung der sich darin befindenden 3D-Punkte durch das Scanmuster des Laserscanners bestimmt wird. In jedem Fall können für den Vergleich $t_1 \leftrightarrow t_2$ die Segmentierungs- und Klassifizierungsergebnisse von Zeitpunkt t_1 in Betracht gezogen werden.

Beim eigentlichen Vergleich können unterschiedliche Änderungsvorgänge erkannt werden. Zum einen betrifft dies die Änderungsrichtung, d.h. die Behandlung der Frage, ob Objekte in der Szene verschwunden sind, bewegt wurden, neu erschienen sind oder ihr Aussehen verändert haben.

Zum anderen ist von Interesse, zu welcher der in Abschnitt 1.1 genannten Kategorien die jeweilige Änderung gezählt werden kann, ob es sich also um ein kurzfristiges, mittelfristiges oder langfristiges Phänomen handelt.

1.6 Ziele der vorliegenden Arbeit

Vorrangiges Thema dieser Arbeit ist die Entwicklung von Methoden zur schritthaltenden Änderungserkennung in urbanen Gebieten, wobei die Daten eines ALS-Systems als Grundlage dienen. Es wird davon ausgegangen, dass die Hauptaufgabe des Flugeinsatzes nicht allein in der topographischen Erfassung des Geländes liegt, sondern dass die unmittelbare Verarbeitung der ALS-Daten für die eigentliche Mission relevant ist (vgl. Abschnitt 1.2). Die Messrichtung des Laserscanners kann von der Nadirsicht abweichen, weshalb die zu vergleichenden oder zu kombinierenden ALS-Daten in Abhängigkeit von der jeweils vorliegenden Flugrichtung verschiedene Aspekte der Szene beinhalten. Die Vergleichbarkeit dieser Daten wird aufgrund von Diskrepanzen und unterschiedlichen Verdeckungen eingeschränkt, sodass die eigentliche Problemstellung im Vorfeld um die Punkte Segmentierung, Kalibrierung und Registrierung erweitert werden muss. Gleichzeitig müssen auch die in Abschnitt 1.2 aufgezählten Randbedingungen beachtet werden, welche einerseits zum Zeitpunkt der Ersterfassung des urbanen Gebiets und andererseits während des Vergleichs vorliegen. Die jeweils bestehenden Aufgaben und Randbedingungen sind in Abbildung 1.4 übersichtlich dargestellt.
Im Einzelnen werden in dieser Arbeit folgende Ziele verfolgt (Aufgabenstellung):

- Es ist eine Methode zu entwickeln, die eine automatische Kalibrierung des ALS-Systems anhand der damit erfassten Multi-Aspekt Daten eines nahezu beliebigen urbanen Gebiets ermöglicht. Die Eignung des Verfahrens ist anhand unterschiedlicher Geländearten und Bebauungsformen zu überprüfen. Es wird erwartet, dass durch die sich ergebenden Korrekturen die Passgenauigkeit zwischen den aktuellen und den im Anschluss erfassten Punktwolken deutlich erhöht wird.

- Trotz der Verwendung eines kalibrierten ALS-Systems verursachen unvermeidbare zusätzliche Fehlerquellen einen Versatz zwischen den Datensätzen. Zur Beseitigung dieser Disparitäten ist eine geeignete Methode zur Koregistrierung überlappender ALS-Datensätze anzupassen oder neu zu entwickeln. Hierbei sollen die aufgrund verschiedener Aspekte stark unterschiedlichen Punktdichten und Verdeckungen möglichst wenig Einfluss auf die Qualität der Registrierung haben.

- In den Punktwolken sollen verschiedene Objektklassen automatisch erkannt werden (z.B. Fassaden, Dächer, Boden und Vegetation), um später eine Aussage über die Art eingetretener Veränderungen zu ermöglichen. Als Zwischenergebnis ist nach der erstmaligen Erfassung des urbanen Gebiets eine dafür geeignete, teilweise symbolische Beschreibung der erfassten Szene zu generieren. Den ermittelten Objekten sollen zugleich Merkmale zugeordnet werden, die eine Zuordnung und einen Vergleich mit neuen ALS-Daten erleichtern.

- Die Vorklassifizierung der Messwerte und die Objektsegmentierung* müssen in der Vergleichsphase schritthaltend durchgeführt werden können. Hierzu ist ein geeignetes Verfahren zu entwickeln, welches Objektzugehörigkeiten der gemessenen 3D-Punkte bereits während des Scanvorgangs erkennt.

*Der Begriff *Segmentierung* kann in dieser Arbeit sowohl die Abtrennung der genannten Sache vom Hintergrund (z.B. Bodensegmentierung) als auch deren weitere Unterteilung meinen (z.B. Segmentierung der Punktwolke)

- Ein Verfahren soll entwickelt und untersucht werden, das bei einer erneuten ALS-Befliegung des gleichen urbanen Gebiets einen sofortigen Vergleich mit den vorhandenen Referenzdaten zulässt. Zur Verbesserung der Ergebnisse sollen auch die aus der objektbasierten Analyse stammenden Merkmale verwendet werden. Es wird erwartet, dass eine automatische Aktualisierung der vorhandenen Szenenbeschreibung durch neu hinzugekommene oder verschwundene Objekte erfolgen kann und dass Auffälligkeiten sich zuverlässig detektieren lassen.

- Es ist zu untersuchen, inwieweit Multi-Aspekt ALS geeignet ist, Aussagen über Änderungsvorgänge in einem urbanen Gebiet zu treffen. Die entwickelten Verfahren sind dazu anhand realer Szenen zu testen und zu evaluieren. Einschränkungen des Ansatzes, die sich anhand der verwendeten Daten zeigen, sollen herausgearbeitet werden.

In der Entstehungsphase dieser Arbeit wurden verschiedene urbane Gebiete mehrfach mit einem ALS-System beflogen, wobei der Rohdatenstrom des Laserscanners und der Navigationssensoren aufgezeichnet wurde. Zur Demonstration der ausgearbeiteten Verfahren wird der aufgezeichnete Datenstrom verwendet, um ggf. eine mit der Erfassung schritthaltende Auswertung simulieren zu können. Es ist nicht Anliegen dieser Arbeit, spezielle Verfahren nur für die in den Experimenten verwendeten Geräte zu entwickeln. An erster Stelle steht die methodische Lösung der genannten Aufgaben für möglichst viele aktuelle und zukünftige ALS-Systeme. Hierbei wird auch die prinzipielle Eignung der Verfahren zur schritthaltenden Datenauswertung beachtet. Die technische Umsetzung und Echtzeit-Realisierung der entwickelten Verfahren in den Systemen selbst ist dabei aber nicht Gegenstand der Untersuchungen.

1.7 Übersicht

Nach dieser Einleitung folgt in den weiteren Kapiteln die eigentliche Auseinandersetzung mit den genannten Themen. In Kapitel 2 wird zunächst eine Übersicht über verwandte Arbeiten zu den einzelnen Aufgaben aus Abschnitt 1.6 gegeben. Diese Übersicht beinhaltet die Themenblöcke Objektsegmentierung und Erkennen von Strukturen in ALS-Daten, Registrierung von 3D-Punktwolken, Kalibrierung von ALS-Systemen, Fehleranalyse und Qualitätskontrolle für die ALS-Datenerfassung und schließlich die Änderungserkennung in urbanen Gebieten. Der aktuelle Stand der Forschung und gängige Vorgehensweisen werden jeweils anhand von Literaturquellen und verfügbaren Produkten dargestellt. Anschließend wird auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum eigenen Ansatz eingegangen.

Die für die weiteren Kapitel relevanten technischen Grundlagen werden in Kapitel 3 besprochen. Den Anfang macht dabei die Vorstellung der einzelnen Komponenten eines typischen ALS-Systems. In einem Unterkapitel werden die aus der Verwendung dieser Komponenten und deren Zusammenspiel resultierenden Fehlerquellen erörtert. Die Reduzierung oder Vermeidung dieser negativen Einflüsse ist ein weiteres wichtiges Thema von Kapitel 3. Eine genaue Untersuchung der beteiligten Fehlerquellen ist zudem Voraussetzung für die methodische Entwicklung des im weiteren Verlauf notwendigen Kalibrierverfahrens.

Kapitel 4 bildet den methodischen Schwerpunkt dieser Arbeit, in dem der Weg zur „Änderungsdetektion in urbanen Gebieten durch objektbasierte Analyse und schritthaltenden Vergleich von Multi-Aspekt ALS-Daten“ schrittweise gezeigt wird. Am Anfang stehen einige bekannte Verfahren zur Vorverarbeitung von 3D-Punktwolken und eine Beschreibung von Datenstrukturen zu deren Speicherung und Verwaltung. Danach werden zwei unterschiedliche Verfahren zur Segmentierung planarer Objekte vorgestellt, wovon das eine auf der vollständigen Punktwolke operiert, während das andere einzelne Scanzeilen des Laserscanners auswertet. Beide Verfahren eignen sich jeweils zur Vorklassifizierung von Einzelmessungen und zur Objektsegmentierung unter den unterschiedlichen in Abschnitt 1.2 genannten Randbedingungen. Aufbauend auf den Ergebnissen der

objektbasierten Analyse von ALS-Daten eines urbanen Gebiets wird ein Verfahren zur Kalibrierung des ALS-Systems sowie zur gleichzeitigen Koregistrierung der damit erfassten Multi-Aspekt Datensätze präsentiert. Die sich ergebende Kombination aller Einzeldatensätze bildet die Basis für den späteren Vergleich bei einer erneuten ALS-Befliegung desselben Gebiets. Das schließlich vorgeschlagene Verfahren zur schritthaltenden Änderungserkennung in multitemporalen Multi-Aspekt ALS-Datensätzen ist eine Weiterentwicklung der aus der Robotik stammenden Belegungsgitter (engl. Occupancy Grids).

In Kapitel 5 werden die zuvor beschriebenen Methoden auf Daten eines realen ALS-Systems angewendet. Die Beschreibung dieser Experimente beginnt mit der Besprechung des eingesetzten Sensorsystems mit den Einzelkomponenten Laserscanner, Navigationssensorik und Sensorträger sowie der herstellerspezifischen Software zur Rohdatenaufbereitung. Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene urbane Geländeformen erfasst. Die Charakteristiken dieser Testgebiete und Details der erfassten Datensätze werden im Anschluss an die Beschreibung des Sensorsystems erläutert. Nach einigen Anmerkungen zur Implementierung der Verfahren werden die Ergebnisse der Experimente ebenfalls in Kapitel 5 präsentiert. Zunächst werden die Systemparameter mit Hilfe der verfügbaren Daten von Mehrfachbefliegungen verschiedener urbaner Gebiete bestimmt. Die durchgeführten ALS-Messungen beinhalten auch zeitlich versetzte Mehrfachbefliegungen eines ausgewählten urbanen Gebiets. Diese Datensätze bilden die Grundlage für die Experimente zur automatischen Änderungserkennung, welche als Hauptergebnis der Arbeit angesehen werden können.

Kapitel 6 umfasst schließlich eine ausführliche Diskussion und Bewertung der Ergebnisse. Hierbei werden auch mögliche Grenz- und Fehlleistungen der beschriebenen Sensorik und Methodik identifiziert, die sich anhand der durchgeführten Experimente zeigen. Die Arbeit schließt daraufhin in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Verbesserungsmöglichkeiten.

2 Stand der Forschung und eigener Beitrag

Die Einleitung hat dargelegt, dass das anvisierte Ziel der automatischen und unmittelbaren Änderungserkennung in urbanen Gebieten mit Hilfe der Erfassung von ALS-Daten in mehrere Teilaufgaben zerfällt. Mit jeder einzelnen dieser Aufgaben haben sich in den letzten Jahren zahlreiche andere Arbeiten befasst. Eine aktuelle und umfassende Übersicht über gängige Techniken der Laserdatenerfassung und über Methoden der Datenverarbeitung (Datenstrukturen, Visualisierung, Registrierung, Kalibrierung, Segmentierung u.a.m.) ist in den Büchern von Shan & Toth [2009] und Vosselman & Maas [2010] zu finden, die die Beiträge verschiedener Forschungsgruppen bündeln. Es stehen dabei geodätische und topographische Anwendungen im Vordergrund.

Dieses Kapitel stellt einige der Lösungsansätze heraus, welche in thematisch verwandten Arbeiten vorgeschlagen wurden, und bringt sie in Zusammenhang mit den Zielen der vorliegenden Arbeit. Durch die besonderen Randbedingungen zeigt sich, dass der Stand der Forschung in wichtigen Fragen nicht zur Lösung der hier betrachteten Aufgaben ausreicht und dass eine Erweiterung der jeweils etablierten Verfahren notwendig ist. In dieser Arbeit werden daher auch einige bekannte Verfahren angepasst, neu ausgerichtet und zielführend zusammengestellt. Zur Realisierung der schritthaltenden Änderungserkennung wird letztlich eine neue Methode entwickelt. In den folgenden Abschnitten werden jeweils die vorliegenden Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu verwandten Arbeiten besprochen.

2.1 Segmentierungsverfahren für 3D-Punktmengen

Ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur automatischen Objekterkennung ist die Trennung zusammenhängender Datenbereiche vom Hintergrund, bevor die so gefundenen Zusammenhangskomponenten einer *Klassifikation* unterzogen werden. Für die Separierung von Vordergrund und Hintergrund wird in der Bildverarbeitung der Begriff *Segmentierung* verwendet, siehe z.B. Jähne [2002]. Auch im Fall von 3D-Punktwolken kann eine ähnliche Vorgehensweise gewählt werden. Die dafür verwendeten Methoden unterscheiden sich je nach vorliegendem Abtastmuster mehr oder weniger deutlich von denen der 2D-Bildverarbeitung. In manchen Fällen werden unregelmäßige 3D-Punktwolken betrachtet, für die zunächst eine geeignete Daten- und Suchstruktur eingeführt werden muss. Abhängig von der Art der behandelten 3D-Daten und der gesuchten Objekte werden unterschiedliche Anforderungen an das jeweilige Segmentierungsverfahren gestellt.

Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit ist die Segmentierung planarer Strukturen, da man annehmen kann, dass diese in ALS-Daten urbaner Gebiete besonders häufig anzutreffen sind. Diese Grundannahme ist aus der Erfahrung motiviert, dass Gebäudebestandteile wie Fassaden und Dächer im Wesentlichen aus planaren Elementen bestehen. Hierzu gibt es zwar genügend Gegenbeispiele, die meist in einer Verbindung von moderner Kunst und Architektur zu sehen sind (z.B. Gehry, Hundertwasser, Gaudí). Der überwiegende Teil eines Stadtbildes ist jedoch typischerweise von geraden Linien, rechten Winkeln und ebenen Flächen geprägt.

2.1.1 Literaturübersicht

Ein Vergleich unterschiedlicher 3D-Segmentierungsverfahren zur Erkennung planarer Strukturen ist bereits im Artikel von Hoover et al. [1996] zu finden. Die Autoren beschränken sich dort zwar auf die Auswertung von Entfernungsbildern, d.h. einer bildähnlichen Verteilung von Entfernungswerten auf einem 2D-Raster. Dennoch waren schon zum damaligen Zeitpunkt mehr als 15 verschiedene Verfahren zu diesem Thema publiziert. Der wesentliche Beitrag des genannten Artikels kann in der Erstellung eines neutralen Rahmens für den Verfahrensvergleich gesehen werden. Als Bewertungskriterien werden sowohl die Laufzeit der Verfahren als auch die Qualität der Ergebnisse anhand bekannter Objektgrenzen herangezogen. Die gleiche Vorgehensweise, nämlich eine Einstufung der Ergebnisse in korrekte Segmentierung, Übersegmentierung, Untersegmentierung, fehlende Objekte und Rauschen, wird von Geibel & Stilla [2000] zur Bewertung von Verfahren zur Gebäudesegmentierung verwendet.

In den letzten zehn Jahren wurden sehr viele neue Verfahren zur 3D-Segmentierung veröffentlicht, was eine umfassende Übersicht schwierig macht. Die einzelnen Verfahren sind oftmals an die Zielsetzung und die speziellen Randbedingungen bei der Datenerfassung angepasst. Dies wäre bereits ein mögliches Kriterium für eine Einteilung der Verfahren; als Alternative kann stattdessen auch die jeweils gewählte Methodik zugrunde gelegt werden. In einer Einteilung nach Vosselman et al. [2004b] werden drei Vorgehensweisen zur Segmentierung von Flächen in 3D-Punktwolken unterschieden: Flächenwachstum, scanzeilenbasierte Segmentierung und die direkte Anpassung parametrisierter Formen (Modelle). In Anlehnung an diese Kategorisierung werden im Folgenden einige Arbeiten als Vertreter genannt:

- Unter *Flächenwachstum* wird eine dem Gebietswachstum (engl. Region Growing) in der Bildverarbeitung äquivalente iterative Methode verstanden, bei der ausgehend von einem Startpunkt unter Einhaltung einer Homogenitätsbedingung jeweils benachbarte Punkte zu einer stetig wachsenden Menge hinzugefügt werden, bis diese Bedingung am entstehenden Rand nicht mehr erfüllt werden kann. Hierbei muss die Punktmenge als Ganzes vorliegen, und es muss bereits eine geeignete Suchstruktur auf ihr definiert sein. Dies ist beispielsweise beim (stationären) terrestrischen Laserscanning (TLS) implizit gegeben, da dabei jeder gemessene Punkt in einem 2D-Abtastraster vorliegt (Elevation, Azimut). Pu & Vosselman [2006] wenden auf solche Daten ein typisches Flächenwachstumsverfahren zur Fassadensegmentierung an, wobei die globale Planarität der entstehenden Flächen als Wachstumskriterium betrachtet wird. Rottensteiner [2003] analysiert in ähnlicher Weise Oberflächenmodelle, die zuvor aus ALS-Daten erzeugt wurden, und verwendet ein Flächenwachstumsverfahren zur Erkennung von Dachflächen. Im Vorfeld der eigentlichen Segmentierung können lokale Merkmale innerhalb der Punktwolke bestimmt werden (z.B. Hauptkomponenten, engl. Principal Components), die dann zu einem Bestandteil der Homogenitätsbedingung werden. Ein solches Verfahren ist zum Beispiel von Roggero [2002] beschrieben worden.

- Bei der *scanzeilenbasierten Segmentierung* wird eine bestehende Ordnung der Datenpunkte ausgenutzt, die sich zum Beispiel durch die Reihenfolge bei der Datenerfassung automatisch ergibt. Die Auswertung setzt zunächst an diesen geordneten Datenabschnitten an, um anschließend die Zwischenergebnisse entlang der orthogonalen Richtung zu einer Gesamtfläche zu verschmelzen (engl. Split and Merge). Die grundlegenden Ideen zur scanzeilenbasierten Auswertung von 3D-Daten stammen von Jiang & Bunke [1994, 1999]. Ihr Verfahren unterteilt zunächst jede Zeile eines Entfernungsbildes in Geradenstücke, die dann in Richtung der Bildspalten zu flächigen Segmenten zusammengesetzt werden. Axelsson [1999] und Han et al. [2007] gehen bei der Gebäudesegmentierung in ALS Daten ähnlich vor, verwenden aber Höhendifferenzen zur Identifikation von Trennstellen. Von Sithole & Vosselman [2003, 2005] wird ein graphentheoretisches Verfahren vorgeschlagen, wobei die Scanzeilen

durch unterschiedlich orientierte Vertikalschnitte der Punktwolke erzeugt werden. Gonzálvez et al. [2007] wiederum betrachten Horizontalschnitte einer 3D-Punktwolke, die sie mit dem Douglas-Peucker-Algorithmus vereinfachen und anschließend zur Extraktion von Ebenen, Zylindern oder Kegeln bündeln. Zur Steigerung der Effizienz und Zuverlässigkeit ergänzen sie beide Auswerteschritte um ein RANSAC-Schätzverfahren (Random Sample Consensus, Fischler & Bolles [1981]). Hatger & Brenner [2003] nutzen ebenfalls ein RANSAC-Verfahren zur Segmentierung einzelner Scanzeilen, wobei die Hauptaufgabe dort in der Extraktion von Straßenzügen liegt. Weitere Arbeiten befassen sich mit Segmentierungsverfahren beim Einsatz mobiler Laserscanner (z.B. Lin & Hyyppä [2011]). Aus Sicht der Anwendung liegt der Hauptvorteil der scanzeilenbasierten Segmentierung in ihrer im Vergleich zum Flächenwachstum hohen Geschwindigkeit, die sie vor allem für die echtzeitnahe Datenverarbeitung prädestiniert. Beispiele hierfür sind Kollisionsvermeidung (Sobottka et al. [1997]), Verkehrsflussanalyse (Toth et al. [2004]), Objekterkennung im Straßenverkehr (Prokhorov [2009]), aber auch industrielle Anwendungen wie der *Griff in die Kiste* (Katsoulas & Werber [2004]).

- Die *Anpassung parametrisierter Modelle* an die 3D-Punkte erfordert zunächst eine Vorstellung darüber, welche Objekte erfasst wurden und welche Modelle diese Objekte am besten beschreiben. Die Modellparameter werden dann anhand der gemessenen Daten geschätzt, z.B. unter Minimierung der Fehlerquadrate (Rabbani et al. [2007]). Ein typisches Beispiel einer Modellvorstellung ist die zuvor getroffene Annahme, dass urbane Gebiete und die darin enthaltenen Gebäude überwiegend planare Flächen aufweisen (Fassaden und Dächer). Ähnlich der Detektion von Geraden in einem 2D-Bild können Ebenenparameter für lokale Ausschnitte der Punktwolke z.B. mit einer Hough-Transformation geschätzt werden. Die Vorgehensweise der Hough-Transformation wird dazu auf den dreidimensionalen Fall erweitert (Vosselman & Dijkman [2001]). Ähnliche Ansätze basieren auf zusätzlichen Merkmalen, zum Beispiel auf den Hauptkomponenten lokaler Ausschnitte der Punktwolke (Hoppe et al. [1992], Schuster [2004], Groß & Thönnessen [2006]). Solche lokalen Merkmale werden entweder den Messwerten selbst oder beispielsweise Dreiecken innerhalb einer Dreiecksvermaschung zugeordnet. Die Flächensegmentierung kann anschließend durch eine Clusteranalyse im Merkmalsraum realisiert werden (Vosselman [1999], Filin & Pfeifer [2006], Tse et al. [2007], Sampath & Shan [2010]). Tarsha-Kurdi et al. [2007] vergleichen die Hough-Transformation mit anderen robusten Schätzverfahren und kommen zu dem Schluss, dass der RANSAC-Algorithmus einige Vorteile hinsichtlich der Performanz bei der 3D-Flächendetektion aufweist. Schnabel et al. [2007] demonstrieren diese Effizienz bei der Zerlegung von Punktwolken in bestimmte Formen wie Ebenen, Kugeln, Zylinder, Kegel und Tori. Neben dieser Anpassung parametrisierter Modelle lassen sich in der Literatur auch Verfahren finden, bei denen Trendflächen direkt aus den Daten berechnet werden, z.B. mittels lokaler polynomialer Regression (Crosilla et al. [2005]).

Die obige Unterscheidung von Segmentierungsverfahren ist nicht vollständig, da es durchaus andere Ansätze gibt, die sich einer Einteilung in die genannten Kategorien entziehen (z.B. die von Stilla et al. [1998] vorgeschlagene strukturelle Analyse) oder die sich nicht eindeutig der einen oder der anderen Kategorie zuordnen lassen.

2.1.2 Gewählter Ansatz und eigener Beitrag

Im Unterschied zu anderen Arbeiten zur ALS-Datenauswertung, die sich meist auf eine einzige Art der Segmentierung von Flächen in 3D-Punktmengen konzentrieren, werden in der vorliegenden Arbeit Verfahren aller drei Kategorien untersucht, angewendet und kombiniert. Dies liegt darin begründet, dass zu den beiden Zeitpunkten t_1 und t_2 unterschiedliche Anforderungen bestehen (siehe Abbildung 1.4), aus denen sich jeweils auch eine unterschiedliche Eignung der Verfahren ergibt.

Ein Flächenwachstumsverfahren eignet sich insbesondere für die Erstellung der Referenzdatenbank aus einer großen Gesamtpunktwolke (t_1). In Abschnitt 4.2.3 wird dieses lokal im iterativen Wechsel mit einer RANSAC-basierten Ebenenanpassung eingesetzt (siehe auch Hebel & Stilla [2007]). Die scanzeilenbasierte Auswertung kann stattdessen bereits während der Datenerfassung sukzessive durchgeführt werden (t_2). Dies gilt insbesondere bei der Verwendung eines Zeilenscanners, bei dem die durch den Scanvorgang verursachte Abfolge der Datenpunkte für eine schritthaltende Auswertung ausgenutzt werden kann. In Abschnitt 4.2.4 werden dazu innerhalb aktuell erfasster Laserscanzeilen Geradensegmente detektiert, die über benachbarte Scanzeilen hinweg zu zusammenhängenden Flächen gruppiert werden (siehe auch Hebel & Stilla [2008]). Beide in dieser Arbeit gewählten Strategien zur 3D-Segmentierung verwenden eine Anpassung parametrisierter Modelle an die Daten, einerseits in Verbindung mit Flächenwachstum und andererseits innerhalb einer scanzeilenbasierten Vorgehensweise. Bemerkenswerterweise sind das jeweils entwickelte Ebenen- und das Geradensegmentierungsverfahren (t_1 bzw. t_2) aus methodischer Sicht trotzdem identisch, da jeweils nur eine andere Datenstruktur verwendet und das Verfahren an die Dimensionalität der Daten angepasst wird. Die Ergebnisse beider Segmentierungsverfahren lassen sich anhand korrespondierender Attribute gegenseitig zuordnen, womit dann auch eine Koregistrierung der ALS-Daten und letztlich auch eine automatische Änderungsdetektion ermöglicht werden.

2.2 Koregistrierung überlappender 3D-Punktmengen

2.2.1 Literaturübersicht

In Abschnitt 1.3 wurde bereits die besondere Bedeutung einer Koregistrierung von ALS-Punktwolken als Voraussetzung für die Änderungserkennung herausgestellt. Der ICP-Algorithmus (engl. Iterative Closest Point) von Besl & McKay [1992] ist ein Standardverfahren zur Koregistrierung zweier Punktmengen. Es handelt sich dabei um ein *rigides* Registrierungsverfahren, bei dem in einem iterativen Prozess eine Punktmenge solange als Ganzes gedreht und verschoben wird, bis sie mit einer anderen, feststehenden Punktmenge optimal zur Deckung kommt. „Optimal“ bedeutet im Original-ICP-Verfahren, dass die Summe der Abstandsquadrate zugeordneter Punkte minimal wird. Die Details dieses Verfahrens werden noch in Abschnitt 4.4.1 beschrieben.

Die zahlreichen Literaturverweise in den folgenden Absätzen verdeutlichen die hohe praktische Relevanz der Koregistrierung von 3D-Punktmengen. Bis auf wenige Ausnahmen (z.B. Pottmann et al. [2004]) sind die meisten Koregistrierungsmethoden Abwandlungen des ICP-Verfahrens. Es gibt sehr viele Verbesserungsansätze, sogar so viele, dass bereits von Rusinkiewicz & Levoy [2001] eine systematische Einteilung existierender ICP-Varianten vorgenommen wurde. Ihre Einteilung unterscheidet die einzelnen Verfahrensvarianten danach, welcher Einzelschritt des Original-ICP-Verfahrens verändert wurde. Dies betrifft jeweils die Auswahl von Untermengen der Punktwolken, die Zuordnung zwischen Einzelpunkten, die Gewichtung von Punkt-zu-Punkt Korrespondenzen, die Zurückweisung einzelner Punktpaarungen, die Auswahl einer geeigneten Fehlermetrik und die verwendete Methode zur Minimierung der Fehler.

Eine ausführliche Literaturübersicht über gängige Verfahren zur 3D-Registrierung (u.a. ICP-Varianten) ist in den Artikeln von Campbell & Flynn [2001] und Gruen & Akca [2005] zu finden. Mit allen Modifikationen des ICP-Verfahrens wird versucht, dessen Robustheit, Performanz, Genauigkeit oder Implementierbarkeit zu verbessern. Zum Beispiel setzten Besl & McKay [1992] in Anlehnung an Horn [1987] noch Quaternionen zur Lösung des Optimierungsproblems ein, wofür mittlerweile eine eingängigere Methode von Arun et al. [1987] gebräuchlich ist.

Ein kritisch zu betrachtender Nachteil des ICP-Verfahrens ist seine mangelnde Robustheit gegenüber Ausreißern in den Datenpunkten (Chetverikov et al. [2005]). Zhang [1994] beschreibt ein Verfahren, bei dem falsche Punktkorrespondenzen durch Auswertung eines variablen Distanz-

Schwellwerts herausgefiltert werden. Andere Autoren ersetzen die ICP-üblichen euklidischen Einzelpunktabstände durch alternative Distanzmaße, etwa den Abstand zu Tangentialebenen (Chen & Medioni [1992]). Oft werden auch zusätzliche Merkmale der Punkte ausgewertet (z.B. Farbe oder Intensität, lokale Krümmung, Normalenrichtung u.a.m.), um auf diese Weise ausschließlich „kompatible“ Punktpaarungen zu bilden (Roth [1999], Godin et al. [2001]) oder ein erweitertes Distanzmaß zu definieren (Sharp et al. [2002]). In diesem Zusammenhang sind auch solche Verfahren publiziert worden, in denen 3D-Punktmengen in einer 2D-Projektion mit Bildverarbeitungsmethoden behandelt werden (Barnea & Filin [2007], Torre-Ferrero et al. [2009], Kang et al. [2009]). Die Koregistrierung kann anstelle der Einzelpunkte auch weitergehende Objekte oder Strukturen berücksichtigen, die zuvor aus den Punktwolken abgeleitet wurden. Beispiele hierfür sind Dreiecksvermaschungen (Maas [2000], Krsek et al. [2002]), Linien oder Ebenen (Stamos & Leordeanu [2003], Dold & Brenner [2006], von Hansen [2006]), abstrakte Objekte (Rabbani et al. [2007]) oder auch konkrete Objekte wie Baumstämme (Henning & Radtke [2008]).

Es kann zwar nachgewiesen werden, dass das ICP-Verfahren immer konvergiert, jedoch führt der Iterationsprozess oft nur zu einem lokalen Minimum einer Fehlerfunktion. Dies gilt insbesondere dann, wenn Position und Orientierung der beiden Punktwolken zu Beginn sehr unterschiedlich sind. Die gewünschte Konvergenz in das globale Optimum erfordert deshalb bereits eine gute Anfangsnäherung (Grobregistrierung). Im Normalfall erfüllen ALS-Daten durch die Verwendung einer satellitengestützten Positionsbestimmung diese Voraussetzung. Probleme können aber auch dann auftreten, z.B. wenn diese Positionsbestimmung fehlerhaft ist, undokumentierte 3D-Daten aus verschiedenen Quellen verglichen werden sollen oder unterschiedliche Koordinatensysteme vorliegen. Robertson & Fisher [2002] suchen für die Koregistrierung das globale Minimum der Fehlerfunktion, indem sie viele unterschiedliche Startparameter parallel mit einem evolutionären Algorithmus abarbeiten und dadurch einen größeren Konvergenzbereich erhalten. Bae & Lichti [2008] bestimmen für die Zuordnung terrestrischer Laserscannerdaten lokale Merkmale der Punktwolken wie Krümmung und Normalenrichtung, worauf sie eine Kombination des ICP-Verfahrens mit einer RANSAC-Ausreißerbehandlung anwenden. Auf diese Weise erreichen sie auch bei deutlichem Versatz und Fehlorientierung der Anfangsnäherung eine optimale Koregistrierung.

Eine Eigenart des klassischen ICP-Verfahrens ist seine Einschränkung auf nur zwei zu registrierende Punktwolken. Für den Fall, dass mehr als zwei Punktwolken zusammengeführt werden sollen, stellt sich die Frage, ob dies z.B. wechselseitig geschehen soll oder ein Datensatz als feststehende Basis deklariert werden kann. Bergevin et al. [1996] bilden für eine Menge aus überlappenden Punktwolken ein Netzwerk aus paarweise ermittelten ICP-Koregistrierungsergebnissen. Anschließend verteilen sie auftretende Registrierungsfehler gleichmäßig über dieses Netzwerk. In Williams et al. [1999] wird eine Übersicht über gängige Verfahren zur mehrfachen 3D-Registrierung gegeben und gleichzeitig ein weiteres Verfahren vorgestellt, welches die globale Registrierungsaufgabe als gewichtetes Kleinste-Quadrate Optimierungsproblem löst. Als eine weitere Möglichkeit zur Koregistrierung mehrerer 3D-Datensätze wird z.B. von Scaioni & Forlani [2003] und Zhai et al. [2006] eine Bündelblockausgleichung vorgeschlagen. Nüchter et al. [2010] linearisieren das Registrierungsproblem für zwei Punktwolken und erweitern ihren Ansatz dann zu einer globalen Lösungsmethode für die Registrierung von n Datensätzen.

2.2.2 Gewählter Ansatz und eigener Beitrag

Ein Beitrag der vorliegenden Arbeit besteht in der Untersuchung der Relevanz rigider Koregistrierungsverfahren für eine auf ALS-Daten basierende Änderungsdetektion. Die Notwendigkeit zur Ausrichtung von 3D-Datensätzen tritt hier an zwei unterschiedlichen Stellen auf: Zum einen muss aus ALS-Daten mehrerer Überflüge ein einheitlicher Referenzdatensatz gebildet werden, der das betreffende urbane Gebiet möglichst vollständig abdeckt. Zum anderen müssen zeitlich versetzt erfasste ALS-Daten in einen räumlichen Bezug zu diesem Referenzdatensatz gebracht werden,

um einen beiderseitigen Vergleich durchführen zu können. Bei der Untersuchung der Notwendigkeit einer Koregistrierung von ALS-Punktwolken wird in dieser Arbeit der Frage nachgegangen, durch welche Effekte die damit zu korrigierenden Diskrepanzen überhaupt verursacht werden. In Abschnitt 3.2 werden dazu die bei der ALS-Datenerfassung typischerweise auftretenden Fehlerquellen erörtert und es zeigt sich, dass insbesondere eine relative Fehlstellung der Sensoren im ALS-System zu einem Versatz der resultierenden Punktwolken führt. Durch die Sensorfehlstellung ergeben sich aber zusätzlich noch Verzerrungen der Punktwolken, die sich nicht allein durch eine rigide Koregistrierung beheben lassen.

Die hier entwickelte Vorgehensweise zur Koregistrierung wird daher im Vergleich zu anderen Arbeiten wesentlich stärker im Zusammenhang mit der geometrischen Kalibrierung des ALS-Systems betrachtet. Bei der Erstellung des Referenzdatensatzes zum Zeitpunkt t_1 dient die rigide Koregistrierung dann nur noch zur Beseitigung verbleibender Diskrepanzen zwischen überlappenden ALS-Punktwolken, die sich auch nach der Kalibrierung des ALS-Systems aufgrund anderer Fehlerquellen zeigen können. Zum Zeitpunkt t_2, also während der Mission, wird eine schritthaltende rigide Koregistrierungsmethode zur Korrektur der Eigenposition im Sinne einer geländebasierten Navigation verwendet.

Weitere Unterschiede zu verwandten Arbeiten ergeben sich durch die Multi-Aspekt ALS-Konfiguration. Die Schrägsicht führt nämlich zu variierenden Punktdichten auf Dächern und Fassaden und unterschiedlichen Fehlstellen in den Punktwolken, weswegen ein einfacher ICP-Ansatz wenig erfolgversprechend ist. In früheren eigenen Arbeiten wurde dieser Problematik mit einem an die speziellen Gegebenheiten angepassten Filterverfahren begegnet, welches nur solche ALS-Punkte für die ICP-Registrierung betrachtet, die von diesen Randbedingungen möglichst wenig beeinflusst werden (Hebel & Stilla [2007]).

In Erweiterung dieses Filterverfahrens wird in der vorliegenden Arbeit zunächst eine Segmentierung der 3D-Daten durchgeführt, wonach sich eine objektbasierte Koregistrierung anhand der Ergebnisse dieser Segmentierung anschließt. Da urbane Gebiete untersucht werden, bietet sich hierfür vor allem die Segmentierung und Zuordnung von Ebenen bzw. Ebenenstücken an. Insbesondere dort, wo eine schritthaltende Prozessierung der Daten erforderlich ist (t_2), kann dazu ein scanzeilenbasiertes Segmentierungsverfahren verwendet werden. In Hebel & Stilla [2009a,b] wurden zwei ebenenbasierte Koregistrierungsverfahren entwickelt und verglichen: Einerseits können die Schnittpunkte zugeordneter Ebenentripel als virtuelle 3D-Punkte für das Verfahren von Arun et al. [1987] verwendet werden, andererseits lassen sich als identisch erkannte Ebenen in den verschiedenen Punktwolken direkt einander angleichen, wofür ein Linearisierungsansatz ähnlich dem von Nüchter et al. [2010] verwendet wird. Da die Bestimmung der Ebenenschnittpunkte sich als weniger stabil erwies, wird in dieser Arbeit nur noch die zweite Methode berücksichtigt. Die Zuordnung von Ebenen(-stücken) geschieht dabei anhand von Positions-, Lage- und Formmerkmalen, wobei mit einer RANSAC-Erweiterung Fehlzuordnungen ausgefiltert werden. Mit diesen Maßnahmen lassen sich die Registrierungsparameter anders als beim ICP-Verfahren bereits durch einmaliges Lösen eines linearen Gleichungssystems zuverlässig bestimmen. In durchgeführten Experimenten wird bestätigt, dass (ähnlich wie von Bae & Lichti [2008] für TLS beschrieben) durch die Verwendung von Flächenmerkmalen und durch die Behandlung von Fehlzuordnungen mit einem RANSAC-Ansatz eine Koregistrierung der ALS-Punktwolken auch noch bei einem relativ großen Versatz möglich ist (z.B. beim Ausfall der satellitengestützten Positionsbestimmung).

2.3 Geometrische Kalibrierung von ALS-Systemen

Im Zuge der Koregistrierung von 3D-Punktmengen werden die Ursachen für eine Fehlstellung der Datensätze weder gesucht noch aufgedeckt, sondern nur die Auswirkungen von fehlerhaften Annahmen reduziert. Die im vorangegangenen Abschnitt 2.2 angeführten Arbeiten zur rigiden Ko-

registrierung stellen nicht die Anordnung der Punkte innerhalb einzelner Punktwolken in Frage. Stattdessen wird dort davon ausgegangen, dass eine Kombination aus Translation und Rotation des ganzen Datensatzes für eine global korrekte Koregistrierung ausreicht. Es wurde bereits erwähnt, dass diese Annahme beim ALS nicht ohne Weiteres zutrifft.

2.3.1 Verwandte Arbeiten

Beim erstmaligen Einsatz eines ALS-Systems kommt es auch dann zu Diskrepanzen zwischen den erfassten Datensätzen, wenn die Sensorkoordinaten ständig und präzise bestimmt werden. Schenk [2001], Filin [2003] und Katzenbeisser [2003] haben in sorgfältigen Analysen ermittelt, welche Fehlerquellen beim ALS typischerweise in Erscheinung treten. Dazu zählen Ungenauigkeiten des Laserscanners (Entfernungsmessung, Steuerung des Scanvorgangs), Fehler der Navigationssensoren (Positions- und Orientierungsbestimmung) sowie Unzulänglichkeiten bei der Synchronisierung und geometrischen Ausrichtung der Komponenten (engl. Boresight Misalignment). Glennie [2007] zeigt, dass ungenaue Relativorientierungen der Systemkomponenten die deutlichsten Einflüsse auf die Genauigkeit der 3D-Punktkoordinaten haben. In den Arbeiten von Schiele [2005] und Zhang [2005] werden die Auswirkungen verschiedener geometrischer Systemparameter auf die ALS-Daten im Detail untersucht. Fehlerhafte Ausrichtungen führen mitunter zu Verzerrungen innerhalb der Punktwolken, welche die Erfolgsaussichten einer rein rigiden Koregistrierung in Frage stellen. Zur möglichst zuverlässigen Änderungserkennung in urbanen Gebieten durch Vergleich von ALS-Daten müssen solche Einflüsse auf die Positionierungsgenauigkeit der Laserpunkte genauer quantifiziert und behoben werden.

Zur dauerhaften Minimierung systematischer Fehler bei der Erfassung von ALS-Daten ist eine *geometrische Kalibrierung des Sensorsystems* erforderlich (Vosselman & Maas [2001]). Dabei wird durch eine Justierung der Sensor- und Systemparameter eine implizite Verbesserung der Passgenauigkeit erreicht. Gelegentlich hat man es mit dem Fall zu tun, dass ALS-Punktwolken von systematischen Fehlern geprägt sind, aber die zugehörigen Rohdaten nicht mehr vorhanden sind. Diese Rohdaten umfassen in der Regel die Sensorpositionen, Sensororientierungen sowie gemessene Entfernungen und Richtungen. Von Ressl et al. [2009] und Habib et al. [2009] werden Verfahren vorgeschlagen, die auch in solchen Fällen durch nachträgliches Schätzen der Randbedingungen eine Erhöhung der Datenqualität erzielen.

Meist kann aber davon ausgegangen werden, dass alle zur Erstellung der ALS-Punktwolken gemessenen Rohdaten zur weiteren Auswertung verfügbar sind, so auch in der vorliegenden Arbeit. Bei vorhandenem Zugriff auf alle Messdaten der Einzelkomponenten können die erforderlichen Kalibrierparameter des ALS-Systems aus den Daten selbst bestimmt werden (Burman [2000]). Von Toth et al. [2002] wird eine automatische Methode beschrieben, welche die Laserpunkte von multidirektionalen ALS-Befliegungen auf ein regelmäßiges Gitter interpoliert und dann mit Bildverarbeitungsmethoden den lokalen Versatz misst. Die Korrekturwinkel der Systemkomponenten werden dann iterativ zur Minimierung dieser Diskrepanzen bestimmt. Schiele [2005] ermittelt die Kalibrierparameter mit Hilfe eines robusten Schätzverfahrens anhand der Flächenschwerpunkte bekannter und unbekannter Referenzflächen, welche in einer Kreuzbefliegung mehrfach erfasst werden. Skaloud & Lichti [2006] verwenden zur Kalibrierung manuell ausgewählte planare Regionen und deren Erscheinungsbild in den Punktwolken. Ihr Verfahren schätzt damit die Ausrichtung der Sensoren dahingehend, dass die zugehörigen 3D-Punkte bestmögliche Planarität aufweisen. Eine Erweiterung dieses Vorgehens auf mehrere überlappende ALS-Datensätze ist von Skaloud & Schär [2007] beschrieben worden. Die Autoren betrachten automatisch erkannte Dachflächen in einem Referenzdatensatz, für die sie lokale Entsprechungen in überlappenden Abschnitten anderer Datensätze suchen. Die Systemparameter werden dann anhand dieser Zuordnungen geschätzt. Habib et al. [2007] gehen ähnlich vor, verwenden aber Luftbilder zur Auswahl geeigneter Referenzflächen. Außerdem diskutieren sie die Eigenschaften eines für Kalibrierzwecke geeigneten

Flugpfades und die für ihr Verfahren optimale Verteilung planarer Flächenstücke. Die Verwendung homologer Ebenen bzw. deren Repräsentation in den Punktwolken wird bereits von Kager [2004] zur Kalibrierung des ALS-Systems vorgeschlagen. Man findet diese Vorgehensweise zur ALS-Streifenanpassung mittlerweile auch in der Nachprozessierungskette vieler Sensorhersteller realisiert, z.B. in den Software-Produkten RiProcess (RIEGL), Attune (Leica) oder LMS (Optech). Friess [2006] und Rieger et al. [2009] gewähren mit ihren Publikationen einen Einblick in diese industrienahe Verfahrensentwicklung.

Der Großteil verwandter Arbeiten richtet sich nach Erfordernissen klassischer Aufnahmetechniken, z.B. zur Erzeugung digitaler Geländemodelle. Dort werden ALS-Daten typischerweise entlang paralleler Flugpfade in Nadirsicht erfasst, wobei sich die Datensätze (hierbei *Streifen* genannt) zu einer flächigen 3D-Abtastung des Geländes ergänzen. Diese Art der ALS-Datenerfassung folgt einem standardisierten Ablauf, der im Vorfeld jeder Befliegung sorgfältig geplant werden kann. Dies beinhaltet die Möglichkeit, Referenzobjekte oder Referenzstationen am Boden bereitzustellen (siehe z.B. Rieger [2008]). Obwohl sich für die Kalibrierung mobiler Laserscannersysteme ebenso wie für die Koregistrierung von Punktwolken und die 3D-Objektsegmentierung wissenschaftliche und industrielle Standards entwickelt haben, findet sich doch bisher kein Gesamtkonzept, welches den in Abbildung 1.4 gezeigten Randbedingungen gerecht würde.

2.3.2 Beitrag dieser Arbeit

Im Gegensatz zur Vorgehensweise in verwandten Arbeiten, in denen ALS primär zur topographischen Erfassung eingesetzt wird, werden die Themen *Segmentierung*, *Kalibrierung* und *Koregistrierung* in der vorliegenden Arbeit nicht getrennt betrachtet, sondern in unmittelbaren Zusammenhang gebracht und auf das Ziel der automatischen Änderungserkennung in Multi-Aspekt ALS-Daten ausgerichtet. Dazu werden Verfahrensabläufe entwickelt, die es ermöglichen, ein ALS-System z.B. für Überwachungsaufgaben kurzfristig einsatzfähig zu machen und zeitgleich mit der erstmaligen Multi-Aspekt Erfassung eines zuvor unbekannten Stadtgebiets zu kalibrieren (siehe auch Hebel & Stilla [2012]).

In Erweiterung bekannter Kalibrierverfahren, die auf der Behandlung von Ebenen beruhen (z.B. Friess [2006], Skaloud & Lichti [2006]), werden die Ergebnisse der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Segmentierungsverfahren in dieser Arbeit auch für zusätzliche Aufgaben verwendet. Ebenen- und Bodensegmentierung dienen vor allem auch einer Vorklassifikation der Laserpunkte, wodurch im weiteren Verlauf detektierte Änderungen genauer spezifiziert und bewertet werden können. Für planare Objekte werden beschreibende Merkmale bestimmt, die unabhängig von der Punktdichte und Punktverteilung eine Zuordnung identischer Flächen in überlappenden Datensätzen ermöglichen. Diese Zuordnungen zwischen homologen planaren Objekten werden dann sowohl zur Bestimmung der Kalibrierparameter des ALS-Systems als auch zur rigiden Koregistrierung der korrigierten Punktwolken ausgewertet.

Die in den Abschnitten 4.3 und 4.4 entwickelten Methoden zur Koregistrierung und Kalibrierung verwenden eine einheitliche, neue und effizient zu implementierende Art, die Übereinstimmungsbedingung für homologe Flächenstücke in ein lineares Gleichungssystem zu überführen. Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit ist auch eine umfangreiche Überprüfung der praktischen Anwendbarkeit und eine Validierung des ausgearbeiteten Kalibrierverfahrens anhand realer Multi-Aspekt ALS-Datensätze, die im Rahmen von Mehrfachbefliegungen unterschiedlicher urbaner Gebiete aufgezeichnet wurden.

2.4 Bewertung der Qualität von ALS-Daten

Ein typisches ALS-System besteht mindestens aus den drei Einzelkomponenten Laserscanner (Laserpulsquelle, -empfänger und beweglicher Scanspiegel), Inertialsensoren (Beschleunigungs- und

Drehratensensoren) und einem Empfänger für ein globales Navigationssatellitensystem (GNSS, z.B. das aktuell etablierte GPS, engl. Global Positioning System). Jede einzelne dieser Komponenten trägt zur Vielzahl von Fehlerquellen im Gesamtsystems bei. Aufgrund dieser Komplexität sind die gemessenen 3D-Punkte mit mehr oder weniger großen Positionsfehlern belegt. Betrachtet man die Positionierungsgenauigkeit innerhalb einer größeren Menge an Messungen, so ist in der Literatur oft von der *Qualität* der erfassten ALS-Daten die Rede.

2.4.1 Verwandte Arbeiten

Untersuchungen der Qualität von ALS-Daten stehen in engem Zusammenhang mit der Analyse von Fehlerquellen und der Fehlerfortpflanzung bis hin zu den letztlich ermittelten Punktkoordinaten. Einige damit verbundene Arbeiten wurden bereits in Abschnitt 2.3 genannt, denn naturgemäß dient die Kalibrierung des ALS-Systems auch der Verbesserung der Datenqualität. Die publizierten Verfahren zur Qualitätsbeurteilung können grob in vier Kategorien unterteilt werden:

- Durch die Untersuchung der Passgenauigkeit zwischen ALS-Punktwolken und bekannten Fixpunkten im Gelände oder zwischen mehreren ALS-Streifen lassen sich die *Fehlersymptome* genauer quantifizieren. Hierbei werden nicht die Beiträge der einzelnen Fehlerquellen bewertet, sondern nur deren summierte Auswirkung auf die Laserpunkte analysiert. Maas [2002] betrachtet dazu den Seiten- und Höhenversatz von dreiecksvermaschten Streifen. Ressl et al. [2008] erzeugen digitale Höhenmodelle aus den Daten, für die sie innerhalb lokaler Ausschnitte durch eine iterative Ausgleichung den jeweiligen Versatz bestimmen. Für ALS-Daten urbaner Gebiete identifiziert Vosselman [2008] die Firste von Gebäuden um damit Verschiebungen der Datensätze zu bewerten.

- Bei der Überprüfung *geometrischer Einflussgrößen* steht der Laserscanner und dessen Orientierung zu den anderen Komponenten im Vordergrund. Dieser Untersuchungszweig hängt stark mit der Kalibrierung des Laserscanners und des ALS-Systems zusammen. In Ergänzung zu den Literaturverweisen aus Abschnitt 2.3 sind noch weitere Artikel zu nennen, die sich speziell mit der Datenqualität befassen. Zum Beispiel ist von Schär et al. [2007] der Einfluss des Scanwinkels auf die Genauigkeit der Laserpunkte untersucht worden. Habib & Rens [2008] betrachten ein mathematisches Modell des ALS-Systems, mit dem sie die Auswirkungen typischer geometrischer Einflussgrößen voraussagen. Im weiterführenden Artikel von Habib et al. [2010] werden die systematischen Fehler des ALS-Systems ausfindig gemacht, indem für parallele Streifen mit einem ICP-artigen Ansatz lokale Qualitätsschwankungen bestimmt werden.

- Einige Arbeiten befassen sich vor allem mit der Genauigkeit der satellitengestützten *Positionsbestimmung*. Bei der geodätischen ALS-Messdatenerfassung reicht die „normale“ GPS-Genauigkeit nicht aus (der sogenannte SPS-Dienst, engl. Standard Positioning Service). Beim DGPS (engl. Differential Global Positioning System) werden eine oder mehrere Bodenstationen als zusätzliche Referenz verwendet. Al-Bayari et al. [2005] untersuchen die Auswirkungen z.B. der Entfernung zur Bodenstation auf die Qualität der ALS-Datenerfassung. Skaloud et al. [2010] zeigen die Realisierbarkeit einer Echtzeit-ALS-Erfassung mit Positionierungsgenauigkeiten der Laserpunkte im Zentimeterbereich, indem sie eine direkte Datenverbindung des Sensorträgers zur GPS-Bodenstation nutzen (RTK, engl. Real Time Kinematic).

- Während viele Publikationen sich nur mit den Auswirkungen einer bestimmten Fehlerquelle auseinandersetzten, gibt es einige Arbeiten, die einen umfassenden, *rigorosen Ansatz* bei der Bestimmung der Positionierungsgenauigkeit der Laserpunkte verfolgen. Ein Beispiel hierfür

ist die Veröffentlichung von May & Toth [2007], in der die Auswirkungen aller Hauptfehler in einem ALS-System anhand von Modellrechnungen untersucht werden. Sehr umfangreiche Studien zum Thema Qualitätsbewertung beim ALS sind in den Dissertationen von Lüthy [2007] und Schär [2009] zu finden. Lüthy beschäftigt sich mit dem Qualitätsmanagement bei der Generierung von digitalen Geländemodellen in Verbindung mit einer ganzheitlichen Betrachtung der Kundenanforderungen, der Vorplanung, der Datenerfassung und der Datenprozessierung. Schär hingegen betrachtet alle Aspekte der Datenprozessierung und Qualitätskontrolle hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit bereits während der Datenerfassung (im Flug). Er zeigt in seiner Arbeit, dass die Fehler der Navigationslösung und der Messgeometrie in Echtzeit ermittelt werden können. Durch eine Fehlerfortpflanzungsrechnung bestimmt er in schritthaltender Weise die Genauigkeit der ALS-Daten und erhält damit eine Qualitätsbeschreibung für Höhenmodelle, welche aus diesen Daten abgeleitet werden.

Obwohl sich auch die soeben angeführten Forschungsleistungen hauptsächlich auf die Erfordernisse der geodätischen Messdatenerfassung beziehen, zeigen die Arbeiten von Schär [2009] und Skaloud et al. [2010] doch, dass bei ALS-Sensorik und Auswertung eine klare Entwicklung hin zu einer schritthaltenden Verarbeitung beobachtet werden kann. Dies ist für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung, da auf diese Weise die technischen Voraussetzungen für die ALS-basierte sofortige Änderungserkennung geschaffen werden.

2.4.2 Beitrag dieser Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird der Frage nachgegangen, ob und wie zum Zeitpunkt der Erstellung des Referenzdatensatzes (t_1) durch die gleichzeitige Durchführung einer Systemkalibrierung und einer rigiden Koregistrierung eine hinreichend gute Gesamtqualität von Multi-Aspekt ALS-Daten erzielt werden kann. „Hinreichend gut“ bedeutet in diesem ersten Schritt, dass die entlang verschiedener Flugrichtungen erfassten Datensätze zu einem einzigen Referenzdatensatz verschmelzen können.

Im zweiten Schritt wird untersucht, wie sich die unter Einsatzbedingungen (t_2) erfassten Daten von absehbar geringer Qualität zu diesem qualitativ hochwertigen Referenzdatensatz schritthaltend koregistrieren lassen, um damit schon während des Flugs die vorliegende Abweichung zu quantifizieren. Auf diese Weise kann die hohe Qualität der Referenzdaten auf die aktuelle Aufnahme transferiert werden, z.B. indem eine ungenaue Eigenposition fortlaufend korrigiert wird. Durch diese Maßnahmen wird dann auch ein sofortiger Vergleich der Daten ermöglicht. Beim Vergleich sollen die zwischenzeitlich ($t_1 \rightarrow t_2$) stattgefundenen Änderungen detektiert werden, wobei sich die erreichbare Datenqualität unmittelbar auf die minimale Objektgröße detektierbarer Änderungen auswirkt.

In Kapitel 5 dieser Arbeit wird die unter den verschiedenen Randbedingungen (t_1 und t_2) erreichbare Positionierungsgenauigkeit der Laserpunkte anhand von realen Multi-Aspekt ALS-Daten auch quantitativ untersucht. Für die Durchführbarkeit der Änderungsdetektion zählt weniger ein Qualitätsmaß, welches die Genauigkeit der absoluten Georeferenzierung beschreibt, als vielmehr eine Kenngröße der relativen Passgenauigkeit. Solche Kenngrößen werden in Abschnitt 5.4.1 definiert und zur Beurteilung der Datenqualität verwendet.

2.5 Änderungserkennung in urbanen Gebieten

In den letzten Jahrzehnten war die Untersuchung von Änderungen in urbanen Gebieten Gegenstand vieler wissenschaftlicher Studien. Meist unterscheiden sich die Beweggründe für die jeweiligen Untersuchungen sehr stark, weswegen auch sehr unterschiedliche Sensoren vorgeschlagen

und verwendet werden (siehe z.B. Hinz [2004]). Ein typisches Beispiel ist die Aktualisierung von Kataster- und Gebäudedatenbanken oder auch die Erweiterung und Pflege von 3D-Stadtmodellen.

2.5.1 Sensortechniken

Die Datengewinnung zur nachfolgenden Erstellung von Stadtmodellen hat auch durch die große Verbreitung von Geoinformationssystemen (GIS) und Plattformen wie Google Earth oder Microsoft Bing Maps ein gesteigertes Interesse erfahren. Ein hierbei häufig anzutreffendes Verfahren zur dreidimensionalen Erfassung von Stadtgebieten ist die Verwendung digitaler Luftbilder, die das betreffende urbane Gebiet unter verschiedenen Aspektwinkeln zeigen. Aufgrund der technisch verfügbaren hohen Auflösung und der gleichzeitig hohen Redundanz (Mehrfachaufnahmen) werden sehr genaue photogrammetrische 3D-Rekonstruktionen ermöglicht (siehe z.B. Gruber et al. [2003], Leberl et al. [2003], Gruber [2007]).

Eine andere verwendbare Sensortechnik ist das Synthetic Aperture Radar (SAR, auf deutsch etwa „Radar mit synthetischer Apertur“), oder hierbei speziell die interferometrische SAR-Technik (InSAR), bei der durch die Auswertung von Phasenunterschieden 3D-Daten gewonnen werden können, um damit digitale Geländemodelle zu erzeugen oder Gebäude zu rekonstruieren (siehe z.B. Sörgel [2003], Balz et al. [2004], Thiele et al. [2007], Brunner et al. [2010]). Hauptvorteile der Radarfernerkundung sind ihre Unabhängigkeit von der Tageszeit, die hohe Reichweite und die Fähigkeit, Wolken und Nebel zu durchdringen. Stilla et al. [2003] beurteilen die InSAR-Technologie bezüglich ihrer Eignung zur Gebäuderekonstruktion in urbanen Gebieten und untersuchen dazu die SAR-typischen Effekte (z.B. *Layover* und *Shadowing*), die sich in urbanen Gebieten besonders deutlich zeigen. In einer Gesamtbeurteilung kommen sie zu dem Schluss, dass eine Gebäuderekonstruktion mit InSAR möglich ist, aber nicht mit dem z.B. durch Laserscanning (ALS) erreichbaren Detaillierungsgrad mithalten kann.

Der Einsatz von ALS weist bezüglich der Sensordatenerfassung und -auswertung zur automatischen Änderungserkennung in urbanen Gebieten weitere Vorteile auf, insbesondere bei den speziellen Zielsetzungen und Randbedingungen dieser Arbeit (z.B. Echtzeitauswertung zur Unterstützung von Hubschrauberpiloten). Zu den wichtigsten Vorteilen gehören die Möglichkeit zur direkten 3D-Datengewinnung in Flugrichtung (vorausblickend) und die Unabhängigkeit von den Lichtverhältnissen. Diese positiven Eigenschaften der ALS-Sensortechnik begründen deren nähere Untersuchung in der vorliegenden Arbeit.

2.5.2 Vergleich von Laserdaten

Verwandte Arbeiten

Die Nutzung des ALS zur Änderungserkennung in urbanen Gebieten wird beispielsweise schon von Murakami et al. [1999] angeregt. Typischerweise wird so vorgegangen, dass man zunächst ein digitales Oberflächenmodell (DOM) aus den ALS-Daten erzeugt, indem die 3D-Punkte auf ein georeferenziertes 2D-Raster interpoliert werden. Die Erkennung von Änderungen erfolgt dann einfach dadurch, dass ein altes DOM vom neu generierten subtrahiert wird (oder umgekehrt). Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit wird zusätzlich zu diesem Vorgehen von Vögtle & Steinle [2004] und Vosselman et al. [2004a] eine Einteilung der Laserpunkte in die Klassen *Boden*, *Gebäude* und *Vegetation* vorgenommen. Die Analyse multitemporaler ALS-Daten wird an verschiedenen Stellen zur Schadensbewertung an Gebäuden vorgeschlagen, z.B. nach Erdbeben oder anderen Katastrophen. Hommel [2009] legt dabei großen Wert auf die Aussortierung aller Datenpunkte, die der Klasse *Vegetation* zugeordnet werden können. In Abhängigkeit von der Jahreszeit und der jeweiligen Belaubung könnten solche Messungen ansonsten fälschlicherweise als relevante Änderung bewertet werden. Ähnlich argumentieren Rutzinger et al. [2010]; es sind jedoch auch solche Anwendungen denkbar, in denen gerade die Analyse urbaner Vegetation von Interesse ist (vgl. Abschnitt 1.1).

Eine umfangreiche und aktuelle Erörterung DOM-basierter Methoden zur Änderungserkennung ist von Matikainen et al. [2010] publiziert worden.

Gewählter Ansatz und eigener Beitrag

Im Gegensatz zu den Gegebenheiten bei der topographischen Datenerfassung und -auswertung ist es bei den hier betrachteten Randbedingungen (Abbildung 1.4) nicht sinnvoll, einen Vergleich auf der Basis multitemporaler DOMe durchzuführen. Hierfür sind hauptsächlich zwei Gründe zu nennen, die auch schon die Koregistrierung und Systemkalibrierung beeinflussen:

- Es wird keine Nadir-Konfiguration zur Datenerfassung betrachtet, sondern ein in Schrägsicht nach vorne gerichteter Laserscanner. Durch diese Besonderheit entstehen Verdeckungen und Abschattungen, die ein anderes Vorgehen beim Vergleich der Daten erfordern, da die jeweils erzeugten DOMe in weiten Teilen nicht vergleichbar wären.

- Der Vergleich der Daten soll während der Hubschraubermission durchführbar sein. Dadurch entfällt zumindest in dieser Phase der ALS-Datenerfassung und -auswertung die Möglichkeit, vor der weiteren Analyse zunächst ein DOM zu generieren.

Statt einer DOM-basierten Änderungserkennung wird in der vorliegenden Arbeit ein für die ALS-Datenauswertung neuer Ansatz verfolgt, bei dem die genannten Probleme nicht auftreten (siehe auch Hebel et al. [2011]): Während in bisherigen Verfahren zur Änderungsdetektion Vergleiche oftmals nur auf den Messpunkten oder auf den daraus abgeleiteten Objekten basieren, ergeben sich aus der Kenntnis der zu jedem Messpunkt gehörenden Sensorposition weitere Möglichkeiten. Und zwar kann für jede mit dem Laser gemessene Entfernung zusätzlich zur Existenz eines reflektierenden Objekts vermerkt werden, dass für den Raumbereich dahinter (vom Sensor aus gesehen) aufgrund der Verdeckung vorerst keine Aussage getroffen werden kann. Man kann auch darauf schließen, dass der Raum zwischen Messpunkt und Sensor leer sein muss, da sich das Laserlicht hier unbeeinflusst ausbreiten konnte. Durch eine solche Betrachtungsweise lassen sich Verdeckungen (Abschattungen) und weitere nicht-überlappende Bereiche in den Datensätzen implizit behandeln, was insbesondere bei der Analyse von Multi-Aspekt ALS-Daten angebracht ist. Änderungen der Szene äußern sich durch neue Messpunkte in einem vormals leeren Raumbereich oder aber durch Messungen, die vormals vorhandene Objekte durchdringen.

Der Beitrag der vorliegenden Arbeit besteht in einer detaillierten Ausarbeitung und anschließenden Prüfung dieses neuen Ansatzes, wofür reale ALS-Daten eines konfigurierbaren Experimentalsystems verwendet werden. Für die Prüfung und Validierung des Verfahrens wurde im Abstand eines Jahres ein für die Experimente ausgewähltes urbanes Gebiet jeweils entlang mehrerer Flugrichtungen erfasst, wobei die Rohdaten aller Systemkomponenten gespeichert wurden. Anhand der mit Zeitstempeln versehenen Rohdaten wird der Ablauf einer schritthaltenden Verarbeitung simuliert und das Verfahren bezüglich seiner Eignung und Realisierbarkeit in ALS-Systemen bewertet.

2.5.3 Belegungsgitter und ihre Verwendung in der Robotik

Literaturübersicht

Vergleichbar mit den eben genannten Rahmenbedingungen treten auch in der Robotik ähnliche Anforderungen auf, etwa bei der automatischen Navigation und Bewegungssteuerung. Auch dabei werden Sensoren zur aktiven 3D-Datenerfassung eingesetzt, z.B. Sonar, Radar oder LiDAR. Ein wichtiges Forschungsthema in diesem Zusammenhang ist die Umgebungskartierung mit Hilfe mobiler Roboter, die nur lokale und teilweise ungenaue 3D-Daten erfassen. In vielen Fällen werden diese Karten als horizontale, zweidimensionale Orthoprojektionen der dreidimensionalen Welt

erstellt. Moravec & Elfes [1985] repräsentieren solche 2D-Karten durch ein regelmäßiges Raster, in dem jede Zelle als *unbestimmt*, *leer* oder *belegt* gekennzeichnet wird. Zahlenwerte aus dem Intervall $[0, 1]$, die für diese Kennzeichnung verwendet werden, definieren den jeweiligen „Grad der Unsicherheit". Puente et al. [1991] unterscheiden zwei verschiedene Ansätze zur Informationsfusion innerhalb dieser *Belegungsgitter*. Dies ist einerseits eine probabilistische Verknüpfung basierend auf dem Satz von Bayes und andererseits die Kombinationsregel der Dempster-Shafer Evidenztheorie (Shafer [1976]).

Thrun [1998] beschreibt detaillierte Untersuchungen zur autonomen Navigation von mobilen Robotern durch die Kombination probabilistischer Belegungsgitter mit neuronalen Netzwerken. Ein aktuelles Beispiel zur 2D-Kartierung unter Verwendung von Laserentfernungsmessungen ist der von Pellenz & Paulus [2008] beschriebene „RoboCupRescue"-Wettbewerb, bei dem Roboternavigation und Kartenerstellung für Rettungseinsätze untersucht werden. Yapo et al. [2008] verwenden Belegungsgitter auch zur probabilistischen Repräsentation von Laser-Punktwolken, um diese letztlich zur Objekterkennung einzusetzen. Die Evidenztheorie von Dempster und Shafer wird oft im Zusammenhang mit der Fusion von Multisensordaten herangezogen (z.B. Rottensteiner et al. [2004]). Bei der Informationsfusion in Belegungsgittern kann sie den probabilistischen Ansatz ersetzen (Zou et al. [2000], Grabe et al. [2009]), wobei sie den zusätzlichen Vorteil hat, dass fehlende und widersprüchliche Informationen implizit bewertet werden. Beispielsweise nutzen Moras et al. [2011] dies aus, um mit 2D-Belegungsgittern Bewegungen innerhalb einer Straßenszene automatisch zu detektieren. 3D-Belegungsgitter werden nur vereinzelt vorgeschlagen, da diese bei gleichzeitig gewünschter hoher Auflösung zu sehr großen Datenmengen führen. Aus diesem Grund verwenden etwa Himmelsbach et al. [2008] zur 3D-Objekterkennung in Laserdaten ein $2\frac{1}{2}$D-Belegungsgitter ähnlich einer Hashtabelle, wobei die Objekterkennung innerhalb der 3D-Punktwolken stattfindet.

Relevanz für diese Arbeit und eigener Beitrag

In Adaption und Erweiterung der Idee der Belegungsgitter wird in der vorliegenden Arbeit eine auf 3D-Voxeln basierende Suchstruktur für Multi-Aspekt ALS-Daten betrachtet. Mit Hilfe dieser Suchstruktur erfolgt die lokale Berechnung der Raumbelegung, durch die bei Konflikten auf Änderungen zwischen den Referenzdaten und den aktuellen ALS-Messungen geschlossen werden kann. Insgesamt wird folgende Strategie verfolgt (siehe auch Hebel et al. [2011]):

- Nach oder während der Ersterfassung des Stadtgebiets (Zeitpunkt t_1) wird ein 3D-Voxelraum mit Informationen für den späteren Vergleich initialisiert. Diese Phase dient auch der Kalibrierung des ALS-Sensorsystems, da hier optimale Bedingungen geschaffen werden können. Das urbane Gebiet wird in mehreren Ansichten erfasst, die zu einem einheitlichen Referenzdatensatz koregistriert werden.

- Während der zweiten Befliegung (also im Einsatz zum Zeitpunkt t_2) wird bewertet, ob aktuelle ALS-Messungen die gespeicherte Information bestätigen oder in einem Widerspruch zu ihr stehen. Dazu findet ständig auch eine schritthaltende Koregistrierung der jeweils aktuellen ALS-Daten zum Referenzdatensatz statt.

Obwohl die hier verwendete voxelbasierte Informationsverwaltung (Abschnitt 4.5.2) vom bekannten Konzept der Belegungsgitter inspiriert ist, dient das 3D-Raster doch nur als Überstruktur für die exakten Koordinaten der 3D-Punkte. Dadurch kann die Zellgröße vergleichsweise weitmaschig gewählt werden, ohne die Ergebnisse selbst zu vergröbern und ohne einen extremen Speicherbedarf zu verursachen. Zur Konflikt- bzw. Änderungserkennung im Modell der Raumbelegung wird hier die Informationsfusion entsprechend der Dempster-Shafer Evidenztheorie herangezogen. Damit wird außerdem der Zustand der Unwissenheit modelliert, wodurch im Zusammenhang mit der ALS-Datenerfassung auch Verdeckungen und andere Bereiche mit fehlender

Information verzeichnet werden können. Die zuvor bereits für den Referenzdatensatz erlangten Segmentierungsergebnisse werden verwendet, um eine Zuordnung der detektierten Änderungen zu unterschiedlichen Klassen vorzunehmen.

Der Beitrag der vorliegenden Arbeit besteht in der Bewertung von Eignung und praktischer Realisierbarkeit der in dieser Weise behandelten „Änderungsdetektion in urbanen Gebieten durch objektbasierte Analyse und schritthaltenden Vergleich von Multi-Aspekt ALS-Daten“. Die zuletzt abgegebene Einschätzung wird durch den umfangreichen experimentellen Teil dieser Arbeit untermauert.

3 Technische Grundlagen der ALS-Datenerfassung

Insbesondere die Auseinandersetzung mit möglichen Fehlern, die beim ALS in Erscheinung treten können, erfordert ein grundlegendes Verständnis der technischen Gegebenheiten und des Zusammenspiels der einzelnen Komponenten eines ALS-Systems. Gegenstand der ersten Hälfte dieses Kapitels ist eine Zusammenfassung dieser technischen Grundlagen. In der zweiten Hälfte werden die Auswirkungen der verschiedenen Komponenten auf die Datenqualität genauer quantifiziert.

3.1 Airborne Laser Scanning

Die Hauptkomponente eines ALS-Systems ist der Laserscanner, mit dem Laserentfernungsmessungen in steuerbare Raumrichtungen durchgeführt werden. Das dabei zur Entfernungsmessung eingesetzte Messprinzip verwendet einen Laser als Lichtquelle und einen Detektor, um damit entweder Phasenunterschiede oder Pulslaufzeiten zu messen. Die nachfolgenden Abschnitte geben einen Einblick in diese Technik, beginnend mit einer kurzen Erklärung der Laserphysik über die Verwendung des Lasers für Entfernungsmessungen hin zum Abtastvorgang. Anschließend werden die weiteren Komponenten des ALS-Systems erläutert, nämlich die Navigationssensoren und die Anbringung am Sensorträger.

3.1.1 LASER

Ein LASER (engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ist eine Lichtquelle, die eine besondere Form elektromagnetischer Strahlung im (bzw. nahe dem) sichtbaren Spektralbereich erzeugt. Im Gegensatz zu natürlich vorkommender elektromagnetischer Strahlung, die auf der *spontanen Emission* von Photonen aufgrund der thermischen Energie von Atomen beruht, werden hierbei Photonen emittiert, für die der Wechsel angeregter Atome oder Moleküle zwischen zwei Energieniveaus durch vorhandene Photonen angeregt wird. Während die spontane Emission ähnlich dem radioaktiven Zerfall nur statistisch vorhersehbar auftritt, findet bei dieser *stimulierten Emission* gerade dann ein Wechsel aus dem angeregten Zustand statt, wenn das angeregte Atom oder Molekül durch ein weiteres Photon gleicher Energie getroffen wird. Das dann zusätzlich abgestrahlte Photon hat die gleiche Phasenlage und Richtung wie das eingestrahlte Photon (man nennt diesen Zusammenhang *Kohärenz*).

Die Atome oder Moleküle, die sich in einen hierzu nutzbaren angeregten Zustand versetzen lassen, werden als laseraktives Medium bezeichnet. Es kann sich um ein Gas handeln (z.B. Helium-Neon-Laser, CO_2-Laser), eine Flüssigkeit (z.B. Farbstofflaser) oder einen Festkörper (z.B. ein dotierter Kristall: Nd:YAG-Laser, Rubinlaser; oder z.B. ein dotiertes Glas: Erbium-Faserlaser). Die energetisch möglichen Übergänge im laseraktiven Medium bestimmen die Frequenz der Laserstrahlung. Damit dauerhaft eine stimulierte Emission ablaufen kann, müssen durch eine externe Energiezufuhr immer mehr Atome oder Moleküle in den angeregten Zustand versetzt werden als

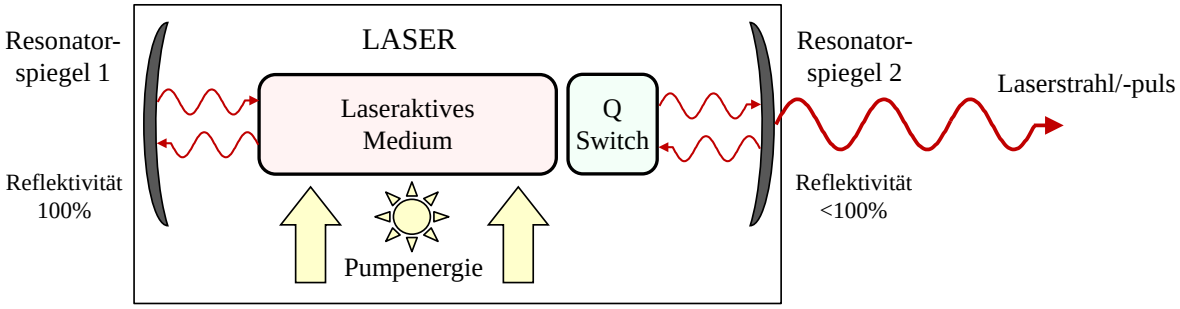


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Aufbaus eines (Puls-)Lasers.

sich im Grundzustand befinden, da sonst die *Absorption* von Photonen überwiegen würde. Dieser Vorgang des Erzeugens der *Besetzungsinversion* wird als *Pumpen* bezeichnet.

Für den Fall, dass durch Pumpen eine Besetzungsinversion aufrecht erhalten werden kann, kann ein (z.B. spontan emittiertes) Photon der passenden Energie eine Kettenreaktion an stimulierter Emission hervorrufen. Da dies ständig zufällig verteilt in alle Raumrichtungen passiert, bildet man durch die Verwendung eines *Resonators* eine Vorzugsrichtung aus, entlang der sich die stimulierte Emission verstärkt. Beim Resonator handelt es sich im einfachsten Fall um zwei Spiegel, zwischen denen sich das laseraktive Medium befindet und zwischen denen die Laser-Strahlung vielfach reflektiert wird. Der Abstand der Spiegel ist gerade so gewählt, dass es zu konstruktiver Interferenz bei der Laserwellenlänge kommt (Fabry-Pérot-Interferometer). Der Aufbau eines Lasers ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt. Typischerweise ist einer der Spiegel teildurchlässig, wodurch sich ein Teil der kohärenten Laserstrahlung als gerichteter Strahl aus dem Resonator lösen kann (ein sogenannter *Dauerstrichlaser*, engl. cw-Laser, continuous wave). Es ist außerdem möglich, durch gezieltes Ändern der Güte des Resonators (engl. Q-Switching) die Pumpenergie im laseraktiven Medium aufzustauen, um sie dann schlagartig in Form eines Laserpulses abzubauen. Dies hat den Vorteil, dass innerhalb des kurzzeitigen Pulses eine viel höhere Energiedichte als mit einem cw-Laser erreicht werden kann. Die Bauart des Lasers (z.B. Resonatorlänge, Pumpquelle, laseraktives Medium, Strahlauskopplung) wirkt sich bestimmend auf die Eigenschaften der Laserstrahlung aus, also etwa die Wellenlänge, Kohärenzlänge, Moden, Strahldivergenz, Pulsdauer (so vorhanden) und Pulsform. Eine umfassende Beschreibung des Laserprinzips und physikalischer Eigenschaften der Laserstrahlung ist zum Beispiel im Buch von Kneubühl & Sigrist [2008] zu finden.

3.1.2 Laserentfernungsmessung

Seit seiner Erfindung vor ca. 50 Jahren ist der Laser ein unverzichtbares Werkzeug auf vielen Gebieten von Wissenschaft, Medizin und Technik geworden. Für die ALS-Messtechnik ist von den zahlreichen Einsatzmöglichkeiten aber allein seine Verwendbarkeit zur optischen Abstandsmessung maßgebend. Laserstrahlung kann auf zwei unterschiedliche Arten für Entfernungsmessungen genutzt werden: phasenbasiert und laufzeitbasiert. Beiden Varianten gemein ist das Grundprinzip, dass ein Laser als Lichtquelle einen „Punkt“ in der zu messenden Entfernung beleuchtet, von wo aus ein Teil des Laserlichts reflektiert bzw. rückgestreut wird. Ein Detektor (z.B. bestehend aus Avalanche-Photodioden) erfasst dieses *Echo* und ermöglicht es dadurch, auf die Gesamtentfernung zwischen Laser, reflektierender Stelle und Detektor zu schließen. Dieses Messprinzip wird engl. „Light Detection and Ranging“ (LiDAR) oder „Laser-Radar“ (Ladar) genannt. Für den Fall, dass Laserquelle und Detektor räumlich getrennt sind, wird von einer *bistatischen* Anordnung gesprochen. Die in dieser Arbeit betrachteten Konstellationen können jedoch als nahezu *monostatisch* angesehen werden. Das heißt, dass Laser und Detektor sich relativ zu den gemes-

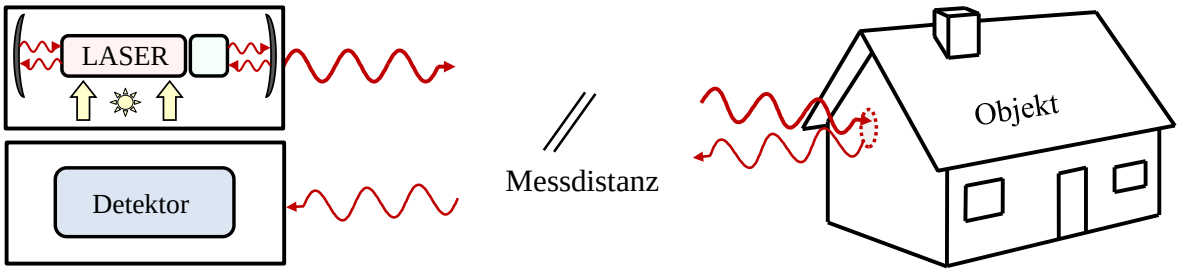


Abbildung 3.2: Prinzip der optischen Abstandsmessung.

senen Entfernungen praktisch am gleichen Ort befinden, weswegen keine Parallaxe berücksichtigt werden muss. Die zu messende Entfernung entspricht gerade der Hälfte der Gesamtentfernung (Laser-Messpunkt-Detektor, vgl. Abbildung 3.2).

Phasenbasierte Laserentfernungsmessung

Bei der Verwendung eines cw-Lasers zur Entfernungsmessung wird das vom Detektor empfangene Laserlicht bezüglich seiner Phasenlage mit der abgestrahlten elektromagnetischen Welle verglichen. Würde man dies auf Grundlage der Laserwelle selbst tun (*Interferometrie*), so wären die damit messbaren Entfernungen bzw. Entfernungsvariationen in etwa so groß wie die Laserwellenlänge (also maximal einige μm). Genau dies wird bei der *Laservibrometrie* getan. Um allerdings einen Entfernungsmessbereich von einigen hundert Metern abdecken zu können, wird nicht die Phasenlage der Laserwelle ausgewertet, sondern die eines aufmodulierten Signals mit wesentlich größerer Wellenlänge. Die Bestimmung der zugehörigen Phasenlage führt nur dann zu einem eindeutigen Entfernungswert, wenn mehrere Messungen mit verschiedenen Modulationsfrequenzen durchgeführt werden. Diese phasenbasierte Laserentfernungsmessung ist vor allem beim (stationären) terrestrischen Laserscanning gebräuchlich. Von Vorteil ist dabei die recht gute Entfernungsauflösung von wenigen Millimetern, jedoch liegt die maximal mögliche Messentfernung typischerweise bei 200 Metern und ist damit vergleichsweise gering.

Laufzeitbasierte Laserentfernungsmessung

Die laufzeitbasierte Entfernungsmessung verwendet keinen cw-Laser, sondern nutzt kurze Laserpulse im Nanosekundenbereich für die Abstandsbestimmung. Immer dann, wenn ein Laserpuls abgestrahlt wird, wird die Zeit bis zur Detektion seines Echos gemessen. Aus der Laufzeit des Pulses und der Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre lässt sich die vom Laserpuls zurückgelegte Entfernung berechnen. Moderne Laserscanner, die mit diesem Messverfahren arbeiten, erfassen und digitalisieren die komplette Signalform der rückgestreuten Pulsenergie, um sie dann mit dem ursprünglich abgestrahlten Puls zu vergleichen (engl. Full Waveform Laser Scanning). Aufgrund seiner Divergenz beleuchtet der Laserpuls nämlich je nach Entfernung eine größere Fläche, sodass Anteile des Laserlichts z.B. an Vegetation reflektiert werden können, während der Rest weiter propagiert und auf entferntere Objekte trifft. Die genaue Analyse der Signalform erlaubt Rückschlüsse auf die Art und Anzahl der Objekte im Ausbreitungsweg des Laserpulses, einschließlich der Materialeigenschaften, der Gestalt und der räumlichen Anordnung. Außerdem lässt sich durch die Signalformanalyse eine Entfernungsauflösung von wenigen Zentimetern erreichen, obwohl die Pulslänge typischerweise bei einem Meter oder mehr liegt (vgl. Jutzi & Stilla [2006], Jutzi [2007], Wagner et al. [2006]). Die laufzeitbasierte Bestimmung von Entfernungen ist die beim mobilen Laserscanning gängige Methode und wird insbesondere beim ALS eingesetzt, da hier üblicherweise Messentfernungen von bis zu einem Kilometer vorliegen.

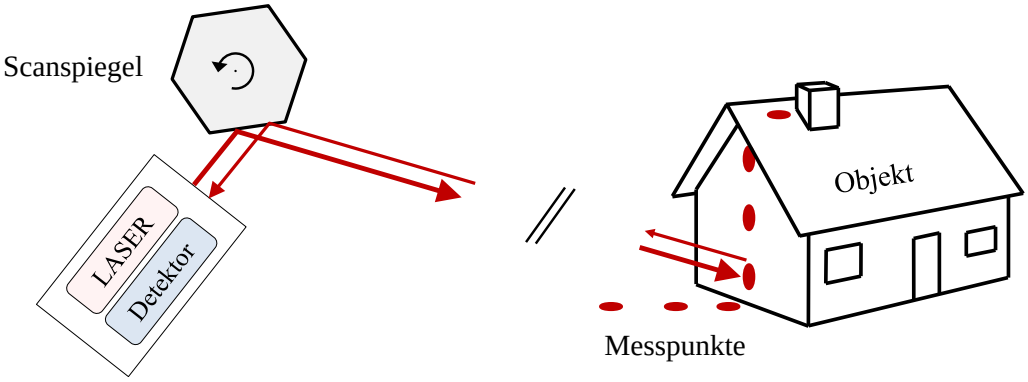


Abbildung 3.3: Aufbau eines Laserscanners mit Laserentfernungsmesser und Scanmechanismus.

3.1.3 Laserscanner

Bei vielen Anwendungen ist man nicht nur an der Ermittlung der Entfernung zu einem bestimmten Objekt interessiert, sondern will einen ganzen Raumbereich erfassen, also mit einem Laserentfernungsmesser *abtasten*. Hierzu wird dem Laserentfernungsmesser eine Vorrichtung hinzugefügt, die den ausgesendeten Laserstrahl bzw. Laserpuls in die gewünschte Richtung ablenkt und gleichzeitig das aus dieser Richtung rückgestreute Signal dem Detektor zuführt. Dieser sogenannte *Scanmechanismus* wird typischerweise mit einem oder mehreren *Scanspiegeln* realisiert, die elektronisch gesteuert werden und dadurch eine definierte Abtastung eines Raumbereichs ermöglichen. In Verbindung mit dem Scanmechanismus wird der Laserentfernungsmesser zum *Laserscanner*. Die durch den verwendeten Scanmechanismus generierten *Scanwinkel* bzw. die dadurch erzeugte spezifische Abfolge der Messpunkte wird *Scanmuster* genannt. Ein einfaches aber auch gebräuchliches Beispiel ist ein rotierender Polygonspiegel, dessen einzelne Facetten ein Muster aus parallelen *Scanzeilen* erzeugen (siehe Abbildung 3.3). Beim (stationären) terrestrischen Laserscanning befindet sich solch ein Laserscanner in einem *Scankopf*, der auf einem Stativ befestigt wird und die gesamte Umgebung mit einer 360°-Drehung um die vertikale Achse abtasten kann. Aus den gemessenen Entfernungen (und Richtungen) kann dabei sehr leicht eine konsistente 3D-Punktwolke erzeugt werden, da der Ausgangspunkt der Messungen konstant bleibt.

3.1.4 Sensorträger

Die großflächige und schnelle Erfassung urbaner Gebiete kann nicht mit einem stationären terrestrischen Laserscanner (TLS) geleistet werden. Stattdessen wird der Laserscanner durch oder über das zu erfassende Gebiet bewegt. Je nach Art des *Sensorträgers* unterscheidet man hierbei das mobile terrestrische Laserscanning und das flugzeuggetragene Laserscanning (ALS). Für die flächendeckende Erfassung und Änderungserkennung in urbanen Gebieten ist vor allem das ALS interessant, welches aus den in Kapitel 1 genannten Gründen Thema der vorliegenden Arbeit ist. Die im weiteren Verlauf vorgestellten Methoden sind jedoch genauso auf andere Formen des mobilen Laserscannings (MLS) z.B. auf Fahrzeugen übertragbar.

Beim ALS wird das Flugzeug oder der Hubschrauber, an dem der Laserscanner befestigt ist, nicht nur als Sensorträger zu einem wichtigen Bestandteil des Gesamtsystems. Die Vorwärtsbewegung kann auch als Element des Scanvorgangs angesehen werden. So bietet es sich zum Beispiel an, einen *Zeilenscanner* am Sensorträger derart zu positionieren, dass seine Scanzeilen quer zur Flugrichtung ausgerichtet sind. Auf diese Weise kann das überflogene Gelände in *Streifen* abgetastet werden, deren Breite durch den Scanwinkel bestimmt wird und deren Länge dem Flugpfad entspricht (*Pushbroom*-Prinzip). Dieses Abtastverfahren führt zwangsläufig zu einer Schrägsicht an den seitlichen Rändern des Streifens (ähnlich dem Öffnungswinkel einer Kameraoptik). Die

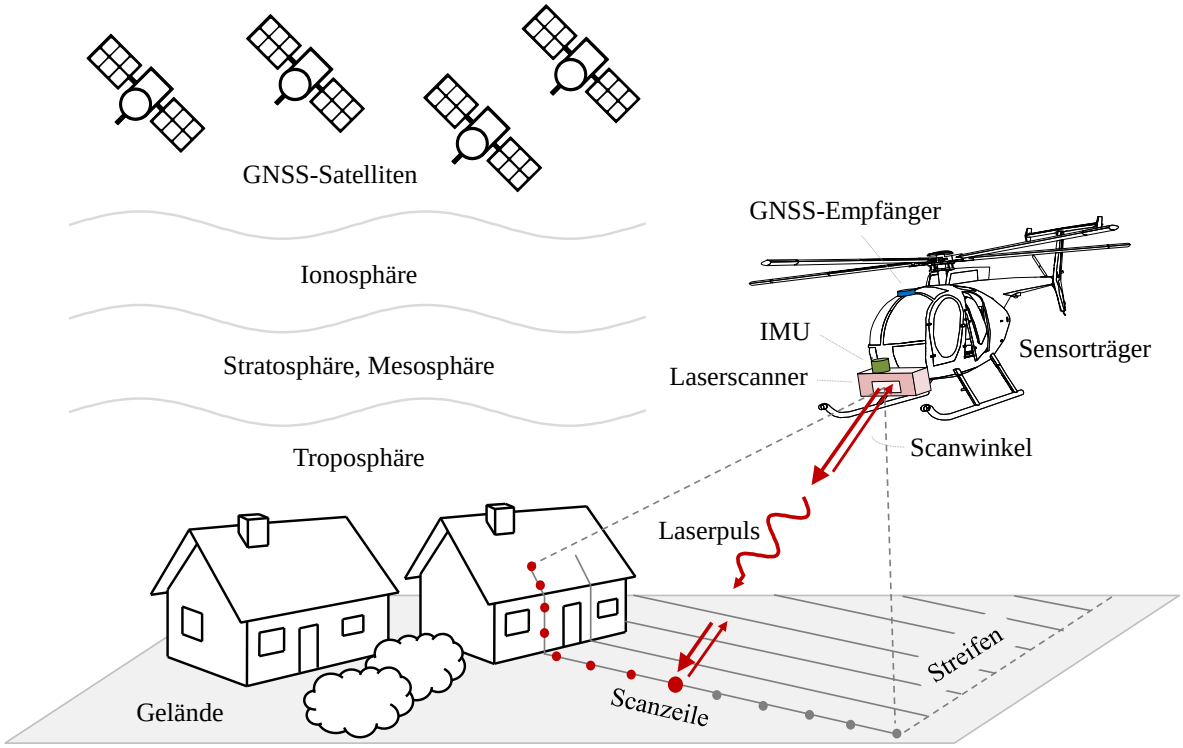


Abbildung 3.4: Messprinzip beim flugzeuggetragenen Laserscanning (ALS).

in Abschnitt 1.2 genannten Anwendungen erfordern zudem eine vorausblickende Ausrichtung des Laserscanners, wie es in Abbildung 3.4 dargestellt ist. Trotzdem sind die in Kapitel 4 entwickelten Verfahren nicht auf dieses Scanmuster beschränkt, andere Konfigurationen werden von der Methodik ebenfalls abgedeckt.

Zusätzlich zur Entfernungsmessung und der Steuerung des Scanvorgangs entsteht beim mobilen Laserscanning eine weitere Schwierigkeit. Die gemessenen Abstände zwischen Laserscanner und Objekten in der Szene haben nämlich für sich genommen kaum eine Aussagekraft, es muss auch der jeweilige Ausgangspunkt und die Messrichtung bekannt sein. Diese Parameter ändern sich aber ständig aufgrund der Fortbewegung und Bewegungsschwankungen des Sensorträgers. Ein ALS-System benötigt daher als weitere Komponenten sogenannte *Navigationssensoren*, die synchron zum Scanprozess des Laserscanners dessen absolute Position und Orientierung im Raum bestimmen können. Dies wird typischerweise durch eine Kombination aus einer inertialen Messeinheit mit einem GNSS-Empfänger verwirklicht.

3.1.5 Globales Navigationssatellitensystem (GNSS)

Bei einem globalen Navigationssatellitensystem handelt es sich um einen Verbund von Satelliten mit unterschiedlichen Umlaufbahnen, die über Funksignale ihre jeweilige Position und Uhrzeit aussenden. Ein GNSS dient der Positionsbestimmung für Empfangsgeräte z.B. auf der Erdoberfläche, die die Signale mehrerer Satelliten interpretieren. Da der Empfänger in der Regel selbst über keine genaue Uhrzeit verfügt, sind mindestens die Signale von vier Satelliten erforderlich, um die Empfängerposition eindeutig bestimmen zu können (als Schnittpunkt von Kugelflächen).

Bislang sind das US-amerikanische NAVSTAR Global Positioning System (GPS) und das russische GLONASS die einzigen voll ausgebauten GNSSe. Weitere Vertreter sind die im Aufbau befindlichen Systeme Galileo (EU) und Compass (China). Die Bezeichnung GPS wird aufgrund der früher alternativlosen Stellung des amerikanischen Systems oftmals synonym für GNSS ver-

wendet. Anders als z.B. Galileo war GPS ursprünglich als militärisches System konzipiert, weswegen seine Signale künstlich verändert wurden, um nur für das US-Militär die volle Genauigkeit nutzbar zu machen (Selective Availability, SA). Dies wurde aufgrund der stark gestiegenen zivilen Verwendung aufgegeben, woraufhin sich die GPS-Nutzung bis heute noch weiter verbreitet hat.

Es gibt verschiedene Arten, die im *Standard Positioning Service* (SPS) erreichbare Präzision der Positionsbestimmung zu verbessern. Zunächst kann neben der Auswertung der gesendeten Codes (C/A-Code, Coarse/Acquisition) auch die Trägerphase der Signale bei mehreren Frequenzen zur Verbesserung der Genauigkeit genutzt werden. Oft wird zudem auf die Möglichkeit zurückgegriffen, zusätzliche Empfänger einzusetzen, deren absolute Position bekannt ist, um so den momentanen lokalen Fehler abschätzen und korrigieren zu können (Differential GPS, DGPS). Hierzu sind großflächig verteilte Referenzstationen in Betrieb, die ihre Daten über geostationäre Satelliten senden um so die GPS-Funktion in einem größeren Gebiet zu unterstützen (Satellite Based Augmentation System, SBAS). Beispiele hierfür sind EGNOS in Europa oder WAAS in den Vereinigten Staaten.

Die höchste Genauigkeit der Positionsbestimmung ist mit einer lokalen Referenzstation in der Nähe der stattfindenden Messung zu erreichen. Auch hierfür kann neben eigenen Installationen auf ein Netzwerk von bodenbasierten Referenzstationen zurückgegriffen werden, die in Deutschland zum Beispiel vom *Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung* (SAPOS) betrieben werden. Es gibt für die in dieser Arbeit betrachteten *kinematischen* Anwendungen im Wesentlichen zwei verschiedene Arten zur hochgenauen GNSS-Positionsbestimmung: Im ersten Fall werden die GNSS-Rohdaten während der Messung aufgezeichnet und erst zu einem späteren Zeitpunkt zusammen mit Daten einer Referenzstation nachprozessiert (Post Processed Kinematic, PPK). Dabei können auch korrigierte Bahndaten der GNSS-Satelliten (Ephemeriden) berücksichtigt werden. Im zweiten Fall sendet die Referenzstation bereits während der Messung ihre Daten z.B. über eine Funkverbindung, sodass die Korrektur in Echtzeit vorgenommen werden kann (Real Time Kinematic, RTK). Sowohl RTK als auch PPK benötigen also neben den GNSS-Grundfunktionen eine zusätzliche lokale Infrastruktur, die je nach Anwendungsszenario nicht notwendigerweise vorhanden ist (vgl. Kapitel 1).

3.1.6 Inertiales Navigationssystem (INS)

Mit einem GNSS-Empfänger lassen sich absolute Positionen im Raum ermitteln. Dies kann z.B. beim GPS-Empfang mit einer Taktfrequenz bis zu 100 Hz geschehen, sodass sich die tatsächliche Trajektorie anhand dieser Stützstellen interpolieren ließe. Es bestehen jedoch weitere Freiheitsgrade, die sich nicht mit einem einzelnen GNSS-Empfänger erfassen lassen. Stattdessen wird zur Bestimmung kurzfristiger Bewegungen und Drehungen ein inertiales Navigationssystem (INS) verwendet.

Ein INS beinhaltet mehrere *Inertialsensoren*, die in ihrer Gesamtheit die inertiale Messeinheit bilden (engl. Inertial Measurement Unit, IMU). Zu den Inertialsensoren gehören Beschleunigungs- und Drehratensensoren, von denen typischerweise jeweils drei orthogonal angeordnet sind, um alle sechs Freiheitsgrade der Bewegung (Rotationen, Translationen) abdecken zu können. Aus den gemessenen Beschleunigungen ergibt sich durch zweifache Integration die relative Positionsänderung zum Ausgangspunkt. Ähnlich kann die aktuelle Orientierung der IMU im Raum durch Integration der gemessenen Wingelgeschwindigkeiten laufend ermittelt werden. Ein INS kommt zwar ohne eine äußere Referenz aus, jedoch zeigen die Inertialsensoren eine mehr oder weniger starke *Drift*, die sich im zeitlichen Verlauf durch die Integration umso deutlicher auf die Messwerte auswirkt. Die Stärke des Driftverhaltens hängt vor allem von der verwendeten Technik bei den Inertialsensoren ab. Es gibt einige Anwendungen, in denen Positionen allein durch die Verwendung eines hochwertigen INS bestimmt werden (müssen), z.B. bei der Unterwassernavigation. In der Regel kombiniert man ein INS aber mit unabhängigen Navigationssensoren wie einem GNSS-Empfänger,

um insgesamt möglichst gute Schätzwerte für die (absolute) Position und Orientierung zu erhalten. Gerade diese GNSS/INS Kombination wird üblicherweise bei der ALS-Messdatenerfassung verwendet. In Abschnitt 4.4.3 wird motiviert, dass umgekehrt auch der Vergleich der gemessenen 3D-Informationen mit einer georeferenzierten Datenbank zur Navigationsstützung dienen kann, z.B. bei fehlenden oder fehlerhaften GNSS-Daten.

Kalman-Filter

Zu der eben erwähnten Kombination verschiedener Navigationssensoren stellt sich die Frage, wie deren Messwerte letztlich zu einer einzigen Information *fusioniert* werden sollen. Mit dieser Frage befasst sich die Schätztheorie als Teilbereich der Statistik. Im vorliegenden Fall werden einerseits absolute Positionen mittels GNSS-Auswertung ermittelt, andererseits aber auch relative Positionsänderungen und Richtungen mit einem INS gemessen. Bei dieser Art der *dynamischen Sensordatenfusion* kommen weitere Randbedingungen zur Betrachtung hinzu, etwa das Wissen um physikalisch mögliche und unmögliche Flugmanöver. Obwohl beide Navigationssensoren unterschiedliche Informationen liefern, ergänzen sie sich doch derart, dass die Messwerte des einen anhand derer des jeweils anderen vorhergesagt werden können.

In einem mathematischen Modell werden die im ALS-Beispiel als Ort, Orientierung und Geschwindigkeit auftretenden (gesuchten) Größen als Zustand des System bezeichnet. Die Aufgabe besteht darin, den Systemzustand anhand der Messwerte der verschiedenen Sensoren zu schätzen. Beim *Kalman-Filter* (Kalman [1960]) handelt es sich um ein Schätzverfahren, welches die zeitliche Änderung (Dynamik) des Systems berücksichtigt. Das Schätzproblem wird rekursiv betrachtet, wobei das Schätzen des Systemzustands als Kombination der letzten Schätzung und der neuen Messwerte geschieht. Aus der vorherigen Schätzung des Systemzustands wird unter Berücksichtigung der Systemdynamik ein Zustand vorhergesagt, der mit den tatsächlich gemessenen Werten korrigiert wird. Im Bericht von Welch & Bishop [1995] kann eine Zusammenfassung und exakte mathematische Formulierung dieser Vorgehensweise gefunden werden.

Die Kombination der Rohdaten von INS und GNSS-Empfänger mittels Kalman-Filter wird in der Regel bereits während der Datenerfassung innerhalb eines herstellerspezifischen Kontrollrechners bewerkstelligt, der integraler Bestandteil des Navigationssystems ist und gleichzeitig die Rohdaten für die Möglichkeit der späteren Nachprozessierung speichert. Obwohl die Details der Navigationsdatenfusion nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind, ist doch die Kenntnis der internen Vorgänge wichtig für die Beurteilung ihrer Einflüsse auf die ALS-Datenqualität.

3.1.7 Direkte Georeferenzierung

Beim Einsatz eines mobilen Laserscanners oder eines anderen bewegten Sensors mit zeitlich variierender Messrichtung muss zwangsläufig zu jeder Einzelmessung die exakte Position und Richtung bestimmt werden, um die Einzelmessungen zu einem korrekt positionierten Gesamtdatensatz anordnen zu können. Beim Laserscanning entsteht so eine *Punktwolke*, in anderen Fällen z.B. eine Gesamtansicht aus zusammengesetzten Einzelbildern. Werden die gemessenen Daten auf ein Geokoordinatensystem bezogen (vgl. Abschnitt 3.1.8), so nennt man den Vorgang der konsistenten Positionierung auch *Georeferenzierung*. Wenn wie beim ALS mit GNSS/INS eine direkte Messung der Sensorposition und -orientierung stattfindet, spricht man in diesem Zusammenhang von *direkter Georeferenzierung*, im Gegensatz zu indirekten Methoden wie der Aerotriangulation in der Luftbildphotogrammetrie.

Im Rahmen der direkten Georeferenzierung von ALS-Messungen werden drei Informationen zeitlich und räumlich zusammengeführt. Dies sind zum einen die gemessenen Entfernungen, zum anderen der Status des Scanvorgangs (z.B. Stellung der Scanspiegel) und schließlich die Position sowie Orientierung des Laserscanners in einem festen 3D-Koordinatensystem. Da die letztgenann-

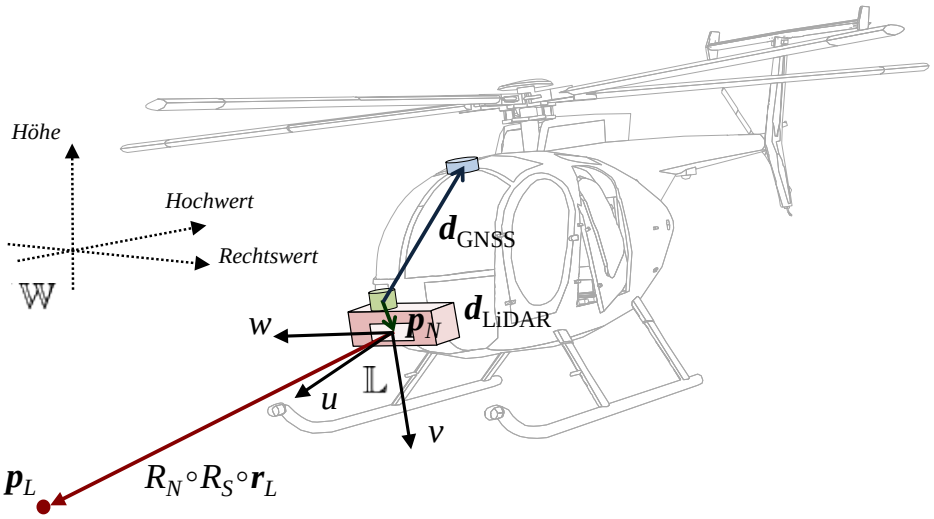


Abbildung 3.5: Anbringung und Relativpositionen der Sensoren am Sensorträger.

te Information von Navigationssensoren gemessen wird, die als Systemkomponenten räumlich vom Laserscanner getrennt sind, muss die Anordnung und relative Orientierung aller Komponenten genau bekannt sein (vgl. Abbildung 3.5). Die Relativpositionen $\boldsymbol{d}_{\text{LiDAR}}$ und $\boldsymbol{d}_{\text{GNSS}}$ zwischen IMU und Laserscanner bzw. zwischen IMU und GNSS-Empfänger werden als *Hebelarme* (engl. Lever Arms) bezeichnet. Nach der Anbringung aller Systemkomponenten am Sensorträger lassen sich die Hebelarme mit hinreichender Genauigkeit bestimmen, wobei „hinreichend“ in diesem Zusammenhang bedeutet, dass geringe Fehler der Hebelarme vernachlässigbar im Vergleich zu anderen Einflüssen sind. Der Hebelarm $\boldsymbol{d}_{\text{GNSS}}$ wird im Kontrollrechner des Navigationssystems verwendet, um aus den GNSS- und INS-Informationen eine fusionierte Positions- und Orientierungsangabe für die IMU zu berechnen. Wird auch $\boldsymbol{d}_{\text{LiDAR}}$ einbezogen, so können diese Angaben auf das Scanzentrum des Laserscanners transferiert werden. In der Regel sind die Navigationsdaten nur mit einer geringeren Taktfrequenz verfügbar, als es der Scanrate (Punkte pro Sekunde) des Laserscanners entsprechen würde. Daher wird für jeden Zeitpunkt t, an dem eine Lasermessung stattfindet, aus der jeweils vorhergehenden (t^-) und nachfolgenden (t^+) Navigationsdatenmessung eine Position $\boldsymbol{p}_N(t)$ und eine Orientierung $R_N(t)$ des Scanzentrums interpoliert. Je nach Taktfrequenz reicht dazu bereits eine lineare Interpolation, wobei Orientierungswinkel als komplexe Zahlen bzw. Drehungen in einer Repräsentation als Quaternionen interpoliert werden können.

Der Laserscanner definiert für sich genommen ein eigenes Koordinatensystem, das fortan mit $\mathbb{L}$ bezeichnet wird, in dessen Ursprung das Scanzentrum mit Laserquelle und Detektor liegt. Ausgehend von diesem Koordinatenursprung werden Entfernungen r_L gemessen, zum Zeitpunkt t also etwa die Entfernung $r_L(t)$. Der Scanvorgang des Laserscanners kann für beliebige Scanmuster durch eine Drehmatrix $R_S(t)$ beschrieben werden, welche sich auf die initiale Richtung $\boldsymbol{r}_L(t) = (0, 0, r_L(t))^{\mathrm{T}}$ auswirkt. Im Koordinatensystem $\mathbb{L}$ des Laserscanners ergibt sich also $R_S(t) \circ \boldsymbol{r}_L(t)$ als Punktkoordinate der Lasermessung. Innerhalb des globalen Geokoordinatensystems, das im weiteren Verlauf dieser Arbeit mit $\mathbb{W}$ bezeichnet wird, erhält man die 3D-Punktkoordinaten $\boldsymbol{p}_L(t)$, indem man das Laserkoordinatensystem an die synchron ermittelte Stelle $\boldsymbol{p}_N(t)$ positioniert und entsprechend $R_N(t)$ ausrichtet (siehe Abbildung 3.5). Damit ist die direkte Georeferenzierung einer Laserentfernungsmessung durch folgende Gleichung gegeben*:

$$\boldsymbol{p}_L(t) = \boldsymbol{p}_N(t) + R_N(t) \circ R_S(t) \circ \boldsymbol{r}_L(t). \tag{3.1}$$

*In dieser Arbeit bezeichnet das Symbol $\circ$ die Standard-Matrixmultiplikation, während $\cdot$ für das Standard-Skalarprodukt im $\mathbb{R}^3$ steht

Zusammenfassend enthält Gleichung 3.1 die folgenden Terme:

$\boldsymbol{p}_N(t)$: 3D-Position des Laserscanners zum Zeitpunkt t in einem fest gewählten, kartesischen Geokoordinatensystem $\mathbb{W}$,

$\boldsymbol{r}_L(t)$: Mittels Laserentfernungsmessung bestimmte Distanz, gegeben als (euklidischer) Vektor der Form $(0, 0, r_L(t))^{\mathrm{T}}$,

$R_S(t)$: 3×3 Drehmatrix, die die relative Orientierung des Scan-Mechanismus und den Status des Scanvorgangs beschreibt (d.h. die Richtung der Laserpuls-Emission im Koordinatensystem $\mathbb{L}$ des Lasers),

$R_N(t)$: 3×3 Drehmatrix, die die absolute Orientierung des Laserscanners in $\mathbb{W}$ angibt,

$\boldsymbol{p}_L(t)$: Geokoordinaten des gemessenen 3D-Laserpunkts in $\mathbb{W}$.

Absolute Orientierungen im Raum werden häufig durch drei Eulerwinkel angegeben, die in der Fachsprache der Luftfahrt als Roll-, Nick- und Gier-Winkel bezeichnet werden (engl. Roll, Pitch, Heading/Yaw). In dieser Reihenfolge bezeichnen diese Winkel Drehungen um die Längsachse, die Querachse und die Vertikalachse z.B. des Flugzeugs. Die Gesamtheit aller Punkte $\boldsymbol{p}_L(t)$, die in einem Zeitintervall $[t_a, t_b]$ erfasst wurden, wird *Laser-Punktwolke* genannt. Im Falle von Nadirsicht in Verbindung mit einer geradlinigen Flugbahn ist oft auch von *Streifen* die Rede.

3.1.8 Koordinatensysteme

Die Forderung nach Vergleichbarkeit zeitlich versetzt erfasster ALS-Punktwolken setzt das Vorhandensein konsistenter Zeit- und Raumkoordinaten voraus. Für Zeitangaben hat sich die sogenannte *koordinierte Weltzeit* (engl. Coordinated Universal Time, UTC) etabliert. Hierbei ist lediglich zu beachten, dass sich die UTC-Zeit zur Berücksichtigung der Verlangsamung der Erdrotation durch das Einfügen von Schaltsekunden mittlerweile um mehrere volle Sekunden von der GPS-Systemzeit entfernt hat (Stand 2012: $\Delta t = 16$ sek).

Die Angabe von Positionen auf bzw. über der Erdoberfläche unter Verwendung geographischer Koordinaten ist ein sehr umfangreiches Thema, da sich in der historischen Entwicklung des Vermessungswesens sehr viele unterschiedliche Koordinatensysteme entwickelt haben. In diesem Abschnitt werden nur die für die spätere Verfahrensimplementierung wichtigen Grundlagen zusammengefasst. In der Regel wird die Erde durch ein Rotationsellipsoid angenähert, wobei sich bezüglich des Mittelpunkts und der Radien (Abplattung) nationale bzw. regionale Unterschiede ergeben haben. Historisch gesehen war man meist bestrebt, ein für ein bestimmtes Gebiet bestmöglich approximierendes Ellipsoid zu definieren, so z.B. das Bessel-Ellipsoid für Europa, welches den in Deutschland verbreiteten Gauß-Krüger-Koordinaten zugrunde liegt. Die Auswahl eines Referenzellipsoids und dessen Verankerung an der Erde mittels der Festlegung eines Fundamentalpunkts wird als *geodätisches Datum* bezeichnet (so z.B. das Potsdam-Datum). Ausgehend vom Mittelpunkt des Ellipsoids, dessen Äquator und einem festgelegten Nullmeridian lassen sich alle Raumpunkte mit der Angabe von Längengrad, Breitengrad und ellipsoidischer Höhe beschreiben. Mit der Entwicklung des GPS wurde eine global einheitliche Festlegung eines geographischen Koordinatensystems erforderlich. Hierbei handelt es sich um das mittlerweile weit verbreitete *World Geodetic System 1984* (WGS84), welches ein Referenzellipsoid verwendet, das praktisch identisch zum GRS80-Ellipsoid ist und das über zwölf globale Fundamentalstationen mit der Erde verbunden ist. Alle mittels GPS ermittelten Positionsangaben basieren auf dem WGS84 System. Für Deutschland wurde 1991 jedoch das *Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989* (ETRS89) als einheitliches Bezugssystem beschlossen, welches sich inzwischen aufgrund der Verankerung des GRS80-Ellipsoids an der eurasischen Kontinentalplatte leicht von WGS84 unterscheidet (Abweichungen im Submeterbereich).

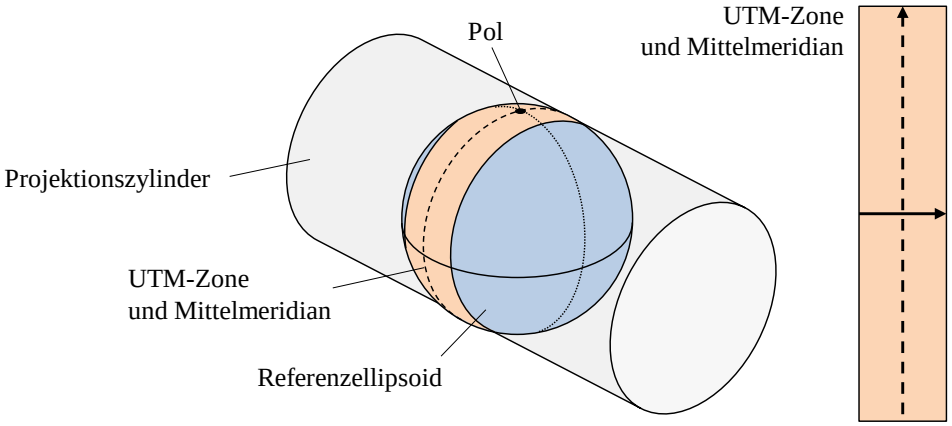


Abbildung 3.6: Abbildung der Erdoberfläche mittels universaler transversaler Mercator-Projektion (UTM).

Die in Gleichung 3.1 vollzogene Berechnung der direkten Georeferenzierung wird erheblich vereinfacht, wenn statt Längen- und Breitengraden ein kartesisches Koordinatensystem verwendet werden kann. Die *universale transversale Mercator*-Projektion (engl. Universal Transverse Mercator, UTM) ist eine gängige Art, zunächst ein zweidimensionales, kartesisches Koordinatensystem zu definieren. Im UTM-System wird das zugrunde liegende Ellipsoid (z.B. GRS80) entlang des Äquators in 6° breite *Zonen* unterteilt, wobei jede der 60 Zonen sich in Richtung der Meridiane bis zu den Polen erstreckt. In jeder Zone wird an den dortigen Mittelmeridian eine Zylinderfläche angelegt, deren Innenradius mit dem Maßstabsfaktor $0,9996$ gekürzt wird (vgl. Abbildung 3.6). Die Zylinderfläche dient als 2D-Projektionsfläche für die Kartenerstellung. Der Verkürzungsfaktor bewirkt, dass ein Kompromiss zwischen Stauchung in der Zonenmitte und Streckung an den Zonenrändern gefunden wird. Nach der Verebnung definieren Äquator und Mittelmeridian ein kartesisches und metrisches 2D-Gitter innerhalb der UTM-Zone, in dem die Koordinaten auch als Rechts- und Hochwert bezeichnet werden. Deutschland liegt größtenteils in UTM-Zone 32, der östliche Teil in Zone 33.

Zusammen mit einer metrischen Höhenangabe erhält man zumindest lokal ein (näherungsweise) kartesisches 3D-Koordinatensystem. Die Art der Höhenangabe ist für sich genommen wieder ein umfangreiches Thema, da es auch dazu unterschiedliche Definitionen gibt, die international und zum Teil auch national variieren. Aufgrund der Betrachtung eines Referenzellipsoids ist einerseits die *ellipsoidische Höhe* eine häufig verwendete Angabe, welche den Abstand eines Punktes von der Oberfläche des Ellipsoids entlang der Ellipsoidennormalen beschreibt. Hierbei ist zu beachten, dass dies nicht der Richtung der Erdanziehung entspricht. Andererseits ist oft von der *Höhe über dem Meeresspiegel* bzw. der *Höhe über Normalnull* die Rede, womit meist die *orthometrische Höhe*, *Normalhöhe* oder die *normal-orthometrische Höhe* gemeint ist. Diese Höhendefinitionen berücksichtigen das tatsächliche Schwerefeld der Erde. Ellipsoidische Höhenangaben können von orthometrischen um etliche Meter abweichen (z.B. ca. 50 m in München), außerdem stimmt ihre Richtung nur näherungsweise überein.

Neben der Höhenrichtung ergibt sich bei der Betrachtung eines auf UTM basierenden lokalen Koordinatensystems eine zusätzliche Schwierigkeit bezüglich der Nordrichtung des Gitters. Diese ist nämlich nur auf dem Mittelmeridian in Übereinstimmung mit der geographischen Nordrichtung. Ansonsten tritt eine Abweichung des sogenannten *Gitternord* von der geographischen Nordrichtung auf (Meridiankonvergenz), die am Rand einer Zone besonders groß wird (z.B. ca. 2° in München). Die Daten der Navigationssensoren müssen dementsprechend angepasst werden, womit speziell der Gier-Winkel (engl. Heading bzw. Yaw) gemeint ist. Alternativ kann auch das gesamte Koordinatensystem lokal eingenordet werden.

3.2 Fehlerquellen

Der vorangegangene Abschnitt 3.1 lässt erahnen, dass die Komplexität eines ALS-Systems einschließlich der satellitengestützten Positionsbestimmung eine Vielzahl möglicher Fehlerquellen beinhaltet. Die einzelnen Einflüsse wirken sich unterschiedlich auf die absolute und relative Position der gemessenen ALS-Datenpunkte aus, d.h. auf die Lagegenauigkeit der Punktwolke im verwendeten Geokoordinatensystem $\mathbb{W}$ und deren innere Qualität. Beide Fehlerarten haben einen nachteiligen Effekt auf die Vergleichbarkeit von Punktwolken. Potentielle Fehlerquellen beim ALS wurden bereits in mehreren anderen Arbeiten besprochen, zum Beispiel von Schenk [2001]. Hier geht es jedoch darum, die verschiedenen Auswirkungen insbesondere im Hinblick auf die Durchführbarkeit einer automatischen Änderungserkennung quantitativ zu bewerten, wobei in den Beispielen eine typische Messentfernung von 500 m angenommen wird. Außerdem werden einige Möglichkeiten zur Fehlervermeidung bzw. -reduzierung angesprochen.

3.2.1 Geodätisches Datum und Koordinatensystem

Die große Anzahl gängiger Geokoordinatensysteme kann dazu führen, dass ALS-Daten aus unterschiedlichen Quellen zunächst diesbezüglich vereinheitlicht werden müssen, bevor ein weiterführender Vergleich vorgenommen werden kann. Bereits bei dieser Umrechnung können Fehler entstehen, insbesondere wenn die Zahlenwerte mehrmals gerundet werden.

Selbst wenn die zu vergleichenden Daten vom selben ALS-System erfasst wurden, führt die Art des gewählten Koordinatensystems dennoch zu Genauigkeitsproblemen. Wie in Abschnitt 3.1.8 erläutert wurde, ist man für die Berechnung der direkten Georeferenzierung einzelner Entfernungsmessungen auf ein kartesisches Koordinatensystem angewiesen. Ein geodätisches Datum ist in der Regel bereits festgelegt (WGS84), da die Sensorpositionen mit einem GPS-Empfänger ermittelt werden. Bei der direkten Georeferenzierung entstünden damit Fehler, falls sich Höhenangaben nach dem Schwerefeld der Erde anstatt nach der Normalenrichtung des WGS84-Ellipsoids richten würden und das Koordinatensystem schon allein dadurch nicht exakt kartesisch wäre.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird jeweils der lokale Tangentialraum am WGS84-Ellipsoid mit ellipsoidischen Höhenangaben zugrunde gelegt. Das bedeutet, dass die Erdoberfläche für das erfasste urbane Gebiet lokal als „Scheibe“ angenommen wird. Bei der Verwendung von UTM-Koordinaten geschieht ähnliches durch die Verebnung der jeweiligen UTM-Zone. Problematisch ist bei solchen Näherungen, dass ein geometrisch geradliniger Laserstrahl in diesen Koordinaten eine scheinbare Krümmung aufweist. Wird dies nicht berücksichtigt, so führt dies zu einem Versatz e_c der resultierenden 3D-Punkte, der quadratisch mit der horizontalen Messentfernung steigt. Bei den in dieser Arbeit typischerweise betrachteten Messentfernungen von 500 m beträgt der dadurch verursachte Versatz maximal $e_c = 2$ cm, in einer Entfernung von 1000 m sind es aber bereits bis zu $e_c = 8$ cm. Dies wird im Folgenden dennoch vernachlässigt, da der Fehler für alle Datenpunkte in ähnlicher Weise auftritt und sich im Gegensatz zu den weiteren Einflüssen praktisch nicht auf die Vergleichbarkeit der Daten auswirkt.

3.2.2 Globales Navigationssatellitensystem

Die bei der satellitengestützten Positionsbestimmung typischerweise auftretenden Fehler fallen in verschiedene Kategorien. Zunächst sind solche Fehlerquellen zu nennen, die durch die Konstellation der GNSS-Satelliten verursacht werden. Da zur Positionsbestimmung Schnittpunkte von Kugelflächen ermittelt werden, ist vor allem die Anzahl der sichtbaren GNSS-Satelliten und deren Position zueinander und zum Empfänger entscheidend. Im ungünstigen Fall muss die Empfängerposition mit Hilfe weniger Satelliten berechnet werden, deren „Signalkugeln“ sich zudem unter einem flachen Winkel schneiden. Hierdurch wird die Genauigkeit der GNSS-Messung deutlich

verringert (vergrößerter DOP-Wert, engl. Dilution of Precision). Bei der Unterstützung eines Hubschrauberpiloten während Landemanövern in urbanem Gebiet kann trotz günstiger GNSS-Konstellation auch durch Abschattung von Satelliten ein großer DOP-Wert vorliegen, z.B. verursacht durch hohe Gebäude (Abbildung 1.3). Zusätzlich kommt die Reflexion der Signale an Hauswänden als weiterer Effekt hinzu, der zu Fehlern der berechneten Empfängerposition führt (Mehrwegempfang, engl. Multipath). Die Positionen der GNSS-Satelliten werden aufgrund von Bahndaten geschätzt (Ephemeriden), die jedoch aufgrund von Defiziten bei der Bahnprädiktion und -darstellung ungenau sind. Auch dieser Effekt wirkt sich nachteilig auf die Berechnung der Empfängerposition aus. Er kann nur in der Nachprozessierung vermieden werden, nachdem die präzisen Ephemeriden bekannt sind. Darüber hinaus können auch noch Ungenauigkeiten der Satellitenuhren als zusätzliche Fehlerquelle in Erscheinung treten.

Die Signale der GNSS-Satelliten müssen zwangsläufig die einzelnen Schichten der Erdatmosphäre durchdringen. Hierbei auftretende Laufzeitunterschiede bilden eine weitere Fehlerquelle bei der Positionsbestimmung des GNSS-Empfängers. In der Ionosphäre und Troposphäre (vgl. Abbildung 3.4) kommt es zu teilweise unvorhersehbarer Brechung der Signale. So wird z.B. die Laufzeit der GNSS-Signale in der Ionosphäre durch die Sonnenaktivität beeinflusst, in der Troposphäre dagegen durch die aktuellen Wetterbedingungen. Die Summe all dieser Einflüsse führt zu einer reduzierten Genauigkeit in der GNSS-Anwendung. Beim GPS und dem dort allgemein verfügbaren SPS-Modus liegt diese bestenfalls horizontal bei ca. 4 m (geographische Länge und Breite) und vertikal bei ca. 8 m (Höhenangaben). Die in der Ionosphäre verursachten Störungen haben an den Ungenauigkeiten den größten Anteil (Petovello [2003]).

Atmosphärische Störungen wirken sich in fast identischer Weise auf dicht beieinander liegende Empfangspositionen aus. Wie zuvor beschrieben lässt sich mittels fester Referenzstationen, deren absolute Position im Raum bekannt ist, der aktuell vorliegende Versatz bestimmen und für den eigentlichen Messempfänger berücksichtigen. Beim SBAS werden diese Korrekturdaten großflächig z.B. für einen ganzen Kontinent ermittelt und über einen geostationären Satelliten gesendet. Unter Verwendung solcher Informationen lässt sich eine Positionsgenauigkeit von 1-2 m erreichen.

Wenn höchste Genauigkeitsanforderungen bestehen, ist die Verwendung einer oder mehrerer ortsnaher Referenzstationen unumgänglich, wobei neben den eigentlichen GPS-Informationen (C/A Code) auch die Trägerphase ausgewertet wird. Die auf diese Weise gefundenen Korrekturdaten werden entweder direkt per Funk an den GPS-Empfänger übermittelt (RTK) oder erst im Rahmen der Nachprozessierung berücksichtigt (PPK). Mit solchen Korrekturverfahren lassen sich sehr genaue satellitengestützte Positionsbestimmungen durchführen. Die verbleibenden Fehler in der gemessenen Position hängen von der Entfernung des Empfängers zur Referenzstation und der Häufigkeit der Korrektur ab. Die Restfehler e_p übertragen sich beim ALS direkt auf die Positionsgenauigkeit der Laserpunkte und liegen typischerweise im Bereich von 3-30 cm, wenn alle GPS-Bedingungen als optimal angesehen werden können.

3.2.3 Inertialsensoren

Die inertiale Navigation zeigt durch die Integration von Beschleunigungs- und Drehratenmessungen eine mehr oder weniger starke Sensordrift, deren Einfluss auf die gemessenen Positionen und Orientierungen sich bei fehlenden absoluten Positionsangaben kumulativ verstärkt (vgl. Abschnitt 3.1.6). Die Stärke dieses Driftverhaltens hängt von der Qualität der eingesetzten IMU ab. Man unterscheidet diesbezüglich verschiedene IMU-Klassen (siehe Petovello [2003]), z.B. *tactical grade* (Drift 1°/h) oder *navigation grade* (Drift 0.01°/h).

Der tatsächliche Winkelfehler für die Kombination aus GNSS und INS hängt von den Kurzzeitbedingungen bei der Fusion der Daten ab. Typischerweise werden in Verbindung mit einer IMU der Klasse *tactical grade* Genauigkeiten von 0.01° für Nick- und Roll-Winkel bzw. 0.02° für den Gier-Winkel erreicht (siehe z.B. Applanix [2009]). Dieser Winkelfehler überträgt sich beim

ALS in Form eines Positionsfehlers e_o auf die Laserpunkte, der proportional mit der Messentfernung steigt. In einer typischen Entfernung von 500 Metern muss daher mit Abweichungen von 10-20 cm gerechnet werden.

3.2.4 Synchronisierung

Ist die exakte Position $\boldsymbol{p}_N(t)$ und Orientierung $R_N(t)$ des Laserscanners in $\mathbb{W}$ bekannt, so kann die zeitgleich gemessene Entfernung $\boldsymbol{r}_L(t)$ unter Berücksichtigung des aktuellen Status $R_S(t)$ des Scanmechanismus entsprechend Gleichung 3.1 in einen georeferenzierten Laserpunkt umgerechnet werden. Von großer Wichtigkeit ist dabei, dass allen genannten Termen dieser Gleichung tatsächlich der gleiche Zeitpunkt t zugrunde liegt, dass also die Messdatenerfassung synchron abläuft. Typischerweise müssen die Navigationsdaten für die Zeitpunkte der Laserentfernungsmessungen interpoliert werden. Im Zuge dessen muss sichergestellt sein, dass keine zeitlich falsche Zuordnung zwischen Laserscanner- und Navigationsdaten auftritt. Ein zeitlicher Versatz würde einerseits eine globale Verschiebung der Punktwolke bewirken. Andererseits ließe auch bereits ein leichter Zeitversatz eine deutliche Verschlechterung der inneren Qualität der Punktwolke entstehen, da Vibrationen und taumelnde Bewegungen des Sensorträgers zu einer Zerstreuung der Laserpunkte führen würden (Positionierungsfehler e_t). Die Übertragungsprotokolle und Triggerimpulse sind bei kompatiblen Sensorkomponenten in der Regel standardisiert, sodass Synchronisierungsfehler in den meisten praktischen Fällen vernachlässigt werden können.

3.2.5 Entfernungsmessung

Auch bei der laufzeitbasierten Laserentfernungsmessung kommt es zu physikalischen und technischen Einschränkungen. Die ausgesendeten Laserpulse müssen zweimal die Messstrecke einschließlich der zwischen Sensor und Objekt vorhandenen Atmosphäre durchlaufen. Atmosphärische Turbulenz und Dispersion können dabei negative Einflüsse auf die Messgenauigkeit haben. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwarten, dass Schwankungen von Luftfeuchtigkeit und -temperatur in Bodennähe eine leichte Krümmung und scheinbare Verlängerung des Ausbreitungswegs der Laserpulse bewirken. Bei einer schwellwertbasierten Entfernungsbestimmung wirkt sich auch die Reflektivität der Objektoberfläche auf die dort gemessene Entfernung aus (Stilla & Jutzi [2009]). Besonders spiegelnde Oberflächen können zu unerwünschten Effekten bei der Entfernungsmessung führen.

Die zur Streckenmessung verwendeten Laserpulse haben bei heutigen Laserscannern typischerweise eine Pulsdauer (zeitliche Pulsbreite) von einigen Nanosekunden, was einer räumlichen Länge bis zu einem Meter entspricht. Mit unterschiedlichen Methoden gelingt es dennoch, eine wesentlich bessere Entfernungsauflösung zu erzielen (siehe z.B. Jutzi & Stilla [2006]). Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 angesprochen wurde, liegt die durch Signalformanalyse erreichbare Genauigkeit unter günstigen Bedingungen im Bereich von 2-3 cm (Restfehler e_d).

3.2.6 Größe der ausgeleuchteten Fläche (Footprint)

Neben der Ausdehnung der abgestrahlten Laserpulse in Ausbreitungsrichtung ist auch ihre laterale Aufweitung ein limitierender Faktor, wenn die präzise Ermittlung von Punktabständen im Vordergrund steht. Die *Strahldivergenz* ist durch die Bauart des Lasers bedingt und unter anderem von der Resonatorlänge und der Größe der Austrittsöffnung abhängig. Typischerweise liegt die Strahldivergenz bei einem modernen Laserscanner z.B. bei 0.03°, weshalb in einer Entfernung von 500 m kein infinitesimal kleiner Punkt, sondern ein *Fleck* mit einem Durchmesser von 25 cm beleuchtet wird (siehe z.B. RIEGL [2010]). Die ausgeleuchtete Fläche wird auch als *Laser-Spot* oder *Laser-Fußabdruck* (engl. Footprint) bezeichnet. In der Regel wird die mit Hilfe eines Laserpulses gemessene Entfernung und der daraus resultierende Laserpunkt der Hauptrichtung zugeordnet

(optische Achse), obwohl das reflektierende Objekt sich auch an anderer Stelle innerhalb des Footprints befinden kann. Der dadurch mögliche Positionsfehler e_f der Laserpunkte vergrößert sich proportional mit dem Durchmesser des Footprints und damit auch mit der Messentfernung.

Die Strahldivergenz beschränkt zwar das Auflösungsvermögen eines Laserscanners, hat aber zugleich eine positive Auswirkung. Sie ermöglicht gerade erst jene messtechnischen Besonderheiten, die oft im Zusammenhang mit ALS genannt werden. Dies ist beispielsweise die Durchdringung von Vegetation mit einem einzelnen Laserpuls, für die die beleuchtete Fläche zwangsläufig eine gewisse Größe aufweisen muss. Nur dann kommt es zu Mehrfachreflexionen des gesendeten Pulses, und es lassen sich Rückschlüsse auf mehrere Objekte im „Strahlengang“ des Lasers ziehen.

3.2.7 Steuerung der Ablenkung (Scan)

Zur Ablenkung der Laserpulse in die jeweils gewünschte Raumrichtung werden in Laserscannern unterschiedliche Techniken eingesetzt. Beispiele sind bewegte Scanköpfe, Glasfaser-Arrays oder bewegliche Spiegel. Sobald jedoch mechanische Teile bewegt werden, sind Analog-Digital-Wandler zur Bestimmung ihrer exakten Position zum Zeitpunkt der Pulsemission erforderlich. Diese A/D-Wandler müssen kalibriert werden, sonst zeigen sie u.U. Nullpunktverschiebungen oder Skalierungseffekte. Ebenso erfordern auch die Drehachsen und damit die Ausrichtung der Spiegelfacetten eine regelmäßige Justierung oder Kalibrierung. Diese Wartung kann unabhängig vom ALS-Gesamtsystem z.B. durch den Hersteller des Laserscanners durchgeführt werden. Wird dies vernachlässigt, so sind die sich zeigenden Effekte nur schwer von einem Boresight-Fehler (siehe Abschnitt 3.2.9) zu unterscheiden. Ein Beispiel hierfür ist der sogenannte „Pitch-Slope“-Fehler (Leica Geosystems [2005]). Typischerweise ist die Winkelgenauigkeit eines kalibrierten Laserscanners im Bereich bis 0.005° anzusetzen, was sich proportional zur Messentfernung auf die Positionierungsgenauigkeit der direkten Georeferenzierung überträgt. In einer Messentfernung von 500 m entspricht dies beispielsweise einem Beitrag e_s von weniger als 5 cm zu den Positionsfehlern der Laserpunkte.

3.2.8 Hebelarme

Die Hebelarme zwischen Laserscanner und IMU ($\boldsymbol{d}_{\mathrm{LiDAR}}$) bzw. zwischen GNSS-Empfänger und IMU ($\boldsymbol{d}_{\mathrm{GNSS}}$) können normalerweise recht genau bestimmt werden, sobald die Systemkomponenten fest am Sensorträger angebracht wurden. Bei unveränderlicher räumlicher Anordnung der Komponenten genügt es, diese einmalig z.B. mit einem Tachymeter zu vermessen. In einem sorgfältig zusammengestellten ALS-System können Fehler e_l der Laserpunkte, die durch ungenaue Hebelarme verursacht werden, auf Werte unter 1 cm reduziert werden. Dieser Fehler ist zudem unabhängig von der Messentfernung. Mit Kenntnis der Hebelarme können die von den Navigationssensoren gemessenen Positionen $\boldsymbol{p}_N(t)$ und -orientierungen $R_N(t)$ auf das Zentrum des Laserscanners bezogen werden, wie in Gleichung 3.1 geschehen. Eine ungenaue Ausrichtung von IMU und Laserscanner, wie sie im nächsten Unterabschnitt besprochen wird, hat dabei auch Auswirkungen auf $\boldsymbol{p}_N(t)$. Da $\boldsymbol{d}_{\mathrm{LiDAR}}$ aber üblicherweise recht klein ist (unter 30 cm), liegt dieser Effekt im Millimeterbereich und ist deshalb vernachlässigbar.

3.2.9 Relativausrichtung der Systemkomponenten (Boresight)

Anders als die Relativposition kann die exakte relative Orientierung von Laserscanner und IMU nicht durch direkte Messung mit der notwendigen Genauigkeit bestimmt werden. Das Koordinatensystem $\mathbb{L}$ des Laserscanners liegt dadurch leicht verkippt zu seiner angenommenen Lage in $\mathbb{W}$ (Abbildung 3.5). Aufgrund dessen stimmt die Mittelachse (engl. *Boresight*) des Laserscanners nicht exakt mit der durch die IMU gemessenen Richtung überein, was man auch als „Schielen“ des Laserscanners umschreiben kann.

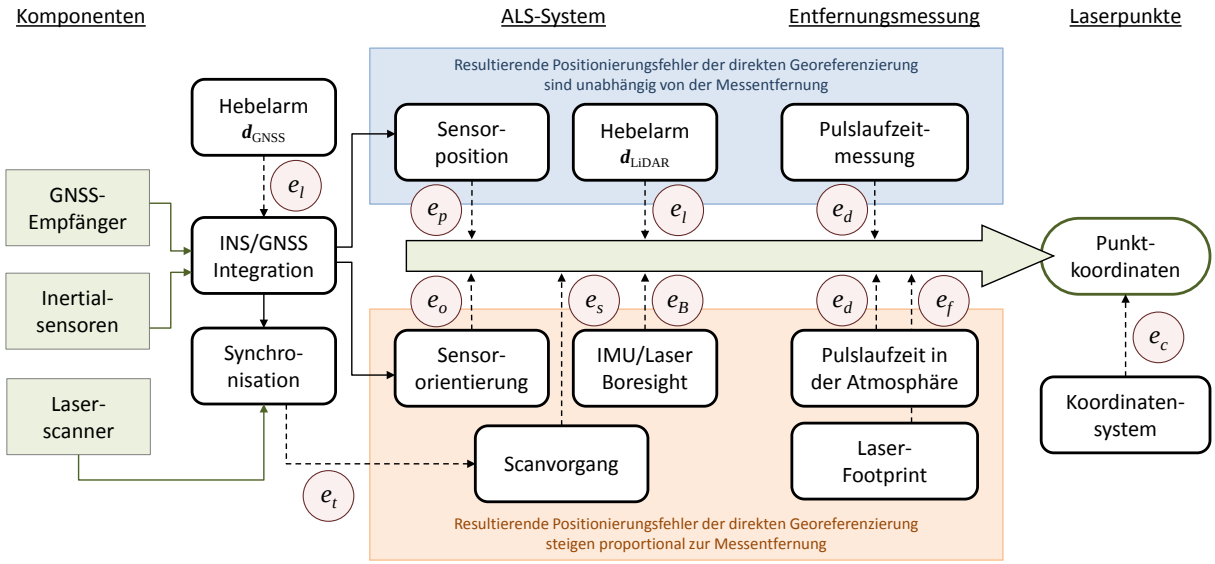


Abbildung 3.7: Zusammenwirken der Komponenten im ALS-System und Fehlerquellen bei der direkten Georeferenzierung der Messwerte.

Es ist empfehlenswert, Laserscanner und IMU möglichst nah und fest miteinander zu verbinden, sodass Änderungen ihrer Ausrichtung durch Vibrationen, Verformungen oder Temperatureffekte möglichst ausgeschlossen werden können. Doch es bleibt auch dann praktisch unmöglich, die beiden Komponenten schon bei ihrer Anbringung am Sensorträger exakt zueinander auszurichten oder ihre Fehlausrichtung in unabhängiger Weise quantitativ zu bestimmen. Der unvermeidbare Boresight-Fehler beträgt typischerweise einige zehntel Winkelgrad, was in einer Entfernung von 500 m zu einem Versatz e_B der gemessenen Laserpunkte um mehrere Meter führt. Der Versatz e_B zeigt sich proportional umso deutlicher, je größer die Messentfernungen sind. Hinzu kommt, dass die Boresight-Fehlstellung sich jedes Mal ändern kann, wenn das ALS-System vom Sensorträger abmontiert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder angebracht wird, was z.B. bei Experimentalsystemen häufig der Fall ist.

3.2.10 Zusammenfassung (Fehlerquellen)

Das Blockdiagramm der wichtigsten Fehlerquellen in Abbildung 3.7 und die Bewertung der Fehler in Tabelle 3.1 verdeutlichen, warum eine „Deckungsgleichheit“ von ALS-Datensätzen nicht ohne Weiteres gegeben ist. Neben zusätzlich auftretendem Messrauschen handelt es sich bei den genannten Fehlern um systematische Effekte, wovon lediglich der Synchronisierungsfehler e_t durch die Abhängigkeit von der Sensorbewegung (z.B. Vibrationen) auch eine Zufallskomponente aufweist. Alle anderen Einflüsse führen jeweils zu lokal zusammenhängenden Verschiebungen und Verzerrungen innerhalb der entstehenden Punktwolken. Positionsfehler e_p und Orientierungsfehler e_o der Navigationssensoren ergeben sich in gemeinsamer Abhängigkeit von der Kalman-Filterung der IMU- und GNSS-Rohdaten. Die anderen Fehler treten unabhängig voneinander auf und überlagern sich jeweils in unterschiedlichen Richtungen, wobei sie sich lokal gegenseitig verstärken oder auch abschwächen können. Bezogen auf das innere Gesamtgefüge und den Versatz von Punktwolken zeigen sie teilweise ähnliche Auswirkungen, sodass sie anhand ihrer beobachtbaren kombinierten Auswirkungen kaum zuverlässig getrennt werden können. Der zu erwartende Versatz zwischen mehreren Punktwolken wird hauptsächlich durch die folgenden beiden Einflüsse bestimmt:

- Für den Fall, dass die satellitengestützte Positionsbestimmung nicht durch eine ortsnahe Referenzstation gestützt werden kann, betragen die Fehler e_p z.B. beim GPS im SPS-Modus

Fehlerquelle	Erwarteter Positionierungsfehler für Laserpunkte in einer Messentfernung von 500 m
e_c : Geodätisches Datum und Koordinatensystem	5-10 cm
e_p : GNSS Fehler (Positionsbestimmung, SPS)	400-800 cm
e_p : GNSS Fehler (Positionsbestimmung, PPK oder RTK)	3-30 cm
e_o : IMU Fehler (Winkelgenauigkeit)	10-20 cm
e_t : Synchronisierung/Interpolation	3-5 cm
e_d : Entfernungsmessung (Full Waveform Laserscanner)	2-3 cm
e_f : Größe der ausgeleuchteten Fläche (Footprint)	10-20 cm
e_s : Steuerung der Ablenkung (Scan)	3-5 cm
e_l : Hebelarme $\boldsymbol{d}_{\text{LiDAR}}$ und $\boldsymbol{d}_{\text{GNSS}}$	2-3 cm
e_B : Relativausrichtung der Systemkomponenten (Boresight)	100-400 cm

Tabelle 3.1: Typische Fehlerquellen beim ALS und deren Einfluss auf die gemessenen Laserpunkte.

mehrere Meter. Hierbei handelt es sich um einen globalen Versatz der Punktwolken, da der GPS-Fehler kurzzeitig als stabil angenommen werden kann.

- Von allen systematischen Fehlern im ALS-System zeigt der Boresight-Fehler die größte Auswirkung auf die Messdaten (e_B), und er kann im Gegensatz zu den meisten anderen Einflüssen nur schwer in unabhängiger Weise erkannt und eliminiert werden. Auch dieser Fehler verursacht einen Versatz um mehrere Meter, wobei die Punktwolken zusätzlich in sich verzerrt werden.

Während ein globaler Versatz der Punktwolken durch eine rigide Koregistrierung korrigiert werden kann, muss die Korrektur der relativen Orientierung von IMU und Laserscanner im Zuge der direkten Georeferenzierung berücksichtigt werden. Wie zuvor schon erwähnt wurde, liegt die Fehlstellung von IMU und Laserscanner typischerweise bei einigen zehntel Winkelgrad. Die Berücksichtigung dieser Fehlstellung kann durch eine Drehmatrix R_B ausgedrückt werden. Gleichung 3.1 ändert sich dadurch folgendermaßen:

$$\boldsymbol{p}_L(t) = \boldsymbol{p}_N(t) + R_N(t) \circ R_B \circ R_S(t) \circ \boldsymbol{r}_L(t). \tag{3.2}$$

In Kapitel 4 werden unter anderem Methoden vorgestellt, die es ermöglichen, R_B anhand von Multi-Aspekt ALS-Daten urbaner Gebiete automatisch zu bestimmen (*Boresight-Kalibrierung*).

4 Methoden zur Analyse von Multi-Aspekt ALS-Daten

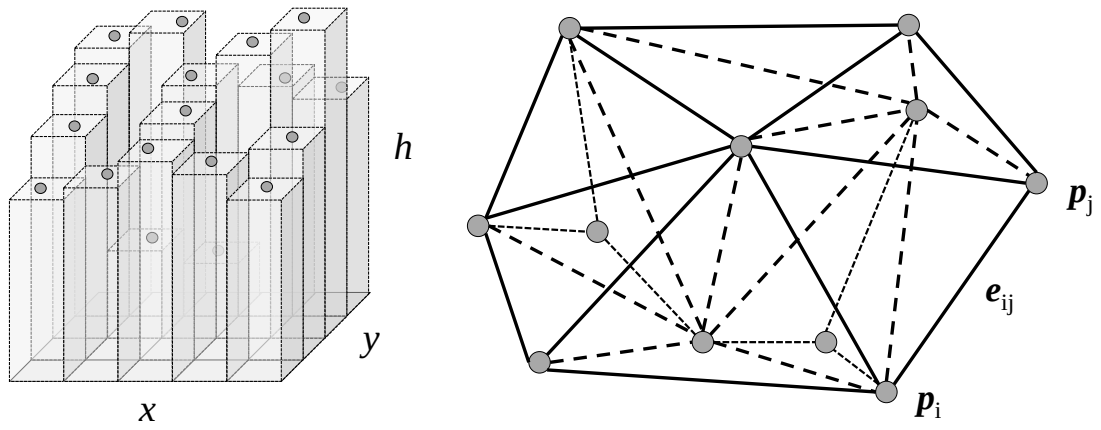
In diesem Kapitel der Arbeit werden die auf dem Weg zur automatischen Änderungserkennung verwendeten, angepassten und neu entwickelten Methoden zur ALS-Datenverarbeitung vorgestellt. Im Gegensatz zu vielen anderen Arbeiten in diesem Themengebiet ist der Ausgangspunkt für alle Untersuchungen nicht allein die georeferenzierte 3D-Punktwolke. Stattdessen werden gemäß Gleichung 3.1 auch die zu jedem gemessenen Einzelpunkt $\boldsymbol{p}_L$ gehörende Sensorposition $\boldsymbol{p}_N$, Sensororientierung R_N, Status des Scanvorgangs R_S und die gemessene Entfernung $\boldsymbol{r}_L$ betrachtet. Für den Fall, dass der eingesetzte Laserscanner eine Analyse der Signalform der rückgestreuten Pulsenergie ermöglicht, können jeder Entfernungsmessung weitere Attribute zugeordnet werden, wie etwa Breite und Amplitude des jeweiligen Echos.

Da die Datenpunkte in einer eindeutigen zeitlichen Abfolge gemessen werden, wird ihnen eine fortlaufende Nummer zugeordnet, welche nachfolgend *Index* genannt wird. Aus einem einzigen abgestrahlten Laserpuls können z.B. infolge von Vegetation in dessen Ausbreitungsweg mehrere Datenpunkte mit aufsteigendem Index in dieser Liste resultieren. Die zeitlich geordnete Abfolge aller Lasermessungen kann jedoch nur eingeschränkt für Suchoperationen innerhalb der Punktwolke benutzt werden, da es in Abhängigkeit vom Scanmuster zu zeitlich versetzten Abtastungen der gleichen räumlichen Region kommt. Zur geometrischen Auswertung von ALS-Daten sind vor allem räumliche Zusammenhänge von Interesse, weswegen zunächst eine geeignete räumliche Suchstruktur auf den 3D-Punktwolken erzeugt werden muss.

4.1 Datenstrukturen für 3D-Punktmengen

ALS-Datensätze bestehen typischerweise aus vielen Millionen* unregelmäßig verteilten 3D-Punkten. „Unregelmäßig“ bedeutet dabei, dass die Punkte abgesehen von ihrer Reihenfolge bei der Datenerfassung keine spezielle räumliche Ordnung aufweisen. Das wiederum unterscheidet diese Art von Daten beispielsweise deutlich von Digitalbildern, wo für einen gegebenen Bildpunkt (*Pixel*, von engl. Picture Element) problemlos auf alle benachbarten Pixel zugegriffen werden kann, da die Bilddaten in einem definierten Raster vorliegen. Wie in der digitalen Bildverarbeitung (siehe z.B. Jähne [2002]) ist der effiziente Zugriff auf Raumbereiche und benachbarte Punkte auch bei der Analyse unregelmäßiger 3D-Punktwolken von großer Bedeutung. Um diesen Zugriff zu ermöglichen und die unregelmäßigen Punktwolken somit „handhabbar“ zu machen, werden die Punkte in einer speziellen Daten- bzw. Suchstruktur organisiert. Die folgenden Unterabschnitte erläutern einige dabei übliche Vorgehensweisen, nämlich die Rasterung, die Dreiecksvermaschung oder die Verwendung von Suchbäumen (Octrees oder k-d Bäume).

*Diese Datenmenge ist vergleichsweise gering, wenn man bedenkt, dass z.B. in der digitalen Luftbildphotogrammetrie mehrere Millionen Bildpunkte **pro Sekunde** erfasst werden



(a) (b)

Abbildung 4.1: Strukturen für 3D-Punktwolken: (a) 2.5D-Rasterung, (b) Dreiecks- bzw. Tetraedervermaschung (TIN).

4.1.1 2.5D-Rasterung

ALS-Daten bilden häufig die Grundlage zur Erzeugung eines *digitalen Oberflächenmodells* (DOM) oder auch eines *digitalen Geländemodells* (DGM). Beide Begriffe bezeichnen in der Geodäsie eine digitale Darstellung der Erdoberfläche, wobei nur das DOM auch die darauf befindlichen Objekte beinhaltet (z.B. Vegetation und Bebauung). Das Gelände kann beim DOM oder DGM als regelmäßiges Raster wiedergegeben werden (neben anderen Möglichkeiten wie z.B. TIN, siehe Abschnitt 4.1.2), wobei Höhenangaben auf ein horizontales Gitter bezogen werden. Dieses Raster erstreckt sich beispielsweise in Süd-Nord und West-Ost Richtung, wobei jeder Rasterzelle eine einzige Höhe zugeordnet wird. Bei der Erzeugung eines DOM aus ALS-Daten wird jeder 3D-Punkt zunächst seiner lokalen Rasterzelle zugeordnet. Die Höhe in einer bestimmten Rasterzelle ergibt sich dann z.B. als Maximum oder Durchschnitt aller Höhenwerte von Laserpunkten an diesem Ort. Liegen keine Lasermessungen für einen bestimmten Ort vor, so muss die Höheninformation aus benachbarten Rasterzellen interpoliert werden. Im Ergebnis kann ein solches Gitter-DOM ähnlich einem Digitalbild interpretiert und verarbeitet werden. Anstelle von Farben und Helligkeiten enthält dieses „Bild“ die Höhe des Geländes (Abbildung 4.1a). Dreidimensionale Daten, die in dieser Weise strukturiert sind, werden in der Literatur oft als 2.5D-Daten bezeichnet.

Die Vorteile von 2.5D-Daten zeigen sich in der einfachen Verarbeitung, da viele aus der digitalen Bildverarbeitung bekannte Verfahren nahezu unverändert angewendet werden können. Beispiele sind etwa klassische Verfahren zur Kantenextraktion (z.B. Canny-Filter) oder schwellwertbasierte Segmentierungsverfahren. Der Nachteil besteht in der Interpolation und Vergröberung der Daten auf eine fest vorgegebene Rastergröße. Ein solche Rasterung ist für die in dieser Arbeit untersuchten Multi-Aspekt ALS-Daten ungeeignet, da z.B. Fassadenpunkte in einem horizontalen 2D-Raster verloren gehen würden. Die Kombination verschiedener 3D-Ansichten lässt erst recht keine geeignete 2D-Rasterung mehr zu.

4.1.2 Dreiecksvermaschung (TIN)

Eine *Dreiecksvermaschung* (engl. Triangulated Irregular Network, TIN) der Punktwolken zeigt die Nachteile der eben beschriebenen Rasterung nicht, denn hierbei bleiben die Daten vollständig und unverändert.

- 2D: Für den Fall, dass die 3D-Punkte als Repräsentanten einer durchgehenden Oberfläche aufgefasst werden können (z.B. eines DGM) oder es sich ohnehin um zweidimensionale Da-

ten handelt, wird unter einem TIN eine vollständige und lückenlose Zerlegung der Fläche in nicht-überlappende Dreiecke verstanden, deren Eckpunkte von den Datenpunkten gebildet werden. Das bei weitem gebräuchlichste Verfahren, eine solche zweidimensionale Dreiecksvermaschung zu bestimmen, ist die sogenannte *Delaunay-Triangulation* (Delaunay [1934]). Das dabei konstruierte TIN erfüllt die zusätzliche Bedingung, dass der Umkreis eines jeden Dreiecks keine weiteren Punkte enthält. Hierdurch entsteht eine möglichst ausgewogene Art der Dreiecksvermaschung.

- 3D: Falls die gemessenen 3D-Punkte nicht nur eine Oberfläche repräsentieren, sondern ein Volumen vollständig durchdringen, lässt sich analog zur Delaunay-Triangulation die dreidimensionale Entsprechung eines TIN bestimmen, nämlich eine Tetraedervermaschung (Abbildung 4.1b). Auch dabei kann die Vermaschung derart konstruiert werden, dass die umschließende Kugel jedes Tetraeders keine weiteren Datenpunkte enthält.

In einer Dreiecks- oder Tetraedervermaschung werden zu jedem Einzelpunkt $\boldsymbol{p}_i$ des Datensatzes die Verbindungen $\boldsymbol{e}_{ij}$ zu benachbarten Punkten $\boldsymbol{p}_j$ gespeichert. Somit kann für einen gegebenen Punkt leicht auf alle benachbarten Punkte zugegriffen werden. Solche Netzwerke werden z.B. zur Interpolation und Darstellung von Flächen in der Computergrafik verwendet. Weitere wichtige Anwendungen finden sich auf dem Gebiet der numerischen Mathematik, genauer gesagt bei der numerischen Lösung partieller Differentialgleichungen (Finite-Elemente-Methode, FEM).

Ein TIN lässt sich aber nur eingeschränkt für *Bereichsanfragen* einsetzen, d.h. für den Zugriff auf alle in einem bestimmten Raumbereich enthaltenen Punkte. Solch ein Raumbereich kann z.B. durch Randbedingungen beschriebenen sein. Beispiele wären etwa die Suche nach allen Punkten in einem Koordinatenfenster oder innerhalb eines Radius um einen bestimmten Mittelpunkt. Der nächste Abschnitt behandelt Datenstrukturen, die hierfür wesentlich besser geeignet sind.

4.1.3 Baumstrukturen

Mit dem Begriff *Suchbaum* bezeichnet man in der Informatik eine spezielle Datenstruktur, die es ermöglicht, Suchoperationen besonders effizient durchzuführen. „Baum“ ist dabei die sinnbildliche Umschreibung der hierarchischen Untergliederung eines gegebenen mehrdimensionalen Datensatzes. Beginnend mit der Gesamtheit aller Daten wird die Einhüllende dieser Menge in immer kleiner werdende Bereiche unterteilt, was anschaulich der Verästelung eines Baums entspricht. In der letzten Unterteilung ist schließlich nur noch ein Datenpunkt enthalten („Blatt“).

Für jeden Einzelpunkt werden Informationen zur Zugehörigkeit bezüglich des Raumbereichs in der jeweiligen Hierarchieebene hinterlegt. Diese Indizierung kann auch als spezielle Sortierung der Daten realisiert oder verstanden werden. Es ist dabei vergleichsweise einfach, Datenpunkte zu entfernen oder neu hinzukommende Punkte in die bestehende Datenstruktur aufzunehmen. Nach der Konstruktion eines Suchbaums lässt sich eine Bereichsanfrage sehr effizient durchführen. Beginnend mit der gröbsten Unterteilung des Gesamtdatensatzes können dabei ganze Datenblöcke von der Suche ausgenommen werden, falls ihre Ränder außerhalb der Bereichsanfrage liegen. Für alle anderen Datenblöcke wird dieser Prozess mit der nächstfeineren Untergliederung fortgesetzt, bis die Blätter des Baums erreicht sind. Auf diese Weise erhält man die gesuchte Untermenge der Daten nach nur wenigen Vergleichsoperationen. Für die in dieser Arbeit betrachteten dreidimensionalen ALS-Punktwolken kommen insbesondere zwei Arten von Suchbäumen in Frage, die im Folgenden beschrieben werden.

Octree

Bei einem Octree („Achtbaum“, gebräuchlich ist nur die englische Bezeichnung) wird die zu organisierende Menge von 3D-Punkten zunächst von einem Würfel vollständig umschlossen. Die

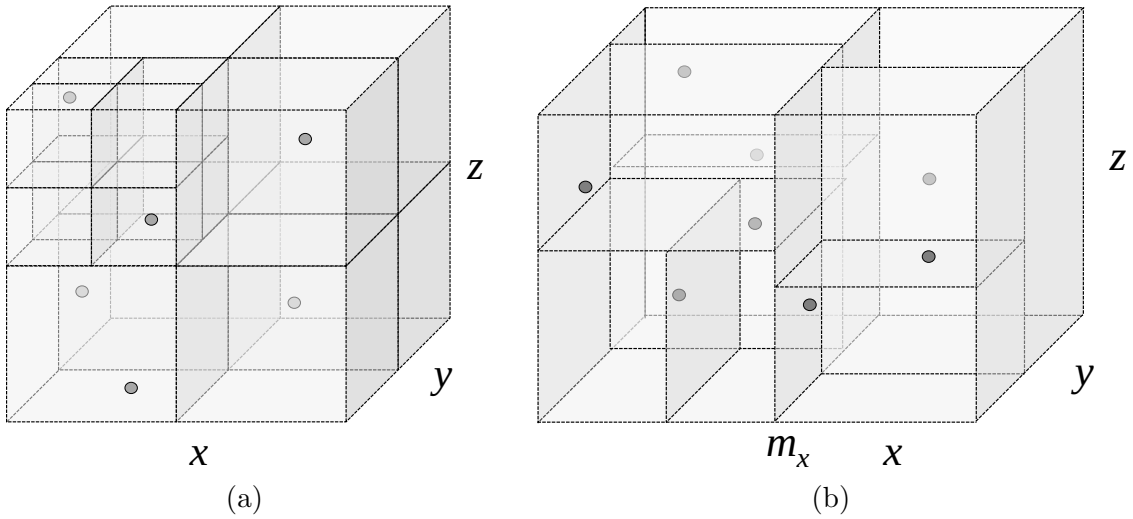


Abbildung 4.2: Suchbäume für 3D-Punktwolken: (a) Octree, (b) k-d Baum (k=3).

Kanten dieses Würfels werden in der ersten Untergliederung mittig geteilt, so dass im Ergebnis genau acht formgleiche „Unterwürfel“ entstehen, die als Oktanten bezeichnet werden. Für jeden Oktanten wird festgestellt, ob er mehr als einen Datenpunkt enthält. Ist das der Fall, wird der betreffende Würfel erneut in Oktanten unterteilt. Dieser Verfeinerungsprozess wird fortgesetzt, bis alle entstandenen Unterwürfel entweder keinen oder genau einen Datenpunkt enthalten (siehe Abbildung 4.2a). Die Oktanten in den einzelnen Hierarchieebenen können nach einem festen Schema mit Ziffern der Menge $\{0, \ldots, 7\}$ durchnummeriert werden, sodass letztlich jeder Oktant in jeder Untergliederungsstufe mit einer entsprechenden Ziffernfolge (Oktalzahl) angesprochen werden kann. Die Datenpunkte werden entsprechend dieser Oktaldarstellung sortiert.

In der Anwendung des so konstruierten Octrees für Bereichsanfragen kann sukzessive entschieden werden, welche Oktanten von der Anfrage betroffen sind. Liegen Oktanten komplett außerhalb oder komplett innerhalb, müssen die darin enthaltenen Punkte überhaupt nicht „angefasst“ werden, weswegen die gesuchte Punktmenge sehr schnell eingegrenzt werden kann. Hauptvorteil des Octrees im Vergleich zu anderen Suchbäumen ist die einfache Implementierung aufgrund der stets gleichbleibenden Art der Unterteilung und der gut zu realisierenden Adressierung durch Oktalzahlen. Die Einfachheit der Unterteilung ist aber zugleich ein Nachteil, da keine Anpassung an lokal unterschiedliche Punktdichten erfolgen kann. Außerdem ist ein Octree definitionsgemäß ausschließlich für 3D-Daten geeignet.

k-d Baum

Ein k-dimensionaler Baum oder k-d Baum (Bentley [1975]) ist eine Organisationsstruktur für k-dimensionale Datensätze. Die Unterteilung des Gesamtdatensatzes wird dabei durch (k-1)-dimensionale Hyperebenen orthogonal zur jeweils betrachteten Koordinatenachse vorgenommen. Durch jede dieser Trennebenen werden jeweils zwei möglichst gleich große Untermengen erzeugt. Diese Art der Unterteilung richtet sich also nicht nach dem Volumen, sondern erfolgt am (Koordinaten-)Median der tatsächlich in diesem Volumen enthaltenen Datenpunkte. Mit den beiden Untermengen wird entsprechend weiter verfahren, wobei die k Dimensionen sequentiell durchlaufen werden. Der entstehende Suchbaum ist ein *binärer Baum*, da mit jeder Unterteilung genau zwei Untermengen erzeugt werden.

Das in Abbildung 4.2b gezeigte Beispiel illustriert mit k=3 zugleich die für die vorliegende Arbeit einzig relevante Art von k-d Bäumen. Die Punktwolke liegt in einem kartesischen Koordinatensystem vor, dessen Achsen mit x, y und z bezeichnet sind. Im ersten Schritt der Konstruktion

des k-d Baums wird der Median m_x der x-Koordinaten aller Punkte bestimmt. Die Ebene $x{=}m_x$ erzeugt die erste Unterteilung der Punktwolke. Anschließend wird innerhalb jeder Untermenge erneut ein Koordinatenmedian ermittelt, diesmal bezüglich der y-Koordinaten. Die vier mittlerweile vorhandenen Sektoren werden dann entsprechend entlang der z-Richtung unterteilt. Danach wiederholt sich der Prozess in den einzelnen Teilbereichen, indem jeweils von neuem mit der Betrachtung der x-Koordinaten begonnen wird. Die Bestimmung von Trennebenen wird solange fortgesetzt, bis jeder abgetrennte Bereich nur noch einen Datenpunkt enthält.

Die zur Gliederung des Datensatzes eingesetzten Hyperebenen werden durch existierende Datenpunkte repräsentiert. Daher sind alle Datenpunkte entweder als *innere Knoten* oder als *Blatt* im k-d Baum zu finden. Bei einer Bereichsanfrage wird durch systematisches Durchlaufen der Knoten (*Traversierung*) des Suchbaums eine schnelle Eingrenzung der gesuchten Punktmenge ermöglicht. Den bereits genannten vorteilhaften Eigenschaften eines k-d Baums als Daten- und Suchstruktur für ALS-Daten stehen nur wenige Einschränkungen gegenüber. Beispielsweise werden Trennungen nur parallel zu den Koordinatenachsen vorgenommen. Die Ausrichtung des Koordinatensystems hat also einen deutlichen Einfluss auf die Konstruktion des Suchbaums. Die allgemeineren *BSP-Bäume* (engl. Binary Space Partitioning) zeigen diese Einschränkung nicht, da sie Hyperebenen mit beliebiger Orientierung zur Unterteilung des Datensatzes verwenden. Allerdings erhöht sich dadurch auch der Aufwand zur Ermittlung und Speicherung der Bereichsgrenzen.

Viele der im weiteren Verlauf dieser Arbeit besprochenen Verfahren, welche die Analyse einer bestehenden 3D-Punktwolke betreffen (Zeitpunkt t_1), setzen das Vorhandensein einer geeigneten Suchstruktur auf diesen Daten voraus. Für die in Kapitel 5 beschriebenen Experimente und gezeigten Ergebnisse wurden k-d Bäume ($k{=}3$) zur Handhabung der Datenmengen eingesetzt. Ebenso wäre die Verwendung von Octrees oder TINs möglich gewesen. Solange die Daten selbst unverändert bleiben, hat die Wahl der Datenstruktur keinen Einfluss auf die Qualität der hier gezeigten Ergebnisse.

4.1.4 Abfolge von Scanzeilen

Aufgrund der Erfordernis einer schritthaltenden Datenauswertung besteht während der Hubschraubermission (Zeitpunkt t_2) nicht die Möglichkeit, auf der vollständig gegebenen 3D-Punktwolke zu operieren. Dennoch ist das Erkennen räumlicher Zusammenhänge innerhalb der aktuell erfassten ALS-Daten auch unter diesen Bedingungen ein wichtiger Ausgangspunkt für die weitere Analyse.

Bei bekanntem Scanmuster des Laserscanners kann die geordnete zeitliche Abfolge von Entfernungsmessungen einen schnellen Zugriff auf räumlich (potentiell) benachbarte Messwerte ermöglichen. Die in dieser Arbeit betrachteten Methoden zur schritthaltenden Segmentierung von ALS-Daten unterstellen einen Scanmechanismus, der bei geradlinigem Flug des Sensorträgers parallele Scanzeilen erzeugt (siehe Abbildung 3.4). Ein solches Scanmuster wird typischerweise durch Kippspiegel oder rotierende Polygonspiegel generiert und ist unter aktuell verfügbaren Laserscannern weit verbreitet. Die im Folgenden beschriebenen Zusammenhänge sind aber in ähnlicher Weise auch für andere Scanmuster ableitbar.

Die Verwendung eines Zeilen-Scanmusters führt dazu, dass sich der durch $R_S(t)$ beschriebene Scanvorgang des (ruhenden) Laserscanners in einer Ebene abspielt. Das heißt, dass die gemessenen Entfernungen $r_L(t)$ im Koordinatensystem $\mathbb{L}$ des Laserscanners in Messpunkten $\boldsymbol{s}_L(t) = R_S(t) \circ \boldsymbol{r}_L(t)$ resultieren, die sich mit zweidimensionalen kartesischen Koordinaten (u, w) beschreiben lassen. Abbildung 4.3 zeigt eine solche Scanebene des Laserscanners. In der kurzen Zeitspanne, innerhalb der eine einzelne Scanzeile typischerweise erfasst wird (z.B. eine hundertstel Sekunde), kann auch der am Sensorträger bewegte ALS-Sensor als nahezu stationär angesehen werden. Die in $\mathbb{L}$ vorliegende Scanebene erzeugt daher in der in $\mathbb{W}$ erfassten Szene näherungsweise geradlinige

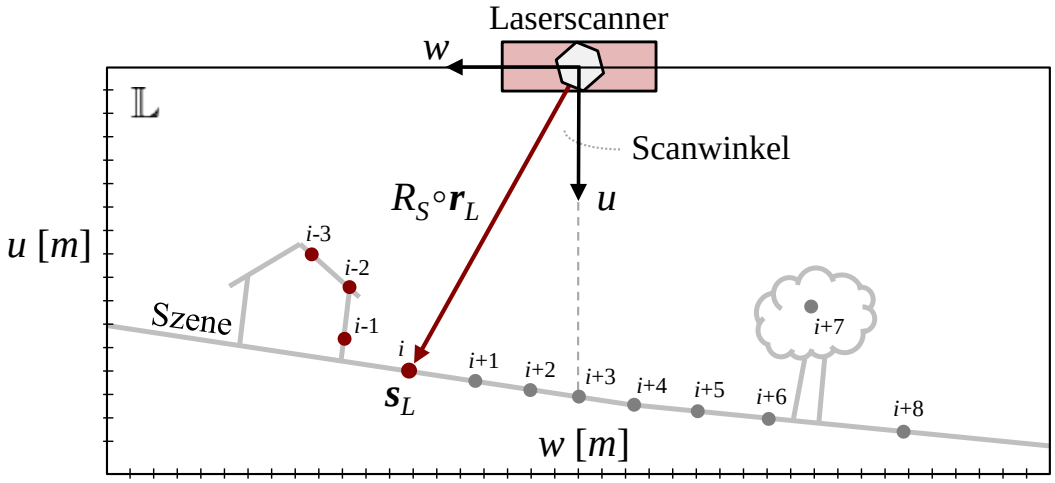


Abbildung 4.3: Entfernungsmessung und Scanvorgang in $\mathbb{L}$ (Scanzeile).

Abtastmuster. Die in Abbildung 4.3 dargestellte Abfolge der Lasermessungen kann also als räumliche Ordnung von Punkten innerhalb einer Schnittebene im Gelände aufgefasst werden. Beim Übergang zwischen benachbarten Scanzeilen bleibt der räumliche Zusammenhang im Rahmen realistischer Flugbewegungen über kurze Zeiträume gewahrt, sodass die Abfolge der Scanzeilen und die innere Anordnung der Laserpunkte geeignet sind, lokale räumliche Zusammenhänge in den ALS-Daten zu erkennen. Diese Art der Strukturierung von ALS-Daten wird in Abschnitt 4.2.4 ausgenutzt.

4.2 Segmentierungsverfahren für 3D-Punktmengen

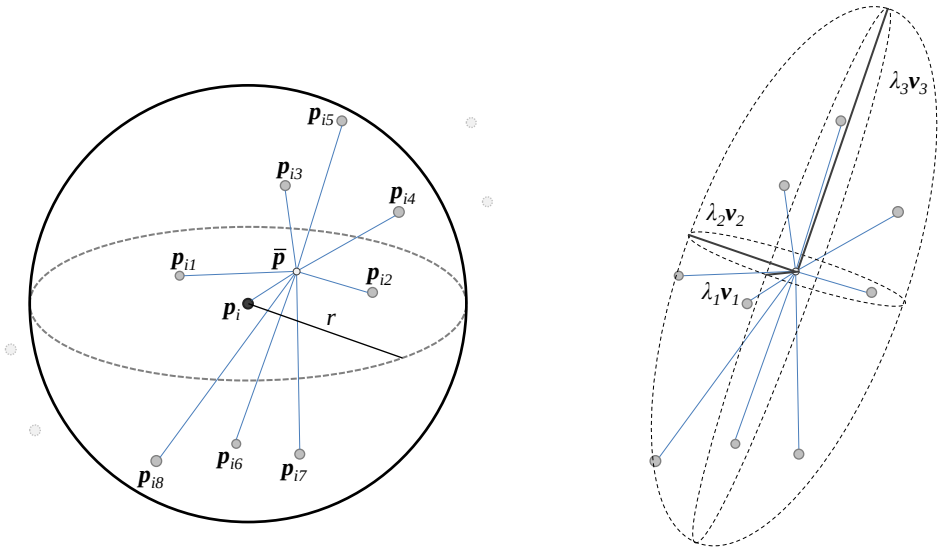
Fernerkundungsdaten wie zum Beispiel Luftbilder, SAR-Daten oder Laser-Punktwolken sind immer nur unvollkommene Abbilder der Realität. Hauptgrund für die Datenerfassung ist es aber, auf der Grundlage dieser Daten Aussagen über die Realität zu treffen. Mit diesem Ziel werden die Daten einer Kette von automatischen, teilautomatischen oder manuellen Verarbeitungsschritten unterzogen. Zwischen der Datenerfassung und der Klassifizierung bzw. Objekterkennung steht typischerweise die *Segmentierung*. Hierbei werden räumlich benachbarte Datenpunkte zu größeren Zusammenhangskomponenten gebündelt, wenn sie aufgrund gewisser Homogenitätseigenschaften mit großer Wahrscheinlichkeit ein einzelnes Objekt repräsentieren. Anhand der vom Hintergrund getrennten Zusammenhangskomponenten (*Segmente*) werden Merkmale extrahiert, die schließlich zur Klassifikation bzw. zum Erkennen der betreffenden Objekte führen.

In dieser Arbeit wird aus zwei unterschiedlichen Gründen eine automatische Segmentierung der ALS-Daten durchgeführt:

1. In unterschiedlichen Datensätzen gefundene Segmente, die das gleiche Objekt repräsentieren, erleichtern sowohl die Koregistrierung der Daten als auch die Boresight-Kalibrierung des ALS-Sensorsystems.

2. Segmentierung und Klassifizierung der Daten ermöglichen spezifische und objektbasierte Aussagen über die Art von eingetretenen Änderungen.

Die in den nachfolgenden Unterabschnitten beschriebenen Segmentierungsverfahren berücksichtigen die unterschiedlichen Anforderungen und Randbedingungen, die jeweils beim Erfassen der Referenzdaten (t_1) oder während der Hubschraubermission (t_2) vorliegen. Zunächst werden Verfahren vorgestellt, die von einer vollständigen 3D-Punktwolke ausgehen. Die einzelnen Methoden



(a) (b)

Abbildung 4.4: (a) Nachbarschaft eines gegebenen Datenpunkts $\boldsymbol{p}_i$ vom Radius r, (b) Kovarianzellipsoid $(\lambda_1 \boldsymbol{v}_1, \lambda_2 \boldsymbol{v}_2, \lambda_3 \boldsymbol{v}_3)$.

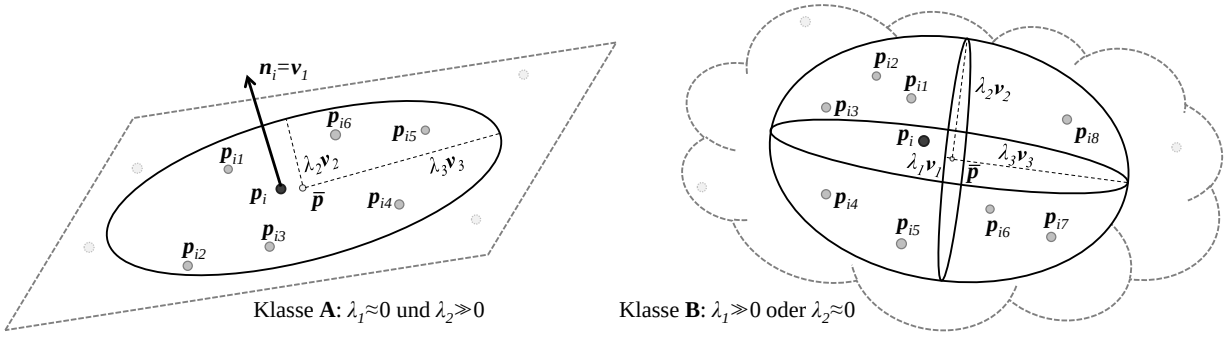
behandeln die Vorklassifizierung der Einzelpunkte aufgrund von Nachbarschaftsbeziehungen, die Abgrenzung des Bodens als zusammenhängende Fläche und die Segmentierung von Ebenen. Letztere spielen im weiteren Verlauf der Arbeit bei den Themen Kalibrierung und Koregistrierung eine wesentliche Rolle. Anschließend wird gezeigt, wie eine schritthaltende Segmentierung ebener Flächen bereits in der Abfolge von Laser-Scanzeilen erfolgen kann. Hierzu werden innerhalb einzelner Scanzeilen Geradenstücke detektiert, die dann fortlaufend zu ebenen Flächen gruppiert werden.

4.2.1 Lokale Hauptkomponentenanalyse (PCA)

Vor der eigentlichen Segmentierung ist es sinnvoll, die Suche nach Zusammenhangskomponenten durch die Bestimmung zusätzlicher Attribute der 3D-Punkte zu unterstützen. Einige in Frage kommende Merkmale wie Pulsbreite und -amplitude ergeben sich bereits aus der Einzelpunktmessung, wenn ein entsprechender Sensor eingesetzt wird. Weitere Attribute lassen sich erst durch die Berücksichtigung von Punktnachbarschaften schätzen. Beispiele hierfür sind der lokale Normalenvektor oder die Krümmung der abgetasteten Fläche.

Ein gängiges Hilfsmittel zur Berechnung lokaler Merkmale von punktweise gegebenen Oberflächen oder Volumen ist die Kovarianz- bzw. Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis, PCA). Frühe Beispiele hierfür finden sich im Bereich der Computergrafik (siehe etwa Hoppe et al. [1992]). Eine lokale Hauptkomponentenanalyse wird in der vorliegenden Arbeit als Vorverarbeitungsschritt für alle Einzelpunkte der zu analysierenden ALS-Punktwolken durchgeführt. Grundlage der Berechnungen ist immer die Menge aller jeweils benachbarten Punkte innerhalb eines bestimmten Suchradius r. Zur effizienten Suche nach diesen Punktnachbarschaften wird eine der in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Suchstrukturen verwendet.

Es sei $\boldsymbol{p}_i$ ein beliebiger Punkt der Punktwolke P. Durch eine Traversierung des Suchbaums von P werden alle Punkte $\boldsymbol{p}_{ij}$ identifiziert, die sich innerhalb einer Kugel vom Radius r um $\boldsymbol{p}_i$ befinden. Abbildung 4.4a zeigt das Ergebnis einer solchen Suche. Der Radius r ist eine globale Größe und wird entsprechend der durchschnittlichen Punktdichte in P festgelegt. Die gewählte Größe von r gewährleistet, dass die somit betrachteten Nachbarschaften im Mittel eine nennenswerte Anzahl an Datenpunkten aufweisen. Bei typischen ALS-Datensätzen liegen sinnvolle Werte von r zwischen



(a) (b)

Abbildung 4.5: Unterscheidung der Einzelpunkte aufgrund von Nachbarschaften. (a) Klasse **A**: Lokal planare Regionen. (b) Klasse **B**: Rest.

0.5 und 5 Metern. Es bezeichne n die Anzahl der benachbarten Punkte von $\boldsymbol{p}_{i0} = \boldsymbol{p}_i$ und $\bar{\boldsymbol{p}}$ sei der Schwerpunkt (Durchschnitt) aller Datenpunkte $P_i = \{\boldsymbol{p}_{i0}, \boldsymbol{p}_{i1}, \ldots, \boldsymbol{p}_{in}\}$ innerhalb des Suchradius:

$$\bar{\boldsymbol{p}} = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^{n} \boldsymbol{p}_{ij}. \tag{4.1}$$

Mit diesen Bezeichnungen ist die Kovarianzmatrix C von $\boldsymbol{p}_i$ wie folgt gegeben:

$$C = (\boldsymbol{p}_{i0} - \bar{\boldsymbol{p}}, \ldots, \boldsymbol{p}_{in} - \bar{\boldsymbol{p}}) \circ (\boldsymbol{p}_{i0} - \bar{\boldsymbol{p}}, \ldots, \boldsymbol{p}_{in} - \bar{\boldsymbol{p}})^{\mathrm{T}}. \tag{4.2}$$

Die in Gleichung 4.2 definierte 3×3 Kovarianzmatrix C ist symmetrisch und positiv semidefinit, daher sind ihre Eigenwerte λ_1, λ_2 und λ_3 nicht-negative reelle Zahlen. Die zugehörigen Eigenvektoren $\boldsymbol{v}_1$, $\boldsymbol{v}_2$ und $\boldsymbol{v}_3$ von C sind die Hauptachsen von P_i. Jeder Eigenwert λ_k, geteilt durch die Anzahl $n+1$ von Punkten in P_i, liefert eine normierte Kenngröße der Punktstreuung in Richtung des jeweiligen Eigenvektors $\boldsymbol{v}_k$. Das Resultat der Hauptkomponentenanalyse kann als Ellipsoid veranschaulicht werden, dessen Halbachsen in Form der drei orthogonalen Vektoren $\lambda_1\boldsymbol{v}_1$, $\lambda_2\boldsymbol{v}_2$ und $\lambda_3\boldsymbol{v}_3$ vorliegen (Abbildung 4.4b). Die drei Eigenwerte von C werden zur besseren Vergleichbarkeit der Größe nach geordnet, sodass $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3$ gilt. Falls λ_1 nahe bei Null liegt, die beiden anderen Eigenwerte aber deutlich größer sind, so weist dies auf eine lokal planare Oberfläche hin. In diesem Fall repräsentiert $\boldsymbol{v}_1$ eine gute Näherung des lokalen Normalenvektors.

Die Berechnung der Eigenwerte $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ und Eigenvektoren $(\boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2, \boldsymbol{v}_3)$ wird für alle Punkte $\boldsymbol{p}_i$ in der Punktwolke P durchgeführt. Überall dort, wo die Umgebung von $\boldsymbol{p}_i$ genügend benachbarte Punkte aufweist (z.B. $n \geq 5$) und die Eigenwerte auf eine planare Fläche hindeuten, wird der betreffende Punkt $\boldsymbol{p}_i$ als Punkt der Klasse **A** angesehen. In diesem Fall wird ihm die Normalenrichtung $\boldsymbol{n}_i = \boldsymbol{v}_1$ bzw. $\boldsymbol{n}_i = -\boldsymbol{v}_1$ als zusätzliches Attribut zugeordnet (Abbildung 4.5a). Alle anderen Punkte werden der Klasse **B** zugeteilt (Abbildung 4.5b). Um konsistente Normalenvektoren zu erhalten, wird das Vorzeichen aller $\boldsymbol{n}_i$ so gewählt, dass sie mit $(R_N \circ R_S \circ \boldsymbol{r}_L) \cdot \boldsymbol{n}_i \leq 0$ zum Sensor hin ausgerichtet sind. Die Einteilung in die Klassen **A** und **B** ist eine erste Unterscheidung der Punkte aufgrund von lokalen Zusammenhängen. Eine Zugehörigkeit der Punkte zu größeren Zusammenhangskomponenten wird dadurch aber nicht festgestellt. Darüber hinaus erfordert die Segmentierung ebener Flächenstücke weitere Verarbeitungsschritte, da in obiger Einteilung auch solche Datenpunkte zur Klasse **A** gezählt werden, die sich über leicht gekrümmte Oberflächen verteilen. Die Segmentierung ausgedehnter zusammenhängender Bereiche mit homogenen Eigenschaften ist Gegenstand der nächsten beiden Unterabschnitte.

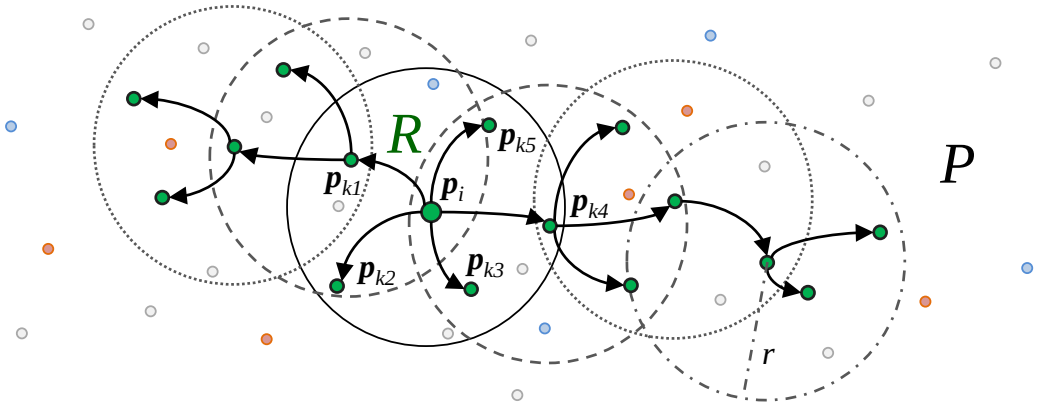


Abbildung 4.6: Gebietswachstum (Region Growing) innerhalb der Punktwolke P.

4.2.2 Region Growing

Die Trennung einheitlicher Datensegmente vom Hintergrund erfordert bei der Auswertung eine Herangehensweise, die Gemeinsamkeiten der Datenpunkte über die Grenzen lokaler Punktnachbarschaften hinaus erkennt, wodurch sich auf eine Zugehörigkeit dieser Datenpunkte zum gleichen Objekt schließen lässt. Dieser Grundsatz wird beim *Gebietswachstum* (engl. Region Growing) verwirklicht. Das Gebietswachstum sieht vor, ausgehend von einem Einzelpunkt nach und nach eine größere Punktmenge anwachsen zu lassen, in der die enthaltenen Punkte eine zuvor festgelegte Homogenitätsbedingung erfüllen. Der Ausgangspunkt wird dabei auch Saatpunkt (engl. Seed Point) genannt.

Abbildung 4.6 illustriert diesen Vorgang: Beginnend mit dem Saatpunkt $\boldsymbol{p}_i \in P$ wird für alle Datenpunkte $\boldsymbol{p}_k$ in einer Umgebung von $\boldsymbol{p}_i$ ein Ähnlichkeitsmaß $d(\boldsymbol{p}_i, \boldsymbol{p}_k)$ bewertet. Die dabei notwendige Umgebungssuche ist mit Hilfe des zuvor eingerichteten Suchbaums auf P effizient durchführbar. Der Suchradius r wird wie in Abschnitt 4.2.1 global gewählt und richtet sich z.B. nach der durchschnittlichen Punktdichte in P. Von entscheidender Bedeutung für das Gebietswachstum ist das betrachtete Ähnlichkeitsmaß. Dieses muss die Eigenschaft(en) widerspiegeln, die letztlich von den Segmenten bzw. den gesuchten Objekten erwartet werden. „Ähnlichkeit“ kann dabei aufgrund von unterschiedlichen Merkmalen definiert sein. Beispiele wären etwa die Echoamplitude, die lokale Normalenrichtung oder die Höhe über Grund. Falls Punkte $\boldsymbol{p}_k$ bezüglich des vordefinierten Ähnlichkeitsmaßes $d(\boldsymbol{p}_i, \boldsymbol{p}_k)$ einen Wert liefern, der unter eine bestimmte Schranke $d_{\max}$ fällt, so werden diese Punkte neben $\boldsymbol{p}_i$ der wachsenden Menge R hinzugefügt, andernfalls nicht. Alle Punkte, die neu in R aufgenommen werden, lösen ihrerseits wieder eine Suche nach ähnlichen Punkten in ihrer Umgebung in P aus. Dieser Prozess wird fortgesetzt, bis alle durch die Umgebungssuche erreichbaren Punkte getestet wurden und keine weiteren Punkte die Ähnlichkeitsbedingung $d \leq d_{\max}$ erfüllen. Die Menge R repräsentiert schließlich das Ergebnis des Gebietswachstums und bildet ein Segment in der Segmentierung von P.

Das Gebietswachstum wird von einigen Parametern gesteuert, die sich mehr oder weniger deutlich auf das Ergebnis auswirken:

- Der Suchradius r ist in der Regel eine globale Größe. Ist er zu klein, kommt das Gebietswachstum in Abschnitten der Punktwolke mit geringer Punktdichte zum Erliegen. Ist er zu groß, werden unter Umständen verschiedene Segmente verschmolzen, obwohl die zugehörigen Objekte eine klare räumliche Trennung aufweisen.

- Der Saatpunkt $\boldsymbol{p}_i$ wird entweder manuell gesetzt oder von einer automatischen Prozedur gefunden. Er sollte in gewisser Weise ein möglichst guter Repräsentant des gesuchten Objekts sein.

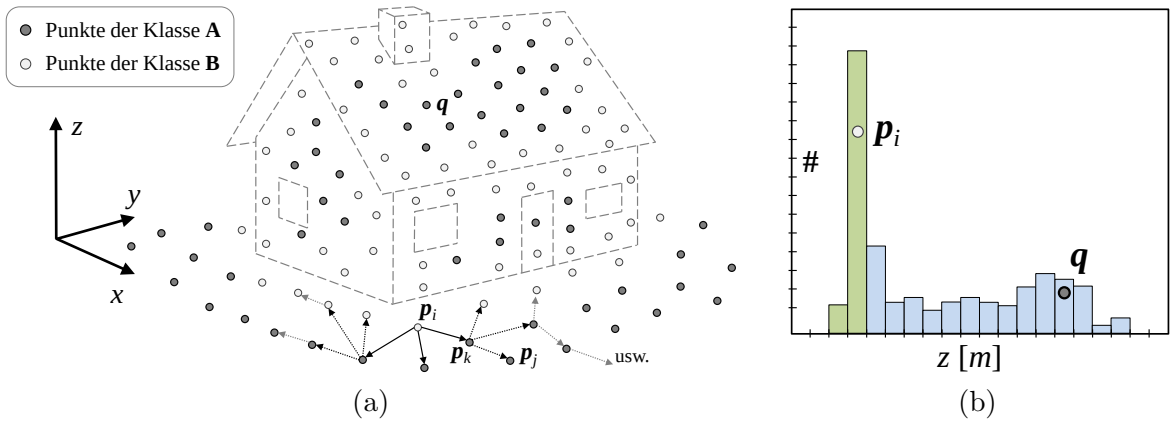


Abbildung 4.7: Lokale Verteilung der Höhenwerte in ALS-Punktwolken urbaner Gebiete: (a) Ausschnitt S der Punktwolke P, (b) Höhenhistogramm zu S.

- Die Schwelle $d_{\max}$ kann global oder lokal definiert werden. Sie entscheidet darüber, wie ähnlich sich die Punkte in R bezüglich des Ähnlichkeitsmaßes d tatsächlich sein müssen.
- Das Ähnlichkeitsmaß d ist die wesentliche Komponente des Region Growing Verfahrens. Nur wenn d entsprechend der Eigenschaften des gesuchten Objekts definiert ist, wird das Gebietswachstum zum gewünschten Ergebnis gelenkt. Auch d kann global oder lokal definiert sein, d.h. entweder finden Vergleiche zwischen benachbarten Punkten statt oder die Punkte werden immer mit dem Saatpunkt verglichen.

Dort wo 3D-Punkte nicht volumendurchdringend auftreten, sondern die diskrete Abtastung einer Oberfläche darstellen, besteht die Segmentierung der Punktwolke meist in der Suche nach Flächenstücken mit einheitlicher Beschaffenheit. Gebietswachstum kann dann als *Flächenwachstum* eingesetzt werden. Ein konkretes Beispiel hierfür ist die Bodensegmentierung, d.h. die Identifikation und Filterung aller ALS-Messpunkte, die weder mit Vegetation noch mit Bebauung in Verbindung stehen, sondern die die Grundfläche des Geländes wiedergeben. In dieser Arbeit ist die Bodensegmentierung mittels Flächenwachstum eines der ersten Glieder in der Verarbeitungskette für ALS-Punktwolken.

Ausgangspunkt der Bodensegmentierung ist die Suche nach geeigneten Saatpunkten, also solchen Datenpunkten, die mit großer Wahrscheinlichkeit tatsächlich am Boden gemessen wurden. Einerseits besteht die Möglichkeit, solche Saatpunkte bei einer visuellen Prüfung der Punktwolke manuell festzulegen. Andererseits soll in der vorliegenden Arbeit vor allem eine Abfolge von automatischen Verarbeitungsschritten gezeigt werden, weswegen die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise verwendet wird. Es sei $\boldsymbol{q}$ ein zufällig gewählter 3D-Punkt in der Punktwolke P. Betrachtet wird die Menge S aller Datenpunkte in einer größeren Umgebung von $\boldsymbol{q}$ (z.B. innerhalb eines Radius von 50 m). Abbildung 4.7a zeigt einen solchen Ausschnitt aus P. Gegenstand der Betrachtung ist die Verteilung der Höhenwerte (z-Koordinate) aller Elemente in S. Handelt es sich hierbei merklich um eine multimodale Verteilung, so finden sich die Bodenpunkte im Histogramm der Höhenwerte als erstes Maximum wieder (Abbildung 4.7b). Punkte $\boldsymbol{p}_i$ unterhalb dieser Maximumstelle können zur Initialisierung des Region Growing herangezogen werden. Der Vorgang wird mit weiteren zufällig gewählten Punkten $\boldsymbol{q}$ wiederholt, um an verschiedenen Stellen in P möglichst geeignete Saatpunkte zu identifizieren.

In Frage kommende Saatpunkte $\boldsymbol{p}_i$ werden einer Menge G hinzugefügt. Wie in der allgemeinen Beschreibung des Gebietswachstums erläutert wurde, lösen alle in G neu aufgenommenen Punkte eine Umgebungssuche nach ähnlichen Datenpunkten in P aus. Im Rahmen der Bodensegmentierung kann „Ähnlichkeit“ etwa bedeuten, dass die zwischen benachbarten Punkten erkennbare

Steigung z.B. für Fußgänger überwindbar wäre. Dementsprechend wird folgendes Ähnlichkeitsmaß definiert:

$$d(\boldsymbol{p}_i, \boldsymbol{p}_k) = \frac{\text{Höhe}(\boldsymbol{p}_k) - \text{Höhe}(\boldsymbol{p}_i)}{\|\boldsymbol{p}_i - \boldsymbol{p}_k\|}. \tag{4.3}$$

Der 3D-Punkt $\boldsymbol{p}_i$ ist dabei bereits in G enthalten, während $\boldsymbol{p}_k$ einen an $\boldsymbol{p}_i$ angrenzenden Punkt in P bezeichnet, dessen „Eignung“ als Bodenpunkt hier getestet wird. Gleichung 4.3 beschreibt die geschätzte Geländesteigung von $\boldsymbol{p}_i$ nach $\boldsymbol{p}_k$, wobei ein negativer Wert von d auf ein Gefälle hindeutet. Eine mögliche obere Schranke für d kann zum Beispiel als $d_{\max}$=0.25 festgelegt werden. Um ein serpentinenartiges Hinaufklettern des Flächenwachstums an Fassaden zu verhindern, wird für $\boldsymbol{p}_k$ zusätzlich gefordert, dass dieser Datenpunkt in seiner lokalen Umgebung keine anderen Punkte deutlich überragen darf. Stattdessen muss zum Beispiel $\text{Höhe}(\boldsymbol{p}_k) - \text{Höhe}(\boldsymbol{p}_j) \leq 0.5$ m für alle Punkte $\boldsymbol{p}_j$ in der Umgebung von $\boldsymbol{p}_k$ gelten. Nur wenn neben $d(\boldsymbol{p}_i, \boldsymbol{p}_k) \leq d_{\max}$ auch diese Bedingung erfüllt ist, wird $\boldsymbol{p}_k$ in G aufgenommen.

Am Ende des Wachstumsprozesses ist eine Menge G entstanden, die alle im Rahmen der Suchkriterien in P erreichbaren und zutreffenden Datenpunkte beinhaltet. Diese Punkte werden schließlich der Klasse **G** (Bodenpunkte) zugeordnet. Die vorgestellte Methode kann unter Umständen zu ungetesteten Bereichen in der Punktwolke führen (z.B. Innenhöfe), ihre Ergebnisse sind aber für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit mehr als ausreichend. Eine Übersicht über methodisch weiterführende Verfahren zur Bodensegmentierung kann im Artikel von Sithole & Vosselman [2004] gefunden werden.

4.2.3 RANSAC-basierte Ebenensegmentierung

ALS-Daten urbaner Gebiete enthalten nach der Filterung der Bodenpunkte in erster Linie noch solche 3D-Messwerte, die Vegetation, Fahrzeuge und vor allem Gebäude wiedergeben. In Abschnitt 2.1 wurde bereits motiviert, dass sich übliche Formen urbaner Architektur durch die Segmentierung planarer Flächenstücke ausfindig machen lassen. Dieser Unterabschnitt stellt ein Verfahren vor, das eine vollständige 3D-Punktwolke nach planaren Regionen durchsucht und dabei Ebenensegmente liefert, die mit großer Wahrscheinlichkeit auf Fassaden und Dachflächen innerhalb des urbanen Gebiets zurückzuführen sind.

Ähnlich dem Vorgehen bei der Bodensegmentierung liegt es nahe, die Identifizierung „planarer Untermengen“ mit solchen Punkten zu beginnen, für die die Zugehörigkeit zu einer Ebene bereits vermutet werden kann. Eine wichtige Vorarbeit hierzu ist die in Abschnitt 4.2.1 durchgeführte lokale Hauptkomponentenanalyse. Datenpunkte der Klasse **A** zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der Punktwolke P zumindest lokal in eine planare Umgebung eingebettet sind. Es ist daher vielversprechend, jeweils ausgehend von einem solchen Punkt ein Flächenwachstum zu starten. Problematisch ist dabei allerdings, dass die Ebenenparameter (Position, Normalenvektor) zunächst nur aufgrund der Attribute des Saatpunkts geschätzt werden, obwohl dieser in der Regel kein optimaler Repräsentant der übergeordneten Ebene ist. Stattdessen wird vorgeschlagen, einen iterativen Wechsel zwischen Region Growing und direkter Ebenenanpassung vorzunehmen, um dadurch die Ebenenparameter und die zugehörigen Datenpunkte unabhängig vom Saatpunkt zu bestimmen. Da beim Flächenwachstum auch Punkte der Klasse **B** berücksichtigt werden müssen, werden womöglich auch solche Punkte eingesammelt, die nicht unmittelbar zur gesuchten Ebene gehören. Bei Dachflächen können diese Zusatzpunkte z.B. durch Gauben oder Schornsteine verursacht werden. Um die Ebenenanpassung trotzdem *robust* durchführen zu können, wird im Folgenden ein RANSAC-Auswahlschema verwendet.

Das Random-Sample-Consensus Paradigma (RANSAC) ist eine spezielle Vorgehensweise zum Schätzen von Modellparametern auf der Basis von beobachteten Daten. Es wurde von Fischler & Bolles [1981] erstmals beschrieben. Die RANSAC-Methode eignet sich vor allem dann, wenn viele der Messdaten durch das gegebene Modell erklärt werden können, aber gleichzeitig etliche

„unpassende“ Daten in den Beobachtungen vorliegen. Letztere werden in diesem Zusammenhang auch als *Ausreißer* bezeichnet. Mehrere Voraussetzungen müssen erfüllt sein, bevor das RANSAC-Verfahren eingesetzt werden kann:

- Es muss eine klare Modellvorstellung existieren, die das Zustandekommen eines Großteils der Beobachtungen erklärt (konkretes Beispiel: Eine Ebene soll an Laserpunkte angepasst werden, da diese entlang einer Fassade gemessen wurden).
- Zum Schätzen der Modellparameter muss eine Prozedur vorhanden sein, die diese Parameter mit der minimal benötigten Menge an Datenpunkten ermittelt (konkretes Beispiel: Sind drei nicht-kollineare 3D-Punkte gegeben, so kann die Ebene durch diese Punkte leicht bestimmt werden).
- Nach dem Schätzen der Modellparameter muss es möglich sein, alle vorhandenen Datenpunkte hinsichtlich ihres Abstands zu diesem Modell zu bewerten (konkretes Beispiel: Für 3D-Punkte lässt sich der euklidische Abstand zu einer gegebenen Ebene mit Hilfe der hesseschen Normalform berechnen).

Andere Verfahren zur Parameterschätzung sehen vor, bei der Modellanpassung einen Kompromiss zu finden, z.B. in der Weise, dass die Summe der Fehlerquadrate minimiert wird (Ausgleichung). Beim RANSAC-Vorgehen wird das nicht versucht. Stattdessen ist man bestrebt, zunächst die Ausreißer in den Daten ausfindig zu machen, um diese letztlich von der Ausgleichung auszuschließen. Das Besondere dabei ist, dass die Modellparameter mit einer dazu minimal benötigten Auswahl (engl. Sample) an Datenpunkten geschätzt werden, wobei diese Auswahl zufällig (engl. Random) getroffen wird. Anschließend wird überprüft, wie gut die restlichen Daten sich in Übereinstimmung (engl. Consensus) mit dem so gefundenen Modell befinden. Dieser Vorgang wird mehrfach mit verschiedenen zufällig gewählten Datenpunkten wiederholt, bis eine möglichst große *Übereinstimmungsmenge* (engl. Consensus Set) gefunden worden ist. Die Elemente dieser Übereinstimmungsmenge werden *Inlier* genannt, alle übrigen Datenpunkte sind *Outlier*, also die Ausreißer, die von der abschließenden Ausgleichungsrechnung auszuschließen sind.

Das RANSAC-Verfahren schätzt die Modellparameter auch dann zuverlässig, wenn die Daten von vielen abweichenden Messwerten geprägt sind. Man sagt dann auch, das Verfahren ist „*robust* gegenüber Ausreißern“. Es gibt durchaus ebenfalls robuste Alternativen zum RANSAC, beispielsweise die iterative Gewichtung (engl. Iteratively Reweighted Least Squares, IRLS). Anstelle von Gewichtungsfaktoren verwendet RANSAC eine Schwelle, die darüber entscheidet, wann ein Punkt als Inlier oder Outlier angesehen wird. Die Festlegung dieses Schwellwerts, die Anzahl benötigter Tests und die zufällige Auswahl von Datenpunkten werden mitunter kontrovers diskutiert (siehe z.B. Michaelsen et al. [2006], Scherer-Negenborn & Schäfer [2010]). In der Anwendung zeigt RANSAC einige Vorteile. So ist die Bestimmung von Modellparametern sehr schnell möglich, da immer nur wenige Datenpunkte herangezogen werden. Ungeachtet der statistisch begründeten Mindestanzahl an Iterationen kann das Verfahren jederzeit gestoppt werden, wobei die zu diesem Zeitpunkt beste Übereinstimmungsmenge verwendet wird. Das RANSAC-Verfahren kann sich also in gewissem Umfang an Laufzeitbeschränkungen oder Qualitätsanforderungen anpassen.

Eine gängige Anwendung des RANSAC-Verfahrens ist die Filterung fehlerhafter Pixelpaarungen zwischen zwei perspektivisch unterschiedlichen Bildern der gleichen Szene. Dies geschieht zum Beispiel mit dem Ziel, aufgrund der verbleibenden korrekten Zuordnungen die Fundamentalmatrix zu schätzen, welche die geometrische Beziehung zwischen beiden Bildern spezifiziert. In der vorliegenden Arbeit werden aber andere Ziele verfolgt. Das relevante Anwendungsbeispiel ist hier die Anpassung einer Ebene an 3D-Punkte, für die das RANSAC-basierte Vorgehen wie folgt beschrieben werden kann: Gegeben sei eine Menge S von 3D-Punkten $\{\boldsymbol{p}_1, \ldots, \boldsymbol{p}_n\}$, von deren Elementen angenommen wird, dass viele näherungsweise eine Ebene repräsentieren

(Inlier) und einige andere davon abweichen (Outlier). Eine klassische Ausgleichung unter Minimierung der Fehlerquadrate würde aufgrund der Ausreißer nicht die gewünschte Ebenengleichung liefern. Stattdessen wird eine Ebene durch drei nicht-kollineare Punkte $\boldsymbol{p}_i$, $\boldsymbol{p}_j$ und $\boldsymbol{p}_k$ erzeugt, welche zufällig aus S ausgewählt werden. Der Normalenvektor $\boldsymbol{n}_0$ dieser Ebene ergibt sich durch $\boldsymbol{n} = (\boldsymbol{p}_i - \boldsymbol{p}_j) \times (\boldsymbol{p}_i - \boldsymbol{p}_k)$, $\boldsymbol{n}_0 = \boldsymbol{n} / \|\boldsymbol{n}\|$, und mit $(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{p}_i) \cdot \boldsymbol{n}_0 = 0$ ist die hessesche Normalform der Ebene gegeben. Unter Verwendung dieser Darstellung kann der euklidische Abstand $|(\boldsymbol{p} - \boldsymbol{p}_i) \cdot \boldsymbol{n}_0|$ eines beliebigen Punkts $\boldsymbol{p}$ zu dieser Ebene leicht berechnet werden. Fällt der Abstand unter eine vordefinierte Schranke, wird $\boldsymbol{p}$ als Inlier gewertet, andernfalls als Outlier. Der verwendete Schwellwert beschreibt etwa die erwartete Rauigkeit und Unebenheit realer Gebäudeflächen. Die Anzahl der Inlier und ebenso die durchschnittliche Distanz aller Inlier zur gefundenen Ebene werden zur Bewertung der Qualität der Modellanpassung herangezogen. Beginnend mit der erneuten Wahl dreier zufälliger Punkte wird der gesamte Vorgang mehrfach wiederholt, um eine möglichst gute Abtrennung von Ausreißern zu finden. Die beste gefundene Übereinstimmungsmenge S_C wird schließlich zur Bestimmung einer ausgleichenden Ebene E berücksichtigt. Diese kann beispielsweise durch eine Hauptkomponentenanalyse von S_C entsprechend der in Abschnitt 4.2.1 dargestellten Berechnung gefunden werden.

Anwendung auf ALS-Daten urbaner Gebiete

Die vorangegangenen Absätze haben erläutert, wie die Gleichung einer Ebene anhand von 3D-Messwerten robust geschätzt werden kann. Um dieses Vorgehen auf ALS-Daten urbaner Gebiete anwenden zu können, müssen zusammenhängende Untermengen der Gesamtpunktwolke bereits ausfindig gemacht worden sein, die jeweils zum Beispiel einzelne Dächer oder Fassaden repräsentieren. Umgekehrt werden die Elemente dieser Untermengen aber gerade erst durch die RANSAC-basierte Ebenenanpassung genauer bestimmt, sodass zwei voneinander abhängige Probleme vorliegen:

1. In der Punktwolke sollen möglichst vollständige Regionen gefunden werden, die als planare Flächenstücke beschrieben werden können.

2. Durch die RANSAC-basierte Ebenenanpassung sollen Einzelpunkte entfernt werden, die nicht zur planaren Region gehören.

In Algorithmus 1 wird ein automatisches Verfahren beschrieben, welches beide Probleme alternierend in einem iterativen Prozess löst. Am Anfang des Verfahrens steht als Eingabe eine unregelmäßige ALS-Punktwolke P, wie sie bei der Erfassung eines urbanen Gebiets durch direkte Georeferenzierung von Laserentfernungsmessungen gemäß Gleichung 3.1 entsteht. Im Falle einer Mehrfachbefliegung des untersuchten Geländes (engl. Region of Interest, ROI) und der damit verbundenen Erfassung von überlappenden Multi-Aspekt Datensätzen $\{P_A, P_B, \dots\}$ wird jeder Überflug zunächst individuell betrachtet. Zur Durchführung von Suchoperationen wird auf P ein k-d Baum als Suchstruktur eingeführt. Anschließend werden alle Einzelpunkte durch eine lokale Hauptkomponentenanalyse vorklassifiert, und die Menge der Bodenpunkte wird durch ein Flächenwachstumsverfahren ermittelt. Details dieser Schritte ⟨1⟩-⟨3⟩ wurden bereits in den Abschnitten 4.1.3, 4.2.1 und 4.2.2 genannt.

Der Algorithmus passt sukzessive Ebenen an lokale Ausschnitte des Datensatzes an, wo immer sich dies als möglich erweist. Zu Beginn jedes Durchlaufs der äußeren Schleife wird ein bislang ungetesteter Datenpunkt der Klasse **A** ausgewählt, der als Ausgangspunkt für Ebenenanpassung und Flächenwachstum dient. Zuvor wird in ⟨5⟩ überprüft, ob dessen Umgebung konsistente Normalenrichtungen aufweist, sodass von einer nennenswert großen Ebene ausgegangen werden kann. In den folgenden Schritten wird versucht, eine Ebene an diese Umgebung anzupassen. Durch das

Eingabe : 3D-Punktwolke P
Ausgabe : Untermengen von P, die jeweils ein planares Flächensegment bilden

⟨1⟩ Organisiere die 3D-Punkte von P in einer Suchstruktur, z.B. unter Verwendung eines Octrees oder eines k-d Baums (Abschnitt 4.1.3).

⟨2⟩ Führe eine lokale Hauptkomponentenanalyse für jeden Punkt $\boldsymbol{p}_k$ in P durch. In Abhängigkeit von den Größenverhältnissen der Eigenwerte wird $\boldsymbol{p}_k$ entweder der Klasse **A** oder der Klasse **B** zugeordnet (Abschnitt 4.2.1). Punkten der Klasse **A** wird dabei der lokale Normalenvektor $\boldsymbol{n}_k$ als zusätzliches Attribut zugewiesen.

⟨3⟩ Identifiziere Punkte der Klasse **G** (Bodenpunkte) mit Hilfe eines Region Growing Verfahrens (Abschnitt 4.2.2). P_{nG} bezeichne die Menge aller Punkte, die nicht dem Boden zuzurechnen sind.

äußere Schleife

⟨4⟩ Wähle einen bislang noch nicht prozessierten Punkt $\boldsymbol{p}_i$ der Klasse **A** unter den Datenpunkten in P_{nG} aus.

⟨5⟩ Prüfe, ob sich in einer Umgebung vom Radius r um $\boldsymbol{p}_i$ benachbarte Punkte der Klasse **A** befinden. Füge diese nebst $\boldsymbol{p}_i$ einer neuen Menge S hinzu, falls ihre zugeordnete Normalenrichtung ähnlich der von $\boldsymbol{p}_i$ ist.

⟨6⟩ Setze den Zähler m der inneren Schleife auf Null.

innere Schleife

⟨7⟩ Wenn S mehr als eine Mindestanzahl an Punkten enthält, setze $S' := \emptyset$ und erhöhe den Zähler m um eins. Ansonsten markiere den Punkt $\boldsymbol{p}_i$ als verarbeitet und gehe zu Schritt ⟨17⟩.

⟨8⟩ Führe eine RANSAC-basierte Ebenenanpassung an die 3D-Punkte der Menge S durch (Abschnitt 4.2.3).

⟨9⟩ Falls die Anzahl der Inlier gering im Vergleich zur Anzahl der Outlier ist, markiere den Punkt $\boldsymbol{p}_i$ als verarbeitet und gehe zu Schritt ⟨17⟩.

⟨10⟩ Bestimme zur Menge der Inlier eine Ausgleichungsebene E im Sinne einer Minimierung der Fehlerquadrate und erhalte deren hessesche Normalform $E : (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{p}) \cdot \boldsymbol{n}_0 = 0$.

⟨11⟩ Lege $\boldsymbol{p}_i$ auf einen Stapel (eine „Last In – First Out“- bzw. LIFO-Datenstruktur).

Region Growing

⟨12⟩ Entnehme das oberste Element $\boldsymbol{p}_j$ des Stapels.

⟨13⟩ Überprüfe jeden Punkt $\boldsymbol{p}_k$ in einer Umgebung vom Radius r um $\boldsymbol{p}_j$, der noch nicht diesbezüglich überprüft wurde, ob er hinreichend nahe an der Ebene E liegt, ob also $|(\boldsymbol{p}_k - \boldsymbol{p}) \cdot \boldsymbol{n}_0| \leq \varepsilon$ gilt. Ist das der Fall, füge den Punkt $\boldsymbol{p}_k$ der Menge S' hinzu. Wenn $\boldsymbol{p}_k$ zusätzlich zur Klasse **A** gehört und $|\boldsymbol{n}_k \cdot \boldsymbol{n}_0| \approx 1$ eine zutreffende Normalenrichtung anzeigt, lege $\boldsymbol{p}_k$ auf den Stapel.

⟨14⟩ Solange der Stapel nicht leer ist, gehe zu Schritt ⟨12⟩, ansonsten fahre fort mit Schritt ⟨15⟩.

⟨15⟩ Sobald der Zähler m sein vordefiniertes Maximum erreicht hat (z.B. drei Durchläufe), markiere alle Punkte in S' als verarbeitet, bestimme die Merkmale des durch S' definierten Ebenensegments (Abschnitt 4.2.5) und gehe zu Schritt ⟨17⟩. Ansonsten fahre fort mit Schritt ⟨16⟩.

⟨16⟩ Gehe mit der Punktmenge $S := S'$ zurück zu Schritt ⟨7⟩.

⟨17⟩ Wiederhole das Verfahren ab Schritt ⟨4⟩ bis alle in Frage kommenden Punkte verarbeitet wurden.

Algorithmus 1: Ebenensegmentierung in einer unregelmäßigen 3D-Punktwolke P.

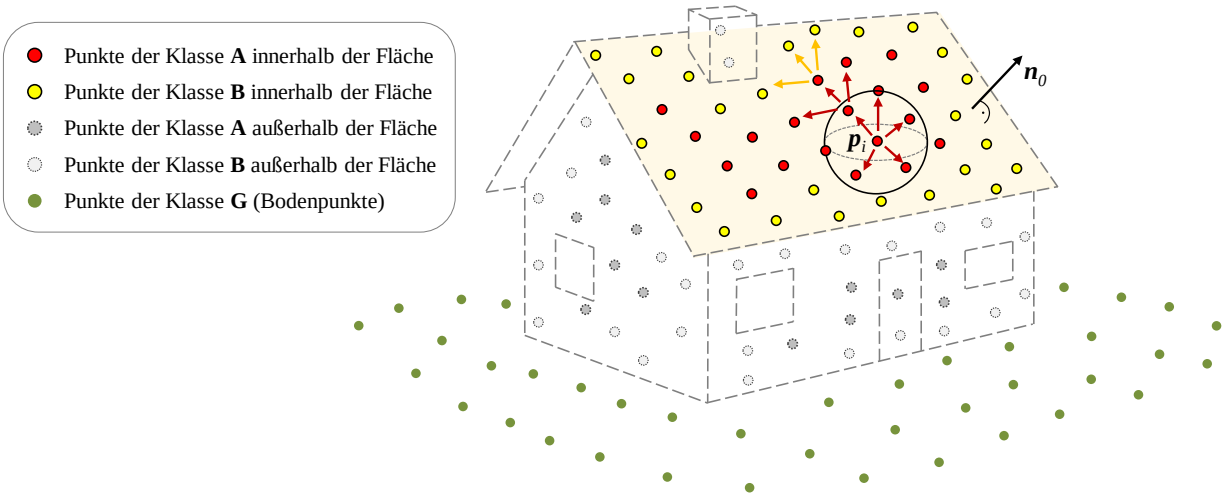
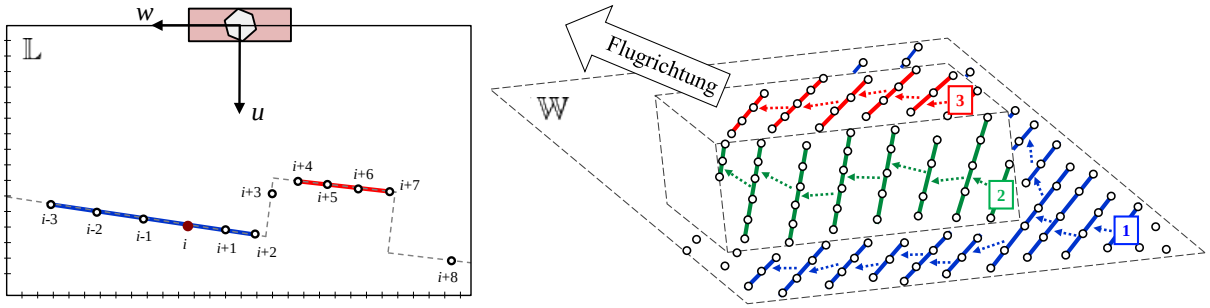


Abbildung 4.8: Extraktion planarer Regionen in einer unregelmäßigen Punktwolke P.

dabei verwendete RANSAC-Verfahren lassen sich Parameter der Ebenengleichung robust bestimmen, wobei gleichzeitig eine Bewertung der Qualität stattfinden kann (z.B. ausgedrückt durch die Anzahl der Inlier). Stellt sich dabei heraus, dass die lokal vorliegenden Datenpunkte nicht durch eine Ebene approximiert werden können, wird diese Position verworfen und an anderer Stelle mit dem Verfahren neu begonnen. Andernfalls wird versucht, die bislang gefundene planare Region möglichst weit zu expandieren und dabei zusätzliche benachbarte Punkte zu finden, die in dieser Ebene enthalten sind. Hierfür wird in den Schritten ⟨12⟩-⟨14⟩ ein Region Growing Verfahren eingesetzt. Der dort verwendete Schwellwert ε ist weniger restriktiv als der des RANSAC-Verfahrens in Schritt ⟨8⟩, sodass sich eine anfängliche Fehlstellung der Ebene in den weiteren Durchläufen noch korrigieren lässt. Bemerkenswerterweise werden Punkte der Klasse **A** und Punkte der Klasse **B** während des Flächenwachstums verschieden behandelt. Nur Punkte der Klasse **A** mit passendem Normalenvektor sind in der Lage, „aktiv“ eine Suche nach weiteren Punkten in ihrer Nachbarschaft auszulösen. Hingegen werden andere Punkte zwar zur wachsenden Fläche hinzugenommen, sie verhalten sich dabei aber „passiv“, d.h. das Wachstum der Fläche stoppt an diesen Stellen. Durch diese Unterscheidung wird ein Verschmelzen von planaren Regionen mit unterschiedlicher Orientierung vermieden. In der inneren Schleife werden Ebenenanpassung und Flächenwachstum z.B. zwei- oder dreimal mit allen bis dahin gesammelten Punkten wiederholt, um den anfänglichen Einfluss des Saatpunkts auf die Ebenenparameter aufzuheben. Resultat der äußeren Schleife ist jeweils eine Menge S' zusammenhängender Punkte, was im weiteren Verlauf der Arbeit auch *Verbund* genannt wird, sowie eine zugehörige Ebenengleichung E, die die Eigenschaften dieses Verbunds als planare Region beschreibt. Algorithmus 1 wird also zur Identifikation derjenigen Punkte verwendet, die bei der ALS-Datenerfassung an Gebäuden gemessen wurden, und gleichzeitig findet eine Abtrennung einzelner planarer Segmente vom Hintergrund statt. Abbildung 4.8 gibt einen Einblick in den Verfahrensablauf bei der Bestimmung einer Dachfläche.

4.2.4 Scanzeilenauswertung und Gruppierung

Die in Algorithmus 1 beschriebene Ebenensegmentierung und alle darin verwendeten Methoden aus den Abschnitten 4.2.1, 4.2.2 und 4.2.3 setzen voraus, dass eine ALS-Punktwolke des urbanen Gebiets bereits vollständig erfasst wurde, bevor mit der Datenauswertung begonnen wird. In der Unterscheidung von Randbedingungen, wie sie in Kapitel 1 und dort insbesondere in Abschnitt 1.2 getroffen wurde, entspricht dies den Gegebenheiten bei der Erstellung einer Referenzdatenbank zum Zeitpunkt t_1. Dieser Vorgang ist nicht zeitkritisch und kann mit einer nachträglichen Daten-



(a) (b)

Abbildung 4.9: (a) Segmentierung der Scanzeile in $\mathbb{L}$, (b) Gruppierung komplanarer Geradensegmente in $\mathbb{W}$.

prozessierung einhergehen. Anders verhält es sich während der Mission zum Zeitpunkt t_2, da dort eine schritthaltende Verarbeitung der ALS-Daten erforderlich ist. Auch in dieser Situation ist eine Segmentierung planarer Regionen und eine Klassifizierung der ALS-Messungen wünschenswert, um zunächst eine robuste Angleichung aktueller Daten an den Referenzdatensatz vornehmen zu können. Anschließend lässt sich durch die objektbasierte Analyse eine genauere Beschreibung detektierter Änderungen liefern. Eine Klassifizierung einzelner Laserpulse kann sich bereits durch die Auswertung der Signalform ergeben, wodurch z.B. eine Unterscheidung von Vegetation und Oberflächen ermöglicht wird. Dies setzt allerdings den Einsatz eines Full Waveform Laserscanners voraus. Wenn größere Segmente in den Daten ausfindig gemacht werden müssen, ist in jedem Fall auch eine Untersuchung der geometrischen Beziehungen benachbarter Messwerte erforderlich.

In Abschnitt 4.1.4 wurde erläutert, dass die schritthaltende Untersuchung von räumlichen Zusammenhängen in ALS-Daten auf der Kenntnis des Scanmusters und der zeitlichen Abfolge der Messungen aufbauen kann. Bei der Verwendung eines Zeilenscanners lassen sich die Entfernungsmessungen einer einzelnen Scanzeile bereits vor der direkten Georeferenzierung in einem zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem $\mathbb{L}$ betrachten, wie es in Abbildung 4.3 gezeigt wird. Die 2D-Einzelpunkte sind darin entsprechend ihrer Reihenfolge bei der Messung geordnet. In Relation zur hohen Scangeschwindigkeit des Laserscanners können unregelmäßige Flugbewegungen des Sensorträgers nahezu vernachlässigt werden, sodass die Lage einer einzelnen Scanzeile in $\mathbb{W}$ praktisch dem Schnitt der Scanebene mit dem Gelände entspricht. Das bedeutet aber auch, dass vom Lasersensor abgetastete planare Objektoberflächen als geradlinige 2D-Segmente innerhalb der Scanzeilen in $\mathbb{L}$ erscheinen. Die in diesem Abschnitt vorgeschlagene Methode zur schritthaltenden 3D-Ebenensegmentierung besteht daher im Wesentlichen aus drei Komponenten:

1. Auswertung in $\mathbb{L}$: In den geordneten 2D-Daten einzelner Scanzeilen werden geradlinige Segmente erkannt und von unstrukturierten Abschnitten unterschieden (Abbildung 4.9a).

2. Auswertung in $\mathbb{W}$: Nach der direkten Georeferenzierung werden kollineare 3D-Geradensegmente innerhalb der gleichen Scanzeile verschmolzen, falls sie sich überlappen oder ergänzen.

3. Auswertung in $\mathbb{W}$: Komplanare Geradensegmente benachbarter Scanzeilen werden fortlaufend zu wachsenden 3D-Flächenstücken gruppiert (Abbildung 4.9b).

Geradensegmentierung in Scanzeilen des Laserscanners

Die Problemstellung in Schritt 1 zeigt deutliche Parallelen zur zuvor besprochenen Ebenensegmentierung in 3D-Punktwolken. Unterschiede bestehen lediglich in der Dimension (2D statt 3D) und in der Datenstruktur (geordnete Liste anstelle eines Suchbaums). Konsequenterweise ist das

Eingabe : Scanzeile F mit n geordneten Elementen, wovon jedes aus einem Tupel $(\boldsymbol{r}_L, R_S, \boldsymbol{p}_N, R_N)$ besteht
Ausgabe : Untermengen von F, die jeweils einem 3D-Geradensegment entsprechen

⟨1⟩ Für alle $i = 1, \ldots, n$ berechne $\boldsymbol{s}_{L,i} = R_{S,i} \circ \boldsymbol{r}_{L,i}$ und bestimme die zugehörigen 2D-Koordinaten $\boldsymbol{a}_i = (u_i, w_i)$ in $\mathbb{L}$. Berechne dann die direkte Georeferenzierung der 3D-Laserpunkte $\boldsymbol{p}_i = \boldsymbol{p}_{L,i} = \boldsymbol{p}_{N,i} + R_{N,i} \circ \boldsymbol{s}_{L,i}$ in $\mathbb{W}$.

⟨2⟩ Führe eine lokale 2D-Hauptkomponentenanalyse für jeden Punkt $\boldsymbol{a}_i$ aus $A = (\boldsymbol{a}_1, \ldots, \boldsymbol{a}_n)$ durch. Speichere den kleineren der beiden Eigenwerte als λ_i und den zugehörigen Eigenvektor als $\boldsymbol{n}_i$. Der Eigenwert λ_i zeigt an, wie geradlinig die Umgebung von $\boldsymbol{a}_i$ ist (Schwellwert κ).

äußere Schleife

⟨3⟩ Wähle eine bislang noch nicht verarbeitete Scanzeilenposition i aus, deren zugehöriger 2D-Punkt $\boldsymbol{a}_i$ mit $\lambda_i \leq \kappa$ eine geradlinige Umgebung in $\mathbb{L}$ aufweist.

⟨4⟩ Füge alle 2D-Datenpunkte in einem hinreichend großen Umkreis von $\boldsymbol{a}_i$ einer neuen Menge S hinzu. Hierzu wird $\|\boldsymbol{a}_i - \boldsymbol{a}_{i\pm\iota}\| \leq r$ für ansteigende $\iota > 0$ überprüft.

⟨5⟩ Setze den Zähler m der inneren Schleife auf Null.

innere Schleife

⟨6⟩ Falls S mehr als eine Mindestanzahl an Punkten enthält, erhöhe den Zähler m um eins, setze $S' := \emptyset$ und setze $I' := \emptyset$. Ansonsten markiere die Position i als verarbeitet und gehe zu Schritt ⟨16⟩.

⟨7⟩ Führe eine RANSAC-basierte Geradenanpassung an die 2D-Punkte in S durch.

⟨8⟩ Falls die Anzahl der Inlier gering im Vergleich zur Anzahl der Outlier ist, markiere die Position i als verarbeitet und gehe zu Schritt ⟨16⟩.

⟨9⟩ Bestimme zur Menge der Inlier eine Ausgleichungsgerade L und erhalte deren hessesche Normalform $L : (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{a}) \cdot \boldsymbol{n}_0 = 0$.

⟨10⟩ Lege i auf einen Stapel (eine LIFO-Datenstruktur).

Line Growing

⟨11⟩ Entnehme das oberste Element j des Stapels.

⟨12⟩ Überprüfe jede Position k in einem Intervall um j, die noch nicht diesbezüglich überprüft wurde, ob der zugehörige 2D-Punkt $\boldsymbol{a}_k$ nahe an L liegt, ob also $|(\boldsymbol{a}_k - \boldsymbol{a}) \cdot \boldsymbol{n}_0| \leq \varepsilon$ gilt. Falls das so ist, füge $\boldsymbol{a}_k$ der Menge S' und k der Menge I' hinzu. Wenn zusätzlich $\lambda_k \leq \kappa$ und $|\boldsymbol{n}_k \cdot \boldsymbol{n}_0| \approx 1$ gilt, lege k auf den Stapel.

⟨13⟩ Solange der Stapel nicht leer ist, gehe zu Schritt ⟨11⟩, ansonsten fahre fort mit Schritt ⟨14⟩.

⟨14⟩ Solange der Zähler m noch nicht sein vordefiniertes Maximum erreicht hat (z.B. drei Durchläufe), gehe mit der Punktmenge $S := S'$ zurück zu Schritt ⟨6⟩.

⟨15⟩ Markiere alle in I' gespeicherten Positionen als verarbeitet. Bestimme die 3D-Ausgleichungsgerade zur Menge $\{\boldsymbol{p}_j\}_{j \in I'}$ z.B. durch PCA. Für $j_{\min} = \min I'$ und $j_{\max} = \max I'$ bestimme die zugehörigen Lotfußpunkte, die das resultierende 3D-Geradensegment begrenzen.

⟨16⟩ Wiederhole das Verfahren ab Schritt ⟨3⟩ bis alle in Frage kommenden Positionen verarbeitet wurden.

Algorithmus 2: Geradensegmentierung in den Daten einer Laser-Scanzeile F.

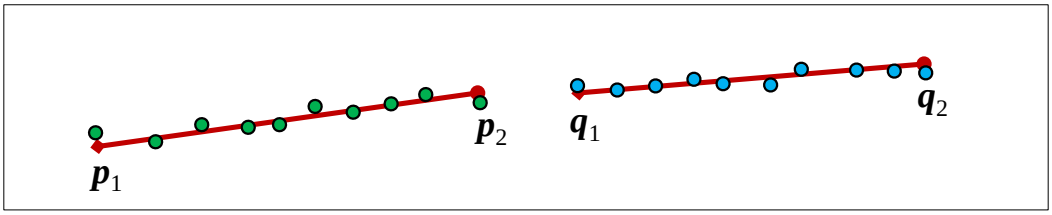


Abbildung 4.10: Zwei zu verschmelzende Geradensegmente in $\mathscr{L}$.

in Algorithmus 2 präsentierte Verfahren zur Geradensegmentierung in wesentlichen Teilen identisch zu Algorithmus 1. Die Eingabedaten von Algorithmus 2 bestehen aus der aktuell gemessenen Scanzeile. Dabei handelt es sich um ein einfach indiziertes Feld F, dessen Elemente jeweils alle Informationen zur direkten Georeferenzierung des zugehörigen 3D-Laserpunkts entsprechend Gleichung 3.1 beinhalten: $F_i = (\boldsymbol{r}_L, R_S, \boldsymbol{p}_N, R_N)_i$ für $i = 1, \ldots, n$. Hiervon wird eine geordnete Liste $A = (\boldsymbol{a}_1, \ldots, \boldsymbol{a}_n)$ von 2D-Elementen abgeleitet, worin die Punkte $\boldsymbol{s}_{L,i} = R_{S,i} \circ \boldsymbol{r}_{L,i}$ durch ihre Koordinaten $\boldsymbol{a}_i = (u_i, w_i)$ in $\mathbb{L}$ angegeben werden (vgl. Abschnitt 4.1.4). Die Anzahl n der Scanzeilenelemente kann variieren, da abgestrahlte Laserpulse entweder ein, kein oder mehrere Echos liefern. Das Ergebnis von Algorithmus 2 sind zusammenhängende Untermengen der Scanzeile, die jeweils als Geradensegment beschrieben werden können. Nach der direkten Georeferenzierung der Einzelpunkte wird zu jedem dieser Verbünde eine 3D-Ausgleichungsgerade bestimmt, wobei die Lotfußpunkte der jeweils äußeren Elemente das Geradensegment begrenzen.

Verschmelzen kollinearer Geradensegmente innerhalb einer Scanzeile

Nach der Anwendung von Algorithmus 2 auf die Daten einer einzelnen Scanzeile liegt eine Liste $\mathscr{L}$ von Geradensegmenten vor, deren Elemente jeweils durch zwei 3D-Endpunkte gegeben sind. In $\mathscr{L}$ sind möglicherweise Geradenstücke vorhanden, die kollinear sind und sich dabei entweder überlappen oder nur durch eine kleine Lücke getrennt werden, wie es in Abbildung 4.10 zu sehen ist. Weil davon ausgegangen werden kann, dass solche kollinearen Geradenstücke Bestandteile der gleichen planaren Fläche in $\mathbb{W}$ sind, können sie zu einem einzelnen Geradensegment verschmolzen werden. Dieser Vorgang ist Gegenstand der nachfolgenden Betrachtung.

Seien $(\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2)$ und $(\boldsymbol{q}_1, \boldsymbol{q}_2)$ zwei Elemente von $\mathscr{L}$, die jeweils durch die 3D-Endpunkte des Geradensegments gegeben sind. Innerhalb eines Geradensegments erfolgt die Nummerierung der Endpunkte entsprechend der zeitlichen Reihenfolge der zugehörigen Datenpunkte bei der Datenerfassung. Es werden zwei verschiedene Abstandsmaße ausgewertet, welche darüber entscheiden, ob die beiden Geradenstücke verschmolzen werden oder nicht. Das erste Abstandsmaß d_1 gibt darüber Auskunft, ob $(\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2)$ und $(\boldsymbol{q}_1, \boldsymbol{q}_2)$ sich überlappen. In diesem Fall würde $d_1 = 0$ gelten. Andernfalls liefert d_1 den kleinsten euklidischen Abstand von Endpunkten der beiden Geradensegmente. Unter Verwendung der wechselseitigen Verbindungen $\boldsymbol{v}_1 = \boldsymbol{p}_1 - \boldsymbol{q}_1$, $\boldsymbol{v}_2 = \boldsymbol{p}_1 - \boldsymbol{q}_2$, $\boldsymbol{v}_3 = \boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{q}_1$ und $\boldsymbol{v}_4 = \boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{q}_2$ wird d_1 wie folgt definiert:

$$d_1 := \begin{cases} \min(\|\boldsymbol{v}_1\|, \|\boldsymbol{v}_2\|, \|\boldsymbol{v}_3\|, \|\boldsymbol{v}_4\|), & \text{falls } \boldsymbol{v}_i \cdot \boldsymbol{v}_j \geq 0 \quad \forall i < j \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \tag{4.4}$$

Mit $\boldsymbol{p_v} = (\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1)/\|\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1\|$ und $\boldsymbol{q_v} = (\boldsymbol{q}_2 - \boldsymbol{q}_1)/\|\boldsymbol{q}_2 - \boldsymbol{q}_1\|$ sind die Parameter der Lotfußpunkte aller Endpunkte bezüglich des jeweils anderen Geradensegments wie folgt zu bestimmen:

$$\begin{aligned} s_1 &= (\boldsymbol{q}_1 - \boldsymbol{p}_1) \cdot \boldsymbol{p_v}, \quad & t_1 &= (\boldsymbol{p}_1 - \boldsymbol{q}_1) \cdot \boldsymbol{q_v}, \\ s_2 &= (\boldsymbol{q}_2 - \boldsymbol{p}_1) \cdot \boldsymbol{p_v}, \quad & t_2 &= (\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{q}_1) \cdot \boldsymbol{q_v}. \end{aligned} \tag{4.5}$$

Das zweite Abstandsmaß d_2 ist eine Kenngröße für die Kollinearität der beiden Geradensegmente. Es beschreibt die Summe aller euklidischen Abstände von Endpunkten des einen Geradensegments

zur Geraden, die durch das jeweils andere Geradensegment verläuft. Unter Verwendung der in Gleichung 4.5 berechneten Parameter s_1, s_2, t_1 und t_2 wird d_2 folgendermaßen ausgedrückt:

$$d_2 := \|\boldsymbol{p}_1 + s_1\boldsymbol{p_v} - \boldsymbol{q}_1\| + \|\boldsymbol{p}_1 + s_2\boldsymbol{p_v} - \boldsymbol{q}_2\| + \|\boldsymbol{q}_1 + t_1\boldsymbol{q_v} - \boldsymbol{p}_1\| + \|\boldsymbol{q}_1 + t_2\boldsymbol{q_v} - \boldsymbol{p}_2\| \,. \tag{4.6}$$

Die auf diese Weise definierten Abstandsmaße d_1 und d_2 ermöglichen es in Algorithmus 3, je zwei Elemente aus $\mathscr{L}$ auf ihren Abstand und ihre Kollinearität zu überprüfen. Wird ein Paar von Geradensegmenten mit geringen Abständen d_1 und d_2 gefunden, so werden diese mit einer gemeinsamen Markierung versehen. Die Suche nach solchen Paaren wird mehrfach wiederholt, bis ein stabiles Ergebnis der Markierungen erreicht ist. Abschließend werden alle Geradensegmente verschmolzen, die die gleiche Markierung aufweisen. Dies kann zum Beispiel dadurch geschehen, dass eine Neuberechnung der Ausgleichungsgeraden und der Lotfußpunkte stattfindet, wobei alle in Verbindung stehenden Datenpunkte berücksichtigt werden. Einfacher aber ungenauer ist die Festlegung des Gesamtsegments durch die zwei äußersten Endpunkte aller beteiligten Geradenstücke.

Eingabe : Liste $\mathscr{L}$ von Geradensegmenten einer Laser-Scanzeile F
Ausgabe : Liste $\mathscr{L}$, in der zusammengehörende Geradenstücke verschmolzen wurden

Schleife 1

⟨1⟩ Initialisiere die Markierung m als $m := 1$.

Schleife 2

⟨2⟩ Betrachte den nächsten Eintrag a in $\mathscr{L}$, beginnend mit dem ersten.

⟨3⟩ Falls a noch nicht markiert wurde, weise ihm die Markierung m zu und erhöhe m um eins.

Schleife 3

⟨4⟩ Überprüfe nacheinander alle Geradensegmente b, die in $\mathscr{L}$ nach a folgen, ob $d_1(a, b)$ und $d_2(a, b)$ unter vordefinierte Schranken fallen. Immer wenn das der Fall ist, gehe zu Schritt ⟨5⟩. Sonst fahre hier fort bis b das Ende der Liste $\mathscr{L}$ erreicht hat. Anschließend gehe zu Schritt ⟨6⟩.

⟨5⟩ Falls b noch unmarkiert ist, weise ihm die Markierung von a zu. Ansonsten setze die Markierung von a und b auf das Minimum der beiden vorliegenden Markierungen. Fahre mit der zuvor abgebrochenen Ausführung von Schritt ⟨4⟩ fort.

⟨6⟩ Gehe zurück zu Schritt ⟨2⟩ bis auch a am Ende von $\mathscr{L}$ angekommen ist.

⟨7⟩ Wiederhole den ganzen Ablauf ab Schritt ⟨1⟩ bis die Markierungen der Geradensegmente sich nicht mehr verändern.

⟨8⟩ Verschmelze alle Geradensegmente, die eine gemeinsame Markierung aufweisen.

Algorithmus 3: Verschmelzen kollinearer Geradensegmente in $\mathscr{L}$.

Fortlaufende Gruppierung komplanarer Geradensegmente benachbarter Scanzeilen

Die gegenseitige Zuordnung von komplanaren Geradensegmenten, die sich in der zeitlichen Abfolge der Scanzeilen auffinden lassen, kann ganz ähnlich zur zuvor beschriebenen Verschmelzung kollinearer Geradensegmente erfolgen. Hauptunterschied sind die betrachteten Abstandsmaße, da nun die Komplanarität anstelle der Kollinearität ausschlaggebend ist. Die entsprechenden Abstandsmaße werden im Folgenden definiert.

Erneut seien $(\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2)$ und $(\boldsymbol{q}_1, \boldsymbol{q}_2)$ zwei Geradensegmente, die durch ihre 3D-Endpunkte gegeben sind. Im Gegensatz zum vorherigen Abschnitt wird jetzt gefordert, dass $(\boldsymbol{p}_1, \boldsymbol{p}_2) \in \mathscr{L}_i$ und

$(\boldsymbol{q}_1, \boldsymbol{q}_2) \in \mathscr{L}_j$ in unterschiedlichen Scanzeilen vorliegen. Zur Überprüfung der Komplanarität wird für jeden Endpunkt dessen euklidischer Abstand zu derjenigen Ebene berechnet, welche durch die drei anderen Endpunkte verläuft (wenn diese nicht kollinear sind). Das Abstandsmaß d_3 ist die Summe dieser vier Abstände:

$$d_3 := \sum_4 \frac{|(\boldsymbol{p}_\alpha - \boldsymbol{p}_\delta) \cdot ((\boldsymbol{p}_\alpha - \boldsymbol{p}_\beta) \times (\boldsymbol{p}_\alpha - \boldsymbol{p}_\gamma))|}{\|(\boldsymbol{p}_\alpha - \boldsymbol{p}_\beta) \times (\boldsymbol{p}_\alpha - \boldsymbol{p}_\gamma)\|}, \tag{4.7}$$

wobei $\boldsymbol{p}_\alpha$, $\boldsymbol{p}_\beta$, $\boldsymbol{p}_\gamma$ und $\boldsymbol{p}_\delta$ die vier Endpunkte zyklisch durchlaufen. Mit den Notationen aus Gleichung 4.4 wird ein weiteres Abstandsmaß d_4 definiert, bei dem es sich um die euklidische Distanz der beiden Anfangspunkte, der beiden Endpunkte oder der Mitten beider Geradensegmente handelt, je nachdem welcher dieser Abstände der kleinste ist:

$$d_4 := \min(\|\boldsymbol{v}_1\|, \|\boldsymbol{v}_4\|, \frac{1}{2}\|\boldsymbol{v}_1 + \boldsymbol{v}_4\|). \tag{4.8}$$

Zusätzlich wird noch der Winkel betrachtet, den beide Geradensegmente einschließen. Mit $\boldsymbol{p_v} = (\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1)/\|\boldsymbol{p}_2 - \boldsymbol{p}_1\|$ und $\boldsymbol{q_v} = (\boldsymbol{q}_2 - \boldsymbol{q}_1)/\|\boldsymbol{q}_2 - \boldsymbol{q}_1\|$ wird d_5 wie folgt definiert:

$$d_5 := \arccos|\boldsymbol{p_v} \cdot \boldsymbol{q_v}|. \tag{4.9}$$

Unter Verwendung dieser Abstandsmaße wird die Zuordnung von Geradensegmenten zwischen verschiedenen Scanzeilen analog zu Algorithmus 3 durchgeführt. Es bestehen dennoch einige Unterschiede, da die fortschreitende Datenerfassung berücksichtigt werden muss. Außerdem reicht die Komplanaritätsbedingung noch nicht aus, um z.B. eine Übertragung von Markierungen über Gebäudekanten hinweg zu verhindern. Diese beiden Gründe führen dazu, dass in Algorithmus 4 zwei Datenfenster $\{\mathscr{L}_1, \ldots, \mathscr{L}_n\}$ und $\{\mathscr{L}_{n+1}, \ldots, \mathscr{L}_{2n}\}$ im Datenstrom mitgeführt werden, die insgesamt $2n$ zurückliegende Scanzeilen betreffen. Im ersten Fenster werden Verbindungen zwischen Geradensegmenten aufgrund der drei Abstandsmaße d_3, d_4 und d_5 identifiziert, aber noch nicht zur Gruppierung dieser Geradensegmente verwendet. Die Gruppierung erfolgt erst im zweiten Fenster, wo die 3D-Normalenrichtung der Geradensegmente als zusätzliches Merkmal ausgewertet werden kann. Die kontinuierliche Anwendung der drei Algorithmen 2-4 lässt im zeitlichen Ablauf der Datenerfassung Gruppen von Geradensegmenten gleicher Markierung entstehen, die jeweils mit den enthaltenen ALS-Datenpunkten ein planares Flächenstück repräsentieren (siehe Abbildung 4.9b).

4.2.5 Merkmalsextraktion und Zuordnung von Ebenensegmenten

In den nächsten Abschnitten werden verschiedene Bestandteile des Gesamtkonzepts zur automatischen Änderungsdetektion besprochen. An mehreren Stellen ist dabei die Registrierung und Angleichung unterschiedlicher ALS-Datensätze des gleichen urbanen Gebiets von Bedeutung. Im ersten Fall geht es darum, einen Referenzdatensatz neu aufzubauen. Hierfür werden Multi-Aspekt Daten eines zur Schrägsicht konfigurierten ALS-Systems verwendet, welches das betreffende Gebiet mehrfach entlang unterschiedlicher Flugbahnen erfasst (Zeitpunkt t_1). Die anfallenden Streifen müssen (ggf. auch erst nachträglich) zu einem einzigen Datensatz harmonisiert werden.

Der zweite Fall betrifft die (schritthaltende) Ausrichtung aktueller Laserdaten zu einer bestehenden Referenz, um eine automatische Erkennung von Änderungen vornehmen zu können (Zeitpunkt t_2). Prinzipiell eignen sich beide Fälle zur Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems, falls GNSS-bedingte Fehler durch nachträgliche Korrekturdaten (PPK) oder durch Echtzeitinformationen (RTK) von GNSS-Referenzstationen auf ein Minimum reduziert werden können. Die technischen Möglichkeiten und Einschränkungen wurden in Kapitel 3 besprochen. Zu den unterschiedlichen Randbedingungen werden in Abschnitt 4.3 zwei Kalibrierverfahren entwickelt.

Eingabe : Listen mit Geradensegmenten entsprechend der Scanzeilenabfolge bei der ALS-Datenerfassung

Ausgabe : Zuordnungen von Geradenstücken, die letztlich eine planare Fläche wiedergeben

⟨1⟩ Notation: Sei n die Anzahl der noch zu berücksichtigenden zurückliegenden Scanzeilen (z.B. $n = 5$). Bei $\mathscr{L}_0$ handelt es sich um die Liste der Geradenstücke in der aktuell gemessenen Scanzeile. $\mathscr{L}_1$ bezieht sich auf die erste zurückliegende Scanzeile, $\mathscr{L}_2$ auf die zweite und so weiter.

⟨2⟩ Prüfe zunächst jedes Geradenstück in $\mathscr{L}_0$, ob es bezüglich der Abstandsmaße d_3, d_4 und d_5 nahe an Geradenstücken in $\{\mathscr{L}_1, \ldots, \mathscr{L}_n\}$ liegt. Übereinstimmungen dieser Art werden als Verbindung vermerkt.

⟨3⟩ Nach Schritt ⟨2⟩ erhalten Geradensegmente in $\mathscr{L}_n$ keine neuen Verbindungen mehr. Daher werden zu diesem Zeitpunkt Normalenvektoren der Geradensegmente in $\mathscr{L}_n$ geschätzt. Für jedes Geradensegment in $\mathscr{L}_n$ werden dazu die damit verbundenen anderen Geradensegmente und deren enthaltene 3D-Punkte betrachtet. Falls diese Punktmenge wenige Elemente enthält oder die RANSAC-basierte Ebenenanpassung viele Outlier liefert, wird das betreffende Geradensegment der Klasse **2** zugeordnet. Solche Geradensegmente sind typischerweise isoliert oder liegen nahe an einer Gebäudekante. Alle anderen Geradensegmente in $\mathscr{L}_n$ gehören zur Klasse **1**, wobei ihnen die soeben bestimmte 3D-Normalenrichtung zugewiesen werden kann.

⟨4⟩ Initialisiere alle Geradensegmente in $\mathscr{L}_n$ mit ansteigenden Markierungsnummern (überschreibe/lösche dabei Markierungen aus Algorithmus 3).

Schleife

⟨5⟩ Prüfe jedes Geradenstück in $\mathscr{L}_n$, ob es bezüglich der Abstandsmaße d_3, d_4 und d_5 nahe an Geradenstücken in $\{\mathscr{L}_{n+1}, \ldots, \mathscr{L}_{2n}\}$ liegt. Die entsprechenden Verbindungen wurden bereits zu einem früheren Zeitpunkt in Schritt ⟨2⟩ ermittelt.

⟨6⟩ Wenn eine Verbindung zwischen den Geradensegmenten a und b existiert, so können folgende Fälle auftreten:

- a und b sind von Klasse **2**: keine Aktion,
- nur ein Geradensegment ist von Klasse **1**: dessen Markierung wird auf das Geradensegment der Klasse **2** übertragen,
- a und b sind von Klasse **1**: Falls der Winkel der zugewiesenen Normalenrichtungen (analog zu d_5) unter eine vordefinierte Schranke fällt, setze die Markierungen beider Geradensegmente auf das Minimum der beiden vorliegenden Markierungen.

⟨7⟩ Wiederhole ab Schritt ⟨5⟩, bis die Markierungen einen stabilen Zustand erreichen.

Algorithmus 4: Gruppieren komplanarer Geradensegmente in unterschiedlichen Scanzeilen.

Falls der Sensorträger mit einem bereits kalibrierten ALS-System ausgestattet ist, kann der schritthaltende Vergleich von aktuellen Lasermessungen mit gespeicherten 3D-Daten auch zur automatischen Unterstützung des Piloten eingesetzt werden, z.B. im Sinne einer Flugführung durch geländebasierte Navigation (Abschnitt 4.4.3) oder mittels einer Warnung vor unerwarteten Gefahren durch sofortige Änderungserkennung (Abschnitt 4.5). In diesem (dritten) Fall wird mit einer reduzierten Positionierungsgenauigkeit (SPS) oder gar Ausfällen bei der GNSS-Positionsbestimmung gerechnet. Die unkorrigierten ALS-Daten können in solchen Szenarien um mehrere Meter vom georeferenzierten Referenzdatensatz abweichen (siehe Tabelle 3.1). In Abschnitt 4.4.2 wird ein geeignetes rigides Registrierungsverfahren vorgeschlagen, das auch unter diesen Bedingungen eine zuverlässige Angleichung der Daten ermöglicht.

Die im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschriebenen Lösungen für das Kalibrierungs- und das Koregistrierungsproblem beruhen auf einer Zuordnung von planaren Flächen. In den genannten

drei Fällen wird daher eine robuste Methode zur Identifizierung homologer Ebenen benötigt. Bei den einzelnen Flächenstücken handelt es sich um Ergebnisse der Segmentierungsverfahren aus den Abschnitten 4.2.3 oder 4.2.4, für die anhand mehrerer geometrischer Attribute entschieden wird, ob sie in überlappenden Punktwolken das gleiche Objekt repräsentieren oder nicht. Beide Segmentierungsverfahren liefern einzelne Verbünde zusammenhängender 3D-Punkte, die jeweils eine planare Form wiedergeben. Ähnlich zu den Berechnungen in Abschnitt 4.2.1 werden für jeden Verbund $C = \{\boldsymbol{c}_1, \ldots, \boldsymbol{c}_n\}$ die folgenden Attribute ermittelt:

- der Schwerpunkt $\bar{\boldsymbol{c}}$ von C, der sich als arithmetisches Mittel aller Punkte aus C ergibt,
- die normierten und nach Größe sortierten Eigenwerte $\hat{\boldsymbol{\lambda}} = (\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \hat{\lambda}_3) = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)/n$ der Kovarianzmatrix $(\boldsymbol{c}_1 - \bar{\boldsymbol{c}}, \ldots, \boldsymbol{c}_n - \bar{\boldsymbol{c}}) \circ (\boldsymbol{c}_1 - \bar{\boldsymbol{c}}, \ldots, \boldsymbol{c}_n - \bar{\boldsymbol{c}})^{\mathrm{T}}$ und
- der Normaleneinheitsvektor $\boldsymbol{n}_0$, der dem Eigenvektor $\boldsymbol{v}_1$ zum kleinsten Eigenwert λ_1 entspricht.

Diese beschreibenden Merkmale werden für alle Ebenensegmente in allen sich überlappenden Punktwolken bestimmt. Wenn C_a einen Verbund nahezu komplanarer Punkte in der Punktwolke P_A bezeichnet, so wird dessen Entsprechung C_b im Datensatz P_B gesucht (falls vorhanden). Hierbei handelt es sich beispielsweise um die gleiche Dachfläche oder Fassade eines Gebäudes. Sowohl die Lage als auch die Formmerkmale von C_a und C_b sollten näherungsweise übereinstimmen, wenn es sich um homologe Flächen handelt. Um eine Zuordnung durchzuführen, muss zunächst der Abstand $|\bar{\boldsymbol{c}}_a - \bar{\boldsymbol{c}}_b|$ der Schwerpunkte unter eine maximal zugelassene Distanz fallen (z.B. 25 m). Alle Suchoperationen werden auf diesen Suchradius beschränkt, nachdem die Schwerpunkte aller Ebenensegmente in einer effizienten Suchstruktur gespeichert wurden (siehe Abschnitt 4.1.3). Als Nächstes muss die Bedingung erfüllt sein, dass der Winkel zwischen den Normalenrichtungen beider Ebenen klein ist (z.B. maximal 15°, was $|\boldsymbol{n}_{0a} \cdot \boldsymbol{n}_{0b}| > 0.966$ entspricht). Als dritte Gemeinsamkeit müssen auch die normierten Eigenwerte $\hat{\boldsymbol{\lambda}}_a$ und $\hat{\boldsymbol{\lambda}}_b$ auf eine ähnliche Form von C_a und C_b hinweisen. Hierzu werden folgende Kriterien überprüft:

$$\frac{\left\|\hat{\boldsymbol{\lambda}}_a - \hat{\boldsymbol{\lambda}}_b\right\|}{\left\|\hat{\boldsymbol{\lambda}}_a\right\| + \left\|\hat{\boldsymbol{\lambda}}_b\right\|} \leq \varepsilon_1 \qquad \text{(z.B. } \varepsilon_1 = 0.1\text{)}, \tag{4.10}$$

$$\left| \frac{\hat{\lambda}_{a,2}}{\hat{\lambda}_{b,2}} + \frac{\hat{\lambda}_{b,2}}{\hat{\lambda}_{a,2}} + \frac{\hat{\lambda}_{a,3}}{\hat{\lambda}_{b,3}} + \frac{\hat{\lambda}_{b,3}}{\hat{\lambda}_{a,3}} - 4 \right| \leq \varepsilon_2 \qquad \text{(z.B. } \varepsilon_2 = 0.05\text{)}. \tag{4.11}$$

Beide Bedingungen beschreiben Abstandsmaße, mit denen die Ähnlichkeit von $\hat{\boldsymbol{\lambda}}_a$ und $\hat{\boldsymbol{\lambda}}_b$ genauer spezifiziert werden kann. Gleichung 4.10 setzt die euklidische Distanz der beiden Vektoren in Relation zu ihrer mittleren Größe. Durch diese Normierung ist der Ausdruck unabhängig vom Flächeninhalt und der verwendeten Maßeinheit. In Gleichung 4.11 werden die von Null verschiedenen normierten Eigenwerte auf ihre gegenseitigen Größenverhältnisse untersucht. Falls C_a und C_b eine ähnliche Form aufweisen, ist jedes dieser Verhältnisse nahe Eins, weswegen sich der Ausdruck in Gleichung 4.11 nahe Null befindet. Außerdem ist Gleichung 4.11 unempfindlich gegenüber leichten Variationen der gefundenen Formen, denn es gilt $d(x + x^{-1})/dx{=}0$ für $x{=}1$.

Paare von Ebenensegmenten C_a und C_b werden als homolog angesehen, falls die genannten Bedingungen für sie zutreffen. Trotz mehrerer Überprüfungskriterien kann es aber zu Fehlzuordnungen kommen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn starke Diskrepanzen zwischen den Punktwolken bestehen, ein großer Suchradius verwendet wird oder wenn das urbane Gebiet viele ähnliche Strukturen aufweist (z.B. baugleiche Häuser in Parallelstraßen). Die in den nächsten Abschnitten vorgestellten Kalibrierungs- und Koregistrierungsverfahren werden deshalb um ein RANSAC-Schema ergänzt, um robust gegen diese Art von Störungen zu sein. In einigen Tests

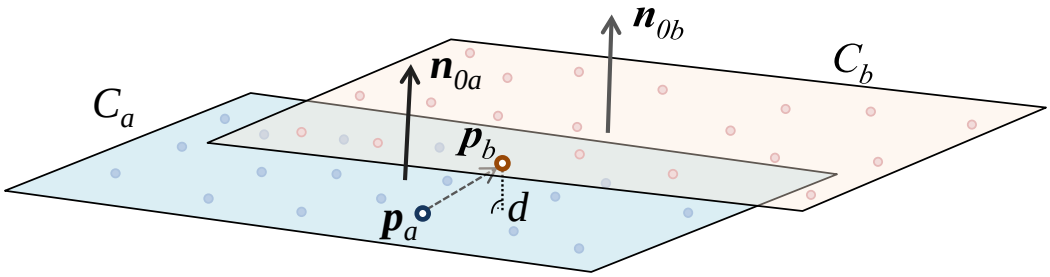


Abbildung 4.11: Homologe Ebenensegmente C_a und C_b mit Vertretern $\boldsymbol{p}_a$ und $\boldsymbol{p}_b$.

mit realen Sensordaten konnte die Notwendigkeit der obigen Kriterien untersucht werden. Hierzu wurde die typische Anzahl von Inliern unter allen Zuordnungen identifiziert, und zwar in Fällen, in denen nur die Flächenschwerpunkte betrachtet wurden (Fall A), die Flächenschwerpunkte und Normalenrichtungen (Fall B) und zusätzlich noch die Bedingungen in den Gleichungen 4.10 und 4.11 (Fall C). Für Suchradien von (5 m, 10 m, 50 m) wurden folgende prozentualen Anteile an Inliern für Fall A erhalten: (92%, 50%, 6%), für Fall B: (95%, 93%, 34%) und für Fall C: (95%, 95%, 80%). Diese Werte bestätigen, dass die Notwendigkeit obiger Zuordnungskriterien hauptsächlich vom Suchradius abhängt. Zum Beispiel genügt eine alleinige Betrachtung der Flächenschwerpunkte, falls Diskrepanzen unter 5 m erwartet werden können. Allerdings werden in den Abschnitten 4.4.3 und 4.5 auch Randbedingungen zugelassen, in denen die Positionierungsgenauigkeit der ALS-Daten deutlich schlechter sein kann. In diesen Fällen muss ein größerer Suchradius verwendet werden, und dann hat die mehrstufige Zuordnungsmethode ihre Berechtigung.

4.3 Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems

Eine Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems ist erst nach der Beseitigung von GNSS-bedingten Fehlern möglich, da die Effekte sich sonst untrennbar in den Punktwolken überlagern würden. Zur Durchführung der Kalibrierung wird daher gefordert, dass entsprechende PPK- oder RTK-Korrekturdaten von einer oder mehreren GNSS-Referenzstationen vorliegen. In Deutschland kann dazu beispielsweise auf den SAPOS-Dienst zurückgegriffen werden, der solche Korrekturdaten sowohl für die nachträgliche Prozessierung als auch für die Echtzeitanwendung verfügbar macht. Unter diesen technischen Randbedingungen wird der Beitrag GNSS-bezogener Positionsfehler auf wenige Zentimeter reduziert (vgl. Tabelle 3.1). Ein Ansatz zur Bestimmung der Boresight-Parameter R_B in Gleichung 3.2 könnte es sein, homologe Punkte $\boldsymbol{p}_L(t_a)$ und $\boldsymbol{p}_L(t_b)$ in unterschiedlichen sich überlappenden Punktwolken P_A und P_B zu identifizieren. Mit Hilfe solcher Punktpaare wäre es möglich, die Relativausrichtung R_B von IMU und Laserscanner derart festzulegen, dass die Summe der Abstandsquadrate homologer Punkte minimiert würde. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass homologe Punkte in den verschiedenen Datensätzen vorliegen, da es sich jeweils um unterschiedliche Abtastungen des urbanen Geländes handelt. Ein ganz ähnliches Problem besteht bei ICP-artigen Koregistrierungsverfahren. Dort umgeht man es häufig dadurch, dass man anstelle der Punktabstände die Distanzen zwischen Punkten und Tangentialebenen im jeweils anderen Datensatz betrachtet (vgl. Rusinkiewicz & Levoy [2001]).

Statt einer ICP-Vorgehensweise, die ALS-Datensätze nach der Zuordnung nächstliegender 3D-Punkte rigide ausrichten würde, werden im Folgenden die Ergebnisse der erarbeiteten Segmentierungsverfahren genutzt, um mit einem neuen Verfahren die Fehlstellung R_B zwischen IMU und Laserscanner zur Verwendung in Gleichung 3.2 zu bestimmen. Die Berücksichtigung von R_B bei der direkten Georeferenzierung zielt darauf ab, die entlang sich kreuzender Flugbahnen ge-

messenen ALS-Datensätze so zu verformen (bzw. die bestehende Verformung zu korrigieren), dass Paare homologer Ebenen sich anschließend bestmöglich in Übereinstimmung befinden.

Die Erfassung der Multi-Aspekt Datensätze kann mit einem einzigen ALS-System erfolgen (Zeitpunkt t_1). In diesem Fall sind alle Punktwolken gleichermaßen von der IMU/Laserscanner-Fehlstellung betroffen. Das für diese Situation entwickelte Kalibrierungsverfahren zur simultanen Angleichung aller Punktwolken wird in Abschnitt 4.3.1 besprochen. Eine andere Möglichkeit zur Kalibrierung besteht, wenn bereits ein korrekter 3D-Datensatz des urbanen Gebiets vorhanden ist. Das zum Zeitpunkt t_2 verwendete System kann dann aufgrund des Abgleichs seiner Messdaten mit dem Referenzdatensatz kalibriert werden. Das hierfür erarbeitete Verfahren ist Thema in Abschnitt 4.3.2. Die Betrachtung von Ebenensegmenten statt Einzelpunkten macht die in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensweise unabhängig von der jeweils vorliegenden Abtastung und Punktdichte. Aus den Kalibrierverfahren gehen korrigierte Datensätze und ein ALS-System hervor, das auch bei anschließenden Messungen konsistente georeferenzierte Datensätze liefert.

4.3.1 Kalibrierung durch Kreuzbefliegung eines (beliebigen) Stadtgebiets

Erneut bezeichne C_a einen Verbund nahezu komplanarer ALS-Punkte in Punktwolke P_A, und C_b sei das entsprechende Gegenstück in Datensatz P_B. Die Ebenensegmente C_a und C_b werden durch eines der Verfahren aus den Abschnitten 4.2.3 oder 4.2.4 gefunden und durch den merkmalsbasierten Vergleich aus Abschnitt 4.2.5 zugeordnet. Ferner sei $\boldsymbol{p}_a$ ein einzelner Datenpunkt aus C_a und ebenso sei $\boldsymbol{p}_b$ ein Punkt aus C_b. Wie bereits weiter oben motiviert wurde, wird der Abstand d zur Tangentialebene im jeweils anderen Datensatz betrachtet (vgl. Abbildung 4.11). Der Vorteil der Ebenensegmentierung und -zuordnung ist in diesem Zusammenhang die Freiheit, praktisch beliebige Punkte $\boldsymbol{p}_a$ und $\boldsymbol{p}_b$ als Repräsentanten der Flächen wählen zu können. Es ist allerdings unrealistisch, alle denkbaren Punktpaarungen zu bearbeiten, da dies letztlich zu einer enormen Anzahl von Bedingungen führen würde. In Gleichung 4.14 wird der Abstand Punkt-Ebene mit Hilfe eines Normaleneinheitsvektors berechnet, der auf Basis der verzerrten Datensätze geschätzt wurde. Um den Einfluss einer dadurch leicht verfälschten Normalenrichtung möglichst klein zu halten, sollten Punkte $\boldsymbol{p}_b$ in C_b mit möglichst geringem euklidischen Abstand zu gegebenen Punkten $\boldsymbol{p}_a$ ausgewählt werden. In Experimenten konnte aber bestätigt werden, dass sich selbst die ausschließliche Verwendung von Punktpaaren mit maximalem Abstand nur unwesentlich auf die ermittelten Kalibrierungsparameter auswirkt.

Die Laserpunkte $\boldsymbol{p}_a$ und $\boldsymbol{p}_b$ sind zu verschiedenen Zeitpunkten t_a bzw. t_b erfasst worden. Mit diesen Indizes wird die direkte Georeferenzierung der beiden Punkte entsprechend Gleichung 3.2 durch die folgende Berechnung ausgedrückt:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{p}_a &= \boldsymbol{p}_L(t_a) = \boldsymbol{p}_{Na} + R_{Na} \circ R_B \circ R_{Sa} \circ \boldsymbol{r}_{La}, \\ \boldsymbol{p}_b &= \boldsymbol{p}_L(t_b) = \boldsymbol{p}_{Nb} + R_{Nb} \circ R_B \circ R_{Sb} \circ \boldsymbol{r}_{Lb}. \end{aligned} \tag{4.12}$$

Zur Vereinfachung der Notation wird der gemessene Entfernungsvektor unter Berücksichtigung des Scanvorgangs wie zuvor als $\boldsymbol{s}_{La} = R_{Sa} \circ \boldsymbol{r}_{La}$ bzw. $\boldsymbol{s}_{Lb} = R_{Sb} \circ \boldsymbol{r}_{Lb}$ abgekürzt. Für jeden Vektor $\boldsymbol{v}$ mit drei Komponenten $\boldsymbol{v} = (v_1, v_2, v_3)^{\mathrm{T}}$ sei $\chi(\boldsymbol{v})$ als folgende schiefsymmetrische Matrix definiert:

$$\chi(\boldsymbol{v}) = \begin{pmatrix} 0 & -v_3 & v_2 \\ v_3 & 0 & -v_1 \\ -v_2 & v_1 & 0 \end{pmatrix}. \tag{4.13}$$

Für zwei Vektoren $\boldsymbol{v}$ und $\boldsymbol{w}$ gilt insbesondere $\chi(\boldsymbol{v}) \circ \boldsymbol{w} = \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{w}$. In Abschnitt 3.2.9 wurde bereits erwähnt, dass die drei Winkel der Boresight-Korrektur typischerweise Werte unterhalb eines Winkelgrads annehmen. Aus diesem Grund kann die Drehmatrix R_B in guter Näherung als $R_B = I_3 + \chi(\boldsymbol{\beta})$ geschrieben werden, wobei mit I_3 die 3×3 Einheitsmatrix gemeint ist und

$\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^{\mathrm{T}}$ die Eulerwinkel der Drehung im Bogenmaß bezeichnet. Diese Näherung linearisiert Gleichung 4.12, wenn diese nach den gesuchten Boresight-Winkeln aufgelöst werden muss. Es wird erwartet, dass beide Ebenensegmente C_a und C_b zu einer einzigen komplanaren Punktmenge zusammenfallen, sobald die Korrektur R_B der IMU/Laserscanner-Fehlstellung in die direkte Georeferenzierung der Laserpunkte einfließt. Diese Bedingung kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$d = |(\boldsymbol{p}_a - \boldsymbol{p}_b) \cdot \boldsymbol{n}| = 0 \qquad \forall\, \boldsymbol{p}_a \in C_a,\, \boldsymbol{p}_b \in C_b. \tag{4.14}$$

Hierin bezeichnet $\boldsymbol{n} = (\boldsymbol{n}_{0a} + \boldsymbol{n}_{0b}) / \left\|\boldsymbol{n}_{0a} + \boldsymbol{n}_{0b}\right\|$ den Mittelwert der nahezu identischen Normalenvektoren, die als Attribute der Punktmengen C_a und C_b ermittelt worden sind. Die Vorzeichen beider Normalenvektoren werden zur Durchschnittsbildung angepasst, damit $\boldsymbol{n}_{0a} \cdot \boldsymbol{n}_{0b} > 0$ gilt. Zusammen mit Gleichung 4.12 ergibt sich:

$$(\boldsymbol{p}_{Na} + R_{Na} \circ R_B \circ \boldsymbol{s}_{La} - \boldsymbol{p}_{Nb} - R_{Nb} \circ R_B \circ \boldsymbol{s}_{Lb}) \cdot \boldsymbol{n} = 0. \tag{4.15}$$

Mit Ausnahme der drei gesuchten Boresight-Winkel β_1, β_2 und β_3 sind Messwerte zu allen Bestandteilen von Gleichung 4.15 vorhanden. Mit der Näherung $R_B = I_3 + \chi(\boldsymbol{\beta})$ kann diese umgestellt werden, sodass man eine lineare Gleichung zur Bestimmung von $\boldsymbol{\beta}$ erhält:

$$\begin{aligned} & (R_{Na} \circ \chi(\boldsymbol{\beta}) \circ \boldsymbol{s}_{La} - R_{Nb} \circ \chi(\boldsymbol{\beta}) \circ \boldsymbol{s}_{Lb}) \cdot \boldsymbol{n} \\ = \;& (\boldsymbol{p}_{Nb} + R_{Nb} \circ I_3 \circ \boldsymbol{s}_{Lb} - \boldsymbol{p}_{Na} - R_{Na} \circ I_3 \circ \boldsymbol{s}_{La}) \cdot \boldsymbol{n}. \end{aligned} \tag{4.16}$$

Die linke Seite dieser Gleichung kann wie folgt umgeformt werden:

$$\begin{aligned} & (R_{Na} \circ \chi(\boldsymbol{\beta}) \circ \boldsymbol{s}_{La} - R_{Nb} \circ \chi(\boldsymbol{\beta}) \circ \boldsymbol{s}_{Lb}) \cdot \boldsymbol{n} \\ = \;& (R_{Na} \circ (\boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{s}_{La})) \cdot \boldsymbol{n} - (R_{Nb} \circ (\boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{s}_{Lb})) \cdot \boldsymbol{n} \\ = \;& (\boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{s}_{La}) \cdot \left(R_{Na}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n}\right) - (\boldsymbol{\beta} \times \boldsymbol{s}_{Lb}) \cdot \left(R_{Nb}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n}\right) \\ = \;& \det\left(R_{Na}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{s}_{La}\right) - \det\left(R_{Nb}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{s}_{Lb}\right) \\ = \;& \left(\boldsymbol{s}_{La} \times \left(R_{Na}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n}\right)\right) \cdot \boldsymbol{\beta} - \left(\boldsymbol{s}_{Lb} \times \left(R_{Nb}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n}\right)\right) \cdot \boldsymbol{\beta} \\ = \;& \left(\chi(\boldsymbol{s}_{La}) \circ R_{Na}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n} - \chi(\boldsymbol{s}_{Lb}) \circ R_{Nb}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n}\right)^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{\beta}. \end{aligned} \tag{4.17}$$

Wenn die Gleichungen 4.16 und 4.17 nun kombiniert werden, erhält man:

$$\begin{aligned} & \left(\chi(\boldsymbol{s}_{La}) \circ R_{Na}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n} - \chi(\boldsymbol{s}_{Lb}) \circ R_{Nb}^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{n}\right)^{\mathrm{T}} \circ \boldsymbol{\beta} \\ = \;& (\boldsymbol{p}_{Nb} + R_{Nb} \circ \boldsymbol{s}_{Lb} - \boldsymbol{p}_{Na} - R_{Na} \circ \boldsymbol{s}_{La}) \cdot \boldsymbol{n}. \end{aligned} \tag{4.18}$$

Gleichung 4.18 ist von der Form $F \circ \boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{g}$, sodass alle Punktpaare $\boldsymbol{p}_a$ und $\boldsymbol{p}_b$ als Elemente homologer Ebenensegmente C_a und C_b aus den Punktwolken P_A bzw. P_B eine Zeile zur Matrix $(F, \boldsymbol{g})$ beitragen. Typischerweise liegen mehr als zwei überlappende Punktwolken vor, da das betrachtete urbane Gebiet entlang mehrerer Richtungen überflogen wird. In diesem Fall werden in $(F, \boldsymbol{g})$ alle Gleichungen akkumuliert, die aus Paaren homologer Ebenen in allen Datensätzen resultieren. Wenn eine einzige planare Fläche beispielsweise in vier sich überlappenden Punktwolken aufträte, so würde sie insgesamt sechs Gruppen von Punktzuordnungen zu $(F, \boldsymbol{g})$ beitragen.

Das sich insgesamt ergebende überbestimmte lineare Gleichungssystem kann im Sinne einer Minimierung der Residuenquadrate gelöst werden. Dieser Lösungsweg wird mit einer RANSAC-Vorgehensweise ergänzt, um seine Robustheit gegenüber Fehlzuordnungen von Ebenensegmenten zu gewährleisten. Die Einzelschritte zur Lösung des Gleichungssystem sehen folgendermaßen aus:

1. Zunächst werden wiederholt drei Zeilen rand $= \{i_1, i_2, i_3\}$ aus $(F, \boldsymbol{g})$ zufällig ausgewählt und $\boldsymbol{\beta}^* = (F_{\mathrm{rand}})^{-1} \circ \boldsymbol{g}_{\mathrm{rand}}$ als vorläufige Lösung berechnet. Anschließend werden die Residuen $|F \circ \boldsymbol{\beta}^* - \boldsymbol{g}|$ bestimmt. Durch die Beurteilung der Residuen können Zeilen aus $(F, \boldsymbol{g})$ als Inlier oder Outlier gewertet werden.

2. Nach einigen Iterationen des RANSAC-Verfahrens wird nur die beste gefundene Inliermenge $(F_{\text{in}}, \boldsymbol{g}_{\text{in}})$ weiter betrachtet.

3. Mit der Absicht, größeren Flächen auch einen entsprechend größeren Einfluss auf das Ergebnis zu geben, werden zusätzlich noch Gewichtungsfaktoren $w = \hat{\lambda}_2 + \hat{\lambda}_3$ eingeführt. Hiermit ergibt sich schließlich

$$\boldsymbol{\beta} = \left(F_{\text{in}}^{\text{T}} \circ W \circ F_{\text{in}}\right)^{-1} \circ F_{\text{in}}^{\text{T}} \circ W \circ \boldsymbol{g}_{\text{in}} \tag{4.19}$$

mit einer Diagonalmatrix W, welche die jeweiligen Gewichtungsfaktoren w enthält. Das Ergebnis dieses Unterabschnitts ist die Drehmatrix R_B zur Boresight-Korrektur, die durch die drei Eulerwinkel $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ gegeben ist.

4.3.2 Kalibrierung mit Hilfe von Referenzflächen

Da der Vergleich multitemporaler Daten Thema dieser Arbeit ist, kann auch die Situation eintreten, dass nicht alle Datensätze simultan von der gleichen IMU/Laserscanner-Fehlstellung betroffen sind. So liegt der Referenzdatensatz typischerweise frei von Fehlern vor, während das aktuell verwendete ALS-System Punktwolken erfasst, die zum Referenzdatensatz ausgerichtet werden müssen. Falls präzise GNSS-Positionen gemessen werden und die beobachteten Diskrepanzen stattdessen auf ein unkalibriertes System zurückzuführen sind, können dessen Boresight-Winkel $\boldsymbol{\beta}$ ebenfalls durch die Angleichung von Ebenenpaaren bestimmt werden. Die Vorgehensweise zur Berechnung von R_B unterscheidet sich dabei leicht vom vorangegangenen Abschnitt.

Sei C_d ein Verbund nahezu komplanarer 3D-Punkte in der aktuell erfassten Punktwolke P_D. In Abschnitt 4.2.4 wurde ein Segmentierungsverfahren beschrieben, das solche Verbünde schritthaltend im Ablauf der ALS-Datenerfassung identifizieren kann. Erneut werden Gemeinsamkeiten der in Abschnitt 4.2.5 erläuterten Merkmale analysiert, um korrespondierende Ebenensegmente im Referenzdatensatz P_M zu finden. C_m bezeichne das dort gefundene Gegenstück zu C_d, falls ein solches existiert. Ferner sei $\bar{\boldsymbol{p}}_m$ der Schwerpunkt von C_m, $\boldsymbol{n}_{0m}$ sei die C_m zugewiesene Normalenrichtung, und $\boldsymbol{p}_d$ bezeichne ein beliebiges Element von C_d. Der Punkt $\boldsymbol{p}_d$ ergibt sich als direkte Georeferenzierung von $\boldsymbol{r}_{Ld}$ mit der folgenden Berechnung:

$$\boldsymbol{p}_d = \boldsymbol{p}_L(t_d) = \boldsymbol{p}_{Nd} + R_{Nd} \circ R_B \circ R_{Sd} \circ \boldsymbol{r}_{Ld}. \tag{4.20}$$

Erneut ist das Ziel der Boresight-Kalibrierung, die Relativorientierung R_B von IMU und Laserscanner so festzulegen, dass alle Punkte der Menge C_d im Anschluss komplanar mit C_m sind. Dies wird durch folgende Bedingung ausgedrückt:

$$(\boldsymbol{p}_d - \bar{\boldsymbol{p}}_m) \cdot \boldsymbol{n}_{0m} = 0 \qquad \forall\ \boldsymbol{p}_d \in C_d. \tag{4.21}$$

Die Kombination der beiden Gleichungen ergibt zusammen mit der Abkürzung $\boldsymbol{s}_{Ld} = R_{Sd} \circ \boldsymbol{r}_{Ld}$:

$$(\boldsymbol{p}_{Nd} + R_{Nd} \circ R_B \circ \boldsymbol{s}_{Ld} - \bar{\boldsymbol{p}}_m) \cdot \boldsymbol{n}_{0m} = 0. \tag{4.22}$$

Analog zur Vorgehensweise in Abschnitt 4.3.1 kann Gleichung 4.22 zur Bestimmung der Boresight-Winkel $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^{\text{T}}$ umgestellt werden:

$$\left(\chi(\boldsymbol{s}_{Ld}) \circ R_{Nd}^{\text{T}} \circ \boldsymbol{n}_{0m}\right)^{\text{T}} \circ \boldsymbol{\beta} = (\bar{\boldsymbol{p}}_m - \boldsymbol{p}_{Nd} - R_{Nd} \circ \boldsymbol{s}_{Ld}) \cdot \boldsymbol{n}_{0m}. \tag{4.23}$$

Auch in diesem Fall ist die letztgenannte Gleichung von der Form $F \circ \boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{g}$, sodass Elemente $\boldsymbol{p}_d$ aus C_d in Punktwolke P_D eine Zeile zur Matrix $(F, \boldsymbol{g})$ beitragen, wenn C_d und das Ebenensegment C_m im Referenzdatensatz P_M zuvor als homologe Ebenen erkannt wurden. In $(F, \boldsymbol{g})$ werden diese Zeilen für alle Paare homologer Ebenen angesammelt, wodurch ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem entsteht. Zur Berechnung von $\boldsymbol{\beta}$ anhand dieses Gleichungssystems wird erneut

eine gewichtete Kleinste-Quadrate-Minimierung der Residuen herangezogen, der ein RANSAC-Schema vorgeschaltet wird. Die berechneten Euler-Winkel ergeben schließlich eine Drehmatrix R_B, die die Fehlstellung von IMU und Laserscanner bei der direkten Georeferenzierung von Laserentfernungsmessungen korrigiert.

4.4 Registrierung von 3D-Punktmengen

Abgesehen von der soeben besprochenen Boresight-Fehlstellung von IMU und Laserscanner zeigt Tabelle 3.1 weitere Fehlerquellen, die einen signifikanten Einfluss auf die Passgenauigkeit mehrerer überlappender ALS-Punktwolken haben können. Dazu zählt insbesondere der GNSS-verursachte Fehler im SPS-Modus. Thema der vorliegenden Arbeit sind nicht allein Anwendungen, in denen optimale Randbedingungen für eine hochgenaue ALS-Datenerfassung geschaffen werden können, sondern auch Situationen, in denen das ALS-Sensorsystem unter widrigen Umständen eingesetzt werden muss und die zudem eine schritthaltende Datenverarbeitung erfordern (vgl. Kapitel 1). Typische Beispiele sind im Einsatz von ALS für polizeiliche Überwachungsaufgaben in urbanen Gebieten zu sehen, oder ebenso in der 3D-Datenerfassung zur Echzeitverwendung im Katastrophenmanagement und bei Rettungseinsätzen. Darüber hinaus kann es erforderlich sein, den Hubschrauberpiloten während solcher Missionen z.B. mit einer automatischen Hinderniswarnung oder Flugführung bei schlechten Sichtbedingungen zu unterstützen, etwa bei Landemanövern oder Nachtflügen. In Abhängigkeit von der Art der Hubschraubermission muss dabei auch mit einer Verschlechterung oder gar einem Ausfall der GNSS-Positionsbestimmung gerechnet werden, z.B. aufgrund einer absichtlichen Störung der GNSS-Funksignale durch Dritte (engl. Jamming).

In den genannten Situationen kann der sofortige Vergleich von ALS-Daten mit einem 3D-Referenzdatensatz des urbanen Gebiets sowohl zur automatischen Änderungsdetektion als auch zur geländebasierten Navigation genutzt werden. Im Gegensatz zu den Untersuchungen im vorangegangenen Abschnitt wird hierbei die Verwendung eines kalibrierten ALS-Systems unterstellt, sodass die beobachteten Diskrepanzen hauptsächlich auf eine mangelhafte Positionsgenauigkeit der GNSS-Komponente des Navigationssystems zurückzuführen sind. Durch die Kurzzeitstabilität von INS-Messungen (siehe Applanix [2009]) ist die während eines Überflugs erfasste Punktwolke in sich konsistent, sodass eine rigide Transformation für die Ausrichtung zum Referenzdatensatz ausreichen sollte. Rotation und Translation zur Angleichung zweier Punktwolken werden in der Literatur standardmäßig mit dem ICP-Verfahren berechnet, welches nachfolgend erklärt wird. Aufgrund der bereits geleisteten Vorarbeit bei der Bestimmung und Zuordnung von Ebenensegmenten kann im Anschluss aber ein alternatives und stabileres Verfahren präsentiert werden, das unter den genannten Randbedingungen wesentlich besser geeignet ist.

4.4.1 Das Standardverfahren: ICP

Der Iterative-Closest-Point Algorithmus von Besl & McKay [1992] zielt darauf ab, die Parameter zur rigiden Koregistrierung von 3D-Punktmengen automatisch zu bestimmen. In der Regel wird einer der Datensätze als *Daten* bezeichnet, der andere als *Modell*. In den hier vorliegenden Zusammenhängen entsprechen diese Punktmengen der aktuell erfassten Punktwolke P_D und dem Referenzdatensatz P_M. Ferner wird angenommen, dass Daten und Modell sich bereits näherungsweise in Position befinden, was durch die direkte Georeferenzierung der ALS-Messwerte erfüllt ist. Während des ICP-Ablaufs wird der gesamte Datensatz P_D iterativ zum Modell P_M hin bewegt, sodass beide am Ende bestmöglich zueinander ausgerichtet sind. Jeder ICP-Iterationsschritt ist in zwei Teilschritte gegliedert, die folgendermaßen beschrieben werden können:

1. Zunächst werden Punkt-zu-Punkt Korrespondenzen zwischen P_D und P_M gesucht bzw. festgelegt. Das klassische ICP-Vorgehen ist hierbei, einfach die nächstliegenden Punkte einander

zuzuordnen, daher auch der Name des Algorithmus. Bei unregelmäßig verteilten 3D-Punkten tritt insbesondere das Problem auf, Suchoperationen effizient zu gestalten, wofür aber eine der zuvor beschriebenen Baumstrukturen verwendet werden kann (Octree oder k-d Baum).

2. Anschließend wird eine rigide Transformation von P_D durchgeführt (bestehend aus Translation und Rotation), die die einander zugeordneten Punkte bestmöglich zur Deckung bringt, nämlich im Sinne einer Minimierung der Quadrate euklidischer Abstände. Das Problem der Transformationsbestimmung kann explizit wie im Originalartikel von Besl & McKay [1992] durch den Einsatz von Quaternionen gelöst werden. Zur Implementierung ist allerdings eine Singulärwertzerlegung geeigneter, wie sie von Arun et al. [1987] beschrieben wird:

   Sei $D = \{\boldsymbol{d}_i | i = 1, \ldots, n\} \subseteq P_D$ eine Untermenge von 3D-Punkten aus P_D, denen Datenpunkte $\boldsymbol{m}_i$ aus P_M zugeordnet wurden, und zwar so, dass jeweils $\boldsymbol{d}_i$ mit $\boldsymbol{m}_i$ korrespondiert. Diese Zuordnung ist nicht notwendigerweise injektiv, d.h. $\boldsymbol{m}_i$ und $\boldsymbol{m}_j$ können auch für $i \neq j$ den gleichen Datenpunkt aus P_M bezeichnen. Zunächst werden die beiden Schwerpunkte berechnet:

$$\bar{\boldsymbol{m}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{m}_i, \qquad \bar{\boldsymbol{d}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{d}_i. \tag{4.24}$$

   Anschließend wird eine 3×3 Matrix H als Summe von dyadischen Produkten der zum Ursprung verschobenen 3D-Punktkoordinaten definiert:

$$H = \sum_{i=1}^{n} (\boldsymbol{d}_i - \bar{\boldsymbol{d}}) \circ (\boldsymbol{m}_i - \bar{\boldsymbol{m}})^{\mathrm{T}}. \tag{4.25}$$

   Die Singulärwertzerlegung dieser Matrix $H = U \circ A \circ V^{\mathrm{T}}$ führt zur optimalen Drehung R und zur optimalen Translation $\boldsymbol{t}$, welche den Datensatz P_D so transformieren, dass die Summe der quadrierten euklidischen Abstände zwischen zugeordneten Punkten im Anschluss minimal ist:

$$R = V \circ U^{\mathrm{T}}, \qquad \boldsymbol{t} = \bar{\boldsymbol{m}} - R \circ \bar{\boldsymbol{d}}. \tag{4.26}$$

   Der Beweis hierfür wird im Artikel von Arun et al. [1987] gegeben. Nach der Bestimmung von R und $\boldsymbol{t}$ kann der gesamte Datensatz P_D gemäß $R \circ \boldsymbol{p}_d + \boldsymbol{t}$ gedreht und verschoben werden.

Da beim Standard-ICP-Verfahren korrespondierende Punkte durch nächstliegende Punkte substituiert werden, müssen die Schritte 1 und 2 mehrfach wiederholt werden. Besl & McKay [1992] haben gezeigt, dass ICP in ein lokales Minimum der Punktabstandsfunktion konvergiert, welches bei hinreichend guter Anfangsnäherung auch die optimale Lösung repräsentiert.

Probleme des ICP-Verfahrens zeigen sich jedoch, falls die initiale Raumlage der Daten deutlich von der des Modells abweicht. Wenn ALS-Daten durch GNSS-Fehler falsch positioniert wurden, können die Diskrepanzen ähnliche Ausmaße wie die Größe der Objekte in der urbanen Szene haben. In diesem Fall führt die Zuordnung nächstliegender Punkte zu fast willkürlichen Punktpaarungen. Selbst wenn das globale Minimum der Punktabstandsfunktion trotzdem gefunden werden kann, ist dieses von der diskreten Abtastung des Geländes abhängig, da der ALS-Messvorgang ganz unterschiedliche Verteilungen von Messpunkten in den Überlappungsbereichen liefert. Hinzu kommt das Problem, dass durch die Schrägsicht und damit einhergehende Verdeckungen sehr viele Punkte aus P_D überhaupt keine Entsprechung in P_M haben können, je nachdem, wie gut das Gelände durch P_M abgedeckt ist. Die Zuordnung nächstliegender Punkte ist dann nicht sehr sinnvoll. In der Literatur sind etliche ICP-Erweiterungen zu finden, die jedes der genannten Probleme umgehen können. Der nächste Unterabschnitt behandelt aber ein neues und an dieser Stelle geeigneteres Verfahren, das unmittelbar an die bisher beschriebene ALS-Datenverarbeitung anschließt, das an die speziellen Umstände angepasst ist und das alle genannten Probleme nicht aufweist.

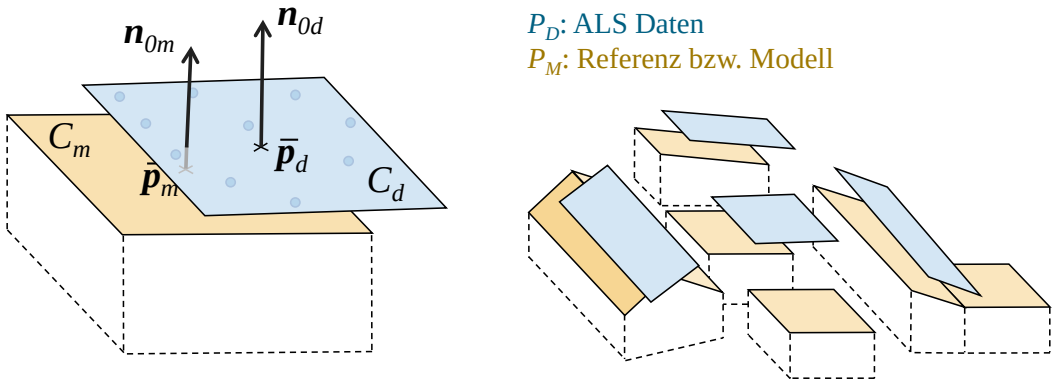


Abbildung 4.12: Zuordnung homologer Ebenen in ALS-Daten P_D und Referenz bzw. Modell P_M.

4.4.2 Angleichung planarer Flächenstücke

Zur Automatisierung der rigiden Koregistrierung von Multi-Aspekt ALS-Daten sollte eine einfache Zuordnung von Einzelpunkten möglichst vermieden werden, da weder die gleiche Abtastung noch einheitliche Punktdichten vorliegen. Die bereits beschriebene Systemkalibrierung durch Berechnung von R_B basiert stattdessen auf der Identifizierung homologer Ebenen. Im Folgenden wird gezeigt, dass durch den gleichen Ansatz auch eine rigide Transformation zur Angleichung zweier Punktwolken bestimmt werden kann.

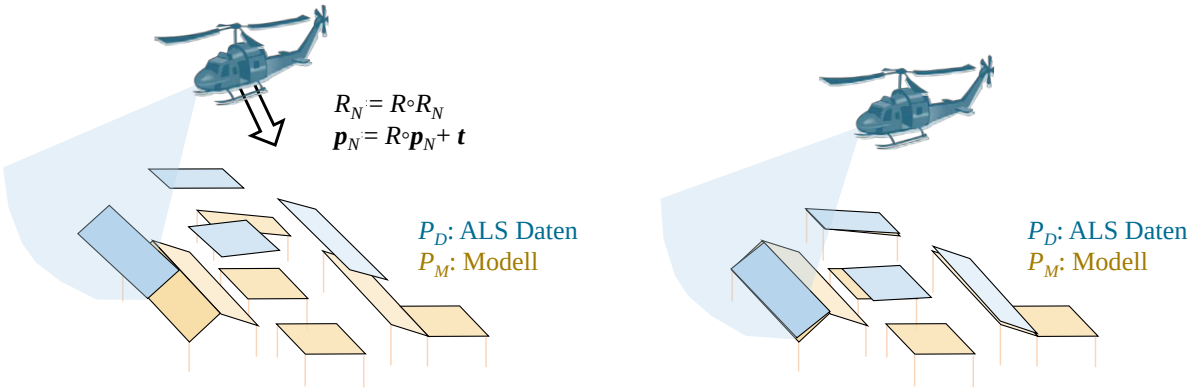
Wie in Abschnitt 4.3.2 bezeichne C_d einen Verbund nahezu komplanarer 3D-Punkte im ALS-Datensatz P_D, der aufgrund ähnlicher Attribute einem ebenen Flächenstück C_m im Referenzdatensatz bzw. Modell P_M zugeordnet werden konnte. Die hessesche Normalform der jeweiligen Ebene ist durch deren Schwerpunkt $\bar{\boldsymbol{p}}_d$ bzw. $\bar{\boldsymbol{p}}_m$ und Normalenvektor $\boldsymbol{n}_{0d}$ bzw. $\boldsymbol{n}_{0m}$ gegeben. Abbildung 4.12 illustriert dies anhand des typischen Beispiels einer Dachfläche. Die Positionsabweichungen identischer Flächen in beiden Datensätzen entsprechen großteils dem Navigationsfehler. Die Aufgabe besteht darin, eine rigide Transformation (Rotation R, Translation $\boldsymbol{t}$) von P_D zu finden, die die Diskrepanzen zwischen P_D und P_M minimiert. Auch bei Störungen des GNSS-Empfangs kann zunächst eine relative Positionierungsgenauigkeit und Konsistenz der ALS-Messungen aufrecht erhalten werden. Erst nach einer gewissen Zeit wirkt sich das Driftverhalten der verwendeten IMU merklich aus. Typischerweise liegt der Positionsfehler aber selbst nach einer GNSS-Empfangslücke von 10 Minuten unter 100 Metern (Toth et al. [2008]). Von daher kann davon ausgegangen werden, dass Orientierungsfehler nicht den Winkelbereich von $\pm 5°$ überschreiten. Dieser Winkelbereich erlaubt es, die gesuchte Drehmatrix R in guter Näherung als $R = I_3 + \chi(\boldsymbol{\gamma})$ darzustellen, wobei $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)^{\mathrm{T}}$ die Eulerwinkel der Drehung im Bogenmaß bezeichnet.

Da homologe Ebenen bei einer korrekten Koregistrierung zusammenfallen müssen, wird der Schwerpunkt $\bar{\boldsymbol{p}}_d$ in die durch C_m definierte Ebene bewegt. Zusätzlich wird $\boldsymbol{n}_{0d}$ parallel zu $\boldsymbol{n}_{0m}$ ausgerichtet. Diese beiden Bedingungen können folgendermaßen formuliert werden:

$$\begin{aligned} &(R \circ \bar{\boldsymbol{p}}_d + \boldsymbol{t} - \bar{\boldsymbol{p}}_m) \cdot \boldsymbol{n}_{0m} = 0, \\ &(R \circ \boldsymbol{n}_{0d}) \cdot \boldsymbol{n}_{0m} = 1, \text{ wobei } \boldsymbol{n}_{0d} \cdot \boldsymbol{n}_{0m} > 0. \end{aligned} \tag{4.27}$$

Die drei Eulerwinkel $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)^{\mathrm{T}}$ und die drei Komponenten der Translation $\boldsymbol{t} = (t_1, t_2, t_3)^{\mathrm{T}}$ sind die insgesamt sechs Unbekannten, die zur Koregistrierung geschätzt werden müssen. Hierzu werden die Gleichungen 4.27 mit $R = I_3 + \chi(\boldsymbol{\gamma})$ analog zur Vorgehensweise in Abschnitt 4.3 umgestellt und ergeben:

$$\begin{aligned} &(\chi(\bar{\boldsymbol{p}}_d) \circ \boldsymbol{n}_{0m}) \cdot \boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{n}_{0m} \cdot \boldsymbol{t} = (\bar{\boldsymbol{p}}_m - \bar{\boldsymbol{p}}_d) \cdot \boldsymbol{n}_{0m}, \\ &(\chi(\boldsymbol{n}_{0d}) \circ \boldsymbol{n}_{0m}) \cdot \boldsymbol{\gamma} = 1 - \boldsymbol{n}_{0d} \cdot \boldsymbol{n}_{0m}. \end{aligned} \tag{4.28}$$



(a) (b)

Abbildung 4.13: ALS zur geländebasierten Navigation über urbanen Gebieten: (a) Versatz von Messdaten und Modell, (b) nach Korrektur der gemessenen Sensorposition und -orientierung.

Jedes Paar korrespondierender Ebenensegmente (C_d, C_m) liefert daher zwei lineare Gleichungen 4.28, weswegen mindestens drei dieser Ebenenpaare in den Daten identifiziert werden müssen, um die rigide Transformation $(R, \boldsymbol{t})$ berechnen zu können. Für gewöhnlich ist die Anzahl detektierbarer homologer Ebenen in ALS-Daten urbaner Gebiete wesentlich höher, sodass die Menge von Korrespondenzen eine robuste Schätzung der Rotation R und Translation $\boldsymbol{t}$ erlaubt. Hierzu wird erneut ein RANSAC-Schema mit einer gewichteten Kleinste-Quadrate-Minimierung kombiniert, wie es auch in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 praktiziert wurde. Anschließend wird die Drehmatrix R aus den Eulerwinkeln $\boldsymbol{\gamma}$ berechnet, und jeder Punkt $\boldsymbol{p}$ aus P_D kann entsprechend $\boldsymbol{p}_{\text{neu}} := R \circ \boldsymbol{p} + \boldsymbol{t}$ transformiert werden. Diese Transformation gleicht P_D an P_M an.

4.4.3 Geländebasierte Navigation

Wenn aktuelle ALS-Daten durch Fehler der Navigationssensoren einen Positionsversatz aufweisen, aber in ihrer räumlichen Lage wie eben beschrieben an vorhandene 3D-Referenzdaten angeglichen werden können, so ist es naheliegend, diese Angleichung der Daten auch zur Korrektur der fehlerhaft gemessenen Sensorposition zu nutzen. Die Zuordnung von Fernerkundungsdaten zu einer Referenz kann auf diese Weise die Rolle des GNSS-Empfängers im Navigationssystem übernehmen oder dessen Funktion zumindest ergänzen. Im Zusammenspiel mit einem INS besteht diese Funktion darin, die INS-Drift zu korrigieren und einen absoluten Raumbezug herzustellen. Geschieht dies mit Hilfe von Fernerkundungsdaten, so redet man in diesem Zusammenhang von *geländebasierter* oder *geländereferenzierter Navigation* (engl. Terrain Referenced Navigation, TRN).

Einige etablierte Methoden zur geländebasierten Navigation fliegender Systeme existieren bereits seit Jahrzehnten, zum Beispiel die bildbasierte Navigation (engl. Image Based Navigation, IBN), Terrainfolgeradar (engl. Terrain-Following Radar, TFR) oder der Gelände-Kontur-Abgleich (engl. Terrain Contour Matching, TERCOM). Im Gegensatz dazu ist ALS eine vergleichsweise neue Technologie. Die Verwendung von ALS zur geländebasierten Navigation wird auch von Toth et al. [2008] vorgeschlagen, da Laserentfernungsmessungen markante 3D-Geländeprofile liefern, die sich vergleichsweise einfach und exakt mit gespeicherten Referenzdaten vergleichen lassen. In ihrem Artikel beschreiben sie einen ICP-Ansatz, den sie an simulierten Daten urbaner Gebiete testen.

Hauptproblem der geländebasierten Navigation ist die Notwendigkeit, die Flugroute vorab möglichst genau zu planen und Referenzdaten entlang der geplanten Flugroute verfügbar zu machen. Die Zuordnung von aktuellen Messdaten zu gespeicherten Geländeprofilen oder sonstigen Geländemerkmalen ist umso schwieriger, je größer die Abweichung von der gedachten Route ist.

Anstelle einer ICP-Vorgehensweise lässt sich mit den Segmentierungs- und Zuordnungsverfahren aus den Abschnitten 4.2.4 und 4.2.5 eine objektbasierte Zuordnung der Daten realisieren, die zudem aus methodischer Sicht schritthaltend mit der Datenerfassung ablaufen kann.

Weiterführende Untersuchungen zur geländebasierten Navigation sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Es konnte aber in einigen Experimenten gezeigt werden, dass die in Abschnitt 4.4.2 beschriebene Koregistrierungsmethode die tatsächliche Sensorposition über urbanem Gebiet auf 0.7 m genau bestimmen kann, selbst wenn zuvor ein Versatz bis zu 100 m vorlag (siehe Hebel & Stilla [2010a] und Hebel & Stilla [2010b]). Hierzu wird die Sensororientierung R_N in $R \circ R_N$ und die Sensorposition $\boldsymbol{p}_N$ in $R \circ \boldsymbol{p}_N + \boldsymbol{t}$ korrigiert, wie es in Abbildung 4.13 zu sehen ist. In einem realen Navigationssystem würden solche Informationen anschließend mit INS-Messungen ein Kalman-Filter durchlaufen und kontinuierliche Korrekturen von Ort und Orientierung des Sensorträgers ermöglichen.

4.5 Änderungserkennung im Stadtgebiet

Nach den Vorarbeiten zur Segmentierung, Klassifizierung und Koregistrierung von Multi-Aspekt ALS-Daten sowie zur Kalibrierung des ALS-Sensorsystems sind die nötigen Voraussetzungen hergestellt, die im Folgenden eine schritthaltende Änderungserkennung in urbanen Gebieten ermöglichen. Das Vorgehen sieht zunächst die Erstellung einer geeigneten Datenbasis als Referenz vor, in der die Raumbelegung entsprechend der Wissensrepräsentation in der Dempster-Shafer Evidenztheorie modelliert wird. Neue ALS-Messungen werden mit der bestehenden Datenbasis gemäß Dempsters Kombinationsregel verbunden, wobei Änderungen letztlich in Form von Konflikten erkennbar werden. Durch die Berücksichtigung zusätzlicher Attribute lassen sich objektbezogene Aussagen über die Art eingetretener Änderungen treffen. Am Anfang dieses Abschnitts steht eine schematische Übersicht der zeitlichen Abfolge aller bisherigen Verarbeitungsschritte und eine Motivation des gewählten Ansatzes zur automatischen Änderungserkennung.

4.5.1 Vorbemerkungen

Die Einleitung in Kapitel 1 hat die besonderen Randbedingungen erläutert, unter denen das Thema „Änderungserkennung in urbanen Gebieten“ in der vorliegenden Arbeit beleuchtet wird (vgl. Abbildung 1.4). In den vorangegangenen Abschnitten wurde nun eine Auswahl an Verfahren dargestellt, die in einer geeigneten Zusammenstellung die Grundlage für die angestrebte Art der Änderungserkennung schaffen. Die verschiedenen Datenstrukturen sowie Segmentierungs-, Klassifizierungs-, Kalibrierungs- und Registrierungsverfahren sind auf der einen Seite für die Erstellung einer Referenzdatenbank geeignet, wofür eine nachträgliche Prozessierung der Daten angewendet werden kann. In Abschnitt 1.2 wurde diese Phase als „Zeitpunkt t_1“ bezeichnet. Auf der anderen Seite sind die gleichen Verfahrenskomponenten auch in einer „schritthaltenden Variante“ vorhanden, welche während der Datenerfassung zum „Zeitpunkt t_2“ zur Anwendung kommen kann. Die beiden Verarbeitungsstränge werden in Abbildung 4.14 nochmal umfassend schematisch dargestellt. Zum Zeitpunkt t_1 besteht das Ergebnis in einer vollständigen und konsistenten 3D-Erfassung des Stadtgebiets, in der jeder Einzelpunkt einer bestimmten Objektklasse zugeteilt wird. Quasi nebenbei fällt dabei die Kalibrierung des ALS-Systems ab. Während der Mission zum Zeitpunkt t_2 können dann 3D-Daten des aktuellen ALS-Datenstroms an die Referenzdaten angeglichen werden, wobei ebenfalls eine (einfachere) Klassifizierung der Einzelmessungen stattfindet. Die bislang noch fehlende Komponente ist in dieser Übersicht eine geeignete Methode, den Vergleich zwischen dem aktuellen Datenstrom und den Referenzdaten schritthaltend durchzuführen.

Zum Themengebiet der „Änderungserkennung mit Laserscannerdaten“ überwiegen in der Literatur Verfahren, die allein von den koregistrierten Punktwolken ausgehen und durch einen Vergleich der Einzelpunkte oder daraus abgeleiteter 3D-Objekte auf Unterschiede in der abgetasteten

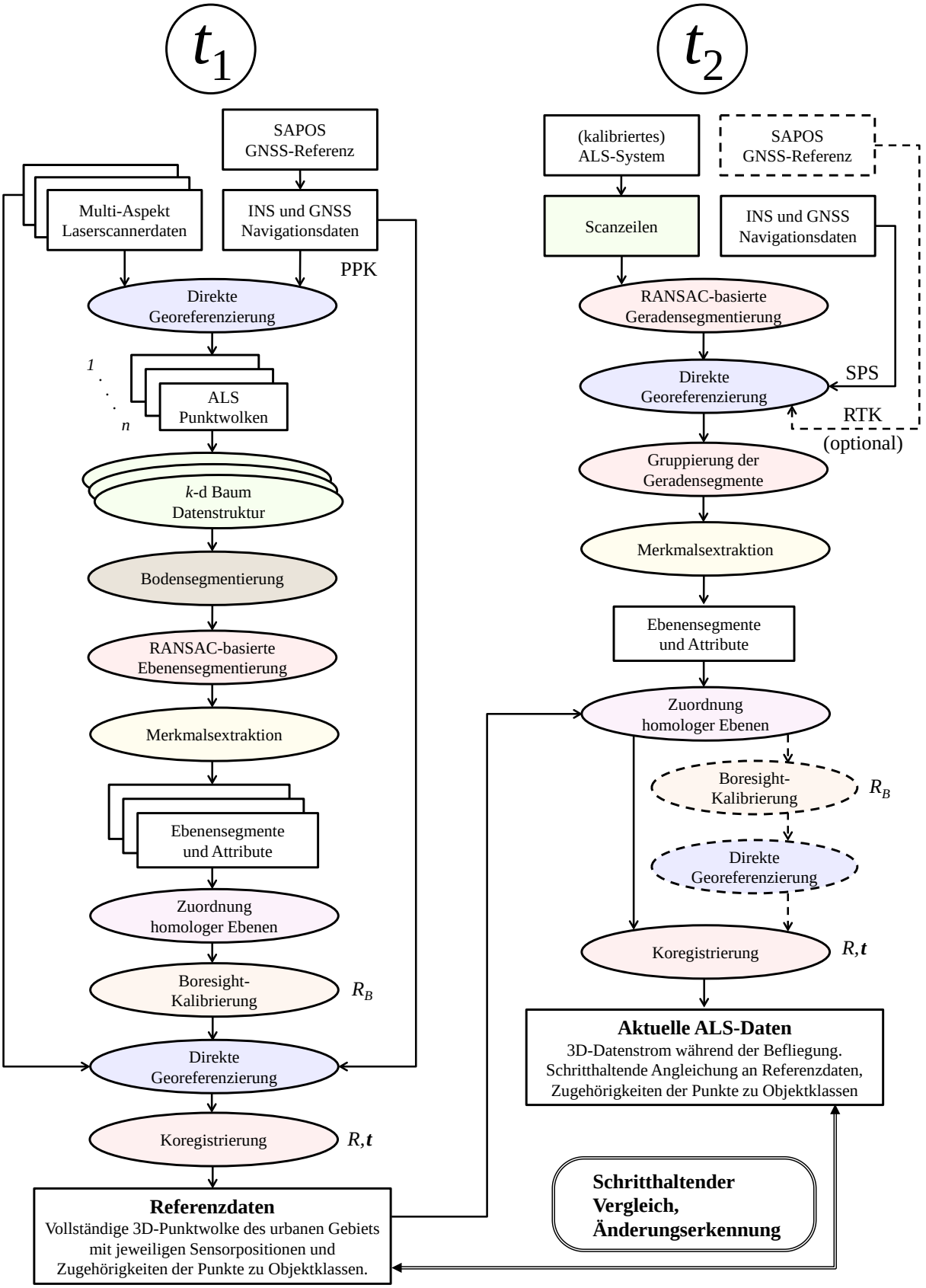


Abbildung 4.14: Die verschiedenen Verarbeitungswege für Multi-Aspekt ALS-Daten (t_1 und t_2) schaffen die Voraussetzungen zur schritthaltenden Änderungserkennung.

Szene schließen. Dies kann im einfachsten Fall durch eine Differenzbildung von digitalen Oberflächenmodellen geschehen, wie es in Abschnitt 2.5.2 umrissen wurde. Im Fall der Betrachtung von Multi-Aspekt ALS-Daten ist bei dieser Vorgehensweise das Hauptproblem darin zu sehen, dass ohnehin viele Unterschiede in den Punktwolken vorliegen. Diese sind aber meistens nicht auf Änderungen zurückzuführen, sondern auf variierende Verdeckungen und Abschattungen. Beispielsweise wäre ein kleineres Gebäude, welches in den Referenzdaten erfasst ist, in den Daten der neuen ALS-Befliegung „unsichtbar“, wenn es aufgrund der Schrägsicht und der gewählten Flugrichtung von einem größeren Nachbargebäude verdeckt werden würde. In diesem Fall ließe sich keine Aussage über das kleinere der beiden Gebäude treffen, aber die Differenzbildung der 3D-Punkte würde dennoch ein Verschwinden anzeigen.

Ein Grund zur Einschränkung von Untersuchungen auf die 3D-Punktkoordinaten ist meist schlicht in der Tatsache zu sehen, dass die verwendeten ALS-Daten von einem Dritten erfasst und als Punktwolke oder DOM aufbereitet wurden und dass kein Zugriff auf die Rohdaten der ALS-Befliegung besteht. In dieser Arbeit wird stattdessen davon ausgegangen, dass alle zur direkten Georeferenzierung der Einzelpunkte benötigten Messdaten gemäß Gleichung 3.1 bzw. Gleichung 3.2 für die Untersuchungen vorliegen. Diese Grundvoraussetzung ermöglicht erst die in Abschnitt 4.3 beschriebene Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems. Sie kann aber auch die Verdeckungsproblematik beim Vergleich von Multi-Aspekt ALS-Daten lösen, wie im Folgenden zu sehen sein wird.

Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Betrachtungsweise beim Vergleich multitemporaler Multi-Aspekt ALS-Daten sieht vor, zusätzlich zu den 3D-Endpunkten von Laserentfernungsmessungen auch die Messstrahlen* in die Untersuchungen miteinzubeziehen. Hierdurch kann zusätzlich zum Vorliegen einer reflektierenden Stelle darauf geschlossen werden, dass der Raum zwischen Laserscanner und Laserpunkt leer (bzw. transparent) sein muss. Außerdem wird deutlich, dass über den Raum hinter der reflektierenden Stelle (in Verlängerung des Laserstrahls) aufgrund dieser Einzelmessung noch keine Aussage getroffen werden kann. Anstelle von 3D-Punktwolken werden also Mengen von 3D-Halbgeraden betrachtet. Jede dieser Halbgeraden hat ihren Ausgangspunkt in der jeweiligen Sensorposition und verläuft durch den zugehörigen Laserpunkt. Der Zustand des Raums entlang der Messrichtung kann vor dem Laserpunkt als *leer* deklariert werden, am Laserpunkt selbst als *belegt* und dahinter als *unbestimmt*. Eine ähnliche Vorgehensweise ist auf dem Gebiet der Robotik weithin bekannt. Dort wird die Raumbelegung zur automatischen Kartenerstellung durch (meist zweidimensionale) Belegungsgitter erfasst. Die im nächsten Abschnitt beschriebene Datenstruktur lehnt sich an solche Belegungsgitter an, wenngleich aber keine Verschlechterung der Auflösung durch Rasterung stattfindet.

4.5.2 Erstellung einer Datenbasis für den späteren Vergleich

Die zum Zeitpunkt t_1 erfassten Referenzdaten beinhalten die (klassifizierten und koregistrierten) Laserpunkte von mehreren überlappenden ALS-Steifen, wobei für jeden Einzelpunkt auch die Sensorposition bekannt ist. In einem klassischen Belegungsgitter würde die Information über den damit gemessenen Raumzustand (*belegt*, *leer* oder *unbestimmt*) auf diskrete Rasterzellen entlang der Strahlen übertragen werden. Dies hat den Nachteil, dass die ursprünglich vorhandene Auflösung auf die Größe der Rasterzellen reduziert wird. Wählt man hingegen eine sehr feine Zellgröße für das Belegungsgitter, so steigt dessen Speicherplatzbedarf rapide an. Dies gilt insbesondere dann, wenn anstelle einer 2D-Karte eine 3D-Abdeckung des Geländes erforderlich ist. Bei sehr feiner Rasterung erhöht sich ebenfalls die Rechenzeit zur Bestimmung und Verarbeitung der betroffenen Zellen, da von einer gewissen Strahlbreite ausgegangen werden muss. Zudem würde

*Der Ausbreitungsweg eines Laserpulses wird im Folgenden ebenfalls als *Strahl* bezeichnet, obwohl es sich hierbei nicht um einen kontinuierlichen Laserstrahl handelt

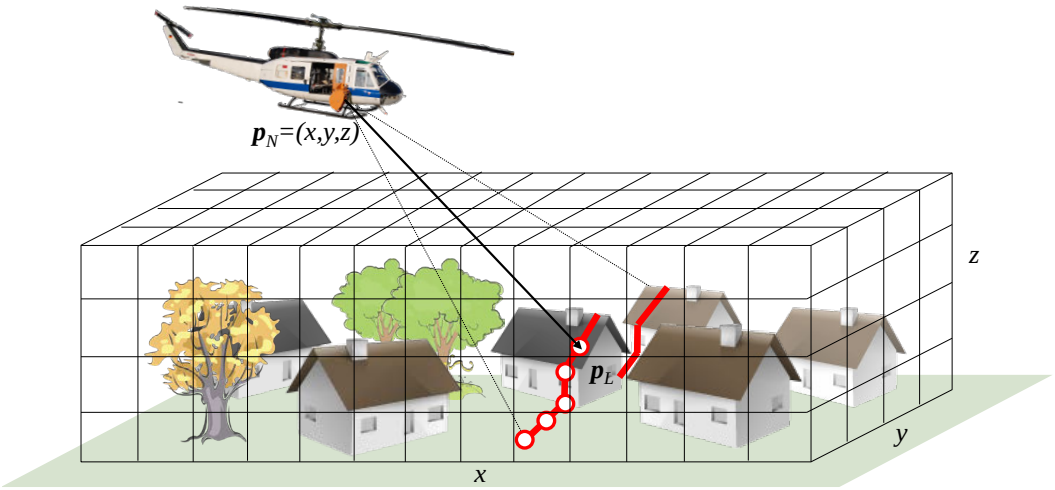


Abbildung 4.15: ALS-Datenerfassung und 3D-Voxelgitter.

die Information sehr vieler Zellen in der späteren Vergleichsphase (t_2) gar nicht benötigt werden, wenn kein neuer Laserstrahl den entsprechenden Raumbereich durchdringt.

Aus den genannten Gründen wird statt der Verwendung eines Belegungsgitters vorgeschlagen, die sich aus den Referenzdaten ergebende Raumbelegung erst während der Vergleichsphase zu berechnen. Dies muss dann nur für solche Raumpunkte geschehen, an denen sich auf eine mögliche Änderung schließen lässt. Hierzu ist es allerdings erforderlich, für jede neu stattfindende Lasermessung alle vergangenen Messstrahlen und -punkte in der Referenzdatenbank ausfindig zu machen, die einen räumlichen Zusammenhang mit der neuen Messung haben. Um diese Suchoperation während der Mission schnell durchführen zu können, wird bei der Nachprozessierung des Referenzdatensatzes ein 3D-Raster definiert, welches das gesamte urbane Gebiet umfasst (siehe Abbildung 4.15). Dieses Raster hat jedoch nicht die Funktion eines Belegungsgitters, sondern speichert in seinen Zellen lediglich die Indizes aller Halbgeraden von Laserstrahlen, die diese Zellen durchdrungen haben. Dieses 3D-Indexfeld dient anschließend als Suchstruktur für windschiefe 3D-Geraden, wobei seine Zellgröße nur geringen Einfluss auf die zu erwartenden Ergebnisse hat. Die Zellgröße kann daher vergleichsweise grob gewählt werden (z.B. das Fünffache des durchschnittlichen Punktabstands), sodass sich eine moderate Datenmenge ergibt.

Es bezeichne $\mathbf{L}$ die geordnete Liste aller Lasermessungen, die zur Erfassung des Referenzdatensatzes zum Zeitpunkt t_1 durchgeführt wurden. Jeder Einzelmessung ist darin ein fortlaufender Index i zugeordnet, der die zeitliche Abfolge der Laserentfernungsmessungen beim Scanvorgang widerspiegelt. Eine Einzelmessung besteht gemäß Gleichung 3.2 aus der Sensorposition $\boldsymbol{p}_N$ und dem gemessenen Entfernungsvektor $\boldsymbol{r} = R_N \circ R_B \circ R_S \circ \boldsymbol{r}_L$, sodass sich die Raumkoordinaten des zugehörigen Laserpunkts $\boldsymbol{p}$ als $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{p}_L = \boldsymbol{p}_N + \boldsymbol{r}$ ergeben. Die Sensorposition $\boldsymbol{p}_N$ und die Richtung von $\boldsymbol{r}$ sind interpolierte Messwerte des GNSS/IMU Navigationssystems, welche nach der Boresight-Kalibrierung R_B und der Koregistrierung $(R, \boldsymbol{t})$ der einzelnen Streifen korrigiert wurden. Ferner bezeichne $\boldsymbol{r}_0$ den jeweiligen Einheitsvektor $\boldsymbol{r} / \|\boldsymbol{r}\|$ der Messrichtung. Falls ein einzelner Laserpuls mehrere Echos erzeugt, so werden diese als eigenständige Einträge in $\mathbf{L}$ erfasst.

Zur Speicherung von Indizes im 3D-Raum werden zwei Voxelgitter $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ und $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ mit identischen Abmessungen definiert, die das für die Betrachtungen relevante urbane Gebiet komplett umfassen (vgl. Abbildung 4.15 und Abbildung 4.16). Die Zellen beider Gitter werden folgendermaßen mit Indizes aus $\mathbf{L}$ befüllt: Jeder Index $i \in \mathbf{L}$ wird einer einzelnen Zelle von $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ zugeordnet, und zwar derjenigen Zelle, die der Position des zugehörigen Laserpunkts $\boldsymbol{p}_i$ entspricht. In dieser Weise repräsentiert $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ eine indexbasierte Rasterung der Punktwolke. $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ hat stattdessen die Aufgabe, in seinen Zellen die Indizes von Strahlen zu speichern, die die entsprechenden Voxel durchdringen.

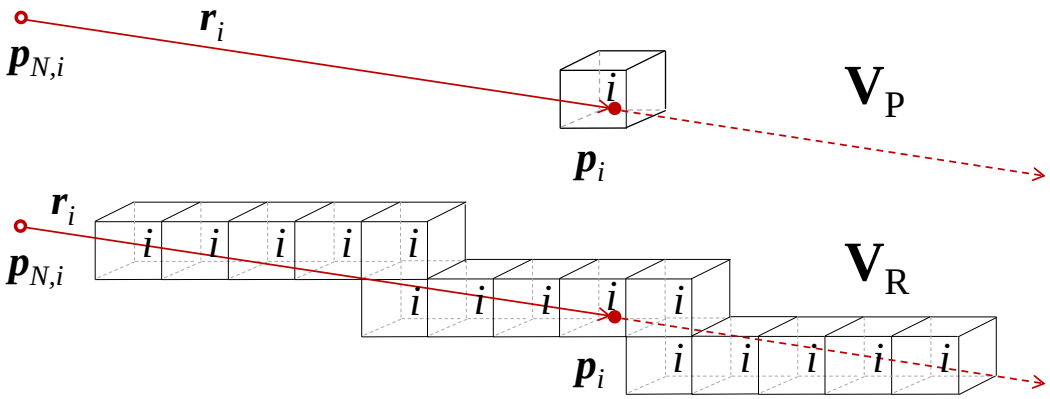


Abbildung 4.16: Befüllen der Voxelgitter $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ und $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ mit Indizes.

Für eine einzelne Laserentfernungsmessung bedeutet das, dass deren Weg durch $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ von der Sensorposition $\boldsymbol{p}_{N,i}$ über $\boldsymbol{p}_i$ und darüber hinaus bis zum Verlassen von $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ als 3D-Rasterlinie bestimmt werden muss. Hierfür kann beispielsweise eine 3D-Variante des Bresenham-Algorithmus (Bresenham [1965]) oder ein DDA-Verfahren angewendet werden, wobei es sich um Standardverfahren zum Zeichnen von Geraden auf Rasteranzeigen in der Computergrafik handelt. Abbildung 4.16 illustriert diesen Vorgang für einen einzelnen Eintrag $(\boldsymbol{p}_{N,i}, \boldsymbol{r}_i)$ aus $\mathbf{L}$. Jede Zelle von $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ und $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ kann nach der Prozessierung aller Einträge aus $\mathbf{L}$ entweder keinen, einen oder mehrere Indizes enthalten. Dies ist im Fall von $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ abhängig von der Anzahl an Laserpunkten, die im entsprechenden Voxel enthalten sind, bzw. im Fall von $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ abhängig von der Anzahl an Strahlen, die den Voxel durchdringen.

4.5.3 Modellierung der Raumbelegung: Die Dempster-Shafer Theorie

Die Verteilung von Strahl- und Punktindizes auf die beiden Gitter $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ und $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ dient dazu, für einen gegebenen 3D-Raumpunkt möglichst schnell alle bereits vorhandenen Lasermessungen zu identifizieren, mittels derer sich eine Aussage über den Belegungszustand des Raums an dieser Stelle treffen lässt. Es wurde bereits erwähnt, dass die Raumbelegung zwischen Sensor und Laserpunkt als *leer* angesehen werden kann und am Laserpunkt selbst als *belegt*. Wenn es mehrere Lasermessungen gibt, die nahezu den gleichen Raumbereich betreffen, so stellt sich die Frage, wie die verschiedenen (evtl. sogar widersprüchlichen) Informationen fusioniert werden können. In einer probabilistischen Modellierung der Raumbelegung kann diese Kombination mit Hilfe des Satzes von Bayes durchgeführt werden. Einem Raumpunkt sind dabei Wahrscheinlichkeiten für die beiden Zustände *leer* und *belegt* zuzuordnen, die in der Summe Eins ergeben. Das Problem hierbei ist, dass diese Wahrscheinlichkeiten in geeigneter Weise initialisiert werden müssten (z.B. als $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{2}$), wobei das Verhältnis der beiden Wahrscheinlichkeiten etwa auf die Bestimmtheit oder Unbestimmtheit der Raumbelegung schließen ließe.

Eine Alternative zur probabilistischen Betrachtungsweise ist in der Evidenztheorie von Dempster und Shafer zu finden, in der der Zustand der Unsicherheit oder Unbestimmtheit explizit behandelt wird (Dempster [1967], Shafer [1976]). Die Anwendung dieser Theorie hat in den hier dargestellten Zusammenhängen mehrere Vorteile: Zum einen lassen sich durch *Unbestimmtheit* Verdeckungen und die daraus entstehenden Informationslücken modellieren. Zum anderen erlaubt Dempsters Kombinationsregel eine Bewertung von Informationskonflikten, die besonders für die automatische Änderungserkennung interessant sind.

Die nachfolgende Beschreibung der Raumbelegung folgt der Terminologie der Dempster-Shafer Theorie. Es sei U die Menge aller möglichen Zustände des betrachteten Systems, welche auch als *Universum* oder *Wahrnehmungsrahmen* bezeichnet wird. Im konkreten Fall der Raumbelegung

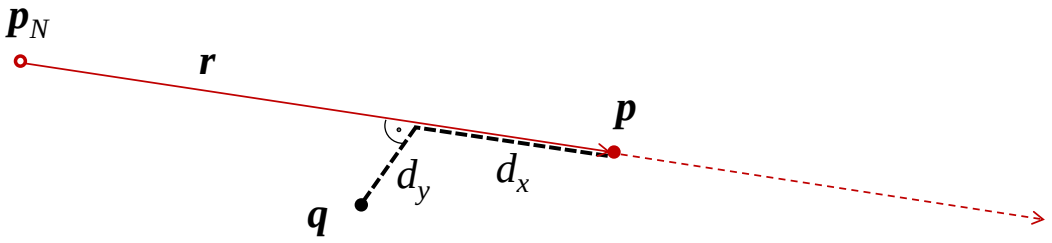


Abbildung 4.17: Longitudinale und transversale Distanz von $\boldsymbol{q}$ zu $\boldsymbol{p}$.

von 3D-Punkten entspricht dieses Universum der Menge $U = \{emp, occ\}$, wobei *emp* und *occ* Bezeichnungen der Zustände „leer“ und „belegt“ sind (engl. empty bzw. occupied). Als Potenzmenge 2^U von U erhält man die Menge $\{\emptyset, \{emp\}, \{occ\}, U\}$. Durch eine *Massefunktion* m wird jedem Element von 2^U eine sogenannte (*Vertrauens-* oder *Glaubens-*)*Masse* aus dem Intervall $[0, 1]$ zugewiesen, mit der zusätzlichen Eigenschaft, dass der leeren Menge die Masse Null zugeteilt wird und die Summe aller anderen Massen Eins ergibt:

$$m : 2^U \to [0, 1], \quad m(\emptyset) = 0, \quad \sum_{A \in 2^U} m(A) = 1. \tag{4.29}$$

Eine Zuordnung von Massen zu den Elementen der Potenzmenge von U, die diese Kriterien erfüllt, wird auch als *Basismassefunktion* (engl. Basic Belief Assignment, BBA) bezeichnet. Die Dempster-Shafer Theorie verwendet die Zuordnungen einer Basismassefunktion zur Definition eines Intervalls, welches die klassische Wahrscheinlichkeit enthält. Die Schranken dieses Intervalls heißen *Grad des Dafürhaltens* (engl. Degree of Belief) und *Plausibilität* (engl. Plausibility). Mit Ausnahme der in Gleichung 4.29 beschriebenen Zusammenhänge betrifft die Masse des Universums $m(U) = m(\{emp, occ\})$ nicht die Einzelelemente $\{emp\}$ und $\{occ\}$ selbst, da diese ihre eigene Masse haben. Stattdessen wird $m(U)$ als *Grad der Unbestimmtheit* interpretiert. Ein Wert von $m(U) = 1$ würde bedeuten, dass die Raumbelegung an der gegebenen Position komplett unbekannt ist.

Zunächst wird der Einfluss betrachtet, den eine einzelne Laserentfernungsmessung $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{p}_N + \boldsymbol{r}$ auf die Masseverteilung an einer beliebigen 3D-Position $\boldsymbol{q}$ im Raum hat. Sei d_x der longitudinale Abstand von $\boldsymbol{q}$ zu $\boldsymbol{p}$ (siehe Abbildung 4.17):

$$d_x = (\boldsymbol{q} - \boldsymbol{p}) \cdot \boldsymbol{r}_0. \tag{4.30}$$

Ebenso bezeichne d_y den transversalen Abstand von $\boldsymbol{q}$ zu $\boldsymbol{p}$:

$$d_y = \|(\boldsymbol{q} - \boldsymbol{p}) \times \boldsymbol{r}_0\|. \tag{4.31}$$

Mit dieser zweidimensionalen (zylindrischen) Parametrisierung der Umgebung eines Laserstrahls $(\boldsymbol{p}_N, \boldsymbol{r})$ wird der Einfluss von $\boldsymbol{p}$ auf die Massen an einer Position $\boldsymbol{q}$ folgendermaßen modelliert:

$$\begin{aligned}
m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\emptyset) &= 0, \\
m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{emp\}) &= \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\lambda d_x - c}}\right) \cdot e^{-\kappa d_y^2}, \\
m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{occ\}) &= \left(\frac{1}{1 + e^{-\lambda d_x - c}} - \frac{1}{1 + e^{-\lambda d_x + c}}\right) \cdot e^{-\kappa d_y^2}, \\
m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(U) &= 1 - m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{emp\}) - m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{occ\}).
\end{aligned} \tag{4.32}$$

Per Definition erfüllen die Zuordnungen 4.32 die Kriterien 4.29, sodass es sich hierbei um eine Basismassefunktion handelt. Der jeweils vordere Faktor von $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{emp\})$ und $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{occ\})$ ist eine

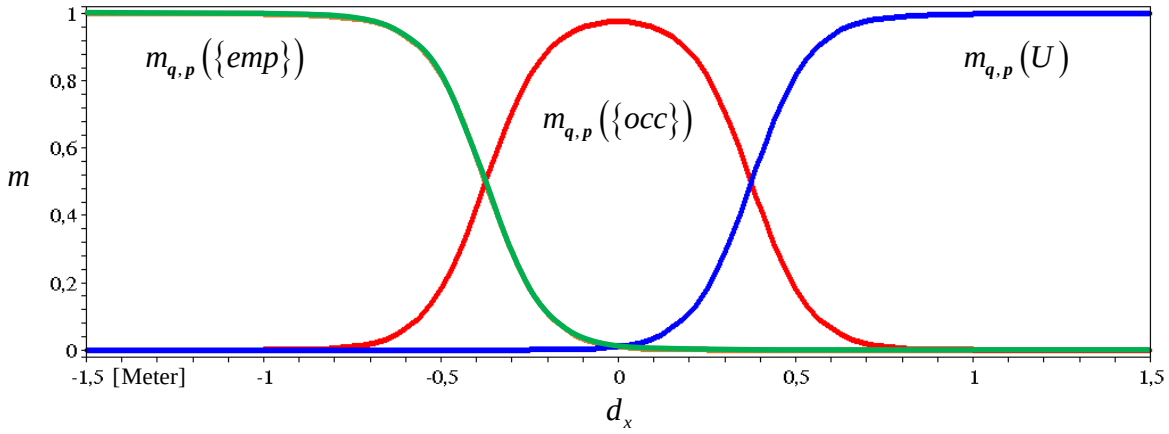


Abbildung 4.18: Verhältnis der Massen entlang des verlängerten Laserstrahls ($d_y = 0$).

Kombination sigmoider Funktionen. Eine davon beschreibt den leeren Raum, der zwischen Sensorposition und Laserpunkt vorliegt, die andere charakterisiert das fehlende Wissen über den Raum hinter dem Laserpunkt. In einem Zwischenbereich spiegelt die inverse Summe beider sigmoider Funktionen die tatsächliche Belegung des Raums am Laserpunkt $\boldsymbol{p}$ wider. Abbildung 4.18 stellt das Zusammenspiel und Verhältnis der sigmoiden Funktionen entlang des Strahls von $(\boldsymbol{p}_N, \boldsymbol{r})$ grafisch dar, wobei die Parameter der Gleichungen 4.32 auf λ=12, c=5 und κ=8 gesetzt wurden. Die Auswirkung des Parameters κ zeigt sich erst außerhalb der Strahlachse, wo der zweite Faktor $e^{-\kappa d_y^2}$ für $d_y > 0$ ein Gaußprofil definiert. Hierdurch wird der Übergang zum Zustand der Unbestimmtheit außerhalb des Messbereichs der Laserentfernungsmessung beschrieben, wie es in Abbildung 4.19 für $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{emp\})$, $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{occ\})$ und $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(U)$ zu sehen ist. Die drei Parameter (λ, c, κ) legen in diesem Modell die Unschärfe der Laserstrahlen und -punkte fest. Diese Parameter sind daher im Einklang mit den physikalischen Eigenschaften und Einschränkungen der durchgeführten ALS-Messungen zu wählen. Insbesondere sollte $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{occ\})$ die vorliegende Punktdichte und die Positionsgenauigkeit der Laserpunkte wiedergeben, die gemäß Tabelle 3.1 unter anderem aus der Entfernungsauflösung des Laserscanners, aus der Genauigkeit des Scanvorgangs und aus der Größe des Laser-Footprints hervorgeht. Wenn $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{occ\})$ eine zu schmale Verteilung darstellt, können sich kaum Überlagerungen ergeben, durch welche aber letztlich Änderungen erkannt werden sollen. Ist $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{occ\})$ hingegen sehr weiträumig verteilt, so würde dies zu Fehlern bei der Änderungsdetektion führen.

4.5.4 Kombination von Evidenzen

Der vorangegangene Abschnitt hat ein Modell vorgestellt, in dem eine einzelne Laserentfernungsmessung $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{p}_N + \boldsymbol{r}$ an jeder 3D-Position $\boldsymbol{q}$ eine spezifische Verteilung von (Vertrauens- oder Glaubens-)Massen der Zustände *leer*, *belegt* und *unbestimmt* hervorruft. Wenn zwei oder mehrere Laserstrahlen die Umgebung von $\boldsymbol{q}$ treffen, müssen die sich jeweils ergebenden Massenzuordnungen kombiniert werden. Seien $\boldsymbol{p}_1 = \boldsymbol{p}_{N,1} + \boldsymbol{r}_1$ und $\boldsymbol{p}_2 = \boldsymbol{p}_{N,2} + \boldsymbol{r}_2$ zwei unabhängige Laserentfernungsmessungen. Durch die Gleichungen 4.32 werden zwei unterschiedliche Zusammenstellungen von Massen $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}_1}$ und $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}_2}$ an einer Position $\boldsymbol{q}$ definiert. Zur besseren Lesbarkeit wird im Folgenden $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}_1}(\{emp\})$ als $m_1(e)$ und $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}_1}(\{occ\})$ als $m_1(o)$ usw. abgekürzt.

Zur Berechnung einer fusionierten Massefunktion kommt die Kombinationsregel von Dempster [1967] zur Anwendung, wobei zunächst der durch m_1 und m_2 hervorgerufene *Konflikt* C genauer spezifiziert wird (umgangssprachlich: „*leer* in m_1 und *belegt* in m_2, oder *belegt* in m_1 und *leer* in m_2“):

$$C = m_1(e)\, m_2(o) + m_1(o)\, m_2(e)\,. \tag{4.33}$$

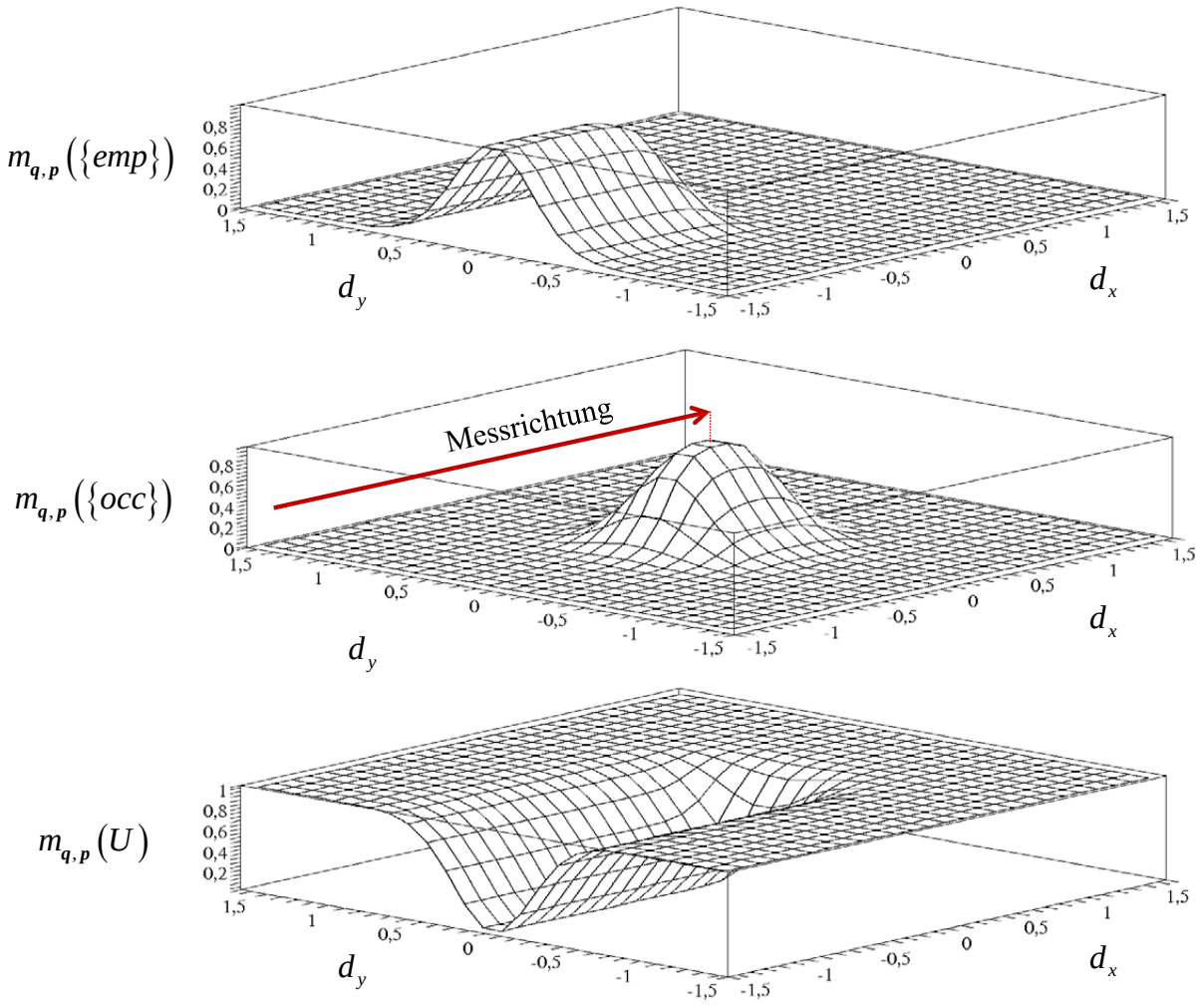


Abbildung 4.19: Massen der Zustände *leer*, *belegt* und *unbestimmt* in der Umgebung des Laserpunkts $\boldsymbol{p}$.

Innerhalb von Dempsters Kombinationsregel werden Konflikte (Widersprüche) ignoriert, was durch den Normalisierungsfaktor $(1 - C)$ in folgender Weise erreicht wird:

$$\begin{aligned} m(e) &= \frac{m_1(e)\, m_2(e) + m_1(e)\, m_2(U) + m_1(U)\, m_2(e)}{1 - C}, \\ m(o) &= \frac{m_1(o)\, m_2(o) + m_1(o)\, m_2(U) + m_1(U)\, m_2(o)}{1 - C}, \\ m(U) &= \frac{m_1(U) \cdot m_2(U)}{1 - C}, \\ m(\emptyset) &= 0. \end{aligned} \tag{4.34}$$

Die in den Gleichungen 4.34 festgelegte Operation zur Kombination von m_1 und m_2 wird als $m = m_1 \oplus m_2$ geschrieben. Das Resultat m beschreibt eine neue Zuordnung von Massen zu den Elementen von 2^U, wobei es sich wieder um eine Basismassefunktion handelt. Darüber hinaus kann gezeigt werden, dass $\oplus$ kommutativ und assoziativ ist. Wenn also die fusionierte Information einer größeren Anzahl von Laserentfernungsmessungen $(\boldsymbol{p}_{N,i}, \boldsymbol{r}_i)$ mit $i \in I$ zu berechnen ist, so kann dies sukzessive und ohne Berücksichtigung der Reihenfolge in eindeutiger Weise geschehen. Hierfür wird im Folgenden die Schreibweise $m = \bigoplus_{i \in I} m_i$ verwendet.

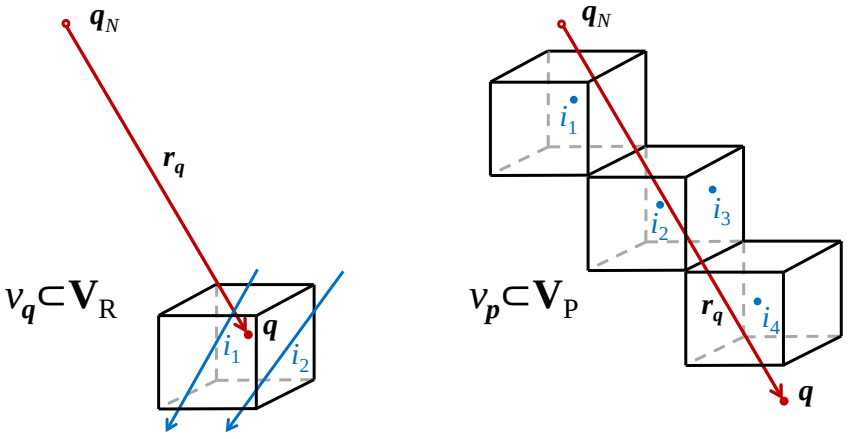


Abbildung 4.20: Mögliche Konflikte zwischen Referenzdaten (*blau*) und einer aktuellen Messung $(\boldsymbol{q}_N, \boldsymbol{r}_q)$ (*rot*): (a) *leerer* Raum am Laserpunkt, (b) *belegter* Raum entlang des Strahls.

4.5.5 Detektion von Änderungen als Belegungskonflikte

In der Vergleichsphase (t_2) wird das zuvor definierte Modell der Raumbelegung verwendet, um zu bewerten, ob eine neue ALS-Einzelmessung $\boldsymbol{q} = \boldsymbol{q}_N + \boldsymbol{r}_q$ die bestehenden Massenzuordnungen im Raum bestätigt oder nicht. Unter den „bestehenden Zuordnungen“ wird dabei die lokale Kombination von Massefunktionen verstanden, die von ALS-Messungen aus dem Referenzdatensatz $\mathbf{L}$ vom Zeitpunkt t_1 stammen. Änderungen in der Szene sind damit als Widersprüche bzw. Konflikte in der Raumbelegung erkennbar. Solche Konflikte entstehen in zwei Fällen, nämlich wenn der Laserstrahl $(\boldsymbol{q}_N, \boldsymbol{r}_q)$ einen Raumbereich durchdringen kann, der als *belegt* markiert ist (Abbildung 4.20b), oder wenn der Laserpunkt $\boldsymbol{q}$ in einer Region gemessen wird, die eigentlich *leer* sein sollte (Abbildung 4.20a).

Der letztgenannte Fall wird zuerst behandelt. Es bezeichne $v_{\boldsymbol{q}} \subset \mathbf{V}_R$ eine Menge von Zellen aus $\mathbf{V}_R$, die in räumlichem Zusammenhang mit $\boldsymbol{q}$ stehen. Diese Untermenge $v_{\boldsymbol{q}}$ kann entweder nur aus dem Voxel bestehen, in dem $\boldsymbol{q}$ enthalten ist, oder (vorzugsweise) aus einer größeren Nachbarschaft. Es kann angenommen werden, dass $v_{\boldsymbol{q}}$ die Indizes von Strahlen aus $\mathbf{L}$ beinhaltet, die eine bedeutende Auswirkung auf die Zuordnung von Massen an der Position von $\boldsymbol{q}$ haben. Sei $I_{\boldsymbol{q}}$ die Menge von Indizes, die mit Voxeln aus $v_{\boldsymbol{q}}$ in Verbindung stehen. Einerseits wird die Kombination $m_{\boldsymbol{q}}$ aller Massefunktionen $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}_i}$ betrachtet, die von Lasermessungen $\boldsymbol{p}_i$ aus $\mathbf{L}$ mit $i \in I_{\boldsymbol{q}}$ an der Position von $\boldsymbol{q}$ verursacht werden:

$$m_{\boldsymbol{q}} = \bigoplus_{i \in I_{\boldsymbol{q}}} m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}_i}. \tag{4.35}$$

Andererseits geht auch aus der aktuellen Messung $(\boldsymbol{q}_N, \boldsymbol{r}_q)$ eine Massenzuordnung $m^*_{\boldsymbol{q}}$ für diese Stelle hervor, nämlich eine Kennzeichnung als *belegter* Raum:

$$m^*_{\boldsymbol{q}}(\{emp\}) = m^*_{\boldsymbol{q}}(U) = m^*_{\boldsymbol{q}}(\emptyset) = 0, \;\; m^*_{\boldsymbol{q}}(\{occ\}) = 1. \tag{4.36}$$

Basierend auf den Zuordnungen kann der Belegungskonflikt $C_{\boldsymbol{q}}$ analog zu Gleichung 4.33 berechnet werden:

$$C_{\boldsymbol{q}} = m_{\boldsymbol{q}}(\{emp\}) \cdot m^*_{\boldsymbol{q}}(\{occ\}) + m_{\boldsymbol{q}}(\{occ\}) \cdot m^*_{\boldsymbol{q}}(\{emp\}), \tag{4.37}$$

und zusammen mit den Werten aus Gleichung 4.36 ergibt sich $C_{\boldsymbol{q}} = m_{\boldsymbol{q}}(\{emp\})$. Hierdurch lassen sich neu hinzugekommene Objekte aufspüren.

Die zweite Art eines Konflikts wird durch *belegten* Raum verursacht, der zwischen der Sensorposition $\boldsymbol{q}_N$ und dem Laserpunkt $\boldsymbol{q}$ vom Laserstrahl $(\boldsymbol{q}_N, \boldsymbol{r}_q)$ durchdrungen wird. Um diese

Konflikte identifizieren zu können, wird die Liste $\mathbf{L}$ des Referenzdatensatzes erweitert, sodass Massenzuordnungen für die Position jedes Einzelpunkts $\boldsymbol{p}$ aus $\mathbf{L}$ gespeichert werden können. Diese werden jeweils zur Kennzeichnung einer *unbestimmten* Raumbelegung initialisiert:

$$m_{\boldsymbol{p}}(\{emp\}) = m_{\boldsymbol{p}}(\{occ\}) = m_{\boldsymbol{p}}(\emptyset) = 0, \;\; m_{\boldsymbol{p}}(U) = 1. \tag{4.38}$$

Der Weg des Laserpulses von $\boldsymbol{q}_N$ nach $\boldsymbol{q}$ kann in $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ als 3D-Rasterlinie nachvollzogen werden, wofür sich erneut ein Standardverfahren aus der Computergrafik einsetzen lässt (z.B. Bresenham [1965]). Es bezeichne $v_{\boldsymbol{p}}$ eine Teilmenge von $\mathbf{V}_\mathtt{P}$, die dieser Rasterlinie entspricht, wobei auch Nachbarzellen entlang des Strahls in $v_{\boldsymbol{p}}$ aufgenommen werden können. Ferner sei $I_{\boldsymbol{p}}$ die Menge aller Indizes, die mit Voxeln aus $v_{\boldsymbol{p}}$ in Verbindung stehen. Innerhalb der erweiterten Liste $\mathbf{L}$ kann anschließend für jede Position $\boldsymbol{p}_i$ mit $i \in I_{\boldsymbol{p}}$ die Massefunktion $m_{\boldsymbol{p}_i}$ entsprechend der Kombination aus $m_{\boldsymbol{p}_i}$ und $m_{\boldsymbol{p}_i,\boldsymbol{q}}$ aktualisiert werden:

$$m_{\boldsymbol{p}_i} \leftarrow m_{\boldsymbol{p}_i} \oplus m_{\boldsymbol{p}_i,\boldsymbol{q}} \;\; \forall i \in I_{\boldsymbol{p}}. \tag{4.39}$$

Sobald der Prozess der ALS-Datenerfassung während der Mission den Bereich eines Punkts $\boldsymbol{p}$ aus $\mathbf{L}$ verlassen hat und die Zuordnungen $m_{\boldsymbol{p}}$ sich somit nicht mehr verändern, kann die akkumulierte Massenzuordnung $m_{\boldsymbol{p}}$ und deren Konflikt zu $m^*_{\boldsymbol{p}}$ beurteilt werden, wobei $m^*_{\boldsymbol{p}}$ wie in Gleichung 4.36 als Kennzeichnung *belegten* Raums definiert wird. Analog zum ersten Fall ergibt sich $C_{\boldsymbol{p}} = m_{\boldsymbol{p}}(\{emp\})$ als Maß des Konflikts, wodurch verschwundene Objekte erkennbar werden.

4.5.6 Berücksichtigung zusätzlicher Attribute

Die in den Abschnitten 4.5.2 bis 4.5.5 vorgeschlagene Vorgehensweise zur automatischen Änderungserkennung ist für die Randbedingungen der Multi-Aspekt ALS-Datenerfassung sehr gut geeignet, denn Verdeckungen werden darin implizit behandelt. Der Vergleich multitemporaler Daten kann im Ablauf der Datenerfassung schritthaltend geschehen, da jede neue Laserentfernungsmessung einzeln bezüglich möglicher Widersprüche zum Referenzdatensatz bewertet wird (d.h. in der Vergleichsphase müssen nicht erst Punktwolken gebildet werden).

Es gibt jedoch auch Nachteile in der bisher beschriebenen Vorgehensweise. Obwohl bei der Erfassung und Erstellung des Referenzdatensatzes und ebenso bei der Scanzeilenauswertung der aktuellen ALS-Daten zahlreiche Segmentierungs- und Klassifikationsergebnisse anfallen, werden diese im zuvor dargestellten Ansatz nicht verwendet. Dabei ist gerade diese Information entscheidend für die (automatische) Interpretation der detektierten Änderungen. Es ist sinnvoll, die aus dem Referenzdatensatz $\mathbf{L}$ stammenden Messungen in unterschiedlicher Weise auf die Massenzuordnungen im Raum wirken zu lassen, und zwar in Abhängigkeit von der jeweiligen Zugehörigkeit der Punkte zu den verschiedenen Objektklassen.

Eine Schwachstelle des beschriebenen Ansatzes zeigt sich zum Beispiel bei der Behandlung von Vegetation. Das Problem besteht hierbei in der Fähigkeit der ALS-Messtechnik, aufgrund der Ausdehnung des Laser-Footprints Vegetation teilweise zu durchdringen. Dies wird im bisherigen Strahlmodell nicht berücksichtigt, daher kann ein einzelner abgestrahlter Laserpuls entlang seiner Messrichtung mehrere Stellen *belegt* aber gleichzeitig auch *leer* markieren. Diese selbst verursachten Belegungskonflikte treten auf, da die einzelnen Echos des Laserpulses als unabhängige Einträge in $\mathbf{L}$ hinterlegt sind. Solche Mehrfachechos können jedoch de facto nicht als unabhängig angesehen werden. Im Zusammenhang mit Vegetation entstehen aber auch bei unterschiedlichen Lasermessungen Konflikte, da die jeweilige Position der gemessenen 3D-Punkte wesentlich größeren statistischen Schwankungen unterworfen ist, als dies bei einheitlichen Oberflächen der Fall wäre. Auch dies führt fast zwangsläufig dazu, dass der gleiche (unveränderte) Raumbereich in den ALS-Messungen sowohl *leer* als auch *belegt* erscheinen kann. Aus den genannten Gründen ist es naheliegend, jene ALS-Messdaten, die mit großer Wahrscheinlichkeit in einem Zusammenhang mit Vegetation stehen, gesondert zu behandeln. Dies kann beispielsweise bedeuten, dass der

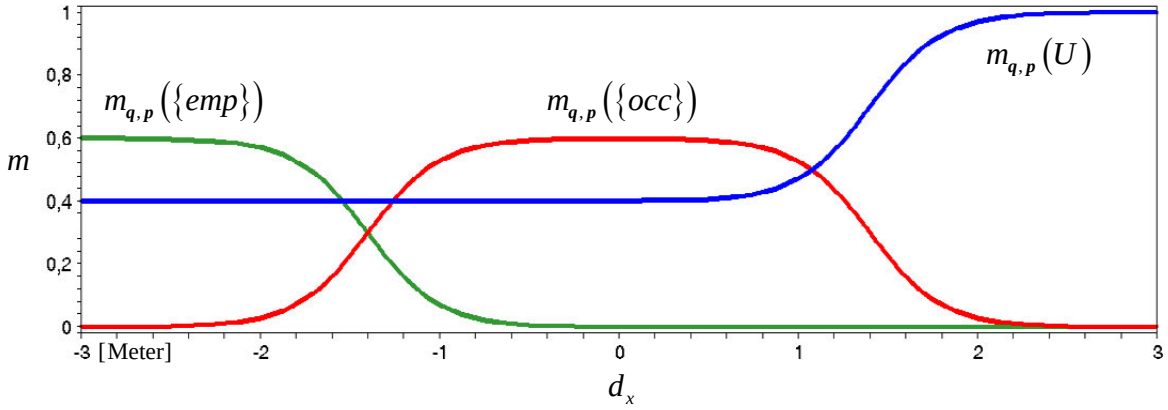


Abbildung 4.21: Verhältnis der Massen bei ALS-Messungen, die im Zusammenhang mit Vegetation gesehen werden (Blick entlang des Strahls, $d_y = 0$).

Grad der Unbestimmtheit $m(U)$ für diese Messungen erhöht wird. Gleichzeitig ist der Bereich weniger „scharf“ zu definieren, in dem der gemessene Laserpunkt zu einer tatsächlichen Belegung $m(\{occ\})$ führt. In einer Abänderung der Zuordnungen 4.32 kann dies mit Gewichtungsfaktoren f_e und f_o sowie alternativen Parametern $(\hat{\lambda}, \hat{c}, \hat{\kappa})$ ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{emp\}) &= f_e \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\hat{\lambda} d_x - \hat{c}}}\right) \cdot e^{-\hat{\kappa} d_y^2}, \\ m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{occ\}) &= f_o \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{-\hat{\lambda} d_x - \hat{c}}} - \frac{1}{1 + e^{-\hat{\lambda} d_x + \hat{c}}}\right) \cdot e^{-\hat{\kappa} d_y^2}, \\ m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(U) &= 1 - m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{emp\}) - m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}(\{occ\}). \end{aligned} \tag{4.40}$$

Abbildung 4.21 zeigt eine mögliche Art der Massenzuordnung für Orte entlang eines Messstrahls, dessen zugehöriger Laserpunkt als Vegetation klassifiziert ist. In diesem typischen Beispiel wird mit $f_e = 0.6$ und $f_o = 0.6$ ein durchgehend hoher Grad der Unbestimmtheit abgebildet. Gleichzeitig modelliert die Parameterwahl $\hat{\lambda} = 5$, $\hat{c} = 7$ (und $\hat{\kappa} = 2$) die unscharfe Position des Laserpunkts, was auch der physikalisch beobachtbaren zeitlichen Aufweitung des Echos entspricht. Die Einordnung von Laserpunkten zur Vegetationsklasse kann auf mehreren Kriterien beruhen:

- Falls für einen einzelnen abgestrahlten Laserpuls mehrere Echos erfasst werden, so sind diese - evtl. mit Ausnahme des letzten - mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Vegetation zurückzuführen.

- Beim Einsatz eines Full Waveform Laserscanners lässt sich Vegetation anhand der Pulsform erkennen und detailliert untersuchen (siehe z.B. Reitberger [2010]).

- Die in Abschnitt 4.2 beschriebenen Segmentierungsverfahren führen zu einer Beurteilung geometrischer Zusammenhänge. Bei der Erstellung des Referenzdatensatzes werden Punkte identifiziert, die in eine lokal planare Umgebung eingebettet sind (Klasse **A**). Ferner werden Punkte der Klasse **G** (Bodenpunkte) erkannt. Zusammenhängende Punkte in planaren Flächen werden an den Rändern ggf. um Punkte der Klasse **B** erweitert. Alle restlichen Punkte der Klasse **B** weisen eine Umgebung unregelmäßig verteilter Nachbarpunkte auf und werden hier der Vegetationsklasse zugerechnet.

Diejenigen ALS-Messungen, die einem oder mehreren der genannten Kriterien genügen, fließen in das Modell der Raumbelegung mit Gleichung 4.40 statt mit Gleichung 4.32 ein.

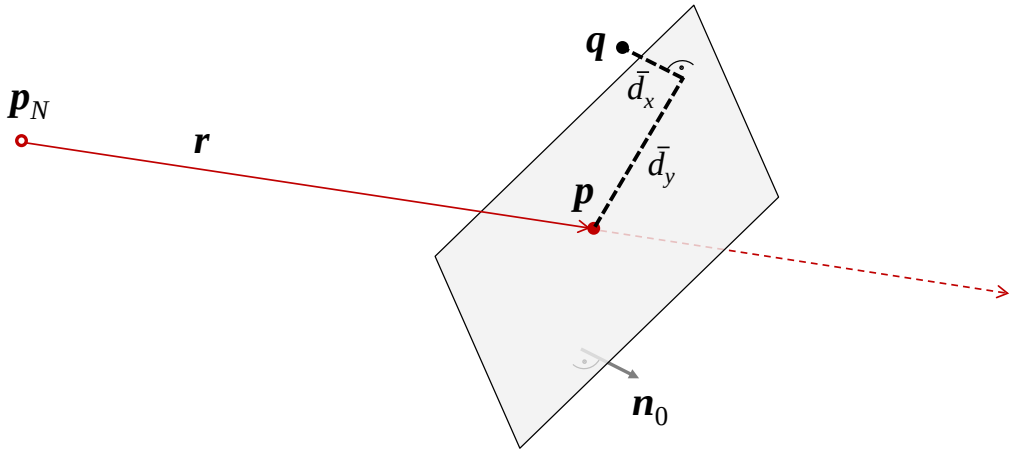


Abbildung 4.22: Distanzen von $\boldsymbol{q}$ zur lokalen Ebene durch $\boldsymbol{p}$ (Klasse **A**).

Eine weitere Möglichkeit zur Verfeinerung des Modells ergibt sich bei allen Laserpunkten im Referenzdatensatz, die im Rahmen der lokalen Hauptkomponentenanalyse der Klasse **A** zugeordnet wurden. Für diese ist ein Normalenvektor vorhanden und es kann davon ausgegangen werden, dass sie lokal in eine glatte Oberfläche eingebettet sind. Aufgrund dieses Wissens wird ein größerer Bereich um den eigentlichen Laserpunkt *belegt* markiert, nämlich so, dass die erkannte Oberfläche im Modell wiedergegeben wird. Es sei $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{p}_N + \boldsymbol{r}$ eine einzelne Laserentfernungsmessung, von der bekannt ist, dass der Laserpunkt $\boldsymbol{p}$ der Klasse **A** angehört. Ferner sei $\boldsymbol{n}_0$ der lokale Normaleneinheitsvektor zu $\boldsymbol{p}$, der gemäß $\boldsymbol{n}_0 \cdot \boldsymbol{r} \geq 0$ in den gleichen Halbraum wie $\boldsymbol{r}$ ausgerichtet wird (siehe Abbildung 4.22). Hiermit lassen sich Abstände $\bar{d}_x$ und $\bar{d}_y$ definieren, die im Gegensatz zu d_x und d_y aus den Gleichungen 4.30 und 4.31 von der Lage der lokalen Oberfläche abhängen:

$$\begin{aligned} \bar{d}_x &= (\boldsymbol{q} - \boldsymbol{p}) \cdot \boldsymbol{n}_0, \\ \bar{d}_y &= \|(\boldsymbol{q} - \boldsymbol{p}) \times \boldsymbol{n}_0\| . \end{aligned} \tag{4.41}$$

Der modellierte Einfluss von $\boldsymbol{p}$ auf die Massenzuordnung an einer Position $\boldsymbol{q}$ richtet sich zunächst nach dem euklidischen Abstand $d = \|\boldsymbol{q} - \boldsymbol{p}\|$. Falls $\boldsymbol{q}$ eine große Entfernung zu $\boldsymbol{p}$ aufweist und d daher über einer vordefinierten Schranke liegt (z.B. $d \geq 3$ m), wird $m_{\boldsymbol{q},\boldsymbol{p}}$ in den Gleichungen 4.32 mit (d_x, d_y) und (λ, c, κ) definiert. Liegt $\boldsymbol{q}$ jedoch nahe an $\boldsymbol{p}$, werden dieselben Gleichungen stattdessen mit den Parametern $(\bar{d}_x, \bar{d}_y)$ und $(\lambda, c, \bar{\kappa})$ ausgewertet. Der kleinere Parameter $\bar{\kappa}$ bewirkt dabei einen breiteren Verlauf *belegten* Raums um $\boldsymbol{p}$, der sich entlang der lokalen Oberfläche erstreckt. Abbildung 4.23 illustriert dies für $\bar{\kappa} = 1$ (und $\lambda = 12$, $c = 5$).

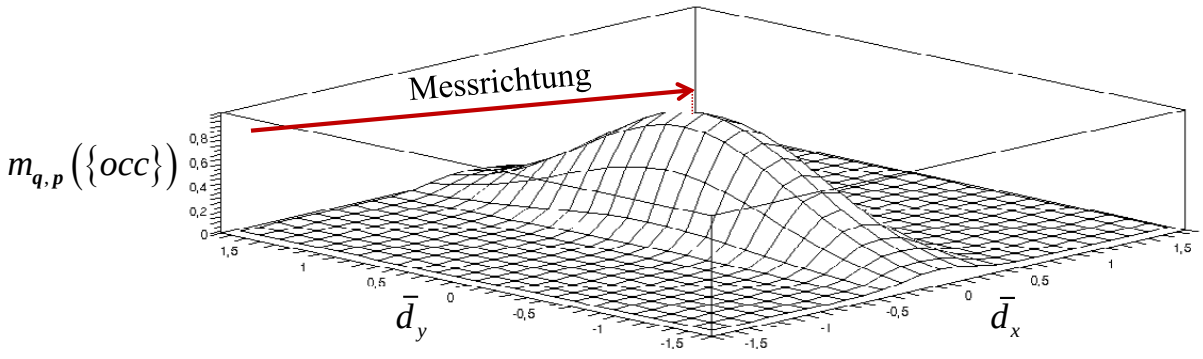


Abbildung 4.23: Masse des Zustands *belegt* in der Umgebung von $\boldsymbol{p}$ (Klasse **A**).

5 Experimente

Nach der Beschreibung der technischen Grundlagen in Kapitel 3 und der Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise in Kapitel 4 werden nun einige Experimente geschildert, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit durchgeführt wurden. Als Erstes werden die verwendeten Sensoren und deren Integration in ein ALS-Experimentalsystem vorgestellt. Danach folgt eine detaillierte Auflistung der durchgeführten Messkampagnen, wobei auch die spezifischen Unterschiede der betrachteten urbanen Gebiete erörtert werden. Ein zusätzlicher Abschnitt erläutert die Implementierung der Verfahren, bevor schließlich die Ergebnisse der Experimente präsentiert werden. Bei diesen Ergebnissen handelt es sich zunächst um die praktische Realisierung und Prüfung der Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems. Außerdem werden Multi-Aspekt ALS-Datensätze unter Minimierung der Restfehler koregistriert. Im Zuge dieser Auswertung werden jeweils sämtliche Einzelschritte aus Abbildung 4.14 zur Erstellung eines Referenzdatensatzes abgearbeitet (Zeitpunkt t_1). Für eines der abgetasteten urbanen Gebiete liegen Datensätze von zwei unterschiedlichen Messkampagnen vor, sodass zuletzt auch das Gesamtkonzept der schritthaltenden Änderungserkennung getestet und bestätigt werden kann (Zeitpunkt t_2).

5.1 Eingesetztes Sensorsystem

Das im Folgenden beschriebene ALS-System wurde in den Jahren von 2006 bis 2009 am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) in Ettlingen zusammengestellt und im Rahmen verschiedener Untersuchungen eingesetzt. Die in der vorliegenden Arbeit behandelte *Änderungserkennung in urbanen Gebieten* ist eines von mehreren Forschungsprojekten, die in dieser Zeit von der ALS-Datenerfassung profitierten. Obwohl die Sensoren in den vier Jahren kontinuierlich zur Verfügung standen, blieb ihr Einsatz aufgrund anderer Restriktionen auf wenige Tage pro Jahr beschränkt. Dies lag vor allem am aufwendigen Planungsprozess einer Flugmesskampagne und dem nur zeitweise vorhandenen Zugang zu einem geeigneten Sensorträger (Hubschrauber mit Pilot). Im Hinblick auf weitere Einschränkungen in Bezug auf Rechnerausstattung und Stromversorgung im Hubschrauber wurde von Anfang an darauf verzichtet, einen tatsächlichen Echtzeitzugriff auf die erfassten Daten vorzusehen. Alle in diesem Kapitel beschriebenen Experimente sind daher im Zuge einer Nachprozessierung der aufgezeichneten Rohdaten durchgeführt worden. Gleichwohl zeigen die Experimente dort, wo es erforderlich ist, die prinzipielle Eignung der Verfahren zur schritthaltenden Prozessierung, da der zeitliche Ablauf im aufgezeichneten Datenstrom berücksichtigt werden kann.

Die nachfolgenden Unterabschnitte nennen die relevanten Spezifikationen der Einzelkomponenten des ALS-Systems und besprechen die herstellerspezifische Software zur Rohdatenaufbereitung, die aufgrund proprietärer Datenformate als unumgänglicher Bestandteil des jeweiligen Sensors angesehen werden kann. Außerdem wird die geometrische Anordnung der Sensoren am Sensorträger gezeigt. Auf eine detaillierte Erläuterung der Verkabelung, Steuerung und Synchronisierung der Komponenten wird an dieser Stelle verzichtet. Diese Details können im Artikel von Schatz [2008] nachgelesen werden, in dem unter anderem das hier verwendete ALS-System beschrieben wird.

5.1.1 RIEGL LMS-Q560 (Version 2006)

Bei dem verwendeten Laserscanner handelt es sich um ein Modell der österreichischen Firma „RIEGL Laser Measurement Systems GmbH“, den RIEGL LMS-Q560. Aufgrund der voranschreitenden technischen Entwicklung sind von RIEGL unterschiedliche Geräte unter dieser Typenbezeichnung fabriziert worden. Das am IOSB vorhandene und für die Messungen eingesetzte Gerät ist das Modell des Jahres 2006, dessen Spezifikationen deshalb leicht von den bei RIEGL [2010] gelisteten abweichen. Der RIEGL LMS-Q560 verwendet das Verfahren der laufzeitbasierten Laserentfernungsmessung bei einer Wellenlänge im nahen Infrarotbereich. Die maximale Pulswiederholrate beträgt 100 kHz, die Strahldivergenz liegt maximal bei 0.5 mrad (ca. 0.03°). Dies entspricht einer Fleckgröße von 25 cm in einer Entfernung von 500 m. Messbare Entfernungen liegen zwischen 30 m und ca. 1 km, wobei eine Entfernungsgenauigkeit von 2 cm erreicht werden kann. Zur Ablenkung der Laserpulse wird ein einzelner rotierender Polygonspiegel eingesetzt, der über vier Facetten verfügt und der damit ein aus parallelen Scanzeilen bestehendes Scanmuster erzeugt (siehe Abbildung 3.4). Die Winkelgenauigkeit der Spiegelsteuerung beträgt 0.001°, und die Rotationsgeschwindigkeit des Ablenkspiegels kann über einen weiten Bereich konfiguriert werden. Typischerweise werden 100 Scanzeilen pro Sekunde erfasst, wobei jede Scanzeile sich über einen Scanwinkel von 60° erstreckt.

Zum Zeitpunkt der Rohdatenerfassung werden keine Entfernungswerte bestimmt. Stattdessen ermöglicht es der RIEGL LMS-Q560 Laserscanner, die gesamte Signalform des Echos jedes abgestrahlten Pulses zu digitalisieren und für die spätere Auswertung aufzuzeichnen (Full Waveform Laserscanner). Die zeitliche Abtastgenauigkeit zur Digitalisierung der Signalform liegt bei einer Nanosekunde (dies entspricht 30 cm Wegstrecke des Laserlichts), wobei der Dynamikbereich der Signalamplitude mit 16 bit wiedergegeben wird. Trotz der vergleichsweise groben zeitlichen Abtastung kann die bereits genannte Entfernungsgenauigkeit von 2 cm erreicht werden. Hierzu werden spezielle Verfahren der Waveform-Analyse eingesetzt (siehe z.B. Wagner et al. [2006]), die in einer Zusatzsoftware „RiAnalyze“ implementiert sind. Mittlerweile sind vergleichbare Laserscanner auf dem Markt verfügbar, bei denen dieser Auswerteschritt während der Datenerfassung vorgenommen werden kann (z.B. RIEGL LMS-Q160), sodass kein Widerspruch zu den in Kapitel 1 motivierten Aufgabenstellungen besteht. Ohnehin ist die Verwendung eines Full Waveform Laserscanners keine grundsätzliche Voraussetzung für die in Kapitel 4 dargestellten Methoden. Es ergeben sich dadurch aber einige Vorteile, da die Signalform zur Vorklassifikation der Messwerte ausgewertet werden kann und die gemessene Amplitude eine Visualisierung der Punktwolke mit einer Grauwert-Textur ermöglicht.

RiAnalyze

Die durch den RIEGL LMS-Q560 Laserscanner erfassten Rohdaten werden in einem proprietären Datenformat abgelegt (SDF), das sich erst mit Hilfe der RIEGL-eigenen Software *RiAnalyze* in ein dokumentiertes Format umwandeln lässt (SDC). Bei dieser Umwandlung handelt es sich auch um eine Vereinfachung der aufgezeichneten Signalformen, da diese als Abfolge von Gaußprofilen approximiert werden. Aus den Positionen der Gaußprofile in der aufgezeichneten Signalform werden schließlich die zugehörigen Entfernungswerte bestimmt. Gleichzeitig ergeben sich Pulsbreite und -amplitude als zusätzliche Merkmale, die zur Klassifikation der Laserpunkte verwendet werden können. Für die Experimente in dieser Arbeit wurde RiAnalyze mit den Standardeinstellungen verwendet, um lesbare SDC-Dateien als „Rohdaten“ für die weitere Verarbeitung zu erzeugen.

5.1.2 Applanix POS AV 410

Das eingesetzte GNSS/INS-Sensorsystem ist ein handelsübliches Modell der Firma Applanix, das POS AV 410. Auch in diesem Fall können unter der gleichen Typenbezeichnung unterschiedliche

GPS-Modus	Positionsgenauigkeit [cm]	Winkelgenauigkeit (Roll, Nick) [°]	Winkelgenauigkeit (Gier) [°]
SPS, C/A	400-600	0.015	0.080
RTK	10-30	0.015	0.040
PPK	5-30	0.008	0.015

Tabelle 5.1: Erreichbare Genauigkeiten des Applanix POS AV 410 (Quelle: Applanix [2009]).

Komponenten im System verbaut sein. Das am IOSB für die Messkampagnen verfügbare Modell beinhaltet eine „IMU-7“ Inertialmesseinheit und einen „Trimble BD950“ GPS-Empfänger. Die Messwerte der beiden Komponenten werden im Betrieb von dem ebenfalls zum System gehörenden Kontrollrechner (Position and Orientation Computing System, PCS) mittels Kalman-Filter verbunden, woraus eine sogenannte „Echtzeitlösung“ der Navigationsdatenbestimmung resultiert. In diese Echtzeitlösung können auch Korrekturdaten einer GPS-Referenzstation einfließen, falls eine entsprechende Datenverbindung zum Zeitpunkt der Messungen besteht (RTK). Bei den durchgeführten Messkampagnen wurde auf diese prinzipiell vorhandene Möglichkeit verzichtet, da aus den oben genannten Gründen ohnehin kein Echtzeitzugriff auf die Messdaten vorgesehen war. Die Echtzeitlösung bildet daher nur die allgemein verfügbare GPS-Genauigkeit ab (SPS, Coarse/Acquisition), die mit Positionsfehlern von mehreren Metern einhergeht. Um nachträglich eine höhere Positionsgenauigkeit zu erreichen, wurden GPS- und IMU-Rohdaten für die spätere Prozessierung gespeichert (PPK). Die zu dieser Nachprozessierung verwendete herstellerspezifische Software wird weiter unten noch erläutert. Tabelle 5.1 zeigt die erreichbaren Genauigkeiten des Applanix POS AV 410 Systems in den drei genannten Betriebsmodi. Neben diesen Angaben ist auch die Driftrate eine relevante Größe, diese ist mit 0.5° pro Stunde spezifiziert.

Das Applanix POS AV 410 liefert seine Positions- und Winkelwerte mit einer Frequenz von 200 Hz. Zur Berechnung dieser Informationen aus den GPS- und IMU-Rohdaten werden vom PCS bzw. von der Software auch die Hebelarme und Relativorientierungen aller Komponenten berücksichtigt. Im Ergebnis werden die Navigationsdaten auf das Scanzentrum des Laserscanners bezogen. Bei den Positions- und Winkelwerten handelt es sich um Angaben bezüglich eines geographischen Koordinatensystems: Längen- und Breitengrad (WGS84), ellipsoidische Höhe, sowie Roll-, Nick- und Gier-Winkel. Diese Datentupel (200 Hz) sind mit einem UTC-Zeitcode versehen, durch den sie sich nach geeigneter Interpolation den gerichteten Laserentfernungsmessungen des RIEGL LMS-Q560 zuordnen lassen (100 kHz). Für die Berechnungen zur direkten Georeferenzierung werden alle Orts- und Winkelangaben in ein lokales kartesisches Koordinatensystem transferiert. Die allgemeinen Schritte dieser Vorgehensweise wurden in Kapitel 3 erläutert.

SAPOS

Zur Durchführung der Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems sind möglichst genaue Positionsdaten erforderlich, wie sie durch die zusätzliche Verwendung von fest installierten GNSS-Referenzstationen erlangt werden können (RTK, PPK). Hierzu besteht prinzipiell die Möglichkeit, eine eigene Referenzstation am Boden einzurichten. In den nachfolgend beschriebenen Experimenten wurde stattdessen auf die deutschlandweit verfügbaren GNSS-Referenzstationen des Satellitenpositionierungsdiensts der deutschen Landesvermessung (SAPOS) zurückgegriffen. Mit über 270 Stationen liefert der SAPOS-Dienst Korrekturdaten sowohl für GPS als auch für GLONASS. Der Zugriff auf diese Korrekturdaten kann in Echtzeitanwendungen über das GSM-Mobilfunknetz erfolgen (RTK). Für die Nachprozessierung (PPK) lassen sich die Korrekturdaten in einem standardisierten Format (Receiver Independent Exchange Format, RINEX) nachträglich herunterladen. Die in diesem Kapitel beschriebenen Experimente verwenden Korrekturdaten aus RINEX-

Abbildung 5.1: Hubschrauber mit seitlich angebrachter Sensorplattform (orange).

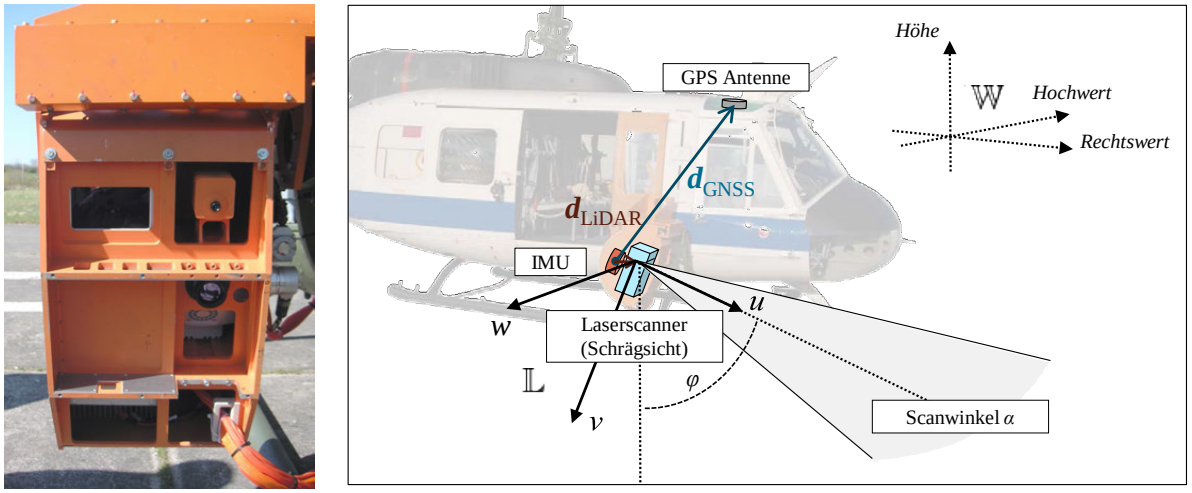
Dateien mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Hz. Da der Betrieb der SAPOS-Referenzstationen in der Verantwortung der Länder liegt, unterscheiden sich die Möglichkeiten zum Generieren und Herunterladen von Korrekturdaten je nach Bundesland. Die Messkampagnen fanden in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein statt. In einigen Ländern ist es möglich, eine virtuelle Referenzstation an der gewünschten Koordinate zu generieren, welche die Korrekturdaten mehrerer benachbarter SAPOS-Stationen kombiniert. In allen anderen Fällen wurde die nächstliegende SAPOS-Station genutzt.

PosPAC MMS

Zur Nachprozessierung der aufgezeichneten GPS- und IMU-Daten wurde die von Applanix für diesen Zweck vorgesehene Software *PosPAC Mobile Mapping Suite* (Version 5.2) verwendet. Die Rohdaten des Applanix POS AV 410 können damit direkt gelesen und verarbeitet werden. Gleichzeitig bietet PosPAC MMS die Möglichkeit, RINEX-Dateien von SAPOS-Stationen und Informationen über die präzisen Ephemeriden der GPS-Satelliten zu importieren. Wie im PCS werden auch von PosPAC MMS alle bekannten Hebelarme und Relativorientierungen der Systemkomponenten berücksichtigt. Die Verarbeitung und Fusion aller Rohdaten mittels Kalman-Filter resultiert in einer optimalen Schätzung der Sensortrajektorie und deren Genauigkeit (engl. Smoothed Best Estimate of Trajectory, SBET). Dieses Resultat kann in vielfältiger Weise in geographische Koordinaten umgerechnet und in unterschiedlichen Formaten ausgegeben werden. Für die Verwendung in dieser Arbeit wurden Datentupel mit UTC-Zeit, WGS84-Koordinaten, ellipsoidischer Höhe und Drehwinkeln (Roll, Nick, Gier) erzeugt und leicht lesbar im ASCII-Format exportiert. Zusammen mit den SDC-Dateien des RIEGL LMS-Q560 Laserscanners sind diese ASCII-Dateien Ausgangspunkt für die in Kapitel 4 beschriebene Verarbeitungskette.

5.1.3 Sensorträger Bell UH-1D

In Vorbereitung der ALS-Datenerfassung wurden die einzelnen Komponenten des ALS-Systems an einem Hubschrauber des Typs Bell UH-1D befestigt, wie es in Abbildung 5.1 zu sehen ist. Die Hauptkomponenten (Laserscanner, IMU) sind in diesem Aufbau fest mit einer Sensorplattform verbunden, die wiederum komplett an einer Seitentür des Hubschraubers angebracht ist. Mitsamt dieser Tür kann das Sensorsystem relativ schnell an baugleiche Hubschrauber adaptiert werden. Die gesamte Sensorplattform lässt sich mit Hilfe eines Stellmotors um die Querachse drehen (Nick-Winkel), sodass die Datenerfassung im Pushbroom-Prinzip in Nadir- oder Schrägsicht unter einem wählbaren Winkel erfolgen kann (vgl. Abbildung 3.4). Abbildung 5.2 zeigt weitere Details der Sensorinstallation: Die GPS-Antenne ist an der Decke der Pilotenkanzel untergebracht. IMU



(a) (b)

Abbildung 5.2: Details der Sensorinstallation: (a) Vorderansicht der Sensorplattform. Das Austrittsfenster des RIEGL LMS-Q560 befindet sich links oben. (b) Positionen der Sensoren am Sensorträger.

und Laserscanner sind mit der seitlichen Sensorplattform möglichst nah und fest verbunden. Die zur Stromversorgung, Steuerung und Datenspeicherung benötigte Hardware befindet sich in einer Haltevorrichtung („Rack“) im Inneren des Hubschraubers.

5.2 Messkampagnen und Testgelände

Die Datenerfassung lief an den verschiedenen Messplätzen nach einem festen Schema ab. Das beschriebene ALS-Experimentalsystem wurde bei jeder Befliegung von einem Bediener im Innenraum des Hubschraubers betrieben, sodass die Piloten nicht beeinflusst wurden. Vor der Ankunft am jeweiligen Messplatz wurde die Sensorplattform mittels Stellmotor auf den gewünschten Winkel eingerichtet. Im verwendeten System wird dieser Winkelwert durch einen Drehgeber bestimmt und an das PCS des Applanix POS AV 410 weitergeleitet, sodass dieses den korrekten Hebelarm $\boldsymbol{d}_{\mathrm{GNSS}}$ speichert und für die GNSS/INS-Integration verwendet. Änderungen der Plattformausrichtung können auch während des Flugs vorgenommen werden. Bei der Datenaufzeichnung blieb der eingestellte Winkel aber immer unverändert. In der Regel wurde er so gewählt, dass sich im Flug eine Schrägsicht von ca. $\varphi = 45°$ noch vorne ergab. Aufgrund allgemeiner Sicherheitsbestimmungen musste die Flughöhe über besiedeltem Gebiet mindestens 300 m betragen, über Großstädten (München, Kiel) sogar 600 m. Bei 300 m Flughöhe und 45° Schrägsicht führt der Scanwinkel des RIEGL LMS-Q560 zu einer Streifenbreite von ca. 500 m mit einem typischen Punktabstand von 50 cm am Boden.

Die ALS-Datenerfassung wurde immer mit einer Kreuzbefliegung des jeweiligen Testgeländes durchgeführt. Das bedeutet, dass das Zentrum der ROI mehrfach aus unterschiedlichen Richtungen überflogen wurde, wobei die Anzahl dieser Überflüge zwischen drei und sechs lag. Durch die Schrägsicht des Laserscanners ergaben sich auf diese Weise mehrere überlappende ALS-Datensätze, die verschiedene Ansichten des jeweiligen urbanen Gebiets zeigen. In Tabelle 5.2 sind einige Informationen zu den durchgeführten Messungen aufgelistet. Aus dieser Tabelle gehen jeweils die Koordinaten der ROI, das Datum der Befliegung, die Anzahl der Überflüge und die Punktdichte im Überlappungsbereich hervor. Zusätzlich sind die geschätzten Positionsfehler angegeben, welche durch die Software *POSPac MMS* bei der Nachprozessierung der Navigationsdaten ermittelt wurden. Die Abschätzung dieser Fehler basiert z.B. auf der vorliegenden Konstellation

Testgebiet	Koordinaten WGS84	Datum tt.mm.jj	Überflüge	Punkte (Überlapp)	Dichte [pt/m²]	Fehler der Sensorposition [cm] Nord	Ost	Höhe	PPK
München (TUM)	N 48° 8.94', E 11° 34.04'	09.10.06	4	3100000	9.7	~400	~400	~800	nein
		02.09.09	4	4400000	5.2	1-20	1-7	1-14	ja
Rendsburg	N 54° 17.94', E 9° 41.28'	22.04.08	5	5400000	18.6	3-8	3-8	4-15	ja
Ruschberg	N 49° 37.18', E 7° 17.33'	01.09.09	3	4200000	17.7	3-10	2-7	4-13	ja
Abenberg	N 49° 14.50', E 10° 57.80'	18.04.08	4	5400000	16.1	2-4	2-3	3-4	ja
		31.08.09	4	6200000	21.1	2-3	2-3	3-4	ja
Kiel	N 54° 19.41', E 10° 8.38'	23.04.08	6	6600000	9.9	3-30	3-12	4-30	ja
Ettlingen (IOSB)	N 48° 56.83', E 8° 24.65'	01.09.09	3	5000000	20.0	3-10	3-5	3-8	ja

Tabelle 5.2: Details der urbanen Gebiete und der dortigen ALS-Datenerfassung.

der GPS-Satelliten und dem Abstand des Hubschraubers zur SAPOS-Referenzstation. Die gespeicherten Rohdaten der einzelnen Befliegungen wurden für unterschiedliche Experimente verwendet:

1. Verarbeitung der ALS-Daten der einzelnen Überflüge mit lokaler Hauptkomponentenanalyse, Bodensegmentierung und Erkennen planarer Flächen,

2. Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems anhand zugeordneter Ebenensegmente,

3. Erstellen eines Referenzdatensatzes durch Minimierung der Restfehler (Koregistrierung) und durch objektbasierte Analyse der Gesamtpunktwolke,

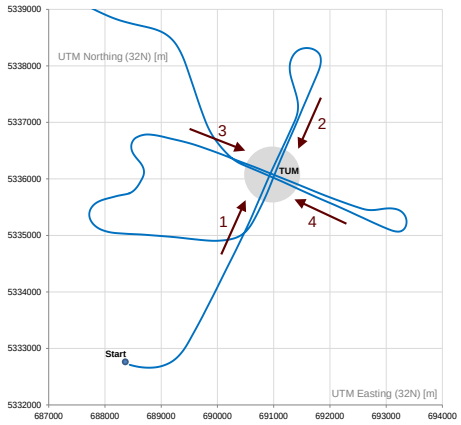
4. Simulation der schritthaltenden Ebenensegmentierung (Scanzeilenauswertung und Gruppierung) im gespeicherten Datenstrom,

5. Zuordnung und Koregistrierung der unterschiedlichen Segmentierungsergebnisse im gleitenden Datenfenster,

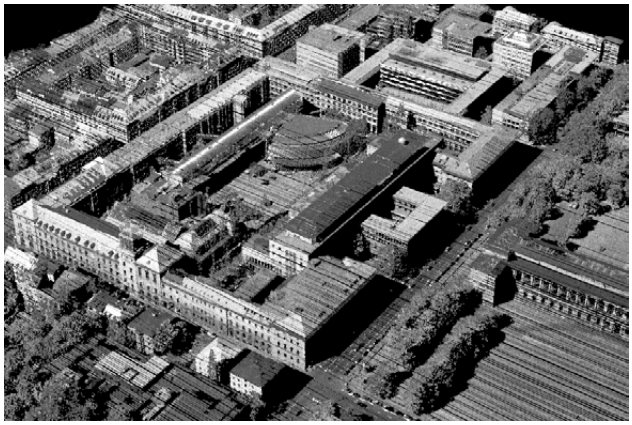
6. Überprüfung des Konzepts der schritthaltenden Änderungserkennung.

In dieser Auflistung betreffen die ersten drei Schritte den Zeitpunkt t_1 aus Abbildung 4.14. Die letzten drei Schritte entsprechen dem Vorgehen des Zeitpunkts t_2. Mit den Messdaten jeder Befliegung war es möglich, die Verarbeitungskette zur Ermittlung der Boresight-Parameter nachzuvollziehen und eine Koregistrierung der Daten der einzelnen Überflüge durchzuführen (Schritte 1-3). Die Verarbeitungskette in den Schritten 4-6 kann vorzugsweise beim Vorliegen multitemporaler Daten getestet werden. Hierfür wurde der Ort Abenberg näher untersucht, für welchen optimale ALS-Daten aus den Jahren 2008 und 2009 zur Verfügung standen.

Bevor die Ergebnisse der Experimente präsentiert werden, werden in den nächsten Unterabschnitten weitere Details der Testgebiete gezeigt. Hierzu gehört jeweils eine Draufsicht der Flugbahn des Hubschraubers und eine Abbildung der erfassten 3D-Daten. In dieser Visualisierung der Punktwolke ist die gemessene Amplitude jedes Echos als Grauwert des zugehörigen Punkts wiedergegeben, sodass sich der Anschein einer Fotografie im nahen Infrarotbereich ergibt. Es ist jedoch ausschließlich das in der Szene reflektierte Laserlicht zu sehen und nicht etwa das Licht der Sonne oder eine Eigenemission der Szene (Wärmestrahlung). Wird das gleiche Gebiet aus unterschiedlichen Richtungen erfasst, so variieren die Grauwerte einer solchen Darstellung aufgrund der Abhängigkeit vom Beleuchtungswinkel. Zugunsten des visuellen Eindrucks werden in den Bildern jeweils nur die Daten eines einzelnen Überflugs visualisiert, obwohl stets mehrere überlappende Punktwolken vorhanden sind. In der Beschreibung wird auf zusätzliche Besonderheiten des jeweiligen Geländes und der dort durchgeführten ALS-Datenerfassung eingegangen.

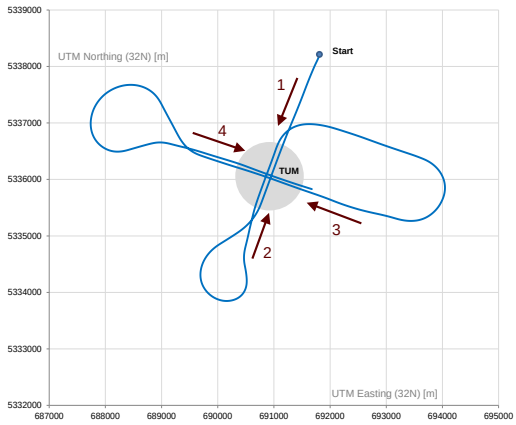


(a)

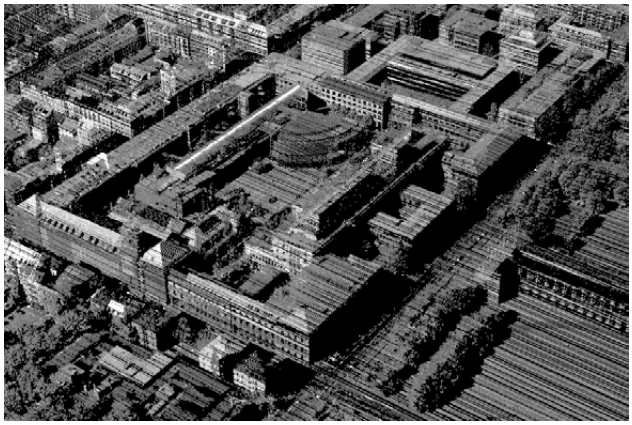


(b)

Abbildung 5.3: Befliegung des TUM Stammgeländes am 09.10.2006: (a) Flugbahn mit vier Überflügen, (b) Punktwolke von Überflug 1.



(a)



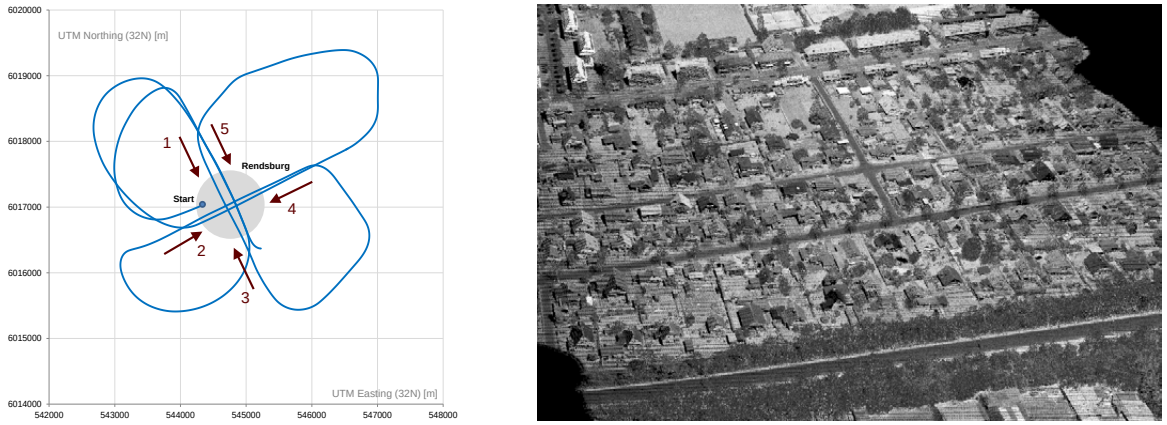
(b)

Abbildung 5.4: Befliegung des TUM Stammgeländes am 02.09.2009: (a) Flugbahn mit vier Überflügen, (b) Punktwolke von Überflug 2.

5.2.1 München (TUM Stammgelände)

In Abbildung 5.3 ist die erste ALS-Befliegung zu sehen, die mit dem beschriebenen Sensorsystem durchgeführt wurde. Es handelt sich dabei um die Erfassung des Stammgeländes der Technischen Universität München (TUM) in der Münchner Maxvorstadt im Oktober 2006. Die gezeigte Flugbahn verdeutlicht das Vorgehen bei der Multi-Aspekt ALS-Datenerfassung: Das Zentrum des Geländes wurde mehrfach entlang geradliniger Flugrichtungen mit dem schräg nach vorne messenden Laserscanner abgetastet. Zwischen den einzelnen Überflügen führte der Hubschrauber Lenk- und Wendemanöver durch, um anschließend die jeweils nächste Richtung anzusteuern. In diesem Beispiel lag die durchschnittliche Flughöhe bei 400 m über Grund, da eine Einflugschneise des Münchner Flughafens unterflogen werden musste. Der Datenstrom des Laserscanners wurde während des gesamten Flugs aufgezeichnet, wobei letztlich nur die Ausschnitte im Überlappungsbereich für die Untersuchungen relevant waren (angedeutet als graue Kreisscheibe). Das heißt, dass aus der gezeigten Flugbahn vier einzelne Punktwolken des TUM-Geländes resultierten, die für Tests von Verfahren aus Kapitel 4 herangezogen werden konnten.

Abbildung 5.3b zeigt eine dieser in Schrägsicht erfassten Punktwolken. Die 3D-Daten werden dort als Bild dargestellt, das einer Ansicht leicht seitlich der tatsächlichen Flugrichtung entspricht.



(a) (b)

Abbildung 5.5: Befliegung eines Wohngebiets in Rendsburg am 22.04.2008: (a) Flugbahn mit fünf Überflügen, (b) Punktwolke von Überflug 3.

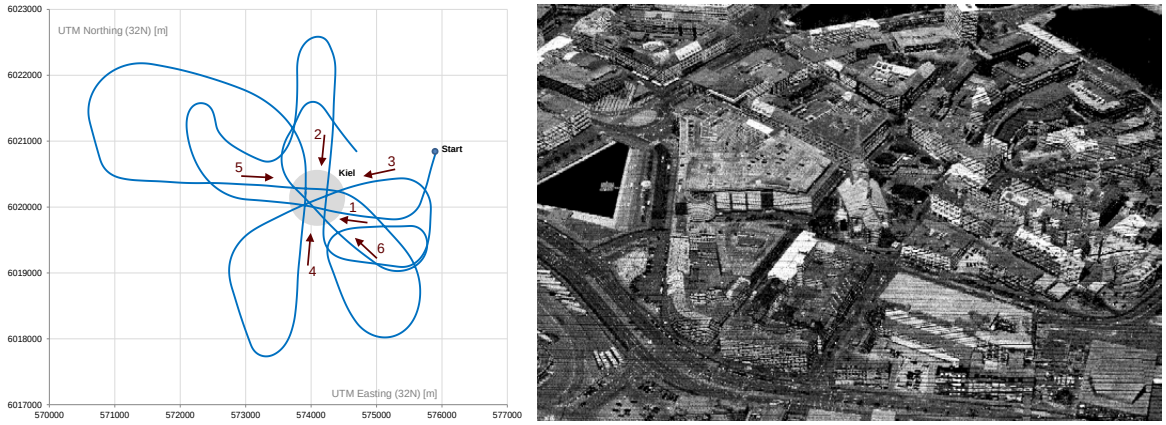
Hierdurch sind sowohl die im Überflug frontal erfassten als auch die lateral fehlenden Fassaden der Gebäude zu erkennen. Am Boden kann man außerdem die einzelnen Scanzeilen des RIEGL LMS-Q560 sehen, die sich bei der geradlinigen Vorwärtsbewegung des Hubschraubers nahezu parallel anordnen.

Da es sich bei der Befliegung im Jahr 2006 um den ersten Einsatz des ALS-Systems in der Praxis handelte, fehlten Erfahrungen in der korrekten Konfiguration der Datenaufzeichnung. Unbeabsichtigt wurden die beteiligten GPS- und IMU-Rohdaten nicht abgespeichert, sondern nur die daraus ermittelte Echtzeitlösung. Dadurch entfiel die Möglichkeit, die Navigationsdaten noch nachträglich zu prozessieren und die GPS-Informationen auf PPK-Genauigkeit zu bringen. Die gemessenen Positionen können daher innerhalb der allgemein verfügbaren GPS-Genauigkeit schwanken, und die im PCS durchgeführte Filterung erzeugte aus diesen fehlerbehafteten Positionen eine geglättete Bahnkurve. Trotz dieser Unzulänglichkeiten wurde der Datensatz in die weiteren Experimente miteinbezogen, da sich damit der Effekt fehlender GPS-Korrekturen untersuchen lässt.

Dasselbe urbane Gebiet wurde im September 2009 erneut beflogen (Abbildung 5.4). Bei diesem Versuch konnten optimale Navigationsdaten für die weitere Prozessierung aufgezeichnet werden, jedoch zeigte sich ein anderer negativer Effekt: Im Gegensatz zur Befliegung von 2006 wurde 2009 die Flughöhe von 600 m eingehalten, was zwar die Erfassung einer ausgedehnteren Fläche ermöglichte, aber auch zu sehr großen Messentfernungen bis zu 1 km führte. Bei solchen Entfernungen stößt die verwendete Technik an ihre Grenzen, vor allem wenn Objekte in der Szene eine geringe Reflektivität aufweisen. Dort entstehen dann Lücken in den Datensätzen, wie auch in diesem Beispiel. Zum Gelände selbst ist anzumerken, dass es als Stadtgebiet überwiegend von geschlossenen Häuserblöcken geprägt ist, welche entlang rechtwinklig verlaufender Straßenzüge angeordnet sind. Inmitten dieser Häuserblöcke liegt das TUM Stammgelände, das als architektonische Besonderheit das Audimax der TUM in einem rundlichen Gebäude enthält. Südlich und westlich davon befinden sich größere Freiflächen mit einzelnstehenden Gebäuden (Glyptothek, Alte Pinakothek).

5.2.2 Rendsburg

Im April 2008 wurde eine Messkampagne in Schleswig-Holstein durchgeführt, die hauptsächlich die 3D-Erfassung der Kieler Altstadt zum Ziel hatte (siehe Abschnitt 5.2.3). Im Vorfeld ergab sich die Möglichkeit, ein Wohngebiet der Stadt Rendsburg zu befliegen. Der Flugablauf und ein Ausschnitt der Daten sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Zufällig entsprach die Abflugrichtung des



(a) (b)

Abbildung 5.6: Befliegung der Kieler Altstadt am 23.04.2008: (a) Flugbahn mit sechs Überflügen, (b) Punktwolke von Überflug 1.

Hubschraubers der Richtung des ersten Überflugs, sodass insgesamt fünf überlappende Punktwolken erfasst werden konnten. Das untersuchte Wohngebiet ist in mehrere Parallelstraßen unterteilt und enthält fast ausschließlich einzelnstehende Wohnhäuser mit Sattel- und Walmdächern. Bei dieser Befliegung war insbesondere die Durchführung der Boresight-Kalibrierung mit Daten dieser schrägen Dachflächen von Interesse.

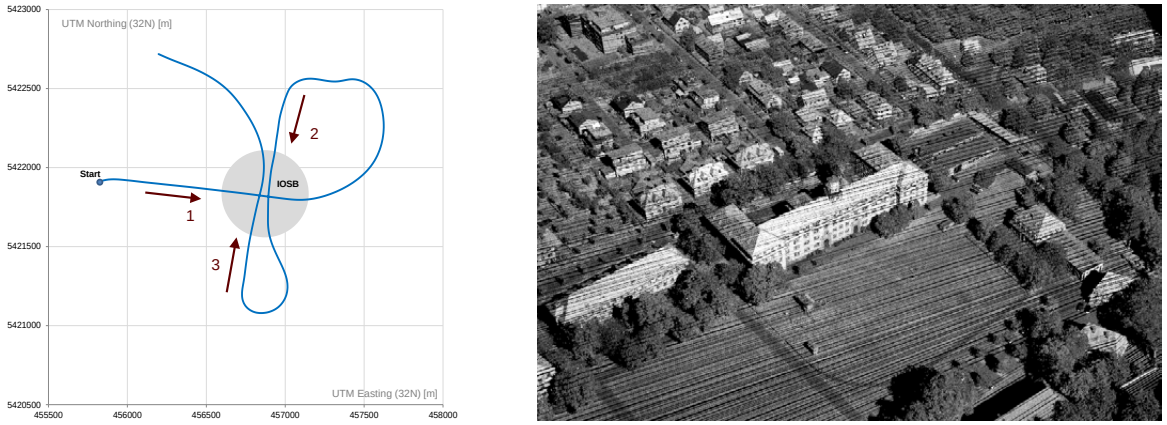
5.2.3 Kiel

Die Befliegung der Kieler Altstadt im April 2008 wurde mit der Absicht geplant, anhand der aufgezeichneten Daten mehrere der in dieser Arbeit besprochenen Szenarien durchspielen zu können. So sollten Daten von vier Überflügen zur Kalibrierung des ALS-Systems und zur Erstellung eines vollständigen Referenzdatensatzes verwendet werden (Zeitpunkt t_1). Zwei weitere Überflüge sollten mit diagonal verlaufenden Flugrichtungen die Daten zur Simulation der schritthaltenden Segmentierung und Änderungserkennung liefern (Zeitpunkt t_2). Abbildung 5.6a zeigt die Flugbahn, die der Pilot aufgrund dieser Planung gewählt hat.

Durch einen Synchronisierungsfehler wichen die Zeitstempel der Laserentfernungsmessungen bei dieser Befliegung um exakt eine Sekunde von der korrekten Zeit ab. Dieser Fehler konnte im Nachhinein zwar leicht identifiziert und korrigiert werden, die zuvor erzeugten Punktwolken zeigten aber deutlich die Notwendigkeit einer exakten Synchronisation der Komponenten im ALS-System, insbesondere weil der Sensorträger Taumelbewegungen vollführt.

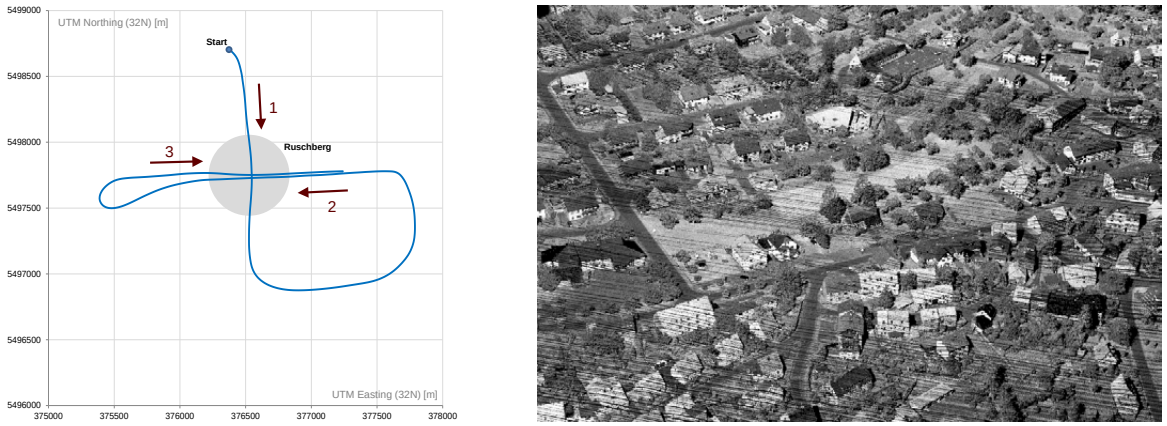
Wie bei den Flügen über München musste auch in diesem Beispiel die für Großstädte vorgeschriebene Mindestflughöhe von 600 m eingehalten werden. Bei den sich ergebenden großen Messentfernungen lieferten Objekte mit geringer Reflektivität und Flächen mit ungünstiger Ausrichtung zu schwache Echos, welche nicht mehr vom Detektorrauschen unterschieden werden konnten. Die in Kiel erfassten Punktwolken weisen daher einige Datenlücken auf, die sich trotz der insgesamt sechs Überflüge in der Gesamtpunktdichte bemerkbar machen (Tabelle 5.2). Ein weiteres Phänomen der ALS-Datenerfassung ist in Abbildung 5.6b zu sehen: Wasserflächen erzeugen bei der verwendeten Laserwellenlänge ebenfalls keine Pulsechos und daher auch keine Datenpunkte. Sie sind nur als Fehlstellen (schwarz) in der Punktwolke erkennbar.

Das Gelände der Kieler Altstadt ist ebenfalls von geschlossenen Häuserblöcken geprägt, die aber im Gegensatz zum Erscheinungsbild der Münchner Maxvorstadt sehr verwinkelt angeordnet sind. Inmitten des kreisförmigen Areals befindet sich die Nikolaikirche am Alten Markt als besonders markantes Gebäude.



(a) (b)

Abbildung 5.7: Befliegung des IOSB-Standorts in Ettlingen am 01.09.2009: (a) Flugbahn mit drei Überflügen, (b) Punktwolke von Überflug 3.



(a) (b)

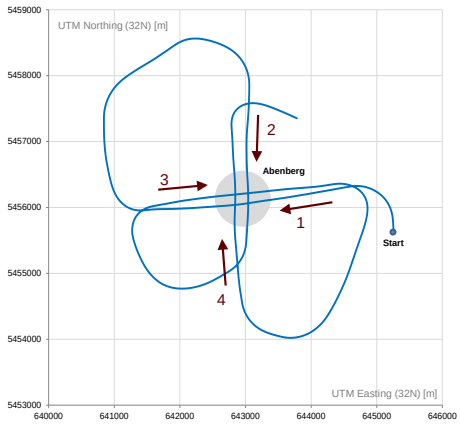
Abbildung 5.8: Befliegung von Ruschberg am 01.09.2009: (a) Flugbahn mit drei Überflügen, (b) Punktwolke von Überflug 1.

5.2.4 Ettlingen (IOSB Gelände)

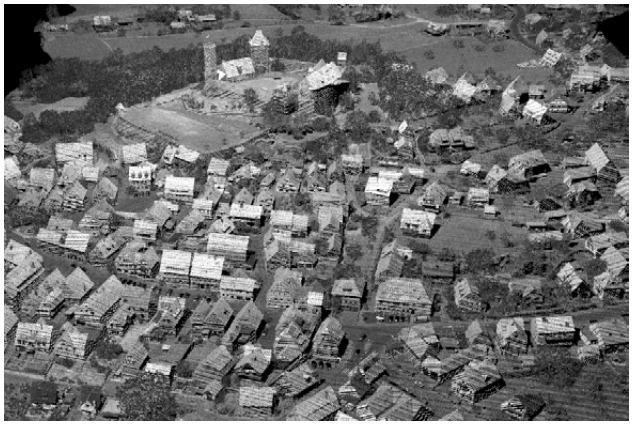
Die im Jahr 2009 durchgeführte Messkampagne spielte sich an mehreren Orten in unterschiedlichen Bundesländern ab. Am 01.09.2009 fand zunächst eine 3D-Erfassung des Institutsgeländes des IOSB am Standort Ettlingen in Baden-Württemberg statt. Da der Beginn der Datenaufzeichnung sich um einige Sekunden verzögerte, konnten nur Daten aus drei von vier Überflügen festgehalten werden (siehe Abbildung 5.7a). Das erfasste Gelände ist ein urbanes Mischgebiet, in welchem sich die ehemalige Rheinlandkaserne mit größeren Freiflächen befindet. Das denkmalgeschützte Institutsgebäude des IOSB ist in der Mitte von Abbildung 5.7b zu sehen. In der unmittelbaren Nachbarschaft schließt sich ein Wohngebiet mit zahlreichen Mehrfamilienhäusern an.

5.2.5 Ruschberg

Am 01.09.2009 wurde außerdem der Ort Ruschberg (Rheinland-Pfalz) mit dem ALS-System erfasst. Auch in diesem Fall konnten nur drei Überflüge aufgezeichnet werden (vgl. Abbildung 5.8a). Das Gelände ist insbesondere für Untersuchungen zur Kalibrierung des ALS-Systems interessant, da es im Gegensatz zu den vorherigen Beispielen eine deutliche Hangneigung aufweist. Die Ort-

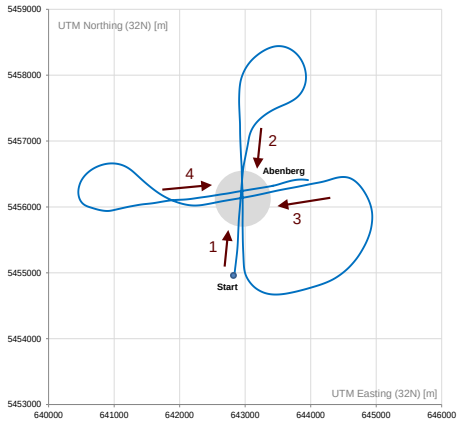


(a)



(b)

Abbildung 5.9: Befliegung von Abenberg am 18.04.2008: (a) Flugbahn mit vier Überflügen, (b) Punktwolke von Überflug 4.



(a)

(b)

Abbildung 5.10: Befliegung von Abenberg am 31.08.2009: (a) Flugbahn mit vier Überflügen, (b) Punktwolke von Überflug 1.

schaft Ruschberg ist geprägt von unterschiedlichen Wohngebieten, die überwiegend aus Einfamilienhäusern bestehen. Während die Gebäude im historischen Ortskern ohne erkennbares Muster angeordnet sind, folgt die Bebauung und die Bauweise in den neueren Ortsteilen klaren Regeln (z.B. Mindestabstände der Gebäude, Parallelstraßen).

5.2.6 Abenberg

Sowohl im Jahr 2008 als auch im Jahr 2009 wurde am ersten Tag der jeweiligen Messkampagne eine 3D-Erfassung der mittelfränkischen Kleinstadt Abenberg vorgenommen. Dies war in beiden Fällen auch als Funktionsprüfung des jährlich neu zusammengestellten ALS-Systems geplant. Im Nachhinein stellte sich heraus, dass gerade diese beiden Befliegungen die geeignetsten Daten für Experimente im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit lieferten. Die beiden Flugpfade und Ansichten der erfassten Punktwolken sind in den Abbildungen 5.9 und 5.10 zu sehen. Beide Befliegungen wurden in vier paarweise antiparallelen oder orthogonalen Überflügen mit 45° Schrägsicht des Laserscanners durchgeführt. Bei einer mittleren Flughöhe von 300 m über Grund ergaben sich Messdistanzen bis 500 m, sodass für die Datenpunkte die in Tabelle 3.1 gelisteten Genauigkeiten angenommen werden können. Darüber hinaus zeigt Tabelle 5.2, dass hier die beste

PPK-Positionierungsgenauigkeit aller Befliegungen erreicht wurde, was auch die besten Ergebnisse bei der Boresight-Kalibrierung erwarten ließ. Für die Experimente zur Änderungsdetektion konnte anhand der 2008er Punktwolken ein vollständiger Referenzdatensatz erstellt werden (t_1), worauf die automatische Änderungserkennung mit dem 2009 aufgezeichneten Datenstrom ablaufen konnte (t_2).

Der Ort Abenberg liegt in einer hügeligen Landschaft und wird von der Burg Abenberg überragt. Zusätzlich zu dieser Burg sind zahlreiche weitere historische und markante Gebäude vorhanden, aber auch neu errichtete Wohnhäuser. Die Straßen sind verwinkelt angelegt, sodass die Orientierung der Dachflächen keine Vorzugsrichtung aufweist. Einige Freiflächen lockern das Stadtbild auf, und unmittelbar neben der Burg grenzt an den Ort ein Waldgebiet an, das sich zur Untersuchung saisonaler Vegetationsänderungen eignet.

5.2.7 Auswirkung eines Boresight-Fehlers in der Praxis

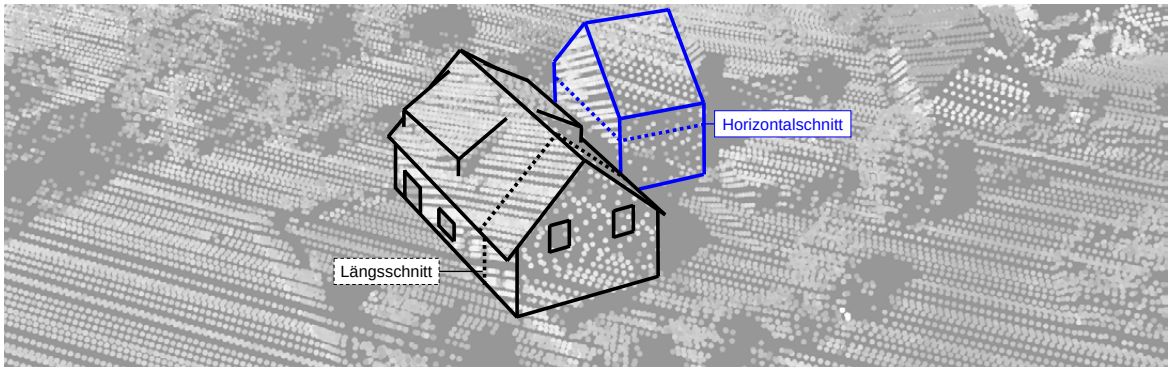
Die aufgezeichneten Rohdaten der einzelnen Befliegungen wurden mit den zum jeweiligen Sensor gehörenden Softwareprodukten in lesbare Formate konvertiert. Bei den Rohdaten des Applanix POS AV 410 fand zusätzlich eine Nachprozessierung in Verbindung mit GPS-Korrekturdaten des SAPOS-Diensts statt. Die in dieser Weise erreichten Genauigkeiten der Sensorpositionen liegen im Bereich weniger Zentimeter (vgl. Tabelle 5.2). Unter Verwendung dieser Navigationsdaten wurden die aufgezeichneten Laserentfernungsmessungen der Überflüge gemäß Gleichung 3.1 direkt georeferenziert, woraus Multi-Aspekt Punktwolken resultierten, von denen jeweils eine in den vorangegangenen Abbildungen visualisiert ist.

Eine Überprüfung der Passgenauigkeit lässt in allen Beispielen aus Abschnitt 5.2 deutliche Diskrepanzen zwischen überlappenden Punktwolken mehrerer Überflüge erkennen. Dies wird in Abbildung 5.11 exemplarisch für die ALS-Daten der Befliegung von Ruschberg veranschaulicht. Dort ist im oberen Teil ein Ausschnitt der Punktwolke aus Abbildung 5.8b herausgegriffen, worin zwei Gebäude durch eine Überlagerung mit Polygonmodellen hervorgehoben sind. Auch in Abbildung 1.1 ist das größere der beiden Gebäude zu sehen (Hauptstraße 31). Innerhalb der Polygonmodelle sind zwei Schnittebenen kenntlich gemacht (horizontal und vertikal), die in allen Punktwolken dieser Befliegung betrachtet wurden.

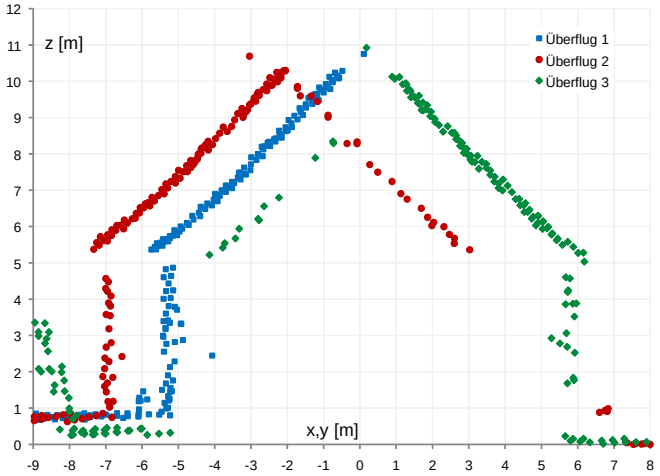
Die akkumulierten Datenpunkte im Bereich dieser Schnitteben sind in den Abbildungen 5.11b und 5.11c dargestellt. Zwischen den 3D-Daten der verschiedenen Überflüge sind Abweichungen von mehreren Metern zu beobachten. Angesichts der hohen Genauigkeit der Navigationsdaten (PPK) lassen sich diese Diskrepanzen nicht durch GPS-bedingte Fehler erklären. Stattdessen ist davon auszugehen, dass eine systematische Boresight-Fehlstellung von Laserscanner und IMU diesen Effekt verursacht. Die Boresight-Parameter des ALS-Systems wurden in den weiteren Experimenten basierend auf den Daten der einzelnen Messplätze bestimmt und verglichen, wobei die in Abbildung 4.14 bzgl. t_1 dargestellte Verarbeitungskette zur Anwendung kam. Der nächste Abschnitt enthält einige Informationen zur experimentellen Implementierung dieser Verfahren, mit der die im Anschluss gezeigten Ergebnisse erzielt wurden.

5.3 Implementierung und Laufzeit der Verfahren

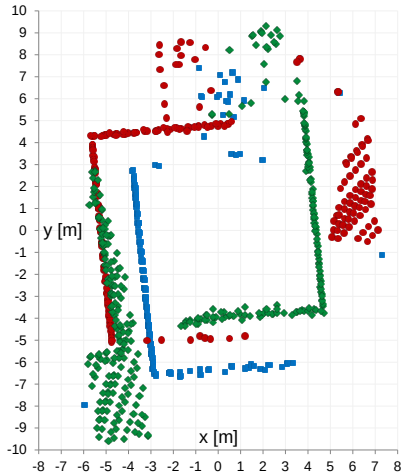
Wie in Abschnitt 1.6 erklärt wurde, ist es primäres Ziel dieser Arbeit, für die Aufgaben der schritthaltenden Änderungserkennung methodische Lösungen zu erarbeiten. Bei den entworfenen Verfahren sollte auch die prinzipielle Eignung zur Echtzeit-Datenprozessierung beachtet werden, dort wo es die Randbedingungen erfordern. Die tatsächliche technische Umsetzung in einem einsatzfähigen System ist aber nicht Gegenstand der Untersuchungen. Ein Datenzugriff während der Erfassung ist beim hier verwendeten Experimentalsystem nicht vorgesehen, stattdessen wurde der Verfahrensablauf an der zeitlich korrekten Abfolge der aufgezeichneten Rohdaten getestet.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 5.11: Details des „Ruschberg 2009“-Datensatzes nach der direkten Georeferenzierung: (a) Ausschnitt mit Polygonmodellen zweier Gebäude. (b) Längsschnitt und (c) Horizontalschnitt der drei überlappenden Punktwolken an den gezeigten Stellen.

Für die Experimente in dieser Arbeit wurde eine prototypische Implementierung aller Verfahren in MATLAB erstellt, die jedoch in keiner Weise laufzeitoptimiert ist. In der Literatur sind aktuelle Beispiele zu finden, in denen Möglichkeiten der Echtzeit-Verarbeitung von ALS-Daten beschrieben werden (vgl. Abschnitt 2.4). Mittlerweile sind auch entsprechende Laserscanner auf dem Markt verfügbar, die einen unmittelbaren Zugriff auf die Scandaten ermöglichen (z.B. RIEGL VQ-580 oder RIEGL LMS-Q160). Unter Berücksichtigung der technischen Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Laserdatenerfassung und -prozessierung ist davon auszugehen, dass die Verfahren dieser Arbeit in einer optimierten Implementierung schritthaltend ablaufen können.

Die als Erstes betrachtete Durchführung der Boresight-Kalibrierung und die Koregistrierung von Multi-Aspekt ALS-Daten zur Erstellung eines Referenzdatensatzes sind keine zeitkritischen Aufgabenstellungen. Dennoch sind auch hierfür Verfahren wünschenswert, die zeitnah ein Ergebnis liefern können. Tabelle 5.3 gibt einen Überblick über die Verfahrensschritte und deren Anteil an der Gesamtlaufzeit. Die angegebenen Werte wurden empirisch bestimmt, indem die einzelnen Methoden auf den „Abenberg 2008“-Datensatz angewendet wurden. Die Laufzeitmessungen basierten also auf Laserdaten (RIEGL LMS-Q560) und Navigationsdaten (Applanix POS AV 410) aus insgesamt vier Überflügen. Der Überlappungsbereich aller Streifen hat einen Flächeninhalt von ca. 500×500 m^2 und beinhaltet 5 400 000 direkt georeferenzierte 3D-Punkte, die innerhalb von ca. 4×20 Sekunden erfasst wurden. Aufgrund der in Abbildung 5.9a gezeigten Wendemanöver des Hubschraubers nahm der Gesamtvorgang der Datenerfassung 11 Minuten

Verfahrensschritt	Anteil an der Gesamtlaufzeit
Synchronisation und Interpolation der Navigationsdaten, direkte Georeferenzierung	28 %
Erstellung von *k*-d Suchbäumen mit der C++ Bibliothek *ANN* und MATLAB-Einbindung	4 %
Bodensegmentierung mittels Flächenwachstum	28 %
Lokale Hauptkomponentenanalyse (PCA)	11 %
RANSAC-basierte Ebenensegmentierung	25 %
Merkmalsextraktion und Zuordnung	2 %
Boresight-Kalibrierung	1 %
Koregistrierung und Angleichung der 3D-Punktmengen aller Überflüge	1 %

Tabelle 5.3: Beitrag der einzelnen Verfahrensschritte zur Gesamtlaufzeit bei der Erstellung eines Referenzdatensatzes („Abenberg 2008“).

in Anspruch. Demgegenüber wurde die Datenprozessierung in 28 Minuten durchgeführt, wobei gewöhnliche PC-Hardware zum Einsatz kam („Notebook“ mit Intel Core 2 Duo P9400 2.4 GHz Prozessor). Die angegebene Laufzeit ist aber hauptsächlich auf die ineffiziente Implementierung in MATLAB (MATLAB 2007a) zurückzuführen. Einige der in Kapitel 4 beschriebenen Methoden sind stark von Suchoperationen in den 3D-Punktwolken abhängig, weswegen insbesondere effiziente Suchstrukturen benötigt werden. Aus diesem Grund wurde die zunächst verwendete eigene MATLAB-Implementierung für Octrees durch die freie C++ Bibliothek *ANN* zur Erstellung und Verwendung laufzeitoptimierter k-d Suchbäume ersetzt (Arya & Mount [2000]). Dies macht Tabelle 5.3 an der entsprechenden Stelle etwas weniger aussagekräftig.

5.4 Ergebnisse der Experimente

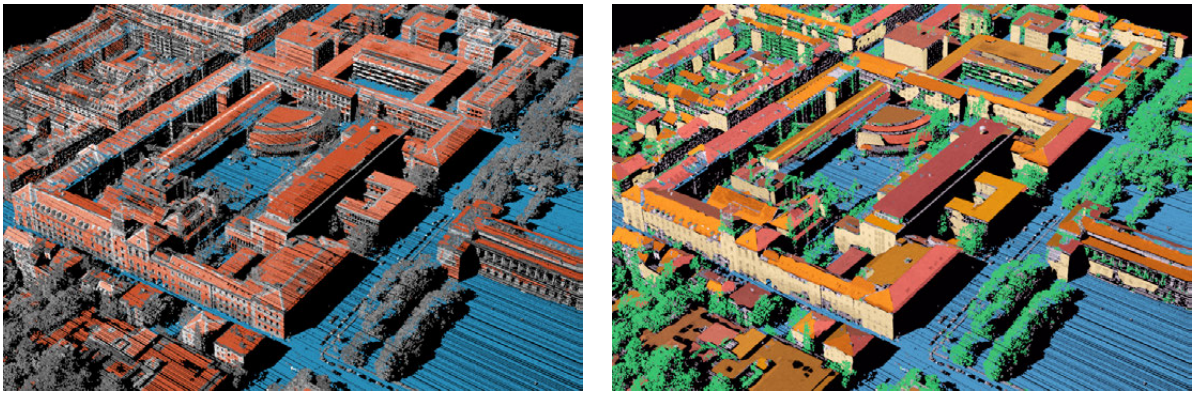
In den nächsten beiden Unterabschnitten werden Resultate präsentiert, die sich während und nach der Verarbeitung der ALS-Daten aus den verschiedenen Befliegungen ergeben haben. Die Prozessierung folgte dem in Abbildung 4.14 illustrierten Ablauf, sodass einerseits der Verarbeitungsstrang t_1 betrachtet wurde, der die objektbasierte Analyse der Daten, die Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems und die Koregistrierung der korrigierten Punktwolken zum Ziel hat. Diese Auswertung wurde für alle vorhandenen Datensätze durchgeführt, damit insbesondere die Ergebnisse der Boresight-Kalibrierung verglichen werden können. Andererseits wurde auch der Verarbeitungsstrang t_2 bearbeitet, in dem multitemporale ALS-Daten in schritthaltender Weise segmentiert, an den Referenzdatensatz angeglichen und auf Veränderungen untersucht werden. Für diese Untersuchungen wurden ALS-Daten der Befliegung „Abenberg 2009“ im Vergleich zu den Referenzdaten „Abenberg 2008“ betrachtet.

5.4.1 Ergebnisse der ALS-Systemkalibrierung und Koregistrierung

Auf dem Weg zur Bestimmung der Boresight-Winkel β_1, β_2 und β_3 und zur Koregistrierung der Multi-Aspekt Datensätze sind verschiedene Teilaufgaben zu lösen, die in Tabelle 5.3 aufgeführt sind. Die hierfür entwickelten Methoden wurden in Kapitel 4 vorgestellt. In den einzelnen Verfahrensschritten sind diverse Parametereinstellungen vorzunehmen, die sich etwa nach der mittleren Dichte und Positionierungsgenauigkeit der Laserpunkte richten. Tabelle 5.4 gibt einen Überblick über die z.B. in Algorithmus 1 gewählten Werte der Parameter. Diese Einstellung wurde für die Verarbeitung aller beschriebenen Datensätze beibehalten. Sie beruht größtenteils auf Erfahrungen und anschaulichen Überlegungen. In diesem Rahmen sind auch Modifikationen der einzelnen Parameter möglich, ohne dass sich ein merklicher Einfluss auf die Ergebnisse ergibt.

Abschnitt der Arbeit	Parameter	eingesetzter Wert
Algorithmus 1, Schritt <2>	Radius der lokalen Hauptkomponentenanalyse (PCA) obere Schranke für Klasse **A**	r=3 m λ_1<0.01·(n+1)
Algorithmus 1, Schritt <3>	maximale Steigung (Boden)	$d_{\max}$=0.25
Algorithmus 1, Schritt <5>	Suchradius Zutreffende Normalenrichtungen	r=3 m $\|\boldsymbol{n}_s \cdot \boldsymbol{n}_i\|$>0.966
Algorithmus 1, Schritt <7>	Mindestanzahl an Punkten in S	#S>7
Algorithmus 1, Schritt <8>	RANSAC-Konfidenzintervall	0.2 m
Algorithmus 1, Schritt <9>	mindestens erforderlicher Anteil der „Inlier“	75%
Algorithmus 1, Schritt <13>	Suchradius Maximalabstand, bei dem ein Punkt noch zur Ebene gehört Zutreffende Normalenrichtungen	r=3 m ε=0.25 m $\|\boldsymbol{n}_0 \cdot \boldsymbol{n}_k\|$>0.966
Algorithmus 1, Schritt <15>	Durchläufe der inneren Schleife	3
Abschnitt 4.2.5	Suchradius (Schwerpunkte der Ebenensegmente) Zutreffende Normalenrichtungen Schwellwerte (4.10) und (4.11)	15 m $\|\boldsymbol{n}_{0a} \cdot \boldsymbol{n}_{0b}\|$>0.966 ε_1=0.1, ε_2=0.05
Abschnitt 4.3.1	RANSAC-Konfidenzintervall	0.4 m

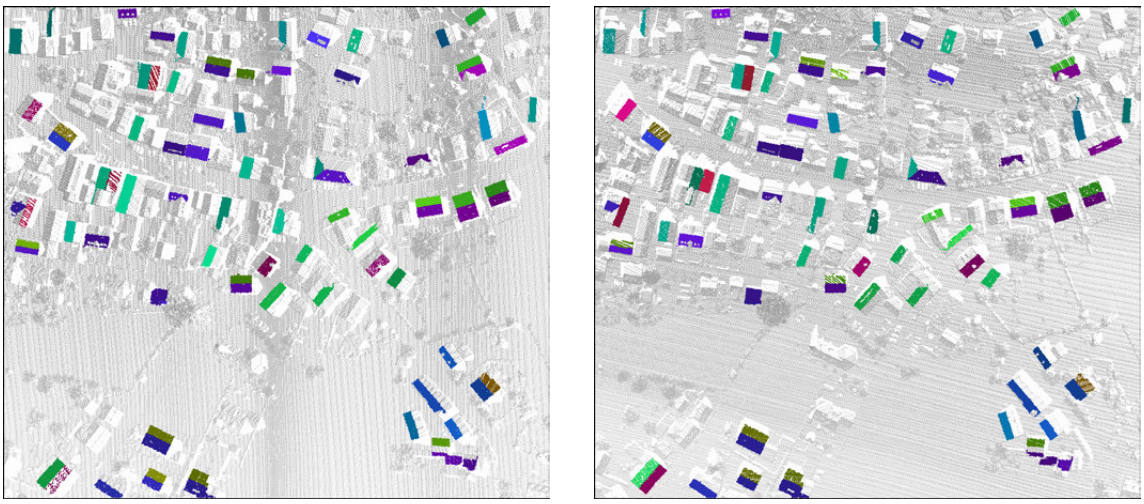
Tabelle 5.4: Die für die Experimente gewählten Parametereinstellungen der einzelnen Verfahrensschritte.



(a) (b)

Abbildung 5.12: Zwischenergebnisse der Auswertung von „München (TUM) 2006“, Überflug 1: (a) Klassen **G** (blau), **B** (grau) und **A** (rot), (b) Boden, Vegetation und Ebenensegmente.

Die Verarbeitungskette t_1 sieht vor, zunächst in den Punktwolken jedes einzelnen Überflugs eine Vorklassifikation der 3D-Punkte vorzunehmen. Mittels der Bewertung einer lokalen Hauptkomponentenanalyse findet dabei eine Einteilung der Einzelpunkte in die Klassen **A** und **B** statt. Unabhängig davon werden durch ein Flächenwachstumsverfahren Bodenpunkte der Klasse **G** identifiziert. Im Anschluss wird eine Ebenensegmentierung durchgeführt, wofür ein iterativer Wechsel von RANSAC-basierter Ebenenanpassung und Flächenwachstum zum Einsatz kommt. Diese Methodik ist in Algorithmus 1 zusammengefasst und wurde für die Daten aller 33 Überflüge aus Tabelle 5.2 mit den in Tabelle 5.4 angegebenen Parametereinstellungen durchgeführt. Abbildung 5.12 zeigt exemplarisch einige Zwischenergebnisse, die bei dieser Verarbeitung im Fall der „München (TUM) 2006“-Befliegung für die Daten aus Überflug 1 angefallen sind. In Abbildung 5.12a ist zunächst die Unterscheidung der Klassen **G**, **B** und **A** zu sehen, während Abbildung 5.12b bereits die Ergebnisse der Ebenensegmentierung zeigt. Die einzelnen Ebenensegmente sind darin flächig und in einem Farbton dargestellt, der sich aus ihrer Normalenrichtung ergibt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse der lokalen Hauptkomponentenanalyse verwendet, um die restlichen Punkte ggf. einer Vegetationsklasse zuzuordnen (hier grün dargestellt).



(a) (b)

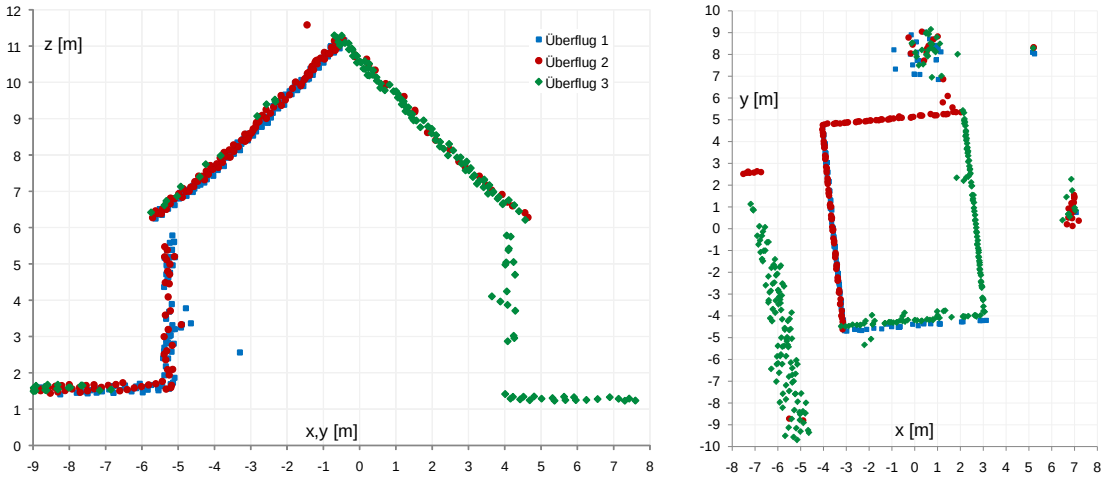
Abbildung 5.13: Zuordnung homologer Ebenensegmente zwischen den Punktwolken aus (a) Überflug 3 und (b) Überflug 4 („Abenberg 2008“, Draufsicht).

Testgebiet	Anzahl homologer Ebenensegmente, (Flachdächer / Satteldächer / Fassaden)	β_1, (σ) [°]	β_2, (σ) [°]	β_3, (σ) [°]
München (TUM) 2006	218, (157 / 47 / 14)	0.0837, (0.0041)	0.0039, (0.0007)	-0.1492, (0.0048)
München (TUM) 2009	296, (148 / 118 / 30)	-0.0132, (0.0033)	0.1762, (0.0008)	0.2102, (0.0045)
Rendsburg 2008	249, (0 / 245 / 4)	-0.0102, (0.0061)	0.1825, (0.0014)	0.1894, (0.0026)
Ruschberg 2009	116, (16 / 92 / 8)	-0.0073, (0.0041)	0.1848, (0.0010)	0.1782, (0.0019)
Abenberg 2008	320, (46 / 261 / 13)	0.0305, (0.0050)	0.1510, (0.0013)	0.1684, (0.0036)
Abenberg 2009	324, (42 / 253 / 29)	-0.0015, (0.0011)	0.1739, (0.0003)	0.1702, (0.0007)
Kiel 2008	670, (475 / 150 / 45)	-0.0190, (0.0100)	0.1632, (0.006)	0.1891, (0.0077)
Ettlingen (IOSB) 2009	60, (31 / 24 / 5)	-0.0485, (0.0032)	0.1796, (0.0009)	0.1237, (0.0018)

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Boresight-Kalibrierung: Winkel der IMU/Laserscanner-Fehlstellung.

Im nächsten Schritt wurden Merkmale der gefundenen Ebenensegmente bestimmt, anhand derer homologe Flächenstücke in Punktwolken der gleichen Befliegung erkannt werden konnten. Abbildung 5.13 zeigt dies exemplarisch für zwei Überflüge aus der „Abenberg 2008“-Befliegung. Diejenigen Ebenensegmente, für die ein entsprechendes Gegenstück in der jeweils anderen Punktwolke gefunden werden konnte, sind in dieser Draufsicht farblich hervorgehoben. In Abbildung 5.13 ist der Vorgang für die Überflüge 3 und 4 dargestellt, die Zuordnung von Ebenensegmenten wurde aber für alle sechs möglichen Paarungen der vier Überflüge vorgenommen.

Die zugeordneten Ebenensegmente waren anschließend Ausgangspunkt für die Bestimmung der Boresight-Parameter $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ des ALS-Systems, wobei gemäß der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Methodik vorgegangen wurde. Eine solche Auswertung wurde in unabhängiger Weise für die Daten der Befliegung jedes einzelnen Testgebiets durchgeführt. In Tabelle 5.5 sind die zugehörigen Ergebnisse zu finden. Zusätzlich sind in dieser Tabelle Informationen zur jeweils vorliegenden Anzahl homologer Ebenensegmente und zu deren Orientierung aufgeführt. Es fällt auf, dass Großstädte wie Kiel und München vermehrt Flachdächer aufweisen, wohingegen in Kleinstädten und ländlichen Gebieten überwiegend Satteldächer gefunden werden konnten. Nur fünf Prozent der zugeordneten planaren Flächenstücke waren auf Fassaden zurückzuführen, was aufgrund der sehr unterschiedlichen Flugrichtungen und der daraus resultierenden wechselseitigen Verdeckung der Fassaden zu erwarten war.



(a) (b)

Abbildung 5.14: Details des „Ruschberg 2009“-Datensatzes nach der Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems: (a) Längsschnitt und (b) Horizontalschnitt zweier Gebäude in den drei überlappenden Punktwolken.

Die drei Boresight-Winkel beschreiben die relative Fehlstellung von Laserscanner und IMU. Bei Nadir-Ausrichtung der Sensorplattform (φ=0°) würden β_1, β_2 und β_3 in dieser Reihenfolge für Drehungen um die Gier-, Roll- und Nick-Achse des fliegenden Hubschraubers stehen. Im Rahmen der beschriebenen Experimente können die drei Boresight-Winkel aber nicht in dieser Weise interpretiert werden, da ausschließlich ein schräg nach vorne gerichteter Laserscanner zur Datenerfassung verwendet wurde. In Analogie zu Abbildung 5.11 zeigt Abbildung 5.14 für zwei ausgewählte Gebäude in Ruschberg einen Längs- und einen Horizontalschnitt der drei Punktwolken dieser Befliegung, nachdem die ermittelte Boresight-Korrektur R_B gemäß Gleichung 3.2 bei der direkten Georeferenzierung der Einzelpunkte berücksichtigt wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass die zuvor vorhandenen Diskrepanzen nach dieser Kalibrierung des ALS-Systems nahezu verschwunden sind.

IMU und Laserscanner sind zur Datenerfassung auf der gemeinsamen Sensorplattform fest verschraubt, sodass Änderungen der Plattformausrichtung keinen Einfluss auf die Boresight-Winkel haben sollten. Das heißt, dass die aus Abbildung 5.14 ersichtliche Passgenauigkeit auch für Punktwolken weiterer Befliegungen erwartet werden kann, falls diese mit einem unveränderten ALS-System durchgeführt werden. Beim Vergleich der ermittelten Boresight-Winkel in Tabelle 5.5 muss allerdings bedacht werden, dass die Einzelkomponenten des hier untersuchten ALS-Systems in jedem Jahr neu zusammengestellt wurden. Dennoch zeigen die anhand der beiden Abenberg-Befliegungen (2008 und 2009) bestimmten Boresight-Winkel konsistente Werte von β_1=0°, β_2=0.16° und β_3=0.17° mit Abweichungen von nur ±0.01°. In beiden Fällen lagen optimale Bedingungen während der Datenerfassung und bei der Bestimmung der Boresight-Winkel vor, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die IMU/Laserscanner-Fehlstellung im verwendeten System durch eine beständige Verformung der Sensorplattform oder einen Versatz der Bohrlöcher verursacht wird, die zur Installation der Sensoren verwendet werden. In diesem Zusammenhang ist der im Vergleich zu β_2 und β_3 viel kleinere Wert von β_1 eher auf einen Zufall als auf die generelle Ausführung des ALS-System zurückzuführen. Die Boresight-Winkel, die anhand von ALS-Daten der Befliegung „München (TUM) 2006“ berechnet wurden, unterscheiden sich deutlich von denen der Jahre 2008 und 2009. Der Grund dafür liegt aber nicht in einer unterschiedlichen Sensorinstallation, sondern in der gerade bei dieser Befliegung fehlenden PPK-Korrektur der Sensortrajektorie.

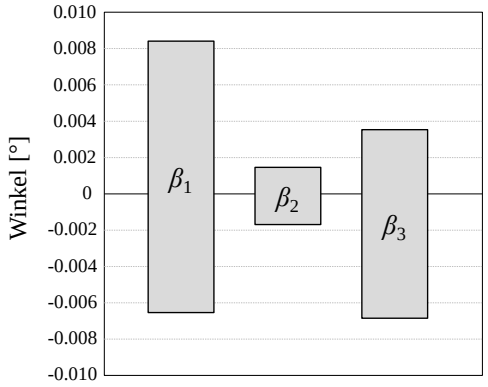


Abbildung 5.15: Streuung der berechneten Boresight-Winkel bei bereits korrigierten Daten („Abenberg 2009“).

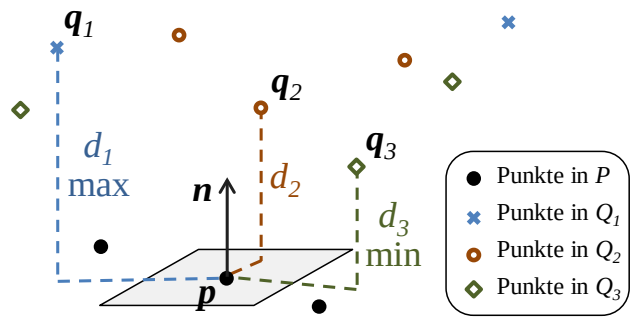


Abbildung 5.16: Bestimmung der minimalen und der maximalen lokalen Diskrepanz (Beispiel für vier Punktwolken).

Zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit der jeweils ermittelten Boresight-Parameter wurde die Verarbeitungskette „Ebenensegmentierung - Zuordnung von Ebenensegmenten - Berechnung von $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$“ für die Daten jeder einzelnen Befliegung mehrfach wiederholt. Aufgrund der Verwendung von Methoden mit Zufallsoperationen (z.B. RANSAC oder die zufällige Auswahl von Saatpunkten bei der Ebenensegmentierung) ergaben sich jedes Mal leicht unterschiedliche Ergebnisse, deren Standardabweichungen σ zur Einschätzung der Stabilität des Verfahrens herangezogen werden können. Auch diese Werte sind in Tabelle 5.5 angegeben. Anhand der „Abenberg 2009“-Daten wurde diesbezüglich eine weitere Untersuchung vorgenommen: Die Punktwolken der einzelnen Überflüge wurden zunächst unter Berücksichtigung der zuvor berechneten Boresight-Korrektur neu zusammengestellt, um dann die genannte Verarbeitungskette mit den bereits korrigierten Daten mehrfach zu wiederholen. Im Idealfall sollte sich dann als Ergebnis immer $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0°$ ergeben, falls die Anfangskorrektur optimal war und die Ergebnisse nicht streuen. Abbildung 5.15 zeigt die tatsächlich gefundenen 1σ-Intervalle der berechneten Boresight-Winkel, die sich in diesem Versuch bei 250 Wiederholungen der Verarbeitung ergeben haben. Es fällt auf, dass die Streuung von β_2 deutlich geringer ausfällt als die von β_1 und β_3. Dies wird auch durch die σ-Werte in Tabelle 5.5 bestätigt.

Nach der Anwendung der jeweils berechneten Boresight-Korrektur R_B wurden verbleibende Diskrepanzen der Punktwolken durch eine rigide Koregistrierung minimiert. Solche Restfehler entstehen hauptsächlich durch Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung der Sensorplattform. Selbst bei Verwendung von GPS-Referenzdaten des SAPOS-Diensts wurden zum Teil noch Schwankungen bis zu 30 cm geschätzt („Kiel 2008“). Im Fall der „München (TUM) 2006“-Daten war sogar nur die allgemein verfügbare GPS-Genauigkeit (SPS, C/A) zu erzielen, weswegen selbst mit einem kalibrierten Sensorsystem Diskrepanzen von mehreren Metern zwischen den Punktwolken der Überflüge auftraten. In solchen Fällen lässt sich mit der in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Methode eine Angleichung der überlappenden Punktwolken erreichen. Dieser Schritt ist optional, wenn die Genauigkeit der Sensorpositionen sehr gut ist und ein kalibriertes Sensorsystem verwendet wurde (Beispiel: Abbildung 5.14).

Zur quantitativen Beurteilung der Passgenauigkeit überlappender Punktwolken sind zusätzliche Berechnungen erforderlich. Die eigentliche Bewertung der Ergebnisse wird zwar erst in Kapitel 6 behandelt, im Folgenden werden hierzu aber bereits geeignete Kenngrößen aus den ALS-Datensätzen abgeleitet. Diese Kenngrößen ergeben sich aus den lokal messbaren Abständen von Punkten zu Tangentialebenen in unterschiedlichen 3D-Punktmengen. Es bezeichne $\{Q_i\}$ die Menge überlappender Punktwolken, von denen der Reihe nach jede als Punktwolke $P \in \{Q_i\}$ einzeln herausgegriffen wird. Zunächst werden in P alle Punkte der Klasse **A** ausfindig gemacht, und

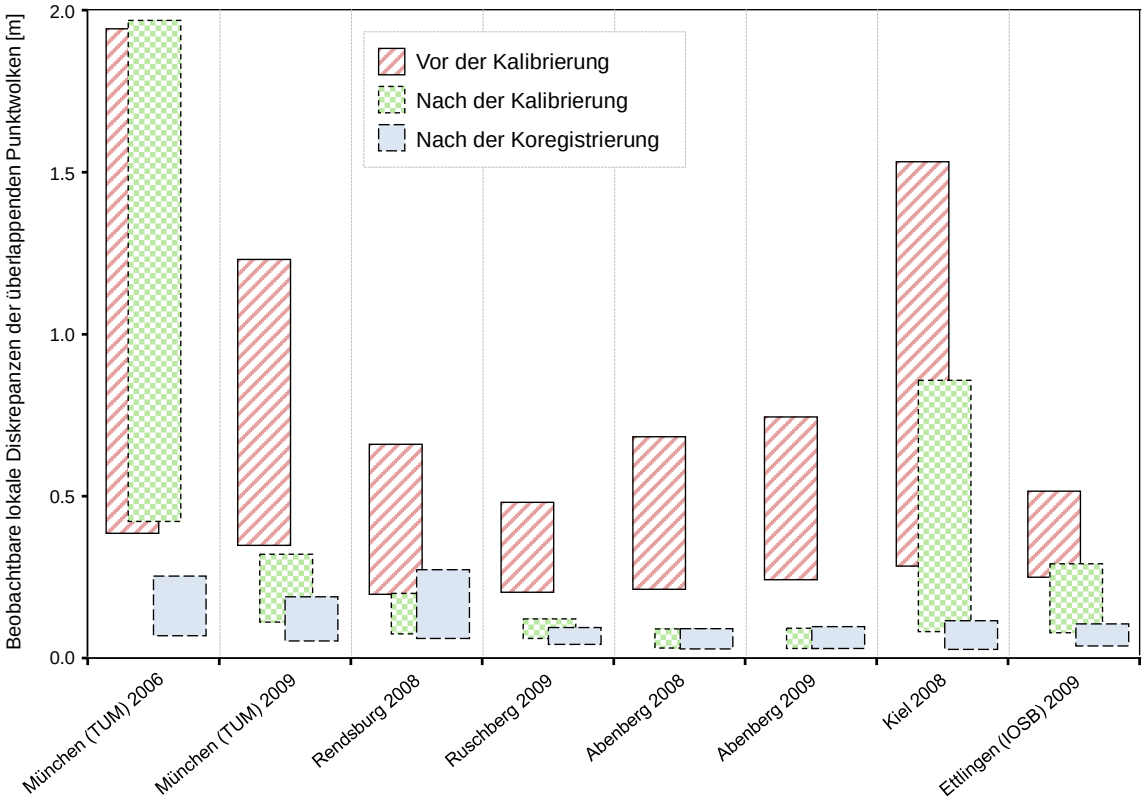


Abbildung 5.17: Passgenauigkeit vor und nach der Boresight-Kalibrierung sowie nach der Koregistrierung: Die Balken veranschaulichen den typischen Wertebereich lokaler Diskrepanzen.

zwar einschließlich der Bodenpunkte (siehe Abschnitt 4.2.1). Für jeden Punkt $\boldsymbol{p}$ der Klasse $\mathbf{A}$ aus P wird dann der jeweils nächstliegende Datenpunkt $\boldsymbol{q}_i$ in jeder anderen Punktwolke Q_i ($Q_i \neq P$) identifiziert:

$$\|\boldsymbol{q}_i - \boldsymbol{p}\| = \min_{\boldsymbol{q} \in Q_i} \|\boldsymbol{q} - \boldsymbol{p}\| \,. \tag{5.1}$$

Da zu $\boldsymbol{p}$ auch die lokale Normalenrichtung $\boldsymbol{n}$ bekannt ist, kann die dort vorliegende lokale Diskrepanz zwischen P und jeder anderen Punktwolke aus $\{Q_i\}$ folgendermaßen geschätzt werden:

$$d_i = |(\boldsymbol{q}_i - \boldsymbol{p}) \cdot \boldsymbol{n}| \,. \tag{5.2}$$

Für jeden Punkt $\boldsymbol{p}$ der Klasse $\mathbf{A}$ in jeder Punktwolke $P \in \{Q_i\}$ werden anschließend die minimale und die maximale lokale Diskrepanz $\min(d_i)$ und $\max(d_i)$ bestimmt. Abbildung 5.16 zeigt diesen Vorgang am Beispiel von vier überlappenden Punktwolken. Um aus den zahlreichen lokalen Werten eine globale Kenngröße für den Datensatz zu ermitteln, werden die Menge aller minimalen und die Menge aller maximalen lokalen Diskrepanzen betrachtet. Das arithmetische Mittel jeder dieser beiden Mengen würde zwei Kenngrößen für die Passgenauigkeit liefern. Da es sich bei den Punktwolken aber um Multi-Aspekt ALS-Daten handelt, treten in Gleichung 5.1 aufgrund von Verdeckungen viele Fehlzuordnungen auf, die diese arithmetischen Mittel übermäßig beeinflussen würden. Stattdessen wird jeweils der Median (0.5-Quantil) innerhalb der beiden Mengen identifiziert und das Intervall zwischen den beiden Medianwerten kennzeichnend für die Passgenauigkeit des Datensatzes verwendet. Lokale Diskrepanzen zwischen den verschiedenen Punktwolken sind hauptsächlich innerhalb dieses Wertebereichs zu beobachten. Falls der Wertebereich sehr groß ist, deutet dies auf partielle Unterschiede der Passgenauigkeit innerhalb des Datensatzes hin. Ziel der Kalibrierung des ALS-Systems und der rigiden Koregistrierung der Daten ist es, das Intervall zu verkleinern und damit möglichst nahe an Null zu kommen.

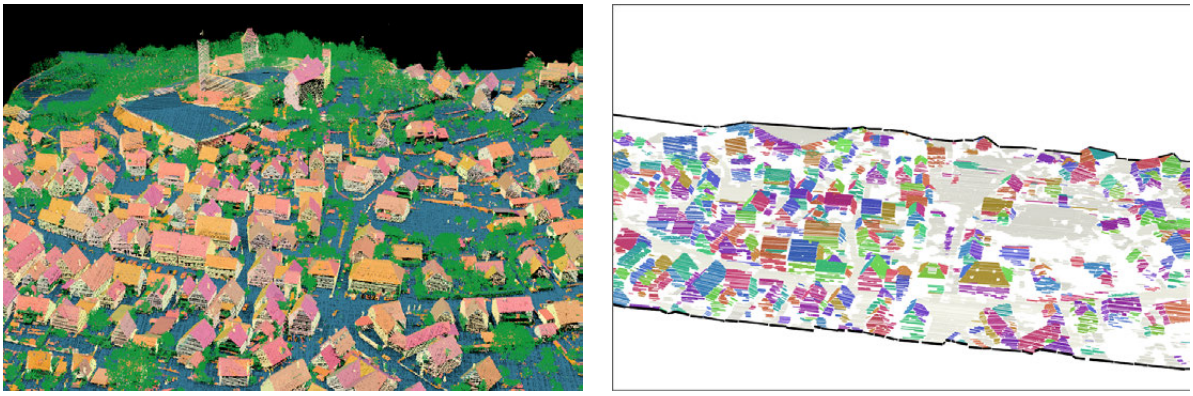
Die beschriebenen Indikatoren der (relativen) Passgenauigkeit wurden für die überlappenden ALS-Punktwolken jeder einzelnen Befliegung aus Tabelle 5.2 berechnet, und zwar jeweils basierend auf den unkorrigierten Daten, nach der Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems und schließlich auch nach der rigiden Koregistrierung der Daten. Abbildung 5.17 zeigt die Ergebnisse dieser umfangreichen Untersuchungen. Eine Bestätigung der absoluten Positionierungsgenauigkeit der 3D-Punkte kann streng genommen nicht in dieser Weise erfolgen, weil dazu unabhängige Referenzdaten benötigt werden würden (z.B. Kontrollpunkte oder -flächen). Dennoch sollte Abbildung 5.17 auch die absolute Genauigkeit der Georeferenzierung widerspiegeln, da mit nur einer Ausnahme korrigierte GPS-Informationen verwendet wurden und die zugrunde liegenden ALS-Daten immer aus mehreren antiparallelen und orthogonalen Überflügen stammen.

5.4.2 Ergebnisse der Änderungsdetektion

Die Verarbeitungskette t_2 aus Abbildung 4.14 beinhaltet die Einzelschritte „Ebenensegmentierung - Zuordnung von Ebenensegmenten zum Referenzdatensatz - Koregistrierung - Vergleich“, wobei multitemporale Daten desselben urbanen Gebiets untersucht werden und eine Echtzeitprozessierung angestrebt wird. Als Vergleichsbasis dient ein Referenzdatensatz, der zu einem früheren Zeitpunkt t_1 aus Multi-Aspekt ALS-Daten erzeugt wurde. Die Auswertung aktueller Laserdaten zur schritthaltenden Änderungserkennung soll in einem zukünftigen System während eines Flugeinsatzes des Hubschraubers ausgeführt werden können. In den nachfolgend beschriebenen Versuchen wurde vertretungsweise der aufgezeichnete Datenstrom der Sensoren des Experimentalsystems ausgewertet.

Von den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Messkampagnen eigneten sich vor allem die experimentell erfassten Daten der beiden Befliegungen von Abenberg für diese Untersuchungen. Der Datensatz „Abenberg 2008“ mit Multi-Aspekt ALS-Daten aus vier Überflügen wurde zur Kalibrierung des ALS-Systems verwendet, wobei die GPS-Informationen des Applanix POS AV 410 mit SAPOS-Referenzdaten nachprozessiert wurden. Abbildung 5.17 zeigt, dass die Passgenauigkeit unter den vier Punktwolken hierdurch auf Werte von 3-8 cm gebracht werden konnte. Die aus der Vereinigung dieser korrigierten Daten entstandene Gesamtpunktwolke wurde anschließend als Ganzes mit Algorithmus 1 prozessiert. Das Ergebnis hiervon ist in Abbildung 5.18a zu sehen. In diesen geordneten Referenzdaten **L** des urbanen Gebiets ist zu jedem 3D-Einzelpunkt auch die zugehörige Sensorposition bekannt, die zu dessen Erfassung führte. Außerdem sind die Datenpunkte im Zuge der Verarbeitung mit Algorithmus 1 in verschiedene Klassen eingeteilt worden. Identifizierte Ebenensegmente werden in Abbildung 5.18a als Verbund von Einzelpunkten wie auch die restlichen Punkte der Klasse **A** in einer rötlichen Farbe dargestellt. Verbleibende Punkte der Klasse **B** werden als „Vegetation“ (grün) interpretiert, Punkte der Klasse **G** als Boden (blau). Für jeden Einzelpunkt ist im Referenzdatensatz als Resultat der lokalen Hauptkomponentenanalyse auch der Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert gespeichert, der bei Punkten der Klasse **A** die lokale Normalenrichtung angibt.

Das anschließend beschriebene Experiment diente der Überprüfung, inwiefern sich die schritthaltende Angleichung aktueller ALS-Daten an den Referenzdatensatz zur Bestimmung der genauen Position des Hubschraubers eignet (geländebasierte Navigation). Eine solche Angleichung der Daten muss vor und während der Änderungserkennung durchgeführt werden, falls zum Zeitpunkt der Datenerfassung keine Möglichkeit zur RTK-Korrektur der GPS-Informationen besteht oder sogar Ausfälle beim GPS-Empfang auftreten. In diesem Szenario wird von der Verwendung eines kalibrierten ALS-Systems ausgegangen. Zur Simulation der geländebasierten Navigation wurden aus den Rohdaten der Befliegung „Abenberg 2009“ 3000 Abschnitte von jeweils 2-4 Sekunden Dauer zufällig ausgewählt. Da auch für die im Jahr 2009 durchgeführte Befliegung PPK-korrigierte Navigationsdaten vorlagen, wurde für jedes dieser Datenfenster ein unterschiedlicher GPS-Fehler simuliert, indem jeweils ein Versatzvektor mit einer Länge zwischen 0 und 100 m zu den korrekten



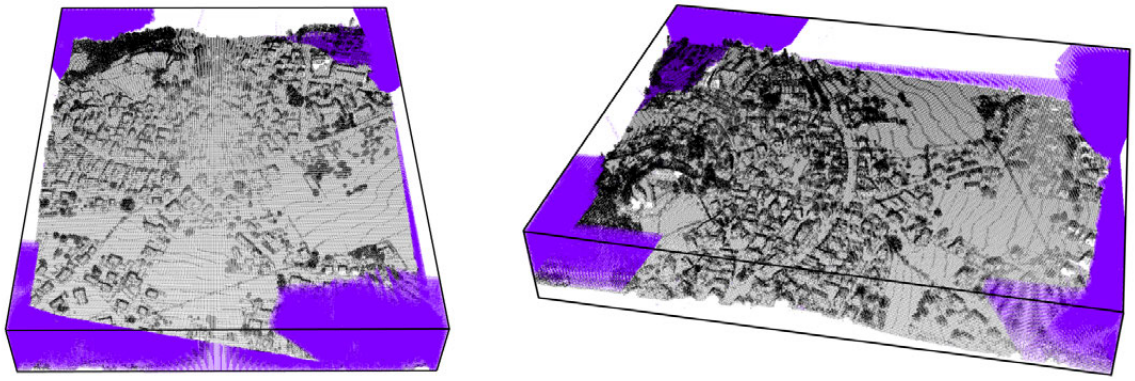
(a) (b)

Abbildung 5.18: Angleichung aktueller ALS-Daten an den vorhandenen Referenzdatensatz: (a) vollständige Punktmenge „Abenberg 2008“ mit planaren Flächensegmenten sowie den Punktklassen „Boden“ und „Vegetation“, (b) Ergebnisse der scanzeilenbasierten Ebenensegmentierung für „Abenberg 2009“ in einem Zeitfenster von vier Sekunden.

Sensorpositionen addiert wurde. Auf den Datenstrom in jedem Datenfenster wurden sukzessive die Algorithmen 2, 3 und 4 aus Abschnitt 4.2.4 angewendet. Das heißt, dass in den einzelnen Scanzeilen Geradensegmente identifiziert wurden, die sich im Falle scanzeilenübergreifender Komplanarität zu Ebenensegmenten gruppierten. Beispielhafte Ergebnisse dieser scanzeilenbasierten Segmentierung sind in Abbildung 5.18b für ein Zeitfenster von vier Sekunden zu sehen („Abenberg 2009“, Überflug 1). Durch ein einfaches Filterverfahren wurden große unförmige Flächensegmente entfernt, da diese meist Abschnitte der Bodenfläche repräsentieren. Für jedes Datenfenster wurden anschließend innerhalb eines Suchradius von 100 m Übereinstimmungen der Ebenensegmente mit denen des Referenzdatensatzes gesucht (vgl. Abschnitt 4.2.5). Beim Vorliegen von etwa 10-20 Zuordnungen homologer Ebenen wurde die in Abschnitt 4.4.2 beschriebene rigide Koregistrierung durchgeführt, wobei auch die absichtlich verfälschten Sensorpositionen gemäß Abschnitt 4.4.3 korrigiert wurden. Im Ergebnis des Experiments lag die verbleibende Abweichung der in dieser Weise berechneten Sensorpositionen bei durchschnittlich 70 cm (Standardabweichung: 25 cm) zur tatsächlich gemessenen Trajektorie, deren eigene Genauigkeit zuvor mit 2-4 cm geschätzt werden konnte. Die durchschnittliche Abweichung verbesserte sich auf 45 cm, wenn jeweils eine größere Anzahl von bis zu 50 Paaren homologer Ebenen für die Berechnung herangezogen wurde (siehe auch Hebel & Stilla [2010a,b]). Die Zahlenwerte dieses Einzelfalls erlauben eine ungefähre Einschätzung der zu erwartenden Positionsgenauigkeit bei der geländebasierten Navigation. Im Allgemeinen werden die Ergebnisse von mehreren Rahmenbedingungen abhängen, etwa von der Flughöhe, von der Fluggeschwindigkeit, sowie von der Anzahl und Orientierung detektierbarer Fassaden und Dachflächen.

Für die Untersuchungen zur sofortigen Änderungserkennung wurde die mit PPK-Genauigkeit gegebene Sensortrajektorie der „Abenberg-2009“-Befliegung betrachtet. Eine vergleichbar gute GPS-basierte Positionsgenauigkeit wäre während des Flugs nur durch eine dauerhafte Datenverbindung zu einer GPS-Referenzstation zu erreichen (RTK). Die eben beschriebene schritthaltende Angleichung des aktuellen ALS-Datenstroms an den Referenzdatensatz ließe aber ähnlich gute Ergebnisse erwarten, falls sie auf ein gleitendes Datenfenster angewendet und in die Regelschleife des Kalman-Filters eingebunden würde.

Basierend auf den in Abbildung 5.18a dargestellten und in der Liste $\mathbf{L}$ gespeicherten Referenzdaten der Befliegung „Abenberg 2008“ wurden zunächst die beiden Voxelgitter $\mathbf{V}_{\mathtt{P}}$ und $\mathbf{V}_{\mathtt{R}}$ mit identischen Abmessungen generiert und mit Indizes aus $\mathbf{L}$ befüllt (siehe Abschnitt 4.5.2). Die Zellgröße der beiden Voxelgitter war dabei mit $2 \times 2 \times 2$ m^3 recht weitmaschig bemessen. Bei

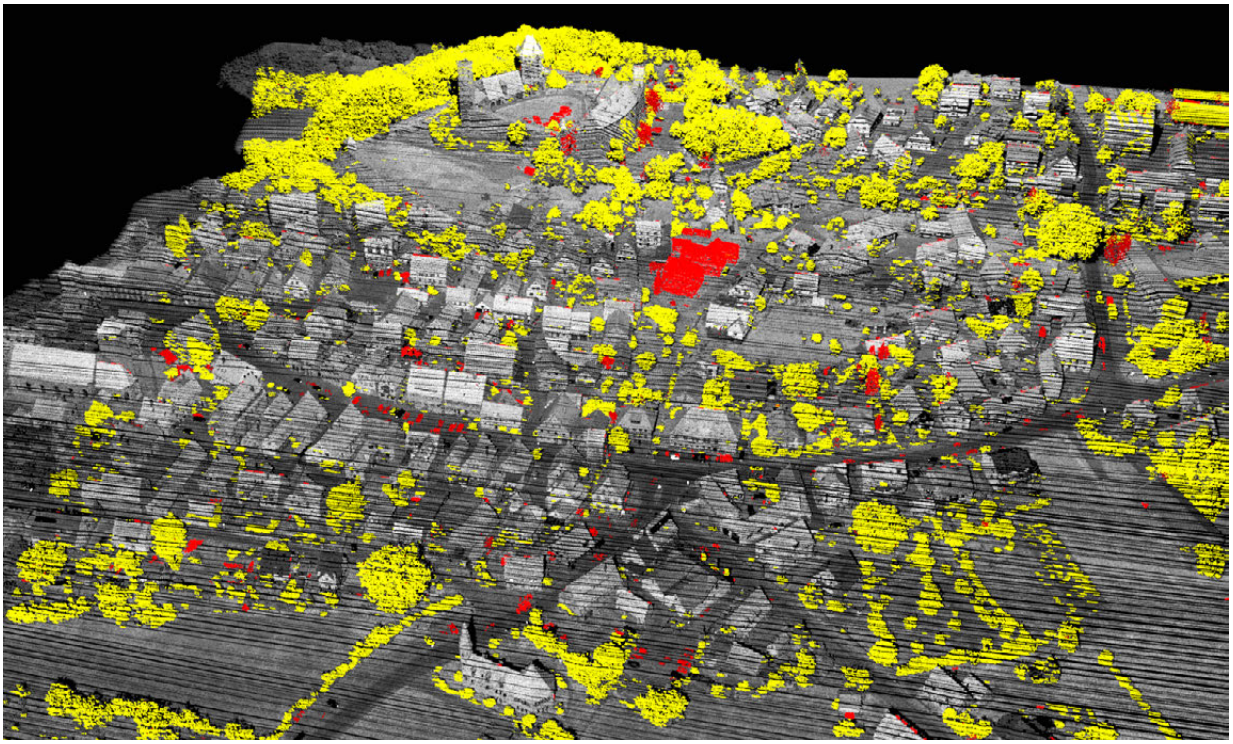


(a) (b)

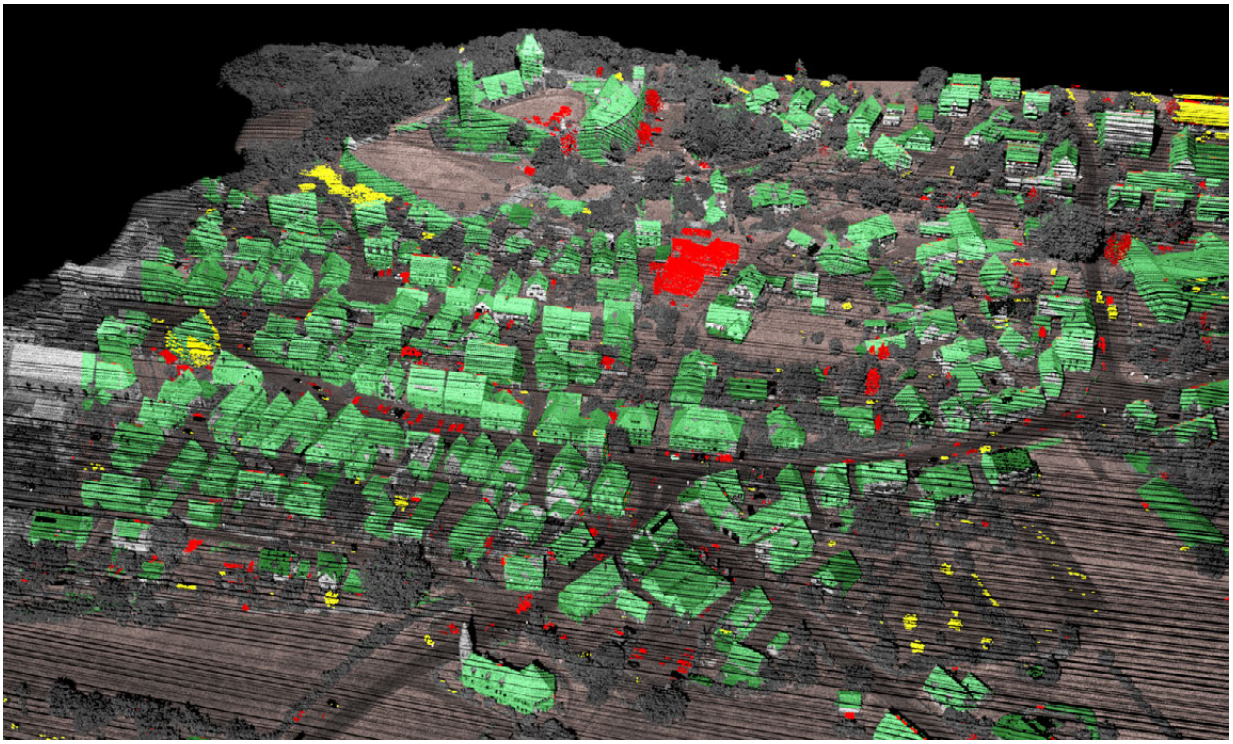
Abbildung 5.19: Visualisierung der Belegung der Voxelgitter $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ und $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ („Abenberg 2008“): Zwei 3D-Ansichten der belegten Zellen in $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ (schwarz) und der leeren Zellen von $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ (violett).

einer Gesamtgröße jedes Gitters von $300 \times 300 \times 50$ Voxeln bzw. $600 \times 600 \times 100$ m^3 konnte das Gelände von Abenberg im Überlappungsbereich der verschiedenen Überflüge abgedeckt werden. Nach der Zuordnung von Indizes aus $\mathbf{L}$ zu den Zellen von $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ und $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ lag der Speicherbedarf für die Datenorganisation bei insgesamt 1.1 GB, was bei heutigen Speicherkapazitäten kein Problem darstellt. Abbildung 5.19 zeigt zwei 3D-Ansichten der beiden überlagerten Voxelgitter, worin die Belegung einer Zelle in $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ durch einen schwarzen Punkt angezeigt wird, während von $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ nur die leeren Zellen als violette Punkte dargestellt sind. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass bei dieser Zuordnung von Indizes zu Rasterzellen keine Veränderung der Datenpunkte stattfand.

Nach diesen Vorbereitungen konnten die in den Abschnitten 4.5.3 bis 4.5.6 beschriebenen Methoden zur automatischen Änderungserkennung auf den aufgezeichneten Datenstrom der Befliegung „Abenberg 2009“ angewendet werden. Auch hierzu wurde eine prototypische Implementierung aller Verfahren in MATLAB erstellt, die nicht für eine wirkliche Echtzeitprozessierung geeignet wäre. Da die Experimente auf aufgezeichneten Daten beruhten, spielte die Laufzeit der Implementierung eine untergeordnete Rolle. Von wesentlicher Bedeutung war vor allem die Beachtung der zeitlichen Abfolge im Datenstrom und die damit verbundene inhärente Echtzeitfähigkeit der Verfahren. Von den Daten aus dem Jahr 2009 wurden primär die des ersten Überflugs betrachtet (Flugrichtung Süd nach Nord). Die Parameter (λ, c, κ) in Gleichung 4.32 waren für diese Untersuchung zunächst global auf die Werte λ=12, c=5 und κ=8 gesetzt, wie es auch in den Abbildungen 4.18 und 4.19 gezeigt wird. Jeder einzelne Laserpuls der Befliegung „Abenberg 2009“ wurde virtuell durch die beiden Voxelgitter $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ und $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ geleitet, um alle im Referenzdatensatz „Abenberg 2008“ gespeicherten Lasermessungen und Laserpunkte zu identifizieren, die zu einer Informationsüberschneidung im betreffenden Raumbereich führen (siehe Abschnitt 4.5.5). Abbildung 5.20a zeigt die Ergebnisse dieser Analyse für alle ALS-Daten des ersten Überflugs im Jahr 2009. In dieser Abbildung sind alle erkannten Konflikte der Raumbelegung farbig hervorgehoben. Die erste Art von Konflikt entsteht, wenn ein neuer Laserpunkt an einer Stelle gemessen wird, die durch die Referenzdaten als *leer* bewertet wurde (hier gelb dargestellt). Umgekehrt zeigt sich eine zweite Konfliktart, falls eine neue Lasermessung einen Raumbereich durchdringt, der ursprünglich als *belegt* angesehen wurde (hier rot dargestellt). Die in Abbildung 5.20a gezeigten 3D-Punkte entsprechen also den im Verlauf des ersten Überflugs 2009 gemessenen ALS-Daten, wobei die zusätzlichen roten Punkte aus dem Referenzdatensatz von 2008 stammen. Vereinfacht gesagt veranschaulichen die gelben Punkte hinzugekommenes Volumen, während die roten Punkte verschwundene Rauminhalte repräsentieren. Im Gegensatz zu einer einfachen DOM-Differenzbildung wurden dabei Verdeckungen und Abschattungen implizit berücksichtigt, sodass diese nicht als vermeintliche Änderungen in Erscheinung treten.



(a)



(b)

Abbildung 5.20: Ergebnisse der schritthaltenden Änderungserkennung („Abenberg 2009“, Überflug 1): (a) Konflikte in der Raumbelegung gemäß Abbildung 4.20a (gelb) und Abbildung 4.20b (rot), (b) Berücksichtigung zusätzlicher Attribute und Bewertung anhand der Objektklassen: Unveränderte planare Oberflächen (grün), unveränderte Vegetation (neutral), unveränderter Bodenbereich (braun), hinzugekommene Objekte (gelb) und verschwundene Objekte (rot).

Konkret wurden zur schritthaltenden Änderungserkennung die Belegungskonflikte $C_{\boldsymbol{q}}$ (gelb) und $C_{\boldsymbol{p}}$ (rot) berechnet, wobei Zahlenwerte größer 0.5 als Änderung gewertet wurden. Im Zuge dieser Berechnungen fand zunächst keine unterschiedliche Behandlung der Referenzdaten in Abhängigkeit von der jeweiligen Objektklasse statt. Dies wurde im nächsten Schritt geändert, indem gemäß Abschnitt 4.5.6 zusätzliche Attribute berücksichtigt wurden. Referenzdaten, bei denen ein Zusammenhang mit Vegetation abgeleitet werden konnte, wurden entsprechend Gleichung 4.40 mit einer alternativen Basismassefunktion in das Verfahren einbezogen. Darüber hinaus wurde zur Berechnung der Massenzuordnung in der Umgebung von Punkten der Klasse **A** der Parameter $\bar{\kappa}$=1 verwendet, wodurch zusammen mit den Distanzmaßen $\bar{d}_x$ und $\bar{d}_y$ aus Gleichung 4.41 die lokale Oberfläche modelliert werden kann (siehe Abbildung 4.23). Mit diesen Verfahrensmodifikationen fand erneut eine Prozessierung der ALS-Daten aus Überflug 1 („Abenberg 2009“) statt. Diesmal wurden Einzelpunkte, für die sich ein Belegungskonflikt $C_{\boldsymbol{q}} < 0.25$ ergab, als Bestätigung der lokalen Referenzdaten aufgefasst und deren vorherrschender Klasse zugeordnet. Außerdem wurden Belegungskonflikte $C_{\boldsymbol{q}}$ und $C_{\boldsymbol{p}}$ größer 0.5 nur dann als Änderung aufgefasst, falls dies bei mindestens zwei aufeinanderfolgenden Messungen innerhalb der Scanzeile eintrat. Auf diese Weise lassen sich Einzelpunktstörungen herausfiltern. Abbildung 5.20b zeigt die Ergebnisse für den vollendeten Überflug, wobei zusätzlich zur Farbgebung aus Abbildung 5.20a bestätigte planare Oberflächen grün, bestätigte Vegetation grau (neutral) und bestätigte Bodenbereiche braun dargestellt sind.

6 Bewertung und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die zuvor beschriebenen Experimente diskutiert und bewertet. Hierbei geht es darum, Vor- und Nachteile sowie Eigenarten der eingesetzten Technik aufzuzeigen, die Verallgemeinerbarkeit der gezeigten Ergebnisse einzuschätzen und die Eignung der besprochenen Verfahren für die Ziele dieser Arbeit zu beurteilen. Die Bewertung und Diskussion der Ergebnisse der Arbeit gliedert sich in vier Abschnitte:

- Abschnitt 6.1 behandelt die technischen Aspekte beim Einsatz eines Laserscanners an einem fliegenden Sensorträger und bei der Prozessierung der ALS-Daten z.B. für die unmittelbare Unterstützung des Piloten. Es wird erörtert, ob ALS aus technischer Sicht für die Aufgabe der schritthaltenden Änderungserkennung in urbanen Gebieten geeignet ist und welche Restriktionen evtl. in Kauf genommen werden müssen. Mögliche Einschränkungen werden auch anhand von Beispielen demonstriert, die sich während der durchgeführten Messkampagnen gezeigt haben.

- In Abschnitt 6.2 werden Eigenschaften der vorgestellten Segmentierungsverfahren unter den verschiedenen Randbedingungen besprochen. Darunter ist einerseits die nachträgliche Verarbeitung der georeferenzierten ALS-Punktwolken und andererseits die scanzeilenbasierte Segmentierung der ALS-Daten während der Erfassung zu verstehen. Für beide Varianten werden mögliche Fehlleistungen identifiziert und diskutiert.

- Der Abschnitt 6.3 bewertet die Ergebnisse aller Experimente, die im Zusammenhang mit der Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems durchgeführt wurden. Da die Boresight-Parameter in unabhängiger Weise anhand von Laserdaten verschiedener urbaner Gebiete bestimmt wurden, können die Ergebnisse untereinander verglichen werden und Rückschlüsse auf die Stabilität der Kalibrierung im hier verwendeten Experimentalsystem gezogen werden. Außerdem werden Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse in spezifischen Gegebenheiten bei den einzelnen Befliegungen gesucht.

- In Abschnitt 6.4 wird schließlich eine Kontrolle der Veränderungen vorgenommen, die zwischen dem Referenzdatensatz „Abenberg 2008“ und den aktuellen Daten „Abenberg 2009“ aufgedeckt wurden. Hierzu zählt eine visuelle Überprüfung der Ergebnisse für ausgewählte Orte innerhalb dieses urbanen Gebiets. In den Resultaten werden sowohl die natürlichen als auch die von Menschen verursachten Veränderungen näher betrachtet. Die Vorzüge des vorgestellten Verfahrens werden zudem an Ausschnitten des Stadtgebiets beurteilt, für die sich keine relevante Änderung ergeben hat. Außerdem wird die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Positionierungsgenauigkeit und der Dichte der 3D-Punkte besprochen.

(a) (b)

Abbildung 6.1: Beispiel für Multi-Aspekt Bilddaten: Zwei Fotografien des Stammgeländes der TUM, die während der Befliegung am 02. September 2009 entstanden sind.

6.1 Technische Eignung des ALS

Die Detektion und Analyse von Veränderungen in einem urbanen Gebiet wird klassischerweise durch den Vergleich hochaufgelöster Luftbildaufnahmen bewerkstelligt. Bei den zugehörigen Anwendungen bestehen meist keine Echtzeitanforderungen, z.B. bei der Aktualisierung von Kataster- und Gebäudedatenbanken oder bei der Erweiterung und Pflege von 3D-Stadtmodellen. Auch auf diesem Gebiet haben in den letzten Jahrzehnten neue Technologien Einzug gehalten, wie zum Beispiel die satellitenbasierte Positionsbestimmung (GNSS) zur direkten Georeferenzierung, Radar mit synthetischer Apertur (SAR) oder Laserscanning (ALS, TLS).

An die Sensorik und die Datenverarbeitung werden besondere Anforderungen gestellt, wenn statt der topographischen Erfassung andere Anwendungen im Vordergrund stehen, die eine sofortige Bewertung der Sensordaten verlangen. In der Einleitung wurden hierfür mehrere Beispiele genannt, etwa Überwachungsaufgaben oder die Pilotenunterstützung bei Flug- und Landemanövern von Hubschraubern. Die vorliegende Arbeit untersucht die Eignung des Airborne Laser Scanning (ALS) zur automatischen Änderungserkennung im Zusammenhang mit diesen Aufgaben.

6.1.1 Vorzüge der 3D-Datenerfassung

Die besonderen Rahmenbedingungen erfordern zumeist eine vorausblickende Sensorik, weil nur damit eine Situationsanalyse durchführbar ist, durch die eine rechtzeitige Reaktion für den bewegten Sensorträger eingeleitet werden kann (z.B. ein Ausweichmanöver aufgrund von Hindernissen in der Flugbahn des Hubschraubers). Bereits in diesem Punkt unterscheiden sich die Randbedingungen deutlich von denen der Geodäsie und Luftbildphotogrammetrie, wo primär Nadiraufnahmen erzeugt und ausgewertet werden. Durch die Auswertung zahlreicher überlappender Luftbilder eines Überflugs können auch sehr genaue 3D-Informationen gewonnen werden. Ziel der Luftbildphotogrammetrie ist hauptsächlich die nachträgliche Verwertung dieser Daten, z.B. zur Erzeugung von digitalen Geländemodellen oder Orthofotos (siehe z.B. Leberl et al. [2003]). Die sofortige Interpretation und der Vergleich einzelner Schrägsichtaufnahmen ist dagegen selbst für einen menschlichen Betrachter recht schwer zu bewerkstelligen, wie man es anhand der Fotografien in Abbildung 6.1 erahnen kann.

Ein klar ersichtlicher Vorteil des ALS im Vergleich zu anderen Sensortechnologien in der Fernerkundung ist die Fähigkeit, ohne Zeitverzug und in Messrichtung des Sensors dreidimensionale Informationen zu liefern. Die 3D-Daten lassen sich auf direktem Weg in ein gemeinsames Ko-

ordinatensystem übertragen, ohne dass verschiedene Aufnahmerichtungen zu geometrischen Unterschieden der Abbildung führen würden (siehe Abbildung 5.14). Im Hinblick auf den Vergleich multitemporaler Daten hat dies gerade bei vorausblickender Sensorik den Vorteil, dass auch die zwangsläufig generierten Multi-Aspekt Daten relativ problemlos verglichen werden können. Damit ist ALS als Sensortechnologie geradezu prädestiniert für die Anforderungen der schritthaltenden Änderungserkennung.

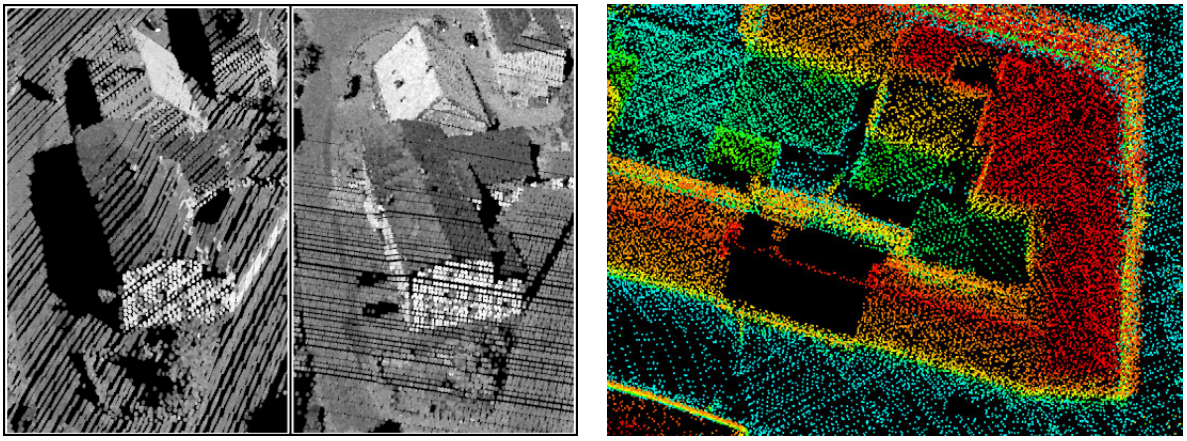
6.1.2 Besonderheiten der aktiven Beleuchtung

Die aktive Beleuchtung der Szene ist eine weitere Eigenschaft des ALS, die einer Anwendbarkeit außerhalb der topographischen Erfassung zugutekommt. Ähnlich wie bei der Verwendung von Radartechnik wird die Geländeoberfläche mit elektromagnetischen Wellen abgetastet, die zu diesem Zweck vom Sensor selbst erzeugt werden. Damit ist die Einsatzfähigkeit des ALS in keiner Weise vom Vorliegen einer anderen (z.B. natürlichen) Beleuchtung der Szene abhängig. Die in Kapitel 5 beschriebenen Messkampagnen wurden aufgrund von Sicherheitsbestimmungen bei Tageslicht und guten Sichtverhältnissen durchgeführt, die gleichen Ergebnisse sind aber ohne Weiteres auch bei Nachteinsätzen zu erwarten. In gewissem Maße verbessert eine aktive Beleuchtung auch die Anwendbarkeit bei schlechten Wetterbedingungen.

Die Aufzeichnung des gesamten Echosignals eröffnet zusätzliche Möglichkeiten der Dateninterpretation. Durch die *Full Waveform Analyse* lassen sich Entfernungen recht genau bestimmen (ca. 2 cm). Außerdem kann schon eine Einzelmessung aufgrund der Pulsform des Echos verschiedenen Klassen zugeordnet werden (vgl. Jutzi [2007], Reitberger [2010]). Diese Technik ist mittlerweile bei vielen aktuellen Laserscannern anzutreffen. In den durchgeführten Experimenten wurden Resultate der Pulsformanalyse als Ergänzung zur PCA-basierten Klassifikation der Laserpunkte betrachtet. Außerdem dienten die gemessenen Amplituden als Textur in den gezeigten Visualisierungen der Punktwolken. Die Grauwerte in diesen Abbildungen hängen demzufolge von der Entfernung, vom Beleuchtungswinkel und von der Reflektivität der angestrahlten Objekte ab.

Auf eine weitere Verwendung der Echoamplituden - etwa als Merkmal in einer merkmalsbasierten Koregistrierung - wurde bewusst verzichtet, da diese Werte in Multi-Aspekt ALS-Daten Schwankungen unterworfen sind. Abbildung 6.2a zeigt dies anhand der Daten zweier Überflüge der „Ruschberg 2009“-Befliegung. Aufgrund der unterschiedlichen Flugrichtungen wurden die Dachflächen jeweils unter anderem Winkel beleuchtet, sodass sich die Helligkeitsverhältnisse in den texturierten Darstellungen der beiden Punktwolken dort gerade umkehren. Solche Effekte wurden z.B. von Jutzi & Groß [2009] behandelt. Da selbst nach einer Winkel- und Entfernungskorrektur der Echoamplitude nur die Reflektivität für Licht der Laserwellenlänge gemessen werden kann, ist diese Information für Fragestellungen der Änderungserkennung nur eingeschränkt nutzbar. So wäre es zum Beispiel allein mit dem hier verwendeten Laserscanner nicht möglich, ein grün gestrichenes von einem roten Haus zu unterscheiden. Die Verfahren aus Abschnitt 4.5 zielen daher einzig auf die Erkennung von Volumenänderungen ab. Zur automatischen Bewertung des Erscheinungsbilds der erfassten Objekte in verschiedenen Spektralbereichen wird eine Kombination von ALS mit einem anderen bildgebenden Sensor empfohlen.

Ein Nachteil der ALS-typischen aktiven Beleuchtung zeigt sich in der Reichweite. Weil die für die Entfernungsmessungen relevante Lichtquelle der Laserscanner selbst ist, muss das erzeugte Laserlicht jede Messstrecke zweimal durchlaufen. Durch die diffuse Reflexion am Messpunkt gelangt bei zunehmenden Messentfernungen ein immer kleiner werdender Anteil der abgestrahlten Energie zurück zum Detektor. Die maximale Lichtenergie, die für Lasermessungen eingesetzt werden kann, ist neben technischen Restriktionen auch Sicherheitsbestimmungen unterworfen. Hiermit ist insbesondere die Augensicherheit des Lasers gemeint (Laserklasse 1M nach EN 60825-1). Diese technischen Gegebenheiten und Einschränkungen führen dazu, dass bei typischen Geländeformen und -inhalten ab einer gewissen Messentfernung Lücken in den ALS-Daten auftreten, wenn



(a) (b)

Abbildung 6.2: Besonderheiten der aktiven Sensorik (Laserscanning): (a) Abhängigkeit der Echoamplitude vom Beleuchtungswinkel (Bsp. „Ruschberg 2009“), (b) Datenlücken bei großen Messentfernungen, ungünstigen Winkeln und Flächen mit geringer Reflektivität (Bsp. „Kiel 2008“).

nämlich das Pulsecho im Detektorrauschen untergeht. Die Maximalentfernung ist umso größer, je besser Beleuchtungswinkel und Reflektivität für das angestrahlte Objekt sind. In ungünstigen Fällen wurden bei den Messkampagnen bereits bei Entfernungen von 800 bis 1000 m Datenlücken beobachtet. Abbildung 6.2b zeigt solch ein Beispiel. Dort ist ein Ausschnitt aus der Überlagerung aller sechs Punktwolken der „Kiel 2008“-Befliegung zu sehen, wobei die Einzelpunkte entsprechend ihrer Höhe über Grund farbig dargestellt sind. Es fällt auf, dass ein einzelnes Dach schwarz erscheint, was daran liegt, dass dort keinerlei Datenpunkte gemessen wurden. In dem Gebäude befindet sich eine Buchhandlung. Eine Nachfrage dort ergab, dass das betreffende Dach in der Woche der Messkampagne 2008 neu gedeckt wurde, weswegen zum Zeitpunkt der Datenerfassung statt der üblichen Ziegel eine Kunststofffolie vorhanden war. Ähnliche Effekte konnten an anderen Stellen aufgrund der zur Zeit oft verwendeten Glasurziegel beobachtet werden. Besonders auffällig ist auch das Fehlen von Datenpunkten auf Wasserflächen selbst bei geringer Wassertiefe (Abbildung 5.6b). Die in Kapitel 4 präsentierte Vorgehensweise zur Änderungserkennung gewährleistet, dass Datenlücken nicht fälschlicherweise als Änderung deklariert werden. Dennoch ist das Fehlen von Daten ein negativer Effekt, da für diese Stellen letztlich keine Aussage getroffen werden kann. Der Einsatz eines ALS-Systems zur vorausblickenden schritthaltenden Änderungserkennung sollte also auf den Entfernungsbereich unter einem Kilometer beschränkt werden, das zeigen zumindest die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erfahrungen.

6.1.3 Realisierbarkeit der Echtzeit-Prozessierung

Ein augenscheinlicher Nachteil des ALS ist die im Vergleich zu anderen Datenerfassungsmethoden (noch) relativ geringe Datenrate. Auch dafür gibt es technische Gründe: Beim Laserscanning wird meist nur ein einzelnes Detektorelement verwendet, für das in aller Regel ein mechanischer Scanprozess realisiert wird, und zwar typischerweise durch die Bewegung eines Spiegels. Das heißt, dass zur Ablenkung der Laserpulse eine Masse bewegt werden muss, weshalb Beschränkungen der maximalen Scangeschwindigkeit bestehen. Die Datenrate ist auch dadurch limitiert, dass nach der Aussendung eines Laserpulses zunächst dessen Echo „abgewartet“ wird, bevor der nächste Puls abgestrahlt werden kann. Mittlerweile existieren auch Laserscanner, die mit mehreren Pulsen gleichzeitig operieren (engl. Multiple Pulses in the Air, z.B. RIEGL LMS-Q680i), wodurch jedoch ein Zuordnungsproblem entsteht und daher ein Entfernungsfenster vorgegeben werden muss. Durch stetige Verbesserungen in der Sensortechnik sind so mittlerweile Datenraten bis

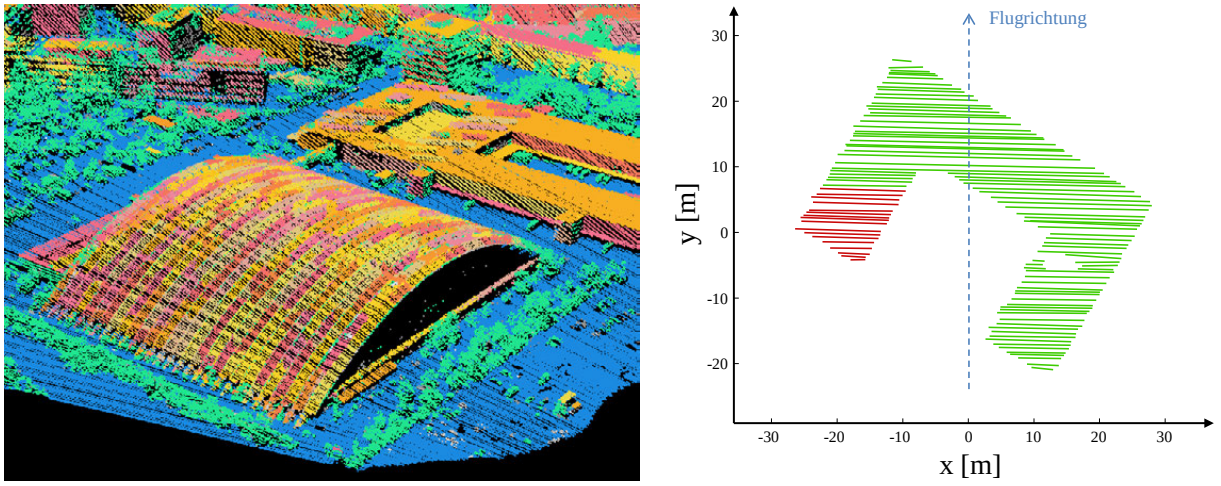
500 kHz möglich. Die Datenrate kann weiter gesteigert werden, indem mehrere Laserentfernungsmesser zu einem einzigen Sensor gebündelt werden. Zum Beispiel verwendet der Sensorkopf des Velodyne HDL-64E aus Abbildung 1.2b insgesamt 64 rotierende Laser und Detektoren, um damit eine Gesamt-Datenrate von 1.3 MHz zu erreichen. Es ist derzeit auch eine andere technische Entwicklung zu beobachten, in der auf einen Scanprozess gänzlich verzichtet und stattdessen eine Detektormatrix verwendet wird (Beispiel: „ASC Flash-LiDAR“ Kamera). Mit solchen Geräten ist es möglich, dreidimensionale Bewegungsabläufe auf große Distanz im 25 Hz Videotakt mit einer Auflösung von 128×128 3D-Punkten zu erfassen. Für jedes 3D-Bild wird dazu das gesamte Gesichtsfeld der Kamera mit einem einzigen aufgeweiteten Laserpuls beleuchtet, was eine hohe Laserenergie erfordert.

Trotz dieser technischen Weiterentwicklung bleibt die Datenrate aktueller Lasersensoren beispielsweise noch hinter der von handelsüblichen HD-Videokameras zurück (30 Bilder/sek bei 1920×1080 RGB), wenn statt einer Speicherung der vollständigen Signalformen nur die signifikanten Pulsechos aufgezeichnet werden. Dieser Vergleich ist nicht ganz stimmig, da ein Laserscanner de facto 3D-Punkte statt 2D-Bilddaten liefert. Dennoch zeigt er, dass die anfallende Datenmenge beim Laserscanning tendenziell eher gering ist. Aus Sicht der Datenauswertung bedeutet das, dass die Voraussetzungen für eine schritthaltende Prozessierung sehr gut sind. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente konnten dies nicht real wiedergeben, da das verwendete ALS-Experimentalsystem nicht für einen Echtzeit-Zugriff auf die Scandaten ausgelegt war. Die allgemeine technische Entwicklung auf dem Gebiet des Laserscanning zeigt aber klar in Richtung Echtzeitauswertung und -anwendung. So sind z.B. bereits mehrere Modelle der Firma RIEGL mit einer *Online Waveform Analyse* versehen. Ein weiteres Beispiel ist der oben erwähnte Velodyne HDL-64E, der erfolgreich zur autonomen Fahrzeugnavigation eingesetzt wird, was naturgemäß eine unmittelbare Datenauswertung erfordert.

Beim ALS ist außerdem die Verwendung von Navigationssensoren von wesentlicher Bedeutung. Hierbei steht die in Kapitel 5 mehrfach erwähnte Nachprozessierung der GPS-Daten (PPK) nicht im Widerspruch zu realen Einsatzbedingungen, da dort das ähnlich genaue RTK-Verfahren oder die schritthaltende Angleichung aus Abschnitt 4.4.3 zur Echtzeit-Koregistrierung eingesetzt werden können. Für die in dieser Arbeit besprochenen und entwickelten Verfahren wurde lediglich eine prototypische Implementierung in MATLAB erstellt. An den entscheidenden Stellen (z.B. scanzeilenbasierte Segmentierung, geländebasierte Navigation, sofortige Änderungserkennung) folgte die Verarbeitung aber dem korrekten Ablauf der Datenerfassung. Die Verfahren zeigen außerdem ein hohes Potential zur Parallelisierung und zur Adaption an Laufzeitbeschränkungen. So kann sich z.B. die Anzahl der durchgeführten RANSAC-Iterationen nach den jeweiligen Anforderungen an Genauigkeit und Geschwindigkeit richten. Für die schritthaltende Durchführung der Änderungserkennung scheinen Gleichungen 4.32 zunächst sehr rechenintensiv zu sein. Die dortigen Sigmoid- und Exponentialfunktionen können aber effizient durch eine Lookup-Tabelle (LUT) umgesetzt werden. Insgesamt sind keine größeren Probleme bei einer Echtzeit-Realisierung der beschriebenen Algorithmen zu erwarten.

6.2 Bewertung der unterschiedlichen Segmentierungsverfahren

In Abschnitt 4.2 wurden zwei Segmentierungsverfahren für 3D-Punktmengen vorgestellt, die verschiedene Einzelschritte im Gesamtablauf darstellen (vgl. Abbildung 4.14). Während das in Algorithmus 1 beschriebene Verfahren als Vorstufe zur Systemkalibrierung und zur „Offline“-Erstellung des Referenzdatensatzes dient, ist die in den Algorithmen 2 bis 4 beschriebene scanzeilenbasierte Segmentierung für die schritthaltende Verarbeitung während der ALS-Datenerfassung vorgesehen. Beiden Verfahren gemein ist die Aufgabe, im ALS-Datensatz Zusammenhangskomponenten von 3D-Punkten aufzufinden, durch die jeweils Ebenensegmente repräsentiert werden. Dahinter steht



(a) (b)

Abbildung 6.3: Typische Segmentierungsfehler beider Verfahren: (a) Fälschlicherweise erkannte lokale Ebenen, (b) Übersegmentierung im Verlauf der Scanzeilenauswertung.

die Motivation, dass in urbanen Gebieten ein vermehrtes Auftreten planarer 3D-Strukturen angenommen werden kann. Diese Annahme trifft allerdings nicht überall zu, und es kann vorkommen, dass Punktnachbarschaften aufgrund ihrer lokalen Eigenschaften fälschlicherweise als Ebenensegmente identifiziert werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 6.3a zu sehen, wo das im Zuge der Befliegung „München (TUM) 2006“ erfasste Gebäude der Deutschen Post AG (Briefzentrum München) gezeigt wird. Algorithmus 1 fand in den 3D-Punkten des weiträumig gebogenen und gewellten Dachs genügend Saatpunkte für das Flächenwachstum. Auch das Schätzen der Ebenenparameter und Filtern der Outlier gelang im Rahmen des RANSAC-Konfidenzintervalls, bis die Gesamtkrümmung der jeweils gefundenen Fläche zu groß wurde. Aus diesem Grund wurde das Dach in viele kleine, zufällig verteilte Ebenensegmente zerlegt.

Die Scanzeilenauswertung in den Algorithmen 2 bis 4 weist darüber hinaus einen Nachteil auf, der sich aus der zeitlich und räumlich gerichteten Vorgehensweise ergibt. Falls der Prozess des sukzessiven Gruppierens komplanarer Geradensegmente auf ein nicht-konvexes Ebenenstück trifft, kann es vorkommen, dass dieses in Teilsegmente zerfällt. Dies liegt darin begründet, dass im Überflug zunächst zwei oder mehrere Segmente aufgebaut werden, die bei einem späteren Zusammentreffen nicht vollständig rückwirkend verschmolzen werden. Abbildung 6.3b zeigt diesen Effekt für das Flachdach des TUM-Haupteingangs. Es wäre einfach möglich, die Verschmelzung der komplanaren Teilsegmente im Nachhinein durchzuführen, jedoch widerspräche das dem Anspruch der schritthaltenden Prozessierung.

Für die genannten Nachteile beider Segmentierungsverfahren konnten in den Experimenten nur vereinzelte Beispiele gefunden werden. Es ist außerdem nicht das Ziel dieser Verfahren, wie z.B. bei Schnabel et al. [2007] eine vollständige und optimale Zerlegung der Punktwolken in Objektprimitive zu erreichen. Stattdessen geht es vor allem darum, durch die Identifikation von Ebenensegmenten deren eindeutige Zuordnung zwischen überlappenden Datensätzen zu ermöglichen. Im Zuge dessen werden weitere Merkmale bewertet, um Fehlzuordnungen zu vermeiden (siehe Abschnitt 4.2.5). Die Zuordnung von Ebenensegmenten ist in den vorgestellten Verfahren weitgehend unabhängig von deren diskreter Repräsentation in den Punktwolken. In der Praxis wirken sich die oben gezeigten Segmentierungsfehler nicht auf z.B. die Durchführung der Boresight-Kalibrierung aus, da fehlerhafte Segmente üblicherweise keine Entsprechung in den anderen Datensätzen haben. Wenn es zufällig doch zu einer Übereinstimmung der Merkmale kommt, werden diese Fehlzuordnungen spätestens durch den RANSAC-Lösungsansatz herausgefiltert.

6.3 Güte und Stabilität der Kalibrierung

6.3.1 Notwendigkeit der Boresight-Kalibrierung

Aufgrund der langwierigen Planungsphasen und der nicht durchgängigen Verfügbarkeit eines Sensorträgers konnten für die beschriebenen Untersuchungen nur die in Tabelle 5.2 aufgelisteten Messkampagnen durchgeführt werden. Die Daten der ersten Befliegung „München (TUM) 2006“ waren sogleich von einem vermeidbaren Fehler geprägt, nämlich der fehlenden Aufzeichnung der GPS-Rohdaten. Hierdurch wurde eine PPK-Korrektur der gemessenen Sensortrajektorie verhindert, sodass die aus vier Überflügen zusammengestellten Punktwolken deutliche Unstimmigkeiten in der Passgenauigkeit erkennen ließen. Die ersten Korrekturversuche beschränkten sich auf eine rein ICP-basierte Koregistrierung der 3D-Punktwolken (vgl. Hebel & Stilla [2007]). Zur Vermeidung solcher Diskrepanzen wurden in den Jahren 2008 und 2009 die für eine Nachprozessierung notwendigen Rohdaten der Navigationssensoren aufgezeichnet. Die damit erfolgte Korrektur der Sensorpositionen ergab aber zunächst keine wesentliche Verbesserung bei der Passgenauigkeit der Punktwolken (siehe Abbildung 5.11).

Diese Erfahrungen verdeutlichen, dass die eigentliche Aufgabe der automatischen Änderungserkennung im Vorfeld eine intensive Auseinandersetzung mit möglichen Fehlerquellen des ALS-Systems erfordert. Die naheliegende Idee, multitemporale ALS-Punktwolken mittels ICP-artiger Methoden zur Deckung zu bringen, kann nur teilweise zur Lösung beitragen. Es gelingt damit zwar, die relative Passgenauigkeit der Datensätze in gewisser Weise zu verbessern, jedoch bleibt deren absolute geographische Position unklar. Eine rigide Koregistrierung hat außerdem keine fehlerbehebende Auswirkung auf Verzerrungen der Punktwolken und ebenso nicht auf zukünftige Messungen mit dem gleichen Sensorsystem. Weitere Gründe, die insbesondere bei den in dieser Arbeit unterstellten Randbedingungen gegen ein ICP-Vorgehen sprechen, ergeben sich z.B. aus der Schrägsicht des Laserscanners. Die wichtigsten Fehlerquellen beim ALS wurden in Abschnitt 3.2 erörtert. Die dortigen Überlegungen führten zu dem Schluss, dass nach einer PPK- oder RTK-Korrektur der GPS-Informationen vor allem die IMU/Laserscanner-Fehlstellung einen wesentlichen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit der Laserpunkte hat. Die zahlreichen anderen Fehlerquellen können prinzipiell in unabhängiger Weise etwa im Labor bzw. am unbewegten Sensorträger beseitigt werden. Dagegen erfordert die Boresight-Kalibrierung des Gesamtsystems dessen Verwendung unter Einsatzbedingungen, da nur so eine akkurate Funktion der Inertialsensoren gewährleistet werden kann. In den Experimenten wurde anhand von Daten der Befliegungen „Abenberg 2008“, „Abenberg 2009“ und „Ruschberg 2009“ bestätigt, dass durch die Berücksichtigung der Boresight-Winkel in Verbindung mit einer PPK-korrigierten Sensortrajektorie bereits eine optimale Angleichung überlappender Punktwolken erreicht werden kann (siehe Abbildungen 5.14 und 5.17). Bei den Daten der anderen Messplätze traten jedoch weitere negative Einflüsse zutage, die im nächsten Abschnitt besprochen werden.

6.3.2 Einfluss weiterer Fehlerquellen

In Abbildung 5.17 ist deutlich zu erkennen, dass der Ablauf der Boresight-Kalibrierung im Fall der Daten der Befliegung „München (TUM) 2006“ zu keinerlei Verbesserung der Passgenauigkeit geführt hat. Im Gegenteil: Die Multi-Aspekt Punktwolken wiesen nach der Berücksichtigung der anhand dieser Daten ermittelten Boresight-Winkel sogar noch leicht größere Diskrepanzen auf (im Sinne des in Abschnitt 5.4.1 definierten Bewertungsschemas). Gleichzeitig fällt in Tabelle 5.5 auf, dass die für „München (TUM) 2006“ berechneten Boresight-Winkel sich deutlich von denen der Jahre 2008 und 2009 unterscheiden. Der Grund hierfür kann ebenfalls in der in diesem Einzelfall fehlenden PPK-Korrektur der Sensortrajektorie gesehen werden. Die in Abschnitt 4.3 beschriebene Vorgehensweise zur Boresight-Kalibrierung kann zwar anhand solcher Daten ablaufen, jedoch ist dies nicht sinnvoll, wenn die Daten noch von weiteren ausgeprägten Fehlerquellen beeinflusst

sind (z.B. signifikante Positionsfehler). Die zusätzlichen Fehler werden dann unsachgemäß in die Boresight-Kalibrierung einbezogen, da sie in diesem Modell überhaupt nicht adäquat erfasst werden können. Eine korrekte Boresight-Kalibrierung ist also nur durchführbar, falls GPS-bedingte Fehler zuvor aus den ALS-Daten beseitigt wurden.

Bei den anhand der Daten von 2008 und 2009 durchgeführten Experimenten war die Einbeziehung einer GPS-Referenz fester Bestandteil der Verarbeitungskette. Der SAPOS-Dienst liefert dazu hochgenaue Korrekturdaten, wobei das gesamte SAPOS-Netzwerk in Deutschland über mehr als 270 Stationen verfügt. Dennoch ist bei den in Tabelle 5.2 aufgelisteten Befliegungen nicht selten ein Abstand von mehr als 10 km zur nächsten Referenzstation aufgetreten, wodurch die Positionierungsgenauigkeit am Messplatz reduziert wurde. Auch die GPS-Satellitenkonstellation zum Zeitpunkt der Datenerfassung kann als limitierender Faktor Auswirkungen auf die Positionierungsgenauigkeit haben. Besonders die Daten der „Kiel 2008“-Befliegung zeigen trotz PPK-Korrektur noch deutliche Einflüsse GPS-bedingter Positionsfehler. Für die Eigenpositionen des Laserscanners wurden in diesem Fall zum Teil noch Abweichungen bis zu 30 cm geschätzt (siehe Tabelle 5.2). Obwohl auf Basis dieser Daten plausible Werte für die Boresight-Winkel β_1, β_2 und β_3 ermittelt wurden, konnte die Passgenauigkeit der insgesamt sechs Punktwolken unter Berücksichtigung dieser Winkel nur mäßig verbessert werden (siehe Abbildung 5.17). In Fällen variabler GPS-bedingter Positionsfehler besteht außerdem das Risiko, dass während der Bestimmung der Boresight-Winkel korrekte Zuordnungen von Ebenensegmenten fälschlicherweise als Outlier gewertet und durch die RANSAC-Filterung entfernt werden, weil dadurch die Passgenauigkeit für andere Teilmengen der Daten verbessert werden kann. Dieser Effekt der Überanpassung (engl. Overfitting) trat beim Beispiel „Ettlingen (IOSB) 2009“ auf, wo nur eine geringe Anzahl planarer Flächenstücke für die Berechnungen verfügbar war. Wenn stattdessen die Kalibrierungsergebnisse der „Abenberg 2009“-Befliegung bei der direkten Georeferenzierung der „Ettlingen (IOSB) 2009“-Punktwolken verwendet wurden, waren die mittleren lokalen Diskrepanzen nahezu identisch zu den in Abbildung 5.17 gezeigten. Das bedeutet, dass die Passgenauigkeit in diesem Beispiel selbst bei der Verwendung eines perfekt kalibrierten ALS-Systems per se recht gering ist, was für das fortwährende Vorhandensein von GPS-bedingten Positionsfehlern spricht. In solchen Fällen ist die in Abschnitt 4.4.2 vorgeschlagene rigide Koregistrierungsmethode das geeignetste Mittel, die relativen Diskrepanzen zwischen den überlappenden Punktwolken zu minimieren.

Mit Hilfe der ALS-Daten aller weiteren Messplätze konnten zuverlässige und reproduzierbare Werte für die Boresight-Winkel im verwendeten ALS-System bestimmt werden. Unter Berücksichtigung der jeweils ermittelten Winkel β_1, β_2 und β_3 ließ sich die absolute Positionierungsgenauigkeit bei der direkten Georeferenzierung der Punktwolken deutlich verbessern, wobei anschließend nahezu keine Notwendigkeit einer zusätzlichen Koregistrierung bestand. Zum Beispiel lag die maximale Standardabweichung der berechneten Boresight-Winkel innerhalb der „Abenberg 200x“-Befliegungen bei σ=0.007°. Allerdings zeigt der übergreifende Vergleich der Boresight-Parameter zwischen den verschiedenen Messplätzen größere Variationen der Werte, selbst wenn das ALS-System zwischen den Messungen unverändert blieb. Zusätzlich zur oben genannten Problematik der Überanpassung deutet dies auf weitere Phänomene hin, die einen negativen Einfluss auf die Daten haben können und im Modell nicht erfasst sind. Einige dieser Einflüsse lassen sich vermuten, die spezifisch für das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Sensorsystem auftreten. Selbst unter optimalen Bedingungen und nach einer Nachprozessierung aller Navigationsdaten (PPK) ist die Winkelgenauigkeit des Applanix POS AV 410 mit 0.008° für Roll- und Nick-Winkel sowie mit 0.025° für den Gier-Winkel spezifiziert (vgl. Applanix [2009]). Wenn die absolute Ausrichtung des Laserscanners durch das GNSS/INS-Subsystem in dieser Größenordnung falsch gemessen wird, so werden diese Winkel unbeabsichtigt in die Boresight-Parameter β_1, β_2 und β_3 hineingerechnet. Weitere negative Einflüsse könnten durch den Scanmechanismus des Laserscanners verursacht worden sein, der seit 2006 nicht justiert wurde. Nach etlichen Flugmesskampagnen am Hubschrauber und nach sonstigen Transporten des Geräts mit starker mechanischer Beanspruchung könnte

sich ein Achsversatz beim Scanspiegel ergeben haben, welcher nun ebenfalls zu Effekten führt, die den Vorgang der Boresight-Kalibrierung beeinflussen („Pitch-Slope“-Fehler).

Trotz der genannten Mängel bestätigen die Ergebnisse und die Konsistenz der ermittelten Boresight-Winkel, dass die Qualität der ALS-Daten durch die Boresight-Kalibrierung deutlich und dauerhaft verbessert werden kann, solange das ALS-System im Anschluss nicht mehr verändert wird. Maximal- und Minimalwert der lokalen Diskrepanzen konnten auf unter 20 Prozent der Werte reduziert werden, die sich anhand des unkalibrierten Systems ergeben hatten (siehe Abbildung 5.17). So zeigten die Punktwolken der „Abenberg 200x“-Befliegungen im Anschluss an die Boresight-Kalibrierung noch relative Abweichungen von 3-8 cm, was ohne Weiteres durch Schwankungen aufgrund der anderen Einflussgrößen aus Tabelle 3.1 erklärt werden kann, aber auch durch die typische Rauheit der betrachteten Oberflächen (z.B. Fassaden und Dächer). Allerdings waren die größten verbleibenden Diskrepanzen an den Streifenrändern zu beobachten, was wahrscheinlich auf die oben genannten Phänomene zurückgeführt werden kann.

6.3.3 Empfohlenes Vorgehen zur Kalibrierung eines ALS-Systems

Sobald die Boresight-Winkel β_1, β_2 und β_3 bestimmt wurden, kann die zugehörige Drehmatrix R_B auch bei allen nachfolgenden Messungen berücksichtigt werden, indem die direkte Georeferenzierung der Laserpunkte gemäß Gleichung 3.2 durchgeführt wird. Eine Wiederholung der Boresight-Kalibrierung ist jedoch sehr zu empfehlen, wenn das Sensorsystem neu zusammengestellt werden musste oder einzelne Komponenten ausgetauscht wurden. Die Relativausrichtung von Laserscanner und IMU kann nämlich bei der Installation am Sensorträger zum Beispiel durch ein unterschiedliches Anzugsdrehmoment von Schrauben oder vertauschte Unterlegscheiben im Vergleich zu einem früheren Zustand verändert werden. Dies ist nur dann nicht der Fall, wenn die IMU ein fester Bestandteil des Laserscanners ist.

Gemäß Abbildung 5.17 wurden bei den Experimenten zur Systemkalibrierung die besten Resultate anhand der Datensätze „Abenberg 2008“ und „Abenberg 2009“ erzielt. Dafür können drei verschiedene Gründe genannt werden: Erstens lagen bei diesen Befliegungen optimale Bedingungen für eine PPK-Korrektur der GPS-Rohdaten vor, wodurch die Positionen des Laserscanners (die Sensortrajektorie) mit einer Genauigkeit besser als 4 cm bestimmt werden konnten (vgl. Tabelle 5.2). Zweitens war die Flughöhe mit 300 m relativ gering, sodass sich eine verbleibende IMU/Laserscanner-Fehlstellung bei den resultierenden Messentfernungen bis 500 m nicht allzu stark auswirkte. Der dritte Grund ist das Erscheinungsbild des Ortes Abenberg: Während bei den anderen Testgeländen regelmäßige Strukturen mit Parallelstraßen, Flachdächern und Reihenhäusern angetroffen wurden, ist Abenberg mit einzelnstehenden Gebäuden sehr verwinkelt angelegt. Die Orientierung von Dachflächen und Fassaden weist daher eine große Streuung auf (siehe Abbildung 5.9b). Durch das hügelige Gelände kommt hinzu, dass planare Flächen in unterschiedlichen Höhen gefunden werden konnten. Offensichtlich werden durch solchen Variationsreichtum optimale Randbedingungen zur Kalibrierung des ALS-Systems geschaffen. Das gilt insbesondere dann, wenn ein schräg nach vorne gerichteter Laserscanner verwendet wird. In jedem Fall wird empfohlen, die Vielfalt der Flächenorientierungen in den ALS-Daten und die Zuordenbarkeit von Ebenensegmenten durch möglichst viele Flugrichtungen zu erhöhen. Dies hat den in dieser Arbeit ohnehin gewünschten Effekt einer möglichst vollständigen Erfassung des urbanen Gebiets, führt aber auch zu den besten Ergebnissen bei der Systemkalibrierung.

6.4 Bewertung der Ergebnisse der Änderungserkennung

Die in Abbildung 5.20 gezeigten Ergebnisse der schritthaltenden Änderungserkennung zwischen dem Referenzdatensatz „Abenberg 2008“ und einem einzelnen Überflug der Befliegung „Abenberg 2009“ lassen keine quantitative Bewertung zu, da Ground-Truth-Informationen über bewegte

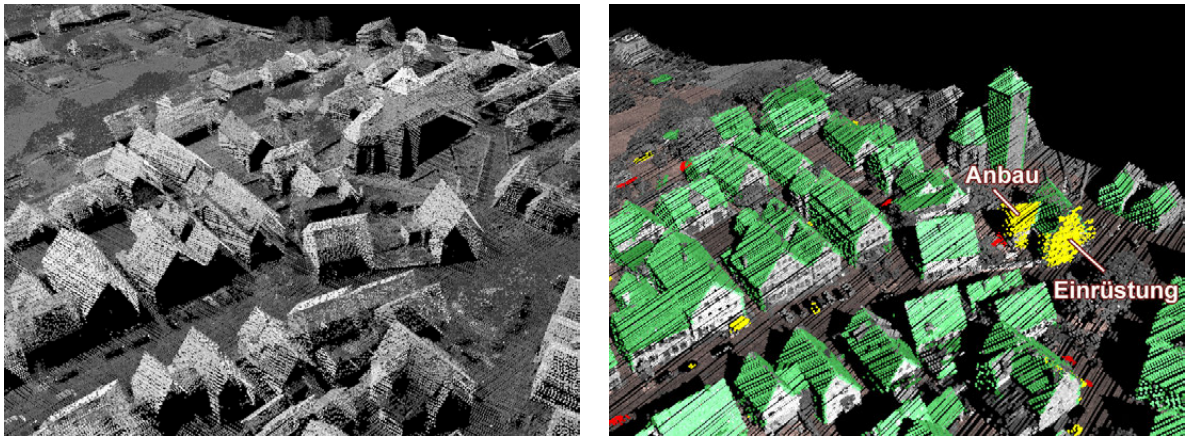
oder bewegliche Objekte in der Szene fehlen. Es können aber einzelne Stellen der Ergebnisdarstellung exemplarisch herausgegriffen und diskutiert werden, um dadurch auf typische (positive wie negative) Effekte hinzuweisen. Größere Rückbaumaßnahmen im fraglichen Zeitraum, die in Abbildung 6.5c zu sehen sind, konnten auch anhand von Luftbildern bei *Google Earth* visuell bestätigt werden. Aufgrund der restriktiven Richtlinien für die Verwendung von Google-Marken durch Dritte wird aber auf einen Abdruck dieser Bilder an dieser Stelle verzichtet.

6.4.1 Vor- und Nachteile des gewählten Ansatzes

Nach den durchgeführten Experimenten zeigen die in Abbildung 5.20 dargestellten Ergebnisse, dass räumliche Änderungen im betrachteten urbanen Gebiet mit den Verfahren aus dieser Arbeit zuverlässig detektiert werden konnten. Da sich die hier verwendete Methode an Raumbelegungskonflikten orientiert, ist die exakte Koregistrierung der aktuellen ALS-Daten zum gespeicherten 3D-Referenzdatensatz von zentraler Bedeutung. Die Qualität der ALS-Daten, deren räumliche Konsistenz, aber auch die Lokalisierbarkeit von Einzelmessungen und die Dichte der 3D-Informationen sind entscheidende Faktoren bei der Festlegung von Untergrenzen der Detektierbarkeit. Im gezeigten Beispiel war die Passgenauigkeit unter den Datensätzen nach allen Vorarbeiten (Kalibrierung, Koregistrierung) besser als 10 cm. Jedoch lag die Punktdichte am Boden in einem einzelnen Überflug der Befliegung „Abenberg 2009“ bei ca. 5 pt/m^2, was einem mittleren Punktabstand von ca. 45 cm entspricht. Gleichzeitig führte die Strahldivergenz bei Messdistanzen bis 500 m dazu, dass jeweils ein Fleck mit einem Durchmesser von 25 cm beleuchtet wurde. Diese Werte verdeutlichen, dass bei diesen Randbedingungen ein erfasstes Objekt dem Laserscanner wenigstens eine Querschnittsfläche von etwa 1 m^2 bieten sollte, um noch möglichst verlässlich als Änderung erkannt werden zu können.

Im Gegensatz zu den in der Robotik vielerorts eingesetzten 2D-Belegungsgittern verwendet das hier präsentierte Konzept zur Änderungserkennung ein 3D-Gitter, dessen Anwendung sich aber allein auf die Durchführung von Suchoperationen beschränkt. Aus diesem Grund kann das Gitter relativ weitmaschig angelegt werden. Dennoch besteht ein Nachteil des Verfahrens darin, dass aus der Vielfachverteilung von Indizes auf das Gitter $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ ein vergleichsweise hoher Speicherbedarf resultiert. Im untersuchten Beispiel führten die Referenzdaten „Abenberg 2008“ zu Voxelgittern $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ und $\mathbf{V}_\mathtt{R}$, die im Speicher insgesamt mehr als 1 GB belegten. Der hohe Speicherbedarf entsteht hauptsächlich im Voxelgitter $\mathbf{V}_\mathtt{R}$, da dort anstelle der Laserpunkte der Ausbreitungsweg jedes Laserpulses in Rasterform eingetragen wird. Hierbei gäbe es die Möglichkeit, die Untersuchungen z.B. auf den Raumbereich von ± 10 m um die Referenzdaten zu beschränken, was den Speicherbedarf deutlich reduzieren würde. Auf solche Maßnahmen wurde aber zugunsten der Vollständigkeit und der Übersichtlichkeit des Verfahrens verzichtet, da heutzutage selbst handelsübliche Mobilrechner eine dafür ausreichende Speicherkapazität aufweisen. Die recht aufwendige Erstellung von $\mathbf{V}_\mathtt{P}$ und vor allem von $\mathbf{V}_\mathtt{R}$ aus den Referenzdaten des Zeitpunkts t_1 hat während der Vergleichsphase t_2 den Vorteil, dass jede Einzelmessung schnell und individuell auf mögliche Informationsüberschneidungen mit den Referenzdaten überprüft werden kann. Hierdurch kann die automatische Änderungserkennung schritthaltend durchgeführt werden, ohne dass zuvor erst eine Punktwolke aus den neuen Messungen generiert werden muss. Da für die Referenzdaten eine Einteilung in verschiedene Klassen existiert (z.B. Boden, glatte Oberflächen, Vegetation), können in der Vergleichsphase t_2 detektierte Änderungen entsprechend bewertet werden.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der konzipierten Methode ist die Vermeidung von zusätzlichen Verdeckungsanalysen, die ansonsten beim differenziellen Vergleich digitaler Oberflächenmodelle aufgrund der Schrägsicht des Sensors erforderlich wären. Durch die Strahlverfolgung werden Verdeckungen implizit behandelt. Falls der Referenzdatensatz durch eine unvollständige Datenerfassung oder aufgrund von Abschattungen Informationslücken aufweist, sind die betroffenen Raumbereiche automatisch als *unbestimmt* gekennzeichnet, wodurch kein Informationskonflikt



(a) (b)

Abbildung 6.4: Schließen von Informationslücken und Änderungserkennung: (a) Rand der Referenzdaten „Abenberg 2008“ mit fehlenden Fassaden, (b) Daten der Befliegung „Abenberg 2009“ (Überflug 2) und erkannte Änderungen.

mit einer neuen Messung entstehen kann. Abbildung 6.4 zeigt hierzu ein Beispiel: In (a) ist ein Teil der Referenzdaten „Abenberg 2008“ zu sehen, wobei es sich um einen Ausschnitt am Rand des betrachteten Gebiets handelt. Da die vier Streifen bei der Befliegung im Jahr 2008 leicht seitlich versetzt erfasst wurden, traten in den äußeren Bereichen Informationslücken auf. Es ist deutlich zu erkennen, dass aus der gezeigten Richtung keine ALS-Messungen auf den Fassaden der Gebäude vorhanden waren. In (b) sind die Resultate der automatischen Änderungserkennung wie in Abbildung 5.20 dargestellt, jedoch mit dem Unterschied, dass es sich hierbei um Überflug 2 der Befliegung „Abenberg 2009“ handelt. Die im Referenzdatensatz von 2008 fehlenden Fassaden wurden bei diesem Überflug im Jahr 2009 erfasst und dabei als neue Information in den Datenbestand aufgenommen (*unbestimmt→belegt*). Auf der rechten Seite ist aber auch zu sehen, dass tatsächliche Veränderungen überall dort erkannt wurden, wo ein Übergang der Raumbelegung von *leer* nach *belegt* stattfand. In diesem Ausschnitt der Daten trifft dies auf ein Gebäude zu, bei dem in der Zwischenzeit (2008→2009) ein Anbau hinzugefügt wurde. Außerdem ist an der Giebelwand des Gebäudes eine Einrüstung zu erkennen, die das Verfahren ebenfalls als Änderung markiert hat (vergleiche auch Abbildung 5.20, linke Seite).

6.4.2 Saisonale Veränderungen der Vegetation

Bei der Betrachtung von Abbildung 5.20a ist besonders auffällig, dass Vegetation in diesem Beispiel als Änderung $C_{\boldsymbol{q}}$ (gelb) in Erscheinung tritt, also als hinzugekommenes Volumen. Dies liegt ganz einfach daran, dass der Referenzdatensatz im Frühling (April 2008) erfasst wurde, während die Suche nach Veränderungen im Hochsommer (August 2009) stattfand. Dadurch ist die Belaubung von Bäumen und Sträuchern zum Zeitpunkt t_2 wesentlich ausgeprägter. Ein zusätzliches Experiment, bei dem entgegen der korrekten Zeitrichtung der Datensatz „Abenberg 2009“ als Referenz und die Befliegung „Abenberg 2008“ zum Vergleich herangezogen wurden, konnte dies bestätigen, da dort Vegetation folgerichtig als Änderung $C_{\boldsymbol{p}}$ auftrat. Die in Abschnitt 4.5.6 beschriebenen Verfahrensmodifikationen reduzieren den Einfluss solcher saisonaler Vegetationsänderungen, indem von allen Messungen im Zusammenhang mit Vegetation andere Massenzuordnungen im Raum verursacht werden. Durch die breitere Verteilung (Abbildung 4.21) werden Volumenschwankungen im Umfeld von Vegetation eher ignoriert. Dies ist sinnvoll, wenn von Menschen verursachte Änderungen primärer Gegenstand der Untersuchungen sind, führt aber auch zu fehlenden Detektionen, wenn z.B. Vegetation und Gebäude sehr dicht stehen oder Fahrzeuge unter

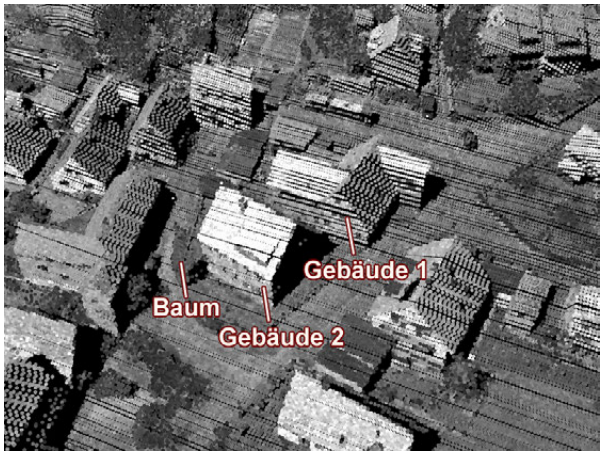
Bäumen geparkt sind/waren. Alternativ zur beschriebenen Abwandlung der Massenzuordnungen könnte man die Klassifikation der Lasermessungen (z.B. durch Pulsformanalyse, PCA oder Scanzeilenauswertung) auch dafür verwenden, Vegetation generell nicht als Änderung einzustufen. Dadurch würden aber z.B. auch gefällte Bäume ignoriert werden, die ansonsten immer noch erkannt werden können. Beispiele hierfür und für verschiedene weitere Arten detektierbarer Änderungen werden im nächsten Abschnitt gezeigt.

6.4.3 Unterschiedliche Arten detektierter Änderungen

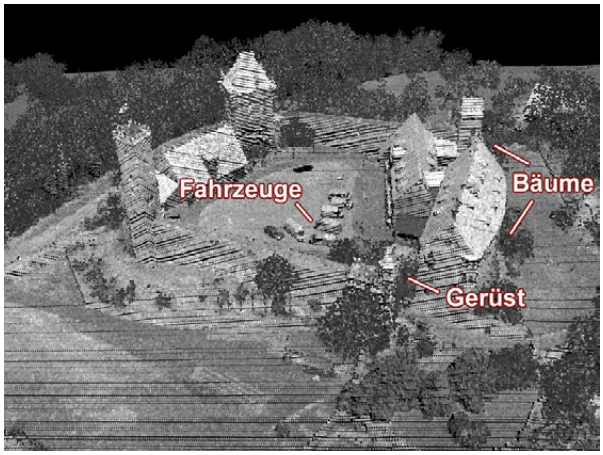
Am Ende dieses Kapitels werden die anhand der experimentellen Daten erhaltenen Ergebnisse der automatischen Änderungserkennung noch einmal näher betrachtet. Die Abbildungen 6.5 und 6.6 zeigen vier ausgewählte Details der Laserpunktwolken „Abenberg 2008“ und „Abenberg 2009“, die zur Bewertung herangezogen werden können. In den oberen und mittleren Abbildungen ist jeweils die entsprechend der gemessenen Reflektivität grauwertcodierte Visualisierung der Punktwolke eines einzelnen Überflugs zu sehen (2008 bzw. 2009). Obwohl von den Daten des Jahres 2008 aus Gründen der besseren visuellen Interpretierbarkeit nur ein einzelner Überflug gezeigt wird, diente doch stets die Vereinigung aller vier Punktwolken (aus vier Überflügen) als Referenzdatensatz. Die automatische Änderungserkennung wurde anhand des aufgezeichneten Datenstroms des dargestellten Überflugs aus dem Jahr 2009 im zeitlich korrekten Ablauf der Datenerfassung durchgeführt. Die Farbgebung bei der Darstellung von detektierten Änderungen ist wie in Abbildung 5.20 gewählt, d.h. Belegungskonflikte $C_{\boldsymbol{q}}$ und $C_{\boldsymbol{p}}$ sind gelb bzw. rot dargestellt, wobei Vegetation wie beschrieben durch eine abgewandelte Art der Massenzuordnung in die Berechnungen einging. Bestätigte planare Oberflächen werden in den Abbildungen grün dargestellt, bestätigte Bodenpunkte sind bräunlich wiedergegeben.

Die Beispiele zeigen, dass typische Änderungen eines urbanen Gebiets weitgehend vollständig und fehlerlos detektiert werden konnten. Die Anzahl falscher bzw. fehlender Detektionen ist allerdings nicht unwesentlich von der Wahl der Parameter (λ, c, κ) abhängig, die sich wiederum nach der Punktdichte und der Positionsgenauigkeit der Laserpunkte richten sollte. In den Experimenten wurden die Parameter heuristisch für die vorhandenen ALS-Daten optimiert. Damit gehörten bewegte Fahrzeuge zu den kleinstmöglichen Objekten, die sich noch mit einer ausreichenden Anzahl an Datenpunkten als Änderung identifizieren ließen (siehe z.B. Abbildungen 6.5f und 6.6c). Jedoch wurden manche Fahrzeuge auch nicht detektiert, was bei näherer Betrachtung daran lag, dass dort im Datensatz statt Laserpunkten „Datenlöcher“ vorhanden waren. Dieser Effekt wird sehr wahrscheinlich aufgrund der schlechten Rückstreueigenschaften des Fahrzeuglacks verursacht. Zu den gut detektierbaren Änderungen zählten vor allem Bau-, Umbau- und Rückbaumaßnahmen an Gebäuden, wie sie in den Abbildungen 6.4b, 6.5c und 6.6f zu sehen sind. Auch Eingriffe in die urbane Vegetation zeigten sich noch als Detektionsergebnis (siehe Abbildung 6.6c), jedoch gelang dies aufgrund der oben beschriebenen Berücksichtigung saisonaler Schwankungen nur bei relativ isoliert stehenden Bäumen oder Baumgruppen.

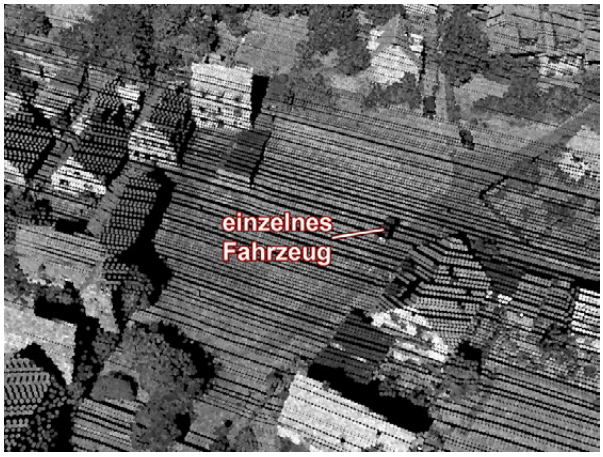
Die in den Abbildungen gewählte Farbgebung für planare Oberflächen (grün) und Bodenpunkte (braun) deutet an, dass die Verfahren aus dieser Arbeit neben der reinen Detektion von Volumenänderungen auch weitergehende Informationen liefern. Aus diesen Informationen kann zumindest teilweise auch auf die Bedeutung der detektierten Änderungen geschlossen werden. Die dazu benötigte Klassifikation und Segmentierung der ALS-Daten wird ohnehin bei der Aufbereitung der Referenzdaten durchgeführt. Aus dieser Auswertung resultiert die Kenntnis über Zusammenhangskomponenten in den Daten, sodass die als Einzelmessungen identifizierten Änderungen letztlich auch in diesen größeren Zusammenhängen betrachtet werden können. In den gezeigten Abbildungen ist dies noch nicht berücksichtigt, tatsächlich liegt aber z.B. für den Rückbau in Abbildung 6.5c jede Fassade und jede Dachfläche als einzelnes Änderungsereignis vor.



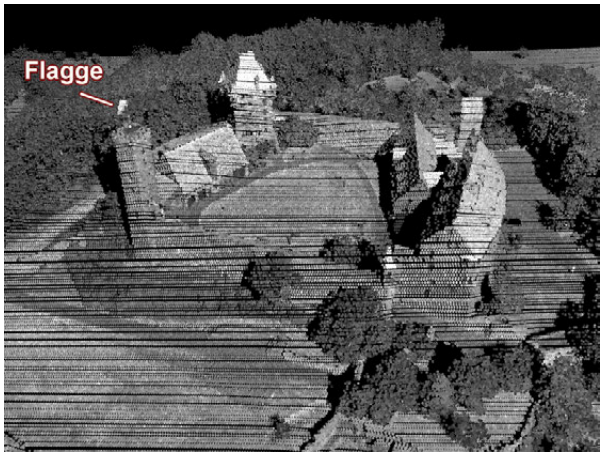
(a)



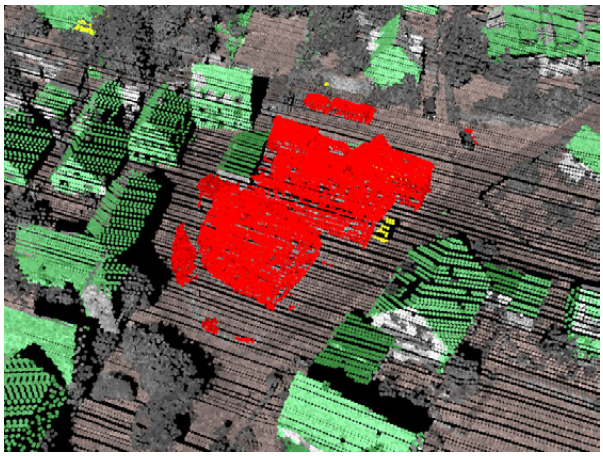
(d)



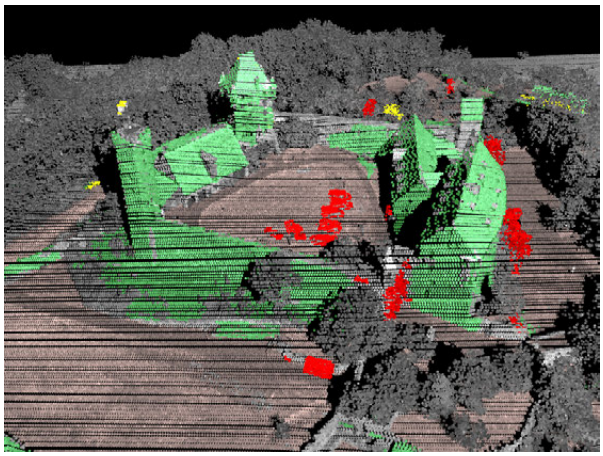
(b)



(e)

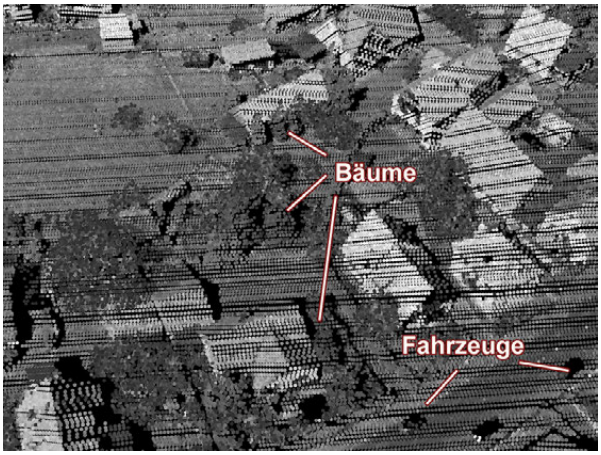


(c)

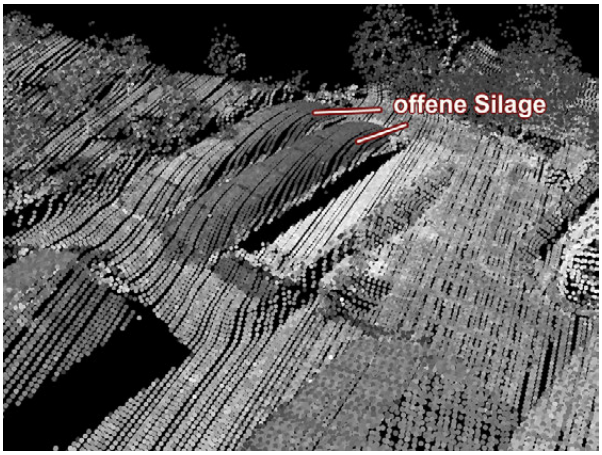


(f)

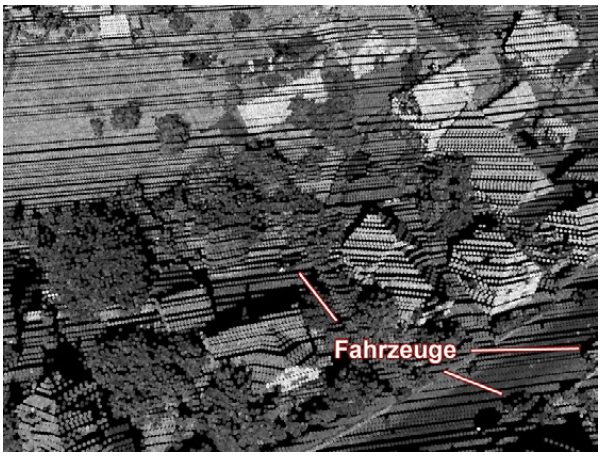
Abbildung 6.5: Unterschiedliche Arten detektierter Änderungen (Teil 1). Linke Seite (a: 2008 Überflug 4, b: 2009 Überflug 1, c: erkannte Änderungen 2009 Überflug 1): Komplettabriss mehrerer zusammenhängender Häuser im Ortskern von Abenberg, hinzugekommenes Fahrzeug. Rechte Seite (d: 2008 Überflug 4, e: 2009 Überflug 1, f: erkannte Änderungen 2009 Überflug 1): z.B. verschwundene Fahrzeuge im Innenhof der Burg Abenberg, entferntes Gerüst/Fassadenbegrünung, mehrere gefällte Bäume.



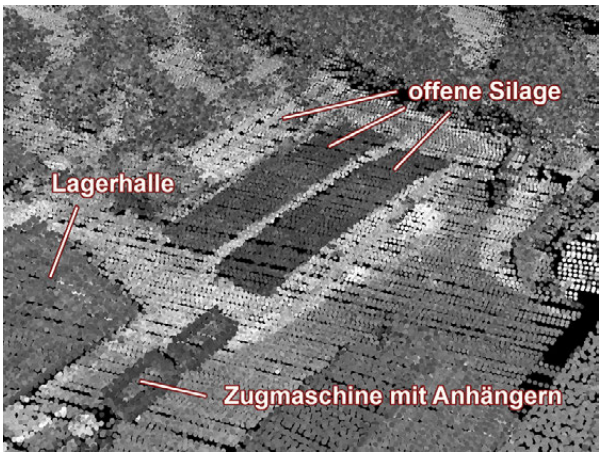
(a)



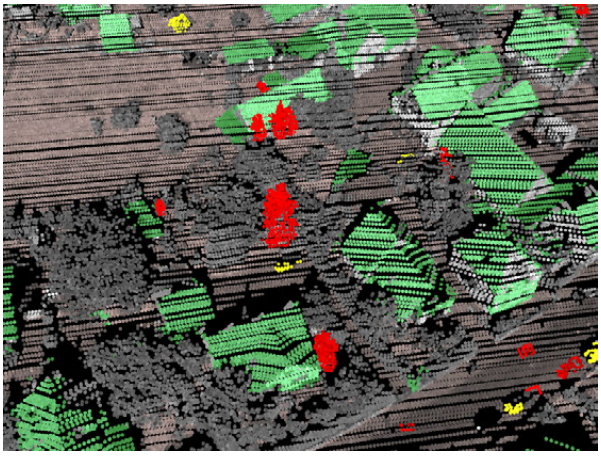
(d)



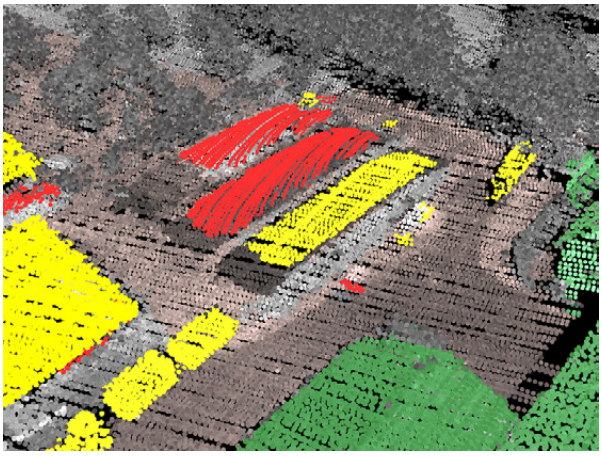
(b)



(e)



(c)



(f)

Abbildung 6.6: Unterschiedliche Arten detektierter Änderungen (Teil 2). Linke Seite (a: 2008 Überflug 4, b: 2009 Überflug 1, c: erkannte Änderungen 2009 Überflug 1): Vereinzelte gefällte Bäume, geänderte Position von Fahrzeugen. Rechte Seite (alle verfügbaren Daten am Rand des betrachteten Gebiets, d: 2008, e: 2009, f: erkannte Änderungen 2009): Aufgestockte Lagerhalle eines landwirtschaftlichen Betriebs, hinzugekommene Fahrzeuge mit Anhänger, offene Silage mit unterschiedlichen Füllständen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahrensablauf entwickelt, in dessen Rahmen sich Veränderungen eines urbanen Gebiets während eines Überflugs automatisch detektieren lassen. Die dazu erarbeiteten Methoden zur schritthaltenden Angleichung erfasster 3D-Daten an gespeicherte Referenzdaten sind darüber hinaus zur geländebasierten Navigationsunterstützung einsetzbar. Im Gegensatz zu typischen Aufgabenstellungen in der Geodäsie und Geoinformatik (z.B. Stadtmodellerstellung oder Aktualisierung von Gebäudedatenbanken) werden vor allem solche Anwendungen in den Mittelpunkt gestellt, für die eine sofortige Verwendung der Auswerteergebnisse unabdingbar ist. Beispiele hierfür sind die Flugführung bei Nachtflügen, Hinderniswarnung oder die Koordinierung von Rettungseinsätzen (SAR: *Search and Rescue*). Die daraus resultierenden besonderen Randbedingungen erforderten eine Anpassung gängiger Methoden und eine Entwicklung neuer Vorgehensweisen zur Datenerfassung und -auswertung. Die nachfolgenden Unterabschnitte enthalten eine Zusammenfassung dieses Vorgehens, der erzielten Ergebnisse und der gewonnenen Erkenntnisse.

Eignung des ALS zur vorausblickenden Änderungsdetektion

Das flugzeuggetragene Laserscanning (ALS) wird als geeignete Sensorik zur Bewältigung der genannten Aufgaben eingestuft. Beispielsweise liefert das für die Experimente eingesetzte ALS-System bei Flughöhen von 300 m bis 500 m mit einem aktuell verfügbaren Laserscanner die nötige 3D-Punktdichte und Positionierungsgenauigkeit, um damit noch Volumenänderungen etwa einer Größe von 1 m^3 detektieren zu können. Bei größeren Flughöhen kommt besonders mit einem vorausblickenden Sensor die eingeschränkte Reichweite des ALS zum Tragen, die sich bei großen Messentfernungen durch vermehrt auftretende Datenlücken äußert (ab ca. 1 km Messentfernung im verwendeten System). Da in den oben genannten Anwendungen eher von Messentfernungen unter 500 m auszugehen ist, spielt diese Eigenschaft des ALS hier eine untergeordnete Rolle.

Die Verwendung von ALS zur Änderungserkennung ist für sich genommen keine Neuheit. Allerdings kommt die in anderen Arbeiten meist herangezogene Differenzbildung digitaler Oberflächenmodelle, welche zuvor aus den ALS-Daten abgeleitet werden, hier nicht in Frage, weil durch die Schrägsicht unterschiedliche Punktdichten vorliegen und Verdeckungen die Vergleichbarkeit der Daten einschränken. Die in dieser Arbeit entwickelte Vorgehensweise ist dagegen sehr gut an die Multi-Aspekt Datenerfassung angepasst, lässt sich aber ebenso für Nadiraufnahmen einsetzen.

Schritthaltende Datenauswertung

Im Vergleich zur topographischen Erfassung urbaner Gebiete, z.B. zur Erzeugung von Stadtmodellen, werden durch die oben genannten Aufgaben auch spezielle Anforderungen an die Datenauswertung gestellt. Der Hauptunterschied besteht in der Erfordernis einer fortlaufenden Echtzeitprozessierung des ALS-Datenstroms. In dieser Hinsicht ist der Beitrag der vorliegenden Arbeit

überwiegend konzeptioneller Natur: Es stand zwar ein Experimentalsystem zur Verfügung, dieses war aber aufgrund technischer Beschränkungen ausschließlich zur Datenaufzeichnung geeignet. Die erarbeiteten Methoden bilden nun aber eine solide Grundlage für eine zukünftige Echtzeitrealisierung in ALS- oder allgemein in MLS-Systemen. Die Realisierbarkeit des beschriebenen Vorgehens hängt sowohl von technischen als auch von methodischen Faktoren ab. Zu den technischen Anforderungen gehören:

- Der Laserscanner muss während der Datenerfassung den sofortigen Zugriff auf die Scandaten ermöglichen. Das verwendete Experimentalsystem sah diese Möglichkeit nicht vor, stattdessen wurde der zeitlich korrekte Zugriff auf die Daten des Laserscanners anhand des aufgezeichneten Datenstroms simuliert.

- Für eine möglichst exakte Positionierung der 3D-Laserpunkte während des Flugs ist eine Korrektur der GNSS-Informationen mit Hilfe von Referenzdaten einer fest installierten Bodenstation ratsam. Beim RTK-Verfahren (*Real Time Kinematic*) werden diese Korrekturdaten (Code und Trägerphase) in Echtzeit an den bewegten Empfänger übermittelt. In den Experimenten dieser Arbeit wurde der entsprechende Vorgang mit aufgezeichneten GPS-Rohdaten und GPS-Referenzdaten des SAPOS-Netzwerks nachgebildet (*Post Processed Kinematic*, PPK).

- Die Echtzeitverarbeitung von ALS-Daten erfordert neben einer effizienten Implementierung der Verfahren auch adäquate Hardware an Bord des Sensorträgers. Im Rahmen dieser Arbeit fanden alle Experimente stattdessen anhand der aufgezeichneten Daten auf normaler PC-Hardware unter MATLAB statt.

Aus methodischer Sicht besteht die Anforderung, dass die Datenauswertung während des Einsatzes an den zeitlichen Ablauf der Datenerfassung angepasst sein muss. Deshalb wurden spezielle Verfahren erarbeitet und an realen Daten getestet, die anstelle einer globalen Auswertung von 3D-Punktwolken den Datenstrom des Laserscanners unter Ausnutzung des Scanmusters analysieren (z.B. scanzeilenbasierte Segmentierung). Zur schritthaltenden Änderungserkennung wurde eine für ALS neue Methodik entwickelt, die jede einzelne Entfernungsmessung des Laserscanners auf Widersprüche zu gespeicherten ALS-Referenzdaten überprüft.

Objektbasierte Analyse

Ein wichtiger Aspekt der ALS-Datenauswertung ist die objektbasierte Analyse, aus der eine Klassifikation der Einzelmessungen bzw. Einzelpunkte und eine Erkennung von Zusammenhangskomponenten hervorgeht (Segmentierung). Insbesondere die Segmentierung planarer Flächenstücke ist zur Behandlung von 3D-Daten urbaner Gebiete geeignet, da ein vermehrtes Auftreten entsprechender Objekte erwartet werden kann (z.B. Dächer und Fassaden). In dieser Arbeit dienen die Ergebnisse der Ebenensegmentierung vor allem der robusten Zuordnung, Koregistrierung und Angleichung verschiedener (multitemporaler bzw. Multi-Aspekt) ALS-Daten. Die Unterscheidung von Boden, Vegetation und Oberflächen liefert außerdem wichtige Zusatzinformationen zur Interpretation detektierter Änderungen.

Insgesamt wurden vier (Teil-)Verfahren zur objektbasierten Analyse vorgestellt und getestet, wovon sich drei (in Kombination) auf die Erstellung des Referenzdatensatzes beziehen, das vierte hingegen auf die schritthaltende Ebenensegmentierung in der Vergleichsphase.

- Die automatische Ebenensegmentierung in den Referenzdaten wird unter anderem durch die variierenden Punkdichten in Multi-Aspekt ALS-Daten erschwert. Durch eine Kombination von lokaler Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit einem iterativen Wechsel von Flächenwachstum (Region Growing) und RANSAC-basierter Ebenenanpassung konnte dennoch eine

robuste Ebenensegmentierung vorgenommen werden. Das dazu entwickelte Flächenwachstumsverfahren richtet sich punktspezifisch nach den Ergebnissen der lokalen Hauptkomponentenanalyse, und die RANSAC-basierte Ebenenanpassung sorgt dafür, dass angrenzende Datenpunkte (verursacht z.B. durch Schornsteine, Dachgauben etc.) keinen Einfluss auf die ermittelten Ebenenparameter haben. In den Experimenten wurden nicht immer alle für den Betrachter sichtbaren Ebenenstücke identifiziert (sondern geschätzt nur etwa 80-90%). Da keine Stadtmodellerstellung o.ä. angestrebt wird, sondern eine effiziente räumliche Zuordnung mehrerer ALS-Datensätze, spielt die Vollständigkeit hier eine untergeordnete Rolle.

- Für die entsprechende Erkennung planarer Objekte während der Vergleichsphase (im Flug) wurde ein schritthaltendes Segmentierungsverfahren entwickelt. Hierbei handelt es sich um ein zweistufiges Verfahren, welches zunächst innerhalb der Scanzeilen des Laserscanners Geradenstücke identifiziert und diese dann über nachfolgende Scanzeilen hinweg sukzessive zu Ebenensegmenten gruppiert. Diese gerichtete Vorgehensweise liefert prinzipbedingt schlechtere Segmentierungsergebnisse, als bei der Analyse der zu einem späteren Zeitpunkt komplett vorliegenden Punktwolke zu erwarten wären. Es gelingt damit aber zuverlässig, eine schritthaltende Zuordnung der ALS-Daten der laufenden Datenerfassung zu den Daten des Referenzdatensatzes herzustellen.

Auf den Segmentierungsergebnissen beider Verfahren aufbauend wurde eine robuste Koregistrierungsmethode entwickelt, durch die eine schritthaltende Angleichung aktueller Daten an vorhandene Referenzdaten ermöglicht wird. Diese schritthaltende Koregistrierung kann in zukünftig zu realisierenden Systemen auch zur geländereferenzierten Korrektur GNSS-bedingter Positionsfehler eingesetzt werden. In Experimenten mit simulierten Positionsfehlern bis 100 m war es beispielsweise möglich, den Versatz anhand von Daten aus 4 Sekunden Flugzeit im Durchschnitt auf 0.7 m zu korrigieren. Das Verfahren ist momentan allerdings auf urbane Gebiete beschränkt, da ausschließlich Ebenenkorrespondenzen verwendet werden und die Ebenen möglichst variierende Ausrichtungen aufweisen müssen. Außerdem wird zur Initialisierung eine Anfangsnäherung der eigenen Position und Orientierung benötigt (typischerweise $\pm$ 50 m, $\pm$ 5°).

Erstellen eines Referenzdatensatzes aus Multi-Aspekt ALS-Daten

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz sieht vor, dass es sich sowohl bei den Referenzdaten als auch bei den zum Vergleich anstehenden Daten um Entfernungsmessungen (sowie Messrichtungen und Positionen) eines Laserscanners handelt, wobei nicht notwendigerweise derselbe Laserscanner gemeint sein muss. Die Randbedingungen beim Aufnehmen der Referenzdaten gleichen denen der topographischen Erfassung: Zur vollständigen Abdeckung des urbanen Gebiets wird dieses unter optimalen Bedingungen mehrfach entlang unterschiedlicher Flugrichtungen erfasst, wobei die gemessene Sensortrajektorie z.B. durch SAPOS-Daten korrigiert wird (RTK oder PPK). Die Auswertung der Referenzdaten wird nachträglich an den georeferenzierten Punktwolken vorgenommen. Im Hinblick auf das Gesamtkonzept wird hier möglichst viel Analyseaufwand in die Erstellung des Referenzdatensatzes verlegt, da dieser Schritt im Gegensatz zur Vergleichsphase nicht zeitkritisch ist. Durch die oben angesprochene objektbasierte Analyse können Einzelmessungen den Klassen *Boden*, *Vegetation* und *glatte Oberflächen* zugeordnet werden. Für die gefundenen Ebenensegmente werden Merkmale bestimmt, durch die eine Zuordnung dieser Segmente zwischen verschiedenen überlappenden Datensätzen ermöglicht wird.

Ein Hauptbeitrag der vorliegenden Arbeit ist die darauf aufbauende Methodik zur Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems: Durch die Detektion homologer Ebenensegmente in überlappenden Multi-Aspekt ALS-Punktwolken urbaner Gebiete wird es ermöglicht, die IMU/Laserscanner-Fehlstellung automatisch zu quantifizieren und anschließend bei der direkten Georeferenzierung der Punktwolken zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Experimente haben gezeigt, dass das

erarbeitete Kalibrierverfahren sowohl für die Gegebenheiten der Multi-Aspekt Datenerfassung als auch für Daten verschiedenster urbaner Gebiete geeignet ist. Besonders vorteilhaft ist dazu die multidirektionale Erfassung von solchen urbanen Geländeformen, die eine große Vielfalt von Flächenorientierungen und -positionen aufweisen. Durch die beschriebene Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems werden erfasste Punktwolken geometrisch korrigiert und es wird eine signifikante Verbesserung der Passgenauigkeit überlappender Datensätze erzielt.

Schritthaltender Vergleich multitemporaler ALS-Daten

Das zur schritthaltenden Änderungserkennung entwickelte Verfahren ist inspiriert von Raumbelegungsgittern, wie sie in der Robotik zur automatischen 2D-Kartenerstellung verwendet werden. Die in dieser Arbeit eingesetzten 3D-Gitter dienen in erster Linie als Suchstruktur, sodass die Genauigkeit der 3D-Informationen nicht durch eine Rasterung reduziert wird. Eine wesentliche Besonderheit des gewählten Ansatzes ist, dass nicht etwa die 3D-Punktwolken verglichen werden. Stattdessen werden sowohl von den Referenzdaten als auch von den zum Vergleich anstehenden aktuellen ALS-Daten die kompletten „Laserstrahlen“ betrachtet, d.h. die Ausbreitungswege der Laserpulse. Für jede aktuelle Lasermessung werden in den Referenzdaten die gespeicherten Strahlen früherer Messungen ausfindig gemacht, die zu einem Konflikt oder zu einer Bestätigung der jeweils gemessenen *Raumbelegung* führen. Die Untersuchung dieses Ansatzes führte zu folgenden Resultaten und Erkenntnissen:

- Durch die Bewertung von „Laserstrahlen“ anstelle von Laserpunkten werden die bei vorausblickender ALS-Datenerfassung auftretenden Verdeckungen implizit berücksichtigt. Fehlstellen in den Referenzdaten erzeugen bei einer erneuten Befliegung keine falschen Änderungsdetektionen, da lediglich ein Übergang der Raumbelegung von *unbestimmt* nach *belegt* oder *leer* festgestellt wird. In dieser Weise kann jede Neubefliegung des urbanen Gebiets auch zu einer Erweiterung des bestehenden Referenzdatensatzes genutzt werden.

- Die Überprüfung aktueller ALS-Messungen auf mögliche Konflikte zu den Referenzdaten kann für jede Laserentfernungsmessung in unabhängiger Weise vorgenommen werden. Dadurch lässt sich die Änderungsdetektion schritthaltend mit der Datenerfassung des Laserscanners durchführen.

- Die Vegetationsklasse muss im Modell gesondert behandelt werden (z.B. durch alternative Wahl der Parameter), da aufgeweitete Laserpulse Vegetation stellenweise durchdringen können, was in der beschriebenen Betrachtungsweise zu selbstverursachten Widersprüchen führt. Außerdem unterliegt Vegetation naturgemäß saisonalen Schwankungen. Die daraus resultierenden Änderungsdetektionen müssen entsprechend interpretiert werden.

- Volumenänderungen in der Szene werden mit den Verfahren dieser Arbeit trotz der besonderen Randbedingungen (Schrägsicht, Erfordernis einer schritthaltenden Prozessierung) zuverlässig detektiert. Für eine exakte Interpretation ist zwar noch die Erfahrung eines menschlichen Betrachters erforderlich (z.B. des Hubschrauberpiloten), durch die objektbasierte Analyse des Referenzdatensatzes werden die detektierten Änderungen aber bereits zusammengefasst und automatisch bestimmten Klassen zugeordnet.

7.2 Ausblick

Die Durchführung der beschriebenen Experimente und die Diskussion der Ergebnisse haben einige Erweiterungsmöglichkeiten in der erarbeiteten Vorgehensweise erkennen lassen, sodass sich Anknüpfungspunkte als Gegenstand für weiterführende Untersuchungen ergeben:

Adaptive Parameterwahl und erweiterte Analyse der ALS-Daten

Die Verfahren zur Analyse von ALS-Daten, die in den Experimenten dieser Arbeit zum Einsatz kamen, werden durch mehrere Parameter gesteuert. Tabelle 5.4 listet beispielsweise die Parameter auf, die die in Algorithmus 1 beschriebene Ebenensegmentierung beeinflussen. Die Festlegung dieser Werte erfolgte intuitiv für das vorliegende ALS-System und wurde für alle Befliegungen beibehalten. In Vorversuchen wurde die Erfahrung gemacht, dass leichte Parameteränderungen keinen merklichen Einfluss auf z.B. die Ergebnisse der Boresight-Kalibrierung haben.

Es wäre dennoch wünschenswert, die Verfahrensparameter nicht aufgrund von Erfahrungswerten festzulegen, sondern sie aufgrund von technischen Randbedingungen wie Punktdichte und -genauigkeit (beide sind z.B. abhängig von der mittleren Messentfernung) automatisch zu setzen. Die Werte für λ, c und κ sollten sich auch nach physikalischen Gegebenheiten (z.B. Pulsdauer und Footprint) sowie nach den Resultaten der Pulsformanalyse der Echosignale richten, um z.B. den Einfluss von Vegetation auf die Detektionsergebnisse zu steuern. Für eine automatische Parametrisierung der Verfahren müssen diese Zusammenhänge und Auswirkungen genauer untersucht werden. Es wird erwartet, dass eine schnelle Anpassung der Verfahren an bestimmte Sensoren, Konfigurationen und Rahmenbedingungen erfolgen kann.

In zukünftigen Arbeiten soll außerdem untersucht werden, inwiefern das eingesetzte Segmentierungsverfahren auf weitere Objektformen bzw. -klassen ausgeweitet werden kann. Dies würde einerseits eine spezifischere Bestimmung von Änderungsereignissen ermöglichen, und andererseits wäre die beschriebene Methode zur Boresight-Kalibrierung des ALS-Systems damit ggf. auch außerhalb urbaner Gebiete nutzbar.

Effiziente Suchstrukturen für 3D-Geraden

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur Änderungsdetektion vergleicht nicht etwa Laserpunktwolken miteinander, sondern Bündel von Laserstrahlen. Bei den Laserstrahlen handelt es sich um 3D-Geraden, die einen Laserpunkt beinhalten und zusätzlich ein „Davor“ sowie ein „Dahinter“ aufweisen. Auch bei dieser Art des Vergleichs von ALS-Daten ist die Suche nach benachbarten Messungen von zentraler Bedeutung. Das heißt, dass zu einer gegebenen 3D-Geraden (der aktuellen Befliegung) alle in der Nähe befindlichen 3D-Geraden (des Referenzdatensatzes) ausfindig gemacht werden müssen. Im Gegensatz zur Datenorganisation in 3D-Punktwolken können Mengen von 3D-Geraden nicht ohne Weiteres durch k-d Suchbäume strukturiert werden. Der minimale euklidische Abstand zweier windschiefer 3D-Geraden lässt sich zwar leicht berechnen, jedoch handelt es sich bei der damit definierten „Nähe“ von 3D-Geraden nicht um eine transitive Relation, weswegen keine Vorsortierung der Daten vorgenommen werden kann.

In dieser Arbeit wurde die Suche nach benachbarten 3D-Geraden durch 3D-Indexfelder realisiert. Dies hat den Nachteil, dass hierdurch ein nicht unerheblicher Speicherbedarf entsteht. Bei den hier betrachteten urbanen Gebieten war dieser zwar noch gut auf normaler PC-Hardware zu bewältigen, es ist aber einzuschätzen, dass der Speicherbedarf bei der Untersuchung größerer Gebiete oder bei einer höheren Datenrate des Laserscanners problematisch werden könnte. Daher soll in zukünftigen Arbeiten untersucht werden, ob sich für die Datenorganisation windschiefer 3D-Geraden bessere Suchstrukturen finden oder entwickeln lassen. „Besser“ würde dabei bedeuten, dass der Speicherbedarf für die Suchstruktur verringert wird und dass Suchoperationen beschleunigt werden. Diese Fragestellung betrifft nicht allein die Behandlung von Lasermessungen, sondern ist z.B. auch auf dem Gebiet der Computergrafik relevant.

Konfliktbehandlung in probabilistischen 3D-Belegungsgittern

In Abschnitt 4.5 wurde die Informationsfusion und die Behandlung von Informationskonflikten bei multitemporalen ALS-Daten im Rahmen der Dempster-Shafer Evidenztheorie betrachtet. Dieser

Rahmen hat den Vorteil, dass darin *Unbestimmtheit* explizit beschrieben wird, wodurch sich probabilistische Unsicherheit von fehlendem Wissen unterscheiden lässt. Dies erweist sich gerade im Modell der 3D-Raumbelegung aufgrund der Verdeckungen als sinnvoll. Die Kombinationsregel von Dempster wird jedoch mitunter kontrovers diskutiert, da sie im Fall von widersprüchlichen Eingangsinformationen alle inkonsistenten Informationsanteile verwirft und zu intuitiv unerwarteten Fusionsergebnissen führen kann. Bei der Änderungsdetektion in Multi-Aspekt ALS-Daten kann dies z.B. für Änderungen auftreten, die sich bereits während der Erfassung der Referenzdaten ereignen.

In Weiterführung der in dieser Arbeit zur Änderungsdetektion vorgeschlagenen Vorgehensweise sollten die Vor- und Nachteile untersucht werden, die sich im Vergleich zur Dempster-Shafer Evidenztheorie aus einem klassischen wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz (Bayes) oder zum Beispiel aus einer unscharfen Beschreibung (Fuzzy-Theorie) ergeben würden. Auch innerhalb der Dempster-Shafer Theorie existieren Alternativen zur hier betrachteten Kombinationsregel von Dempster (z.B. Kombinationsregeln von Yager, Smets oder Dubois-Prade). Ein Ergebnis dieser Untersuchung könnte sein, dass bei gleichbleibender Detektionsleistung eine Verbesserung der Informationsfusion im Fall von Informationskonflikten erreicht wird.

Simulation der ALS-Datenerfassung und Änderungsdetektion

Bei der Verfahrensentwicklung zur ALS-Datenauswertung in dieser Arbeit bestand eine Schwierigkeit in der praktischen Durchführung von Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Sensoreinstellungen, in der Überprüfung der entworfenen Konzepte für verschiedene Sensoren und in der Bewertung der Verfahren anhand von Ground-Truth Informationen. Hierzu soll in zukünftigen Arbeiten auch eine virtuelle Testumgebung entwickelt werden, in der Messungen eines Laserscanners (ähnlich wie beim Raytracing in der Computergrafik) anhand einer 3D-Szenenbeschreibung simuliert werden können. Mit einer solchen Simulationsumgebung soll untersucht werden, ob damit technische Eigenschaften existierender oder geplanter Sensorsysteme sowie verschiedene GNSS- und Umweltbedingungen nachgestellt werden können, um damit optimale Parameter für den Einsatz in der Realität festzulegen.

Laserbasierte Navigation ohne INS/GNSS-Unterstützung

In der vorliegenden Arbeit wurde mehrfach die Verwendung von ALS zur geländebasierten Navigation angesprochen, wobei dies stets im Zusammenspiel mit einem INS/GNSS-Navigationssystem gesehen wurde. Die Idee dabei ist, durch die Zuordnung der ALS-Daten (eines Zeitfensters von wenigen Sekunden) zu gegebenen 3D-Referenzdaten die Eigenposition des Sensors möglichst genau zu bestimmen. Hierdurch können GNSS-bedingte Fehler kontinuierlich korrigiert werden, wobei jedoch eine Initialisierung der Eigenposition und -ausrichtung durch das INS/GNSS-Subsystem erforderlich ist.

Eine zukünftige Untersuchung soll klären, ob innerhalb der gemessenen 3D-Daten (z.B. innerhalb nur einer einzelnen Scanzeile) charakteristische Merkmale bestimmt werden können, die sich schnell und global (d.h. ohne Vorinformation) einem 3D-Modell des Geländes zuordnen lassen. Zum Beispiel erzeugt eine einzelne Scanzeile eines Zeilenscanners eine Schnittebene, die in der Regel ein unverwechselbares 2D-Profil des urbanen Geländes liefert (siehe Abbildung 4.3). Die Schwierigkeit besteht im Wiederfinden dieses Profils im 3D-Modell, wenn Position und Orientierung des Sensors unbekannt sind. Es wird erwartet, dass zumindest mögliche Positionskandidaten ausfindig gemacht werden können, die sich im Verlauf der Datenerfassung nur an einer Stelle im Raum zu einer stetigen Trajektorie ergänzen. Eine effiziente Lösung dieser Problematik hätte neben der Hubschraubernavigation über urbanen Gebieten zahlreiche weitere Anwendungen in der Robotik.

Multisensorielle Umgebungserfassung und Echtzeitanalyse

Die Diskussion der grundsätzlichen Eignung von ALS-Sensorik zur schritthaltenden Änderungserkennung hat ergeben, dass den zahlreichen positiven Eigenschaften durchaus einige Vorbehalte gegenüberstehen. Beispielsweise ist die Untersuchung spektraler Objekteigenschaften durch alleiniges Abtasten mit einem Laserscanner schlicht nicht möglich. Es ist daher naheliegend, ALS oder allgemein MLS in Verbindung mit weiteren bildgebenden Sensoren zu betrachten. Durch die Fusion mit Bilddaten können mögliche Nachteile der rein laserbasierten Umgebungserfassung ausgeglichen werden. In den beabsichtigten Einsatzgebieten (z.B. in der Piloten-/Fahrerassistenz) spielt außerdem die Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle eine wichtige Rolle. Weitere Untersuchungen werden sich daher sowohl mit einer geeigneten Ergebnisdarstellung als auch mit der tatsächlichen Echtzeitimplementierung der Verfahren in einem Multisensorsystem befassen.

Literaturverzeichnis

Al-Bayari O, Saleh B, Barbarella M (2005) Quality Assessment Of Kinematic Airborne Laser Survey. *Surveying and Built Environment*, 16 (2): 43–52.

Applanix (2009) POS AV Specifications. `http://www.applanix.com`. Zuletzt abgerufen im September 2011.

Arun KS, Huang TS, Blostein SD (1987) Least-Squares Fitting of Two 3-D Point Sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9 (5): 698–700.

Arya S, Mount DM (2000) Approximate Range Searching. *Computational Geometry: Theory and Applications*, 17 (3/4): 135–152.

Axelsson P (1999) Processing of laser scanner data - algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2-3): 138–147.

Bae K, Lichti D (2008) A method for automated registration of unorganised point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63 (1): 36–54.

Balz T, Haala N, Sörgel U (2004) Combining LiDAR, INSAR, SAR and SAR-Simulation for Change Detection Applications in Cloud-prone Urban Areas. In: *Proceedings of the* 1^{st} *Symposium on Cloud-prone and Rainy Areas Remote Sensing, CARRS*: 68–79.

Barnea S, Filin S (2007) Registration of Terrestrial Laser Scans via Image Based Features. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*: 32–37.

Bentley JL (1975) Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*, 18 (9): 509–517.

Bergevin R, Soucy M, Gagnon H, Laurendeau D (1996) Towards a General Multi-View Registration Technique. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18 (5): 540–547.

Besl PJ, McKay ND (1992) A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (2): 239–256.

Bresenham J (1965) Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal*, 4 (1): 25–30.

Brunner D, Lemoine G, Bruzzone L (2010) Earthquake Damage Assessment of Buildings Using VHR Optical and SAR Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (5): 2403–2420.

Burman H (2000) *Calibration and orientation of airborne image and laser scanner data using GPS and INS*. Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Campbell RJ, Flynn PJ (2001) A Survey Of Free-Form Object Representation and Recognition Techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, 81 (2): 166–210.

Chen Y, Medioni G (1992) Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, 10 (3): 145–155.

Chetverikov D, Stepanov D, Krsek P (2005) Robust euclidean alignment of 3D point sets: the trimmed iterative closest point algorithm. *Image and Vision Computing*, 23 (3): 299–309.

Crosilla F, Visintini D, Sepic F (2005) A segmentation procedure of LiDAR data by applying mixed parametric and nonparametric models. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W19): 132–137.

Delaunay BN (1934) Sur la sphère vide. *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, 7: 793–800.

Dempster A (1967) Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping. *Annals of Mathematical Statistics*, 38 (2): 325–339.

Dold C, Brenner C (2006) Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5 (36): 78–83.

Filin S (2003) Recovery of Systematic Biases in Laser Altimetry Data Using Natural Surfaces. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69 (11): 1235–1242.

Filin S, Pfeifer N (2006) Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60 (2): 71–80.

Fischler MA, Bolles RC (1981) Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, 24 (6): 381–395.

Friess P (2006) Toward a rigorous methodology for airborne laser mapping. In: *International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW*: 1–7.

Geibel R, Stilla U (2000) Segmentation of Laser-altimeter data for building reconstruction: Comparison of different procedures. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33 (B3): 326–334.

Glennie C (2007) Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. *Journal of Applied Geodesy*, 1 (3): 147–157.

Godin G, Laurendeau D, Bergevin R (2001) A Method for the Registration of Attributed Range Images. In: *Proceedings of the IEEE* 3^{rd} *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*: 179–186.

Gonzálvez PR, Aguilera DG, Lahoz JG (2007) From Point Cloud to Surface: Modeling Structures in Laser Scanner Point Clouds. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*: 338–343.

Grabe B, Ike T, Hoetter M (2009) Evaluation Method of Grid Based Representation from Sensor Data. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*: 1245–1250.

Groß H, Thönnessen U (2006) Extraction of Lines from Laser Point Clouds. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3): 86–91.

Gruber M (2007) UltraCamX, the new Digital Aerial Camera System by Microsoft Photogrammetry. In: Fritsch D (ed) *Proceedings of the Photogrammetric Week 2007*: 137–145.

Gruber M, Leberl F, Perko R (2003) Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie durch digitale Luftbildaufnahme? *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 4: 285–297.

Gruen A, Akca D (2005) Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59 (3): 151–174.

Habib A, Kersting AP, Bang KI, Lee DC (2010) Alternative methodologies for the internal quality control of parallel LiDAR strips. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (1): 221–236.

Habib A, Rens JV (2008) Quality Assurance and Quality Control of LiDAR Systems and Derived Data. In: *Review document of the annual meeting of the ASPRS Airborne Lidar Committee*: 1–15.

Habib AF, Bang KI, Shin SW, Mitishita E (2007) Tight Integration of Photogrammetric and LIDAR Data for the Estimation of LIDAR Bore-Sighting Parameters. In: *CIG/ISPRS Conference on Geomatics for Disaster and Risk Management*: 1–12.

Habib AF, Kersting AP, Bang KI, Zhai R, Al-Durgham M (2009) A strip adjustment procedure to mitigate the impact of inaccurate mounting parameters in parallel lidar strips. *The Photogrammetric Record*, 24 (126): 171–195.

Han SH, Lee JH, Yu KY (2007) An Approach for Segmentation of Airborne Laser Point Clouds Utilizing Scan-Line Characteristics. *ETRI Journal*, 29 (5): 641–648.

Hatger C, Brenner C (2003) Extraction of road geometry parameters from laser scanning and existing databases. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (3/W13): 225–230.

Hebel M, Arens M, Stilla U (2011) Change Detection in Urban Areas by Direct Comparison of Multi-view and Multi-temporal ALS Data. In: *PIA 2011, Springer, Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 6952: 185–196.

Hebel M, Stilla U (2007) Automatic Registration of Laser Point Clouds of Urban Areas. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W49A): 13–18.

Hebel M, Stilla U (2008) Pre-classification of Points and Segmentation of Urban Objects by Scan Line Analysis of Airborne LiDAR data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B3a): 105–110.

Hebel M, Stilla U (2009a) Automatische Koregistrierung von ALS-Daten aus mehreren Schrägansichten städtischer Quartiere. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation PFG*, 2009 (3): 261–275.

Hebel M, Stilla U (2009b) Objektbasierte Koregistrierung von Laserscannerdaten bei der luftgestützten Erfassung urbaner Gebiete. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009*: 82–89.

Hebel M, Stilla U (2010a) ALS-Aided Navigation of Helicopters or UAVs over Urban Terrain. In: *Proceedings of the International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2010*: 1–6.

Hebel M, Stilla U (2010b) LiDAR-supported Navigation of UAVs Over Urban Areas. *Surveying and Land Information Science, Journal of the American Congress on Surveying and Mapping*, 70 (3): 139–149.

Hebel M, Stilla U (2012) Simultaneous Calibration of ALS Systems and Alignment of Multiview LiDAR Scans of Urban Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50 (6): 2364–2379.

Henning J, Radtke P (2008) Multiview range-image registration for forested scenes using explicitly-matched tie points estimated from natural surfaces. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63 (1): 68–83.

Himmelsbach M, Müller A, Lüttel T, Wünsche HJ (2008) LIDAR-based 3D Object Perception. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Cognition for Technical Systems*: 1–7.

Hinz S (2004) Automatic Object Extraction for Change Detection and GIS Update. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Geoinformation Sciences*, 37 (B4): 277–284.

Hommel M (2009) Verification of a Building Damage Analysis and Extension to Surroundings of Reference Buildings. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (3/W8): 18–23.

Hoover A, Jean-Baptiste G, Jiang X, Flynn PJ, Bunke H, Goldgof DB, Bowyer K, Eggert DW, Fitzgibbon A, Fisher RB (1996) An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18 (7): 673–689.

Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, McDonald J, Stuetzle W (1992) Surface reconstruction from unorganized points. In: *Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques SIGGRAPH*: 71–78.

Horn BKP (1987) Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America*, 4 (4): 629–642.

Jähne B (2002) *Digitale Bildverarbeitung*. Springer Verlag. 5. Auflage, ISBN 3-540-41260-3.

Jiang X, Bunke H (1994) Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping. *Machine Vision and Applications*, 7 (2): 115–122.

Jiang X, Bunke H (1999) Edge Detection in Range Images Based on Scan Line Approximation. *Computer Vision and Image Understanding*, 73 (2): 183–199.

Jutzi B (2007) *Analyse der zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpulsen*. Dissertation, Technische Universität München, München.

Jutzi B, Groß H (2009) Normalization of LiDAR Intensity Data Based on Range and Surface Incidence Angle. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 38 (Part 3/W8): 213–218.

Jutzi B, Stilla U (2006) Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61 (2): 95–107.

Kager H (2004) Discrepancies between Overlapping Laser Scanner Strips - Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial information Sciences*, 35 (B/1): 555–560.

Kalman RE (1960) A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal Of Basic Engineering*, 82 (D): 35–45.

Kang Z, Li J, Zhang L, Zhao Q, Zlatanova S (2009) Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanning Point Clouds using Panoramic Reflectance Images. *Sensors*, 9 (4): 2621–2646.

Katsoulas D, Werber A (2004) Edge Detection in Range Images of Piled Box-like Objects. In: *International Conference on Pattern Recognition ICPR*, 2: 80–84.

Katzenbeisser R (2003) About the calibration of LiDAR sensors. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial information Sciences*, 34 (3/W13): 59–64.

Kneubühl FK, Sigrist MW (2008) *Laser*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Krsek P, Pajdla T, Hlavác V (2002) Differential Invariants as the Base of Triangulated Surface Registration. *Computer Vision and Image Understanding*, 87 (1-3): 27–38.

Leberl F, Gruber M, Ponticelli M, Bernoegger S, Perko R (2003) The UltraCam large format aerial digital camera system. In: *Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*: 1–6.

Leica Geosystems (2005) Leica ALS50 Technical Notes. Heerbrugg, Schweiz.

Lin Y, Hyyppä J (2011) k-Segments-Based Geometric Modeling of VLS Scan Lines. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8 (1): 93–97.

Lüthy HJ (2007) *Entwicklung eines Qualitätsmodells für die Generierung von Digitalen Geländemodellen aus Airborne Laser Scanning*. Dissertation, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

Maas HG (2000) Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 33 (3a): 548–555.

Maas HG (2002) Methods for Measuring Height and Planimetry Discrepancies in Airborne Laserscanner Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68 (9): 933–940.

Markoff J (2010) Google Cars Drive Themselves, in Traffic. *The New York Times*, 10.10.2010: A1.

Matikainen L, Hyyppä J, Ahokas E, Markelin L, Kaartinen H (2010) Automatic Detection of Buildings and Changes in Buildings for Updating of Maps. *Remote Sensing*, 2 (5): 1217–1248.

May N, Toth C (2007) Point Positioning Accuracy of Airborne LIDAR Systems: A Rigorous Analysis. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W49B): 107–111.

Michaelsen E, von Hansen W, Kirchhof M, Meidow J, Stilla U (2006) Estimating the essential matrix: GOODSAC versus RANSAC. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (Part 3): 161–166.

Moras J, Cherfaoui V, Bonnifait P (2011) Moving Objects Detection by Conflict Analysis in Evidential Grids. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV'11*: 1122–1127.

Moravec H, Elfes A (1985) High Resolution Maps from Wide Angle Sonar. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*: 116–121.

Murakami H, Nakagawa K, Hasegawa H, Shibata T, Iwanami E (1999) Change Detection of Buildings Using an Airborne Laser Scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2-3): 148–152.

Nüchter A, Elseberg J, Schneider P, Paulus D (2010) Study of parameterizations for the rigid body transformations of the scan registration problem. *Computer Vision and Image Understanding*, 114: 963–980.

Pellenz J, Paulus D (2008) Mapping and map scoring at the RoboCupRescue competition. In: *Quantitative Performance Evaluation of Navigation Solutions for Mobile Robots*: 1–12.

Petovello M (2003) *Real-Time Integration of a Tactical-Grade IMU and GPS for High-Accuracy Positioning and Navigation*. Dissertation, University of Calgary.

Pottmann H, Leopoldseder S, Hofer M (2004) Registration without ICP. *Computer Vision and Image Understanding*, 95: 54–71.

Prokhorov DV (2009) Object recognition in 3D lidar data with recurrent neural network. In: *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*: 9–15.

Pu S, Vosselman G (2006) Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (5): 25–27.

Puente E, Moreno L, Salichs M, Gachet D (1991) Analysis of Data Fusion Methods in Certainty Grids - Application to Collision Danger Monitoring. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*: 1133–1137.

Rabbani T, Dijkman S, van den Heuvel F, Vosselman G (2007) An integrated approach for modelling and global registration of point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61 (6): 355–370.

Reitberger J (2010) *3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner*. Dissertation, Technische Universität München, München.

Ressl C, Kager H, Mandlburger G (2008) Quality checking of ALS Projects Using Statistics of Strip Differences. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial information Sciences*, 37 (B3b): 253–260.

Ressl C, Mandlburger G, Pfeifer N (2009) Investigating adjustment of Airborne Laser Scanning strips without usage of GNSS/IMU trajectory data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial information Sciences*, 38 (3/W8): 195–200.

Rieger P (2008) The Vienna laser scanning survey. *GEOconnexion International Magazine*, 2008 (Mai): 40–41.

Rieger P, Studnicka N, Pfennigbauer M (2009) Methode zur Kalibrierung eines „Mobile Laser Scanning"-Systems. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009*: 90–100.

RIEGL (2010) RIEGL LMS-Q560 Specifications. `http://www.riegl.com`. Zuletzt abgerufen im September 2011.

Robertson C, Fisher RB (2002) Parallel Evolutionary Registration of Range Data. *Computer Vision and Image Understanding*, 87 (1-3): 39–50.

Roggero M (2002) Object Segmentation with Region Growing and Principal Component Analysis. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (3A): 289–294.

Roth G (1999) Registration two Overlapping Range Images. In: *Proceedings of the IEEE* 2^{nd} *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*: 191–200.

Rottensteiner F (2003) Automatic Generation of High-Quality Building Models from Lidar Data. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23 (6): 42–50.

Rottensteiner F, Trinder J, Clode S, Kubik K, Lovell BC (2004) Building Detection by Dempster-Shafer Fusion of LIDAR Data and Multispectral Aerial Imagery. In: 17^{th} *International Conference on Pattern Recognition, ICPR*, 2: 339–342.

Rusinkiewicz S, Levoy M (2001) Efficient Variants of the ICP Algorithm. In: *Proceedings of the IEEE* 3^{rd} *International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*: 145–152.

Rutzinger M, Rüf B, Höfle B, Vetter M (2010) Change Detection of Building Footprints from Airborne Laser Scanning Acquired in Short Time Intervals. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38 (7b): 475–480.

Sampath A, Shan J (2010) Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs From Aerial Lidar Point Clouds. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (3-2): 1554–1567.

Scaioni M, Forlani G (2003) Independent Model Triangulation of Terrestrial Laser Scanner Data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (5/W12): 308–313.

Schatz V (2008) Synchronised Data Acquisition for Sensor Data Fusion in Aerial Surveying. In: *Proceedings of the* 11^{th} *International Conference on Information Fusion*: 1125–1130.

Schenk T (2001) *Modeling and analyzing systematic errors in airborne laser scanners.* The Ohio State University, Technical report.

Scherer-Negenborn N, Schäfer R (2010) Model Fitting with Sufficient Random Sample Coverage. *International Journal of Computer Vision*, 89 (1): 120–128.

Schiele OJ (2005) *Ein operationelles Kalibrierverfahren für das flugzeuggetragene Laserscannersystem ScaLARS.* Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie.

Schnabel R, Wahl R, Klein R (2007) Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. *Computer Graphics Forum*, 26 (2): 214–226.

Schär P (2009) *In-flight quality assessment and data processing for airborne laser scanning.* Dissertation, École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL.

Schär P, Skaloud J, Landtwing S, Legat K (2007) Accuracy estimation for laser point cloud including scanning geometry. In: *Proceedings of the Mobile Mapping Symposium 2007, Padova*: 1–7.

Schulz KR, Scherbarth S, Fabry U (2002) HELLAS: Obstacle warning system for helicopters. In: *Laser Radar Technology and Applications VII, Proceedings of the International Society for Optical Engineering 4723*: 1–8.

Schuster HF (2004) Segmentation Of LIDAR Data Using The Tensor Voting Framework. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35 (B3): 1073–1078.

Shafer G (1976) *A Mathematical Theory of Evidence.* Princeton University, Technical report.

Shan J, Toth C, eds (2009) *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing.* CRC Press/Taylor & Francis Group.

Sharp GC, Lee SW, Wehe DK (2002) ICP Registration Using Invariant Features. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24 (1): 90–102.

Sithole G, Vosselman G (2003) Automatic Structure Detection in a Point-Cloud of an Urban Landscape. In: *Proceedings of the second Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas URBAN 2003*: 67–71.

Sithole G, Vosselman G (2004) Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59 (1-2): 85–101.

Sithole G, Vosselman G (2005) Filtering of Airborne Laser Scanner Data Based on Segmented Point Clouds. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W19): 66–71.

Skaloud J, Lichti D (2006) Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61 (1): 47–59.

Skaloud J, Schär P (2007) Towards Automated LiDAR Boresight Self-calibration. In: 5^{th} *International Symposium on Mobile Mapping Technology*: 1–6.

Skaloud J, Schär P, Stebler Y, Tomé P (2010) Real-time registration of airborne laser data with sub-decimeter accuracy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65 (2): 208–217.

Sobottka K, Jiang X, Bunke H (1997) Spatiotemporal segmentation of range image sequences into planar surfaces for collision avoidance. In: 30^{th} *International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA)*: 69–76.

Sörgel U (2003) *Iterative Verfahren zur Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden in SAR- und InSAR-Daten.* Dissertation, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Hannover.

Stamos I, Leordeanu M (2003) Automated Feature-Based Range Registration of Urban Scenes of Large Scale. In: *2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR*: 555–561.

Stilla U, Jutzi B (2009) Chapter 7: Waveform Analysis for Small-Footprint Pulsed Laser Systems. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, Shan J, Toth C, eds. CRC Press/Taylor & Francis Group: 215–234.

Stilla U, Michaelsen E, Jurkiewicz K (1998) Structural analysis of right-angled building contours. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (3/1): 379–386.

Stilla U, Sörgel U, Thönnessen U (2003) Potential and limits of InSAR data for building reconstruction in built-up areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58 (2003): 113–123.

Tarsha-Kurdi F, Landes T, Grussenmeyer P (2007) Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3D building roof planes from lidar data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36 (3/W52): 407–412.

Thiele A, Cadario E, Schulz K, Thönnessen U, Sörgel U (2007) Building Recognition from Multi-Aspect High-Resolution InSAR Data in Urban Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45 (11): 3583–3593.

Thrun S (1998) Learning Metric-Topological Maps for Indoor Mobile Robot Navigation. *Artificial Intelligence*, 99 (1): 21–71.

Torre-Ferrero C, Llata J, Robla S, Sarabia E (2009) A similarity measure for 3D rigid registration of point clouds using image-based descriptors with low overlap. In: *Search in 3D and Video (S3DV) Workshop at the* 12^{th} *IEEE International Conference on Computer Vision ICCV*: 71–78.

Toth C, Csanyi N, Grejner-Brzezinska D (2002) Automating The Calibration Of Airborne Multisensor Imaging Systems. In: *Proceedings of the ACSM-ASPRS Annual Conference*: 1–14.

Toth CK, Grejner-Brzezinska D, Moafipoor S (2004) Precise Vehicle Topology and Road Surface Modeling Derived from Airborne LiDAR Data. In: *Proceedings of the ION* 60^{th} *Annual Meeting*: 1–8.

Toth CK, Grejner-Brzezinska DA, Lee YJ (2008) Recovery of sensor platform trajectory from LiDAR data using reference surfaces. In: *Proceedings of the* 13^{th} *FIG Symposium and the* 4^{th} *IAG Symposium*: 1–10.

Tse ROC, Gold CM, Kidner DB (2007) Building reconstruction using LIDAR data. In: *Proceedings of the ISPRS Workshop on Updating Geo-spatial Databases with Imagery and the* 5^{th} *ISPRS Workshop on DMGISs*: 1–6.

Vögtle T, Steinle E (2004) Detection and Recognition of Changes in Building Geometry Derived from Multitemporal Laserscanning Data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35 (B2): 428–433.

von Hansen W (2006) Robust automatic marker-free registration of terrestrial scan data. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3): 105–110.

Vosselman G (1999) Building Reconstruction Using Planar Faces In Very High Density Height Data. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (3/W5): 87–92.

Vosselman G (2008) Analysis of Planimetric Accuracy of Airborne Laser Scanning Surveys. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial information Sciences*, 37 (B3a): 99–104.

Vosselman G, Dijkman S (2001) 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34 (3/W4): 37–43.

Vosselman G, Gorte B, Sithole G (2004a) Change detection for updating medium scale maps using laser altimetry. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (B3): 207–212.

Vosselman G, Gorte BGH, Sithole G, Rabbani T (2004b) Recognising structure in laser scanner point clouds. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial information Sciences*, 46 (8): 33–38.

Vosselman G, Maas HG (2001) Adjustment and Filtering of Raw Laser Altimetry Data. In: *OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*: 62–72.

Vosselman G, Maas HG, eds (2010) *Airborne and Terrestrial Laser Scanning.* CRC Press/Taylor & Francis Group.

Wagner W, Ullrich A, Ducic V, Melzer T, Studnicka N (2006) Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60 (2): 100–112.

Welch G, Bishop G (1995) *An Introduction to the Kalman Filter.* Chapel Hill, NC, USA: University of North Carolina at Chapel Hill, Technical report.

Williams JA, Bennamoun M, Latham S (1999) Multiple View 3D Registration: A Review and a New Technique. In: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 3: 497–502.

Yapo TC, Steward CV, Radke RJ (2008) A Probabilistic Representation of LiDAR Range Data for Efficient 3D Object Detection. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Workshop CVPRW'08*: 1–8.

Young S (2011) LIDAR in the Driver's Seat. *Optics and Photonics Focus*, 12 (7): 1–2.

Zhai R, Zhang J, Zheng S (2006) Seamless Registration of Multiple Range Images with Whole Block Adjustment. In: *Proceeding of the First IEEE International Multi-Symposium of Computer and Computational Sciences*: 753–758.

Zhang X (2005) *Precise Point Positioning Evaluation and Airborne Lidar Calibration.* Danish National Space Center, Technical Report No. 4.

Zhang Z (1994) Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 13 (2): 119–152.

Zou Y, Ho YK, Chua CS, Zhou XW (2000) Multi-ultrasonic Sensor Fusion for Mobile Robots. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*: 387–391.

Lebenslauf

Name	Marcus Hebel
Geburtstag und -ort	08.04.1974 in Baumholder
Wohnort	Hasenbergweg 30 76275 Ettlingen

Ausbildung/Tätigkeit

1980 – 1984	Grundschule in Ruschberg
1984 – 1993	Gymnasium in Birkenfeld (Nahe) Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
1993 – 1994	Grundwehrdienst an der Artillerieschule in Idar-Oberstein
1994 – 2002	Studium der *Technomathematik* an der Technischen Universität Kaiserslautern mit Nebenfach *Technische Physik* Abschluss: Diplom (Dipl.-Math. techn.)
2000	Praxissemester bei der BASF AG, Ludwigshafen
2002 – 2009	Wissenschaftlicher Angestellter am Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung FGAN-FOM in Ettlingen
seit 2009	Wissenschaftlicher Angestellter am Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB in Ettlingen

Danksagung

Mein ausdrücklicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla für die engagierte Unterstützung und für die wissenschaftliche Förderung dieser Arbeit. Bei den Herren Prof. Dr. rer. nat. Rüdiger Westermann und Prof. Dr. rer. nat. Maurus Tacke bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats. Den Vorsitz bei der Prüfung übernahm freundlicherweise Herr Prof. Dr.-Ing. Thomas Wunderlich, wofür ich mich ebenfalls bedanken möchte.

Die vorliegende Arbeit entstand begleitend zu meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung (FGAN-FOM) in Ettlingen, welches währenddessen in das Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) übergegangen ist. Für die zur Anfertigung dieser Arbeit gewährten Freiräume bedanke ich mich nochmals bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Maurus Tacke in seiner Funktion als Institutsleiter. Mein besonderer Dank hierfür gilt außerdem den Herren Dipl.-Ing. Karlheinz Bers, Dr.-Ing. Karl Lütjen und Dr. rer. nat. Michael Arens.

Allen Freunden und Kollegen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich herzlich für ihre Hilfsbereitschaft danken. Von großer Bedeutung war für mich der tatkräftige Einsatz der Herren Dr. rer. nat. Volker Schatz und Dr. rer. nat. Marcus Hammer bei der Durchführung der Flugmesskampagnen. Für die wertvollen fachlichen Diskussionen und Anregungen danke ich insbesondere den Herren Dipl.-Phys. Peter Lutzmann, Dipl.-Phys. Klaus Jäger, Dr. rer. nat. Michael Arens, Dr. rer. nat. Walter Armbruster, Dr.-Ing. Christoph Bodensteiner, Dr.-Ing. Boris Jutzi, Dr.-Ing. Jochen Meidow und Dr.-Ing. Eckart Michaelsen.

„Last but not least“ gilt ein großer Dank meiner Freundin Claudia für die Unterstützung und Rücksichtnahme während dieser Zeit.