

Single Photon LiDAR – Grundlagen und erste Evaluierungsergebnisse

GOTTFRIED MANDLBURGER^{1,2} & HUBERT LEHNER³

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden die Grundlagen von Single Photon LiDAR (SPL) erläutert und die technologischen Unterschiede zu konventionellem Laserscanning aufgezeigt. Anhand der 3D Punktwolken zweier Messkampagnen, die im Juli bzw. September 2018 in Wien unabhängig mit beiden Sensorsystemen erfasst wurden, werden erste Evaluierungsergebnisse präsentiert. Es zeigt sich, dass die Höhengenaugigkeit bei SPL etwa um einen Faktor 2 geringer ist als bei konventionellem Laserscanning. Die planimetrische Genauigkeit, welche wesentlich von der Größe des Laserabtastflecks abhängt, ist beim SPL wegen der geringen Strahldivergenz (0.08 mrad) selbst bei höherer Flughöhe (4.000 m) nur unwesentlich größer als bei typischen Erfassungen mit konventionellen ALS Systemen. Die große Messdistanz erfordert allerdings eine hoch-genaue IMU. Eine Überlegenheit von SPL gegenüber konventionellen Systemen besteht bei der Flächenleistung in Folge der simultanen Messung von 100 Teilstrahlen, der daraus resultierenden hohen Messrate (6 MHz) und der großen Flugstreifenbreite (>2.000m).

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren sind im Bereich des Flugzeuglaserscannings neben etablierten Systemen auch Geräte auf den Markt gekommen, die eine Entfernungsmessung beim Eintreffen eines oder weniger Photonen erlauben (single photon sensitivity). Hierbei haben mittlerweile zwei Systeme auch in der kommerziellen Nutzung Bedeutung erlangt: Beim sogenannten Geiger-mode LiDAR (GmLiDAR, LiDAR=Light Detection and Ranging) wird mit der Reflexion eines stärker divergenten Laserpulses eine Matrix von Einzelphoton-sensitiven Elementen (Geiger-mode Avalanche Photo Diode Array, GmAPD) beleuchtet (KIM et al. 2013; STOKER et al. 2016). Bei der als Single Photon LiDAR (SPL) bezeichneten Technologie wird ein hoch kollimierter Laserimpuls durch ein diffraktives optisches Element in 10x10 Teilstrahlen, sogenannte beamlets, aufgespaltet (DEGNAN 2016). Da für jedes beamlet ein Einzelphoton-sensitives Detektor-Array zum Einsatz kommt, das sich in gewissen Aussteuerbereichen ähnlich einer APD im Linearbetrieb verhält, ist die SPL Technologie mehrzielfähig, was vor allem für die Durchdringung von Vegetation von großer Bedeutung ist. Durch die hohe Sensorempfindlichkeit können beide Systeme aus großer Flughöhe (4.000-10.000 m) betrieben werden und ermöglichen dadurch gegenüber konventionellen Laserscannern bei vergleichbarer Punktdichte eine höhere Flächenleistung (800-1.000 km²/h bei 8 Punkten/m²) zum Preis einer geringeren Höhengenaugigkeit (~10 cm) und einer höheren Rate an Ausreißer-Punkten (PFENNIGBAUER & ULLRICH 2018; ULLRICH & PFENNIGBAUER 2016).

¹ Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, E-Mail: gottfried.mandlbuerger@ifp.uni-stuttgart.de

² TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Gußhausstraße 27-29/E120, A-1040 Wien

³ Stadtvermessung Wien, Magistratsabteilung 41, Muthgasse 62, A-1190 Wien

Die höhere Flächenleistung Einzelphoton-basierter Systeme ist vor allem für großflächige Topographieerfassung in der Landesvermessung von Interesse. So kommen sowohl GmLiDAR als auch SPL bereits beim *3D Elevation Program* (SUGARBAKER et al. 2014), einer Initiative zur flächendeckenden Höhendatenerfassung in den USA zum Einsatz und werden dort hinsichtlich der Erfüllung der geforderten Genauigkeitsstandards evaluiert (STOKER et al. 2016). Während das Geiger-mode System von Harris Corporation als Dienstleistung vornehmlich in Amerika betrieben wird, ist das Single Photon LiDAR System seit der Übernahme des Sensorherstellers SigmaSpace Corporation durch Hexagon/Leica Geosystems unter dem Namen SPL100 kommerziell verfügbar.

Bei Letzterem handelt sich um ein hybrides Messsystem, bestehend aus einem Navigationssystem (GNSS/IMU), dem Laserscanner und einer 80 Megapixel RGBI Kamera (RCD30). Der Sensor ist auf effiziente großflächige Erfassung von Topographie optimiert, eignet sich aber wegen der eingesetzten grünen Wellenlänge ($\lambda=532$ nm), dem kreisförmigen Scanmuster mit einer Neigung von wahlweise 10° , 15° , 20° oder 30° gegenüber der Nadirrichtung und der hohen Detektorempfindlichkeit grundsätzlich auch für bathymetrische Anwendungen bei sehr klaren und seichten Gewässern (DEGNAN 2016)⁵. In Europa ist gegenwärtig ein Sensor stationiert. Dieser wird in einigen Ländern (z.B. Spanien, Finnland, Niederlande, Österreich) im Rahmen von Pilotprojekten erprobt. So ist beispielsweise die gesamte Fläche der nordspanischen Provinz Navarra mit dem SPL100 erfasst worden. Diese Daten wurden kürzlich öffentlich zugänglich gemacht⁶. In Österreich wurden unter anderem im Auftrag der Stadt Wien Testflächen aufgenommen.

In diesem Beitrag werden zunächst die Grundlagen der Einzelphoton-basierten Techniken erläutert und die technologischen Unterschiede zu konventionellem Laserscanning aufgezeigt (Abschnitt 2). Daran anschließend werden die Messkampagnen vom August/September 2018 vorgestellt, bei welchen ein Teil des Stadtgebiets von Wien mit einem Leica SPL100 Sensor und einem RIEGL VQ-1560i erfasst wurden (Abschnitt 3). Im Abschnitt 4 erfolgt die Beschreibung der Auswertemethoden für die Datenevaluierung, und die entsprechenden Ergebnisse werden in Abschnitt 5 präsentiert und diskutiert. Der Beitrag endet mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse und einem Ausblick (Abschnitt 6).

2 Funktionsprinzipien

In diesem Abschnitt werden die prinzipielle Funktionsweise von konventionellem Flugzeuglaserscanning (Abschnitte 2.1 und 2.2) sowie von Einzelphoton-basiertem LiDAR (Abschnitte 2.4 und 2.4) erläutert.

2.1 Grundlagen

Beim Flugzeuglaserscanning handelt es sich um ein dynamisches, polares, aktives Multisensor-Messsystem bestehend aus der Navigationseinheit (Global Navigation Satellite System, Inertial

⁴ <https://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/topographic-lidar-sensors/leica-spl100>

⁵ Trotz der grundsätzlichen bathymetrischen Fähigkeiten sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Hersteller das System ausschließlich zur effizienten 3D-Kartierung der Überwasser-Topographie propagiert.

⁶ Siehe: ftp://ftp.cartografia.navarra.es/5_LIDAR/5_4_2017_NAV_ca_EPSG25830/

Measurement Unit) zur Bestimmung der Raumlage und –stellung der Messplattform und dem Laserscanner, welcher Auslenkwinkel des Laserstrahls und Entfernungen zu den die Laserstrahlung reflektierenden Zielen misst (PFEIFER et al. 2015). Zur Entfernungsmessung kommt das Impuls-Laufzeit-Verfahren zur Anwendung, bei dem die Zeitdifferenz zwischen emittiertem Laserpuls und Eintreffen des reflektierten Echos am Empfänger gemessen wird. Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit kann damit auf die Distanz zwischen Sensor und Ziel geschlossen werden. Eine Laserstrahl-Ablenkeinrichtung (schwingender, rotierender oder nutzierender Spiegel) sorgt dabei zusammen mit der Vorwärtsbewegung der Plattform für die systematische Abtastung der Erdoberfläche.

Diese grundsätzlichen Eigenschaften gelten sowohl für konventionelles wie auch für Einzelphoton-basiertes Laserscanning. Der wesentliche Unterschied besteht in der Detektortechnologie, die in den folgenden Unterabschnitten für die einzelnen Systeme näher erläutert ist. Einen grundsätzlichen Überblick über die Situation der eintreffenden Laserstrahlung aus der Sicht des Detektors gibt die Abb. 1.

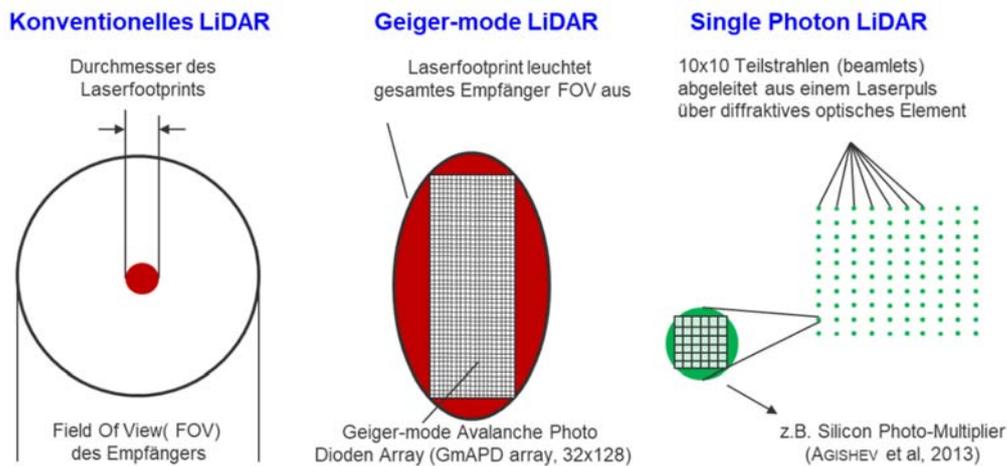


Abb. 1: Prinzipskizze: Eingehende Laserstrahlen aus Sicht des Empfängers für konventionelles, Geiger-mode und Single Photon LiDAR

2.2 Konventionelles ALS – Linear-mode LiDAR

Bei der klassischen Impuls-Laufzeit-Laserentfernungsmessung, die gegenwärtig als Abgrenzung zum Geiger-mode auch als „linear-mode LiDAR“ bezeichnet wird, trifft die reflektierte Strahlung eines hoch kollimierten Laserpulses auf genau einen Detektor. Das Gesichtsfeld (FOV) des Empfängers ist dabei wesentlich größer als der Durchmesser des reflektierten Laserstrahls (siehe Abb. 1 links). Die Umwandlung der optischen Strahlungsleistung in digitale Form erfolgt dabei zweistufig (ULLRICH & PFENNIGBAUER 2016): Zunächst wird die empfangene Laserstrahlung mittels einer Photodiode (Avalanche Photo Diode, APD) in ein analoges Signal umgewandelt, welches dann über einen Analog-Digital-Wandler (Analog Digital Converter, ADC) in digitale Information konvertiert wird. Die Bezeichnung „linear mode“ geht dabei auf den Betriebsbereich der APD zurück, in welchem ein linearer Zusammenhang zwischen optischer Leistung und ausgehendem Signal besteht. Es sei der Vollständigkeit darauf hingewiesen, dass bei modernen Sensoren zur

Erhöhung des erfassbaren Dynamikbereichs mehrere APDs/ADCs mit unterschiedlicher Empfindlichkeit zum Einsatz kommen (WAGNER et al., 2004). Jedenfalls liefern linear-mode APDs Informationen über die empfangene Signalstärke und ermöglichen durch radiometrische Kalibrierung Rückschlüsse auf die Reflektivität bzw. Materialeigenschaften der beleuchteten Objekte (LEHNER & BRIESE 2010; BRIESE et al. 2012; PFEIFER et al. 2015; WAGNER 2010).

Die eigentliche Zielerfassung erfolgt entweder durch entsprechende Bauteile im Laserscanner selbst (Diskret-Echo-Systeme) oder durch zeitlich hochauflösende Abtastung der gesamten rückgestreuten Signalenergie (Full Waveform, FWF). Die erfassten Wellenformen werden entweder direkt in der Firmware des Sensors verarbeitet (PFENNIGBAUER et al. 2014) oder zur detaillierten Analyse im Postprocessing gespeichert (PFEIFER et al. 2015). FWF Erfassung und Aufzeichnung ist derzeit jedenfalls ausschließlich für konventionelle Sensoren möglich, mit entsprechenden Vorteilen für die Genauigkeit der Entfernungsmessung, der Trennbarkeit von einzelnen Objekten innerhalb des Strahlkegels und der Beschreibung der Objekteigenschaften (Ausdehnung, Neigung, Reflektivität). Für die zuverlässige Detektion eines einzelnen Objekts sind jedenfalls einige 100 Photonen erforderlich, wobei für topographische Anwendungen vornehmlich Laserwellenlängen im nahen Infrarot ($\lambda=1064/1550$ nm) eingesetzt werden. Selbst sehr empfindliche Einzeldetektorsysteme, wie sie etwa in der Laserbathymetrie bei einer Wellenlänge im sichtbaren Bereich des Spektrums ($\lambda=532$ nm) zur Anwendung kommen, benötigen ca. 250 Photonen für die Erfassung eines Objekts (MANDLBURGER & JUTZI 2018). Die erzielbare Punktdichte hängt dabei neben Fluggeschwindigkeit und Reflektivität der beleuchteten Objekte ausschließlich von der Pulswiederholrate und dem Scanmechanismus ab.

2.3 Geiger-mode LiDAR

Zur Steigerung der Flächenleistung kommt beim GmLiDAR eine Matrix von Einzelphoton-sensitiven Detektoren, ein sogenanntes Geiger-mode Avalanche Photo Diode (GmAPD) Array, zum Einsatz (STOKER et al. 2016). Die APD jeder einzelnen Detektorzelle ist dabei im Geiger-mode, d.h. durch Anlegung einer Vorspannung über der Durchbruchsspannung in einen Modus versetzt, bei dem bereits das Eintreffen eines oder weniger Photonen den Lawineneffekt auslöst, der zu einem sprunghaften Ansteigen der Spannung am Ausgang des Detektors führt (ULLRICH & PFENNIGBAUER 2016). Dadurch kann jede Zelle als binärer Detektor angesehen werden, wobei das Eintreten des Lawineneffekts (=Durchbrechen der Photodiode) über einen Time-To-Digital (TDC) Konverter den Stopimpuls für die Laufzeitmessung auslöst. Nach dem Durchbrechen einer Zelle ist diese infolge der resultierenden Ladungsflut für längere Zeit inaktiv. Insbesondere kann nach der Detektion eines ersten Echos für diese Zelle kein weiteres Echo vom selben Laserimpuls detektiert werden. Erst nach einem Reset des gesamten Detektorarrays im Zuge der Emission des nächsten Laserpulses sind die ggf. durchgebrochenen Detektorzellen wieder aktiv.

Durch die Einzelphoton-Empfindlichkeit der Detektorzellen kann die Flughöhe wesentlich gesteigert werden. Die damit verbundene potenzielle Reduktion der Punktdichte wird durch das Detektorarray kompensiert, die als range camera aufgefasst werden kann. Der relativ große Laserabtafleck am Boden wird also von der Detektormatrix räumlich aufgelöst erfasst. Das Gesichtsfeld des Detektors ist dabei so gestaltet, dass alle $32 \times 128 = 1024$ Detektorzellen beleuchtet werden (siehe Abb. 1, Mitte). Für die planimetrische Auflösung ist demnach (in Abhängigkeit der Flughöhe) die Größe der Detektorzelle maßgeblich und nicht wie bei konventionellen Systemen die Größe des

Laserabtafleck am Boden. Bei dem von Harris Corporation betriebenen System beispielsweise beträgt der Punktabstand 35 cm bei einer nominellen Flughöhe von 10 km und einer Größe einer Detektorzelle von 35 μm . Dies setzt aber voraus, dass es zu keinen Spontanauslösungen in der Atmosphäre kommt und jede Zelle tatsächlich auslöst. Beides ist in der Praxis nicht der Fall. Allerdings kommt es zu einer weiteren Steigerung der Punktdichte, da sich die relativ großen Footprints benachbarter Laserimpulse in der Regel überlappen. Im offenen Bereich kann die hohe Punktdichte zur Glättung der verfahrensbedingt größeren Entfernungsmessfehler herangezogen werden. Vegetationsdurchdringung ist wegen der mangelnden Mehrzielfähigkeit nur eingeschränkt möglich. Abschließend sei erwähnt, dass das Harris GmLiDAR System für effiziente Topographieerfassung optimiert ist und mit einer Wellenlänge im nahen Infrarot operiert ($\lambda=1064\text{ nm}$). Radiometrische Information kann durch den binären Charakter des Detektors nicht gemessen, sondern lediglich aus der lokalen Punktdichte geschätzt werden.

2.4 Single Photon LiDAR

Bei der als Single Photon LiDAR bezeichneten Technologie kommen ebenfalls Einzelphoton-sensitive Detektoren zum Einsatz. Anders als beim GmLiDAR, wird Laserstrahlung im sichtbaren grünen Bereich des Spektrums ($\lambda=532\text{ nm}$) verwendet, womit SPL inhärente bathymetrische Fähigkeiten aufweist. Zur Erhöhung der Punktdichte wird der Laserstrahl durch ein diffraktives optisches Element in 10×10 Teilstrahlen, sogenannte beamlets, aufgespalten (DEGNAN, 2016). Die 100 simultan emittierten, einander aber nicht überlappenden Teilstrahlen interagieren mit der Oberfläche, und jeder Teilstrahl wird von einem eigenen, auf die jeweilige Raumrichtung des Laserstrahls ausgerichteten Detektor, empfangen (siehe Abb. 1, rechts). Jeder Einzeldetektor besteht dabei wiederum aus einer Matrix von Einzelphoton-sensitiven Zellen, wobei jede dieser Zellen durch entsprechende Vorspannung in den Geiger-mode versetzt wird. Die genaue technische Realisierung ist dabei vom Sensorhersteller nicht offengelegt. Mögliche Implementierungen sind Micro Channel Plate PhotoMultiplier Tubes (MCP-PMT) oder Silicon PhotoMultipliers (SiPM) (AGISHEV et al. 2013; DEGNAN 2002)

Während die Raumrichtung für jeden einzelnen Teilstrahl bekannt ist, steht am Ausgang des jeweiligen Teilstrahl-Detektors ein Summensignal zur Verfügung. Mit anderen Worten, eine weitere Verfeinerung der räumlichen Auflösung durch die einzelnen Detektorzellen ist nicht möglich. Eine Abtastung des Summensignals am Ausgang des Detektors, und damit die Aufzeichnung der vollen Wellenform, ist derzeit noch nicht möglich, die Signalamplitude kann aber im Gegensatz zum GmLiDAR gemessen werden. Der radiometrische Informationsgehalt ist allerdings nicht vergleichbar ist zu jenem konventioneller (multi-photon) APDs, die im linearen Modus betrieben werden.

Die Einzelphoton-Empfindlichkeit erlaubt aber auch für SPL größere Flughöhen und damit potenziell größere Flächenleistungen. Dies ist, wie bereits eingangs erwähnt, für großflächige Datenerfassung etwa in der Landesvermessung von Interesse. Wegen der Verfügbarkeit eines entsprechenden Sensors in Europa und der daraus resultierenden höheren Relevanz für den deutschsprachigen Raum, wird der weitere Fokus auf den Vergleich von SPL und konventionellem FWF Laserscanning (forthin: Waveform LiDAR) gelegt.

3 Datensätze

Für die Erprobung der Single Photon LiDAR Technologie beauftragte die Stadt Wien (Magistratsabteilung 41 – Stadtvermessung) die Firma COWI im Rahmen eines Pilotprojektes mit der Erfassung eines Testgebiets. Der aufgenommene Flugblock ist etwa 8 km breit und 20 km lang und reicht von der Lobau östlich der Donau über den Bereich der Wiener Innenstadt bis in den westlich angrenzenden Wiener Wald (siehe Abb. 2a). Die geforderte Punktdichte war 20 Punkte/m² im Einzelstreifen (letzte Echos). Die Befliegung wurde am 29.07.2018 mit dem Hexagon/Leica Geosystems SPL100 Sensor aus einer Flughöhe von ca. 4.000 m durchgeführt. Für die Datenerfassung wurde ein Palmer Scanner (kreisrundes Punktmuster) mit einem Öffnungswinkel des Scankegels von 15° eingesetzt, woraus sich eine Streifenbreite von 2.000 m ergibt. Bei einer theoretischen Querüberlappung von 20% sind daher 5 Flugstreifen erforderlich, um das Gebiet abzudecken. Um Scanschatten im Stadtgebiet zu reduzieren wurde das Gebiet mit einer Querüberlappung von >50% also mit 10 Flugstreifen befliegen.

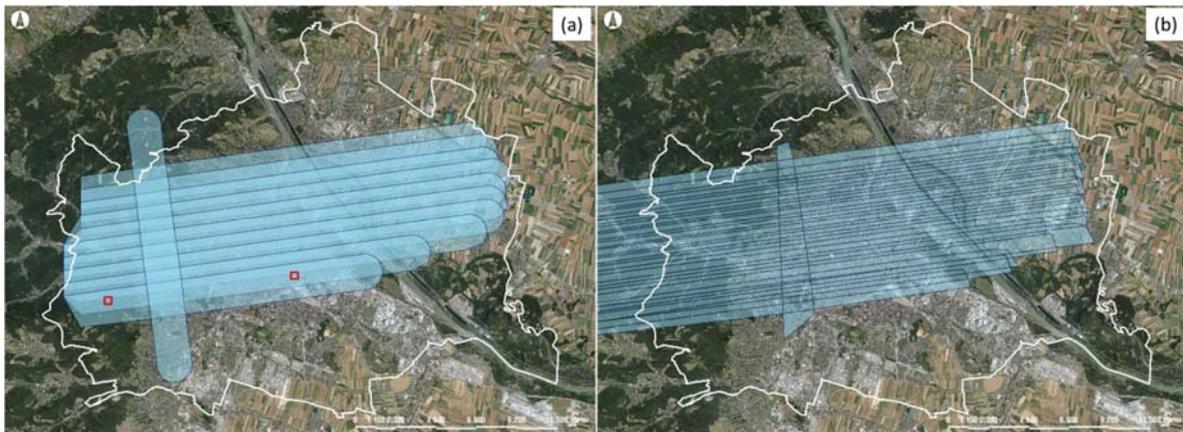


Abb. 2: Übersicht Flugblock Wien. (a) Flugstreifen Single Photon LiDAR (SPL100), rote Rechtecke: Detailuntersuchungsgebiete der Abb. 3, (b) Flugstreifen Waveform LiDAR (VQ-1560i) als Teil eines größeren Flugblocks

Als Vergleichsdatensatz steht eine Aufnahme desselben Gebiets mit einem konventionellen Full Waveform Laserscanner zur Verfügung, welche am 20.09.2018 bei vergleichbarem Belaubungszustand mit dem RIEGL VQ-1560i durchgeführt wurde. Der gesamte Flugblock ist in Abb. 2b dargestellt. Die Zielpunktdichte im Einzelstreifen lag dabei ebenso bei 20 Punkten/m². Auch hier betrug die Querüberlappung der Flugstreifen 50%. Zur Erfassung des Gebietes wurden 18 Längsstreifen mit einer Geschwindigkeit von 120 Knoten (60 m/s) aus einer Flughöhe von 750 m über Grund befliegen. Der Scanner arbeitet mit zwei Laserquellen, deren Pulse über ein gemeinsames rotierendes Polygonrad abgelenkt werden und dabei zwei vertikale Scanebenen mit einem Scanwinkelbereich von jeweils $\pm 30^\circ$ aufspannen⁷. Die x-förmig angeordneten Scanlinien sind jeweils um $\pm 14^\circ$ gegenüber der Querachse gedreht, sodass der gesamte Scanbereich quer zur Flugrichtung

⁷ http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/RIEGL_VQ-1560i_Datasheet_2018-10-16.pdf

58° beträgt. Die Streifenbreite ergibt sich damit zu 840 m. Die einzelnen Ziele (Echos) werden vom Scanner über online Verarbeitung der vollen Echowellenform ermittelt. Zu jedem Echo stehen neben der Geometrie auch zusätzliche Attribute wie Signalamplitude, Reflektivität und ein Qualitätsmaß (pulse shape deviation) zur Verfügung.

Für die weiteren Analysen wurden aus dem Gesamtgebiet zwei 400×400 m² große repräsentative Bereiche extrahiert und detailliert untersucht (siehe Abb. 3). Dabei handelt es sich um die in Abb. 2a eingezeichneten, rot markierten Bereiche. Die östliche Testfläche ist ein typisches Stadtgebiet mit großen Wohnhausblöcken, Straßenfluchten und einer Kirche mit einem 70 m hohen Turm (Abb. 3b). Anhand dieses Datensatzes kann einerseits die Erfassung der engen Straßenschluchten, aber auch die innere Messgenauigkeit an glatten Flächen (Straßen, Dächer, etc.) untersucht werden. Das westlich gelegene Gebiet ist eine Waldfläche mit unterschiedlich hohen Bäumen, Forststraßen, einer größeren offenen Fläche und einem alleinstehenden Gebäude (Abb. 3a). Dieser Datensatz eignet sich vor allem zur Analyse der Penetrationsfähigkeit von SPL. Die beiden Gebiete sind im Folgenden mit „Stadt“ und „Wald“ bezeichnet.

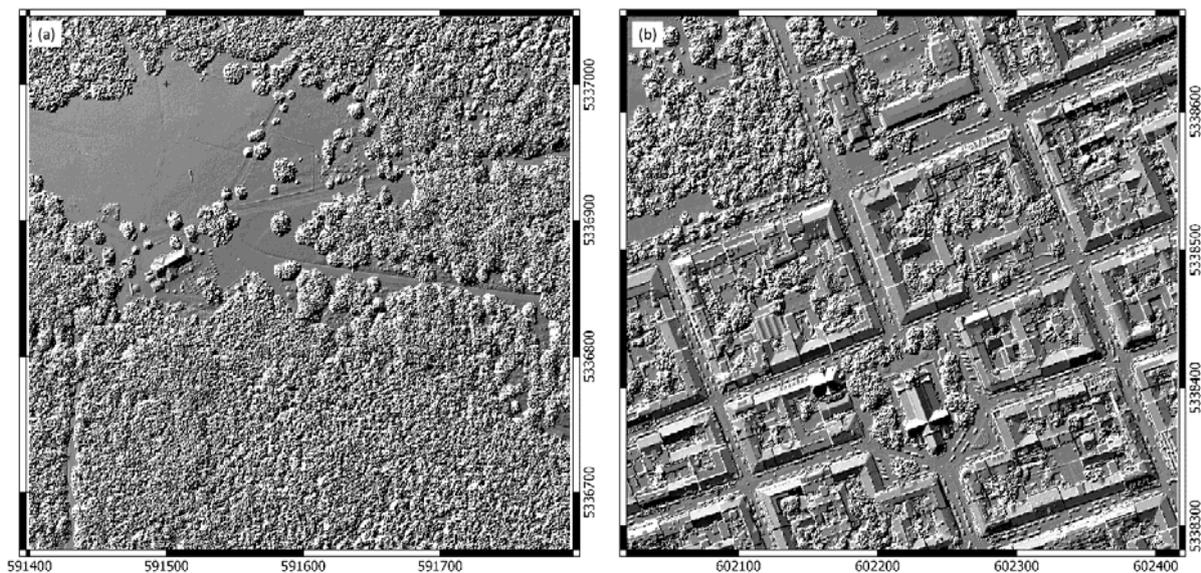


Abb. 3: Schummerungen des Digitalen Höhenmodells der Detailuntersuchungsgebiete Wald (a) und Stadt (b). Die zugrunde liegenden Daten stammen aus der Waveform LiDAR Befliegung

4 Auswertemethoden

Für die im nächsten Abschnitt dargestellten Ergebnisse wurden jeweils die folgenden Verarbeitungsschritte für beide Testgebiete (Stadt, Wald) und für beide Datensätze (SPL100, VQ-1560i) ausgeführt:

- Visuelle Kontrolle im 3D Punktvier: Für den SPL100 Datensatz wurden dabei die ungefilterten Punkte inklusive der Streupunkte oberhalb und unterhalb des Geländes herangezogen.
- Durchdringungsfähigkeit: Die Evaluierung erfolgt in diesem Fall qualitativ durch visuelle Begutachtung von Profilschnitten im bewaldeten Bereich.

- Punktdichteabschätzung: Dazu wurden die streifenweisen Punktwolken jeweils in ein Raster mit einer Kantenlänge von 2,5 m einsortiert und pro Zelle die Punktdichte berechnet. Visualisierungen und quantitative Auswertungen wurden im Anschluss für den Einzelstreifen und den Gesamtblock erstellt.
- Streifenhöhendifferenzen: Die Überprüfung der Passgenauigkeit erfolgte durch Berechnung von Streifen-Höhenmodellen (DHM), deren Klassifizierung in raue und glatte Bereiche anhand der Standardabweichung der Gitterpunktinterpolation (gleitende Schrägebene / moving planes) und die anschließende Berechnung von Differenzmodellen für glatte Bereiche der Streifenüberlappung.
- Untersuchung der Nachbarschaftsgenauigkeit bzw. des Messrauschens: In den glatten Bereichen gibt die Standardabweichung der Gitterpunktinterpolation Aufschluss über das Messrauschen. Die Residuen zur ausgleichenden Schrägebene kennzeichnen hier die relative Genauigkeit der Punktmessung. Die Auswertung erfolgt dabei durch statistische Analyse (Histogramm, statistische Kennzahlen).

5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Datenevaluierung und des Vergleichs zwischen dem Single Photon LiDAR Datensatz (SPL100) und dem Waveform LiDAR Datensatz (VQ-1560i) anhand von Abbildungen vorgestellt und diskutiert.

Durch die Einzelphoton-Sensitivität der SPL Technologie können Entfernungen zu Objekten selbst bei sehr schwachen Signalen gemessen werden. Dies ermöglicht größere Flughöhen und in weiterer Folge eine größere Streifenbreite als dies bei konventionellem Laserscanning der Fall ist. Die Flugblockübersicht der Abb. 2 verdeutlicht dies. Während für die Erfassung des Projektgebietes mit dem Waveform LiDAR Sensor bei 50%-iger Streifenüberlappung 18 Fluglinien erforderlich waren, reichen beim SPL System selbst bei effektiver Überlappung von 65% 10 Flugstreifen aus. Die SPL Flugstreifen sind dabei mehr als doppelt so breit wie die Waveform LiDAR Streifen (2.000 m vs. 840 m). Für beide Befliegungen wurde die Flugplanung auf eine Zielpunktdichte von 20 Punkten/m² ausgelegt. Diese wird beim SPL System trotz größerer Flughöhe (4.000 m vs. 750 m) durch eine höhere Scanrate von 5 MHz erreicht (Pulsrepetitionsrate: 50 kHz, 100 Teilstrahlen pro Puls).

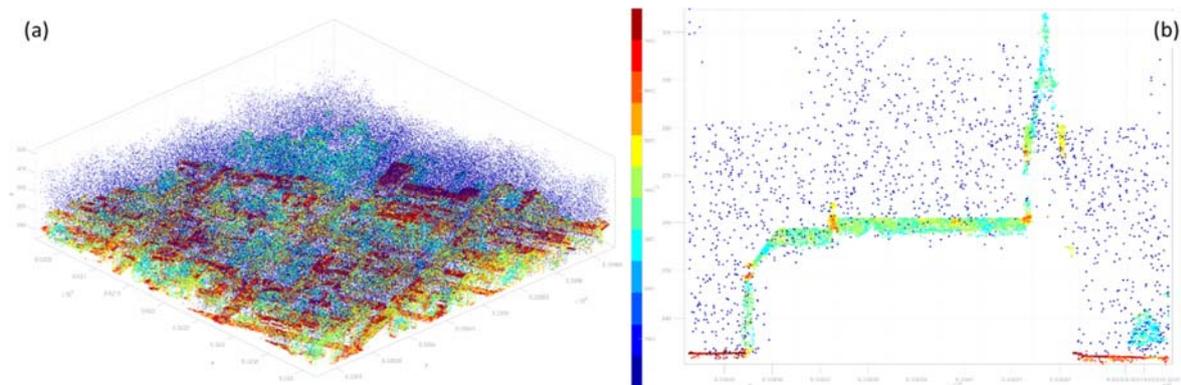


Abb. 4: Ungefilterte SPL100 3D-Punktwolke des Untersuchungsgebietes Stadt eingefärbt nach Intensität [DN]; (a) Perspektivansicht des gesamten Bereichs (b) Profilschnitt Kirche

Um aus solch großen Flughöhen Entfernungen zu Geländepunkten messen zu können, kommen die in Abschnitt 2.4 beschriebenen Einzelphoton-sensitiven Detektoren zum Einsatz. Durch die hohe Empfindlichkeit werden im praktischen Einsatz allerdings nicht nur Nutzpunkte (Gelände, Vegetation, Gebäude, etc.) sondern auch Streupunkte, die von Reflexionen aus der Atmosphäre stammen, erfasst. Diese wesentliche Charakteristik von 3D SPL Punktwolken zeigt die Abb. 4 für das städtische Untersuchungsgebiet in einer Perspektivansicht des gesamten Ausschnitts (a) sowie einem Profilschnitt im Bereich der Kirche. Die Punkte sind dabei nach Signalintensität eingefärbt, wobei zu erkennen ist, dass die meisten Streupunkte niedrige Intensität aufweisen und ihre Dichte geringer ist als die der Nutzpunkte. Diese beiden Eigenschaften stellen die Grundlage für die erforderliche Datenfilterung dar (DEGNAN 2016). Erheblich schwieriger ist die Bereinigung all jener Punkte mit hoher Intensität, die knapp unter der Oberfläche liegen. Gängige DGM Filterverfahren versagen in diesem Fall, da tief liegende Punkte prinzipiell bevorzugt werden.

Alle weiteren Untersuchungen beruhen auf der gefilterten Punktwolke, welche auch das Lieferprodukt der Befliegungsfirma darstellt. Die Abb. 5 zeigt die bereinigte SPL sowie die Waveform LiDAR Punktwolke des städtischen Untersuchungsgebietes wiederum im Gesamten und für den Detailbereich der Kirche. Dabei ist die größere Prägnanz (Abbildungsschärfe) der Waveform LiDAR Daten klar ersichtlich. Besonders ausgeprägt ist dies am Beispiel des Kirchturms, bei welchem architektonische Details im Waveform LiDAR Datensatz (Abb. 5d) abgebildet sind, in der SPL Punktwolke (Abb. 5c) aber fehlen. Deutlich zu erkennen ist dies auch am Profilschnitt in Abb. 5e, in welchem die SPL Punkte blau und die Waveform LiDAR Punkte braun dargestellt sind.

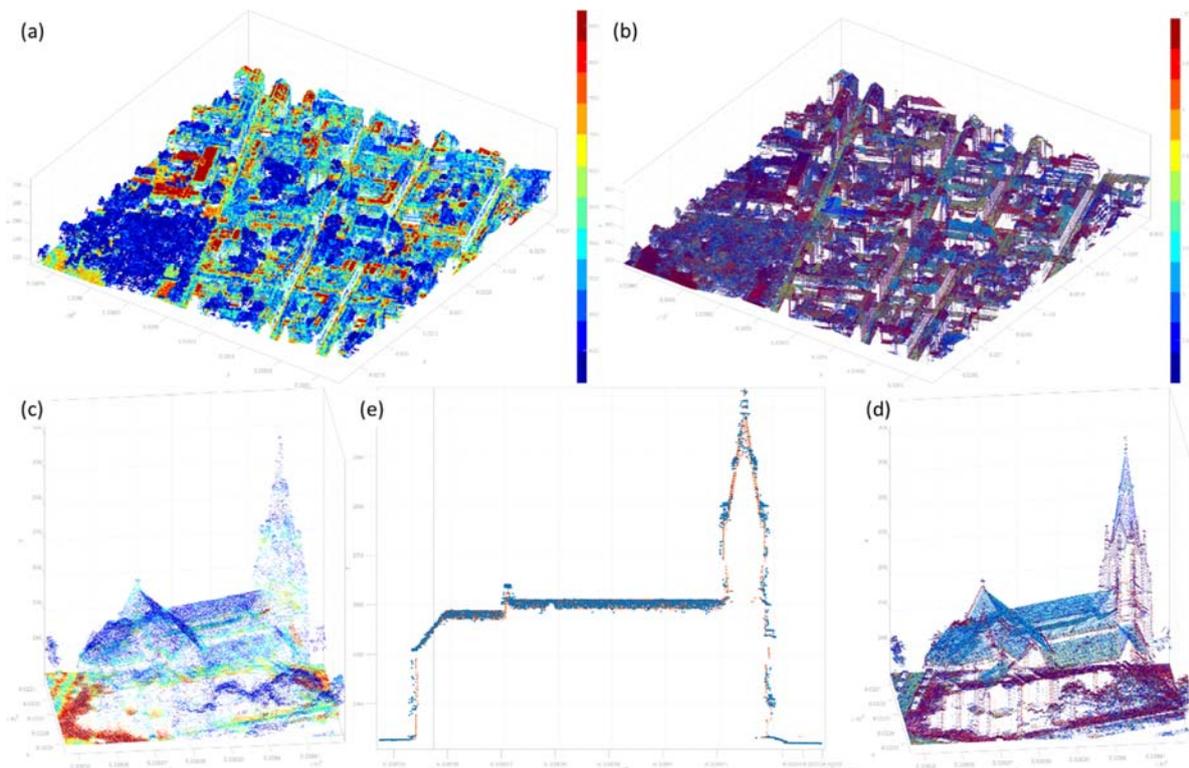


Abb. 5: Gefilterte 3D-Punktwolken eingefärbt nach Intensität [DN], Untersuchungsgebiet Stadt mit Detailausschnitt Kirche; (a+c) Single Photon LiDAR, (b+d) Waveform LiDAR, (e) Profilschnitt: SPL (blau), Waveform LiDAR (braun)

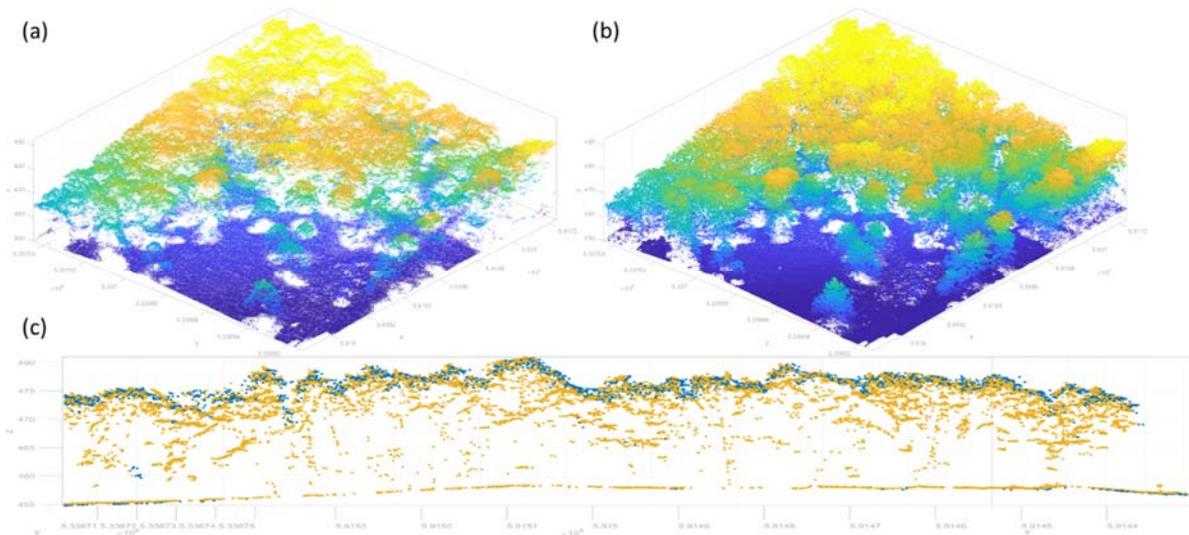


Abb. 6: 3D-Punktwolke, Ausschnitt aus Untersuchungsgebiet Wald; (a) SPL, (b) Waveform LiDAR, (c) Profilschnitt: SPL (blau), Waveform LiDAR (hellbraun)

Abb. 6 zeigt die 3D Punktwolke eines Ausschnittes aus dem Untersuchungsgebiet Wald und hat die Evaluierung der Durchdringungsfähigkeit von SPL zum Thema. Prinzipiell ist die Technologie mehrzielfähig, im konkreten Vergleichsdatensatz ist die Abdeckung mit Bodenpunkten allerdings deutlich geringer als beim Waveform LiDAR Datensatz. Dies ist vor allem im Profilschnitt (Abb. 6c) zu erkennen, in welchem über weite Bereiche lediglich die braunen Punkte des konventionellen Systems vorhanden sind. Die Belaubungssituation kann dabei bei beiden Erfassungszeitpunkten (SPL: Juli, Waveform LiDAR: September) als äquivalent angesehen werden. Die bessere Fähigkeit zur Vegetationsdurchdringung konnte auch durch ein höheres Maß an Mehrfachechos von max. 5 Echos/Puls beim konventionellen System gegenüber max. 2 Echos/Puls beim SPL System quantitativ erfasst werden.

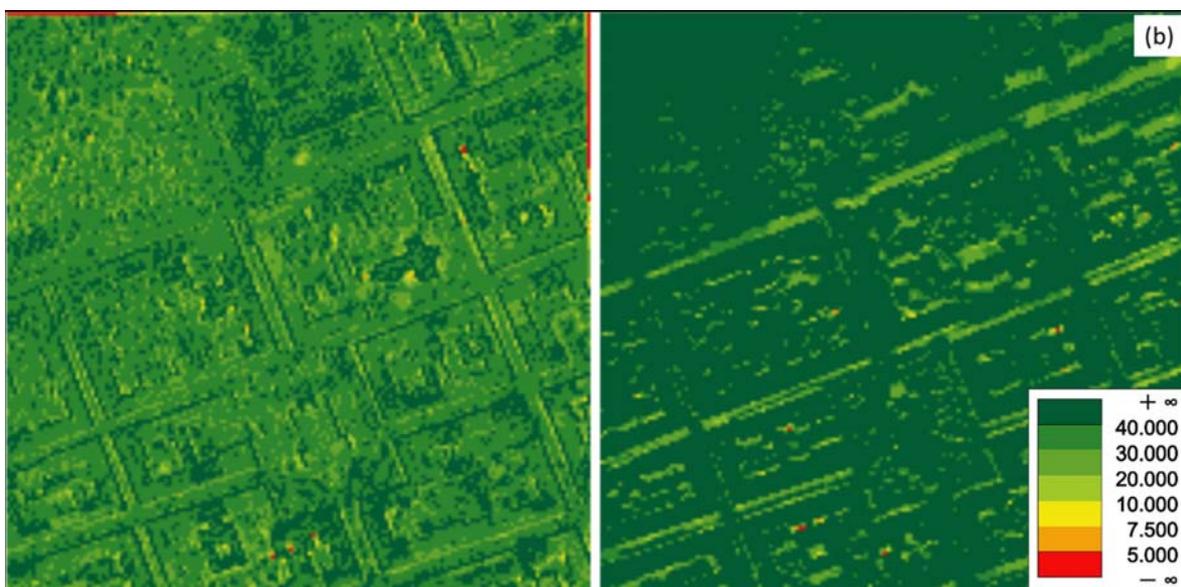


Abb. 7: Punktdichte [Punkte/m²] Untersuchungsgebiet Stadt; (a) SPL, (b) Waveform LiDAR

Abb. 7 zeigt die Gesamtpunktdichtekarte für das städtische Untersuchungsgebiet für beide Befliegungen. Die angestrebte Punktdichte von 20 Punkten/m² im Einzelstreifen wurde beim SPL Datensatz nicht erreicht, was eher auf die Flugplanung (Fluggeschwindigkeit, Scannerdrehrate) zurückzuführen ist als auf die Technologie. Die Punktdichtekarte erlaubt aber dennoch interessante Einblicke. So ist aus Abb. 7a für den SPL Datensatz eine deutlich erhöhte Dichte an den Hausfassaden zu erkennen, welche auf die konsequent schräge Scanrichtung zurückzuführen ist. Der kreisförmige Scanmechanismus (Palmer Scanner) ermöglicht dabei neben Seitblicken auch Vor- und Rückblick in der Mitte des Scanstreifens. Der Waveform LiDAR Datensatz weist hier immer wieder Stellen mit hellgrünem Farbton (10-20 Punkte/m²) auf. Andererseits sind in diesem Datensatz die Straßenfluchten mit konstant hoher Punktdichte (>40 Punkte/m² im Flugblock) erfasst.

Als weiteres Element einer Standard ALS Qualitätskontrolle wurden auch die relativen Höhendifferenzen in den Streifenüberlappungsbereichen berechnet und analysiert. Abb. 8 zeigt die Ergebnisse für beide Detailuntersuchungsgebiete und beide Datensätze. Während die Streifendifferenzen im Waldgebiet vollflächig dargestellt sind (Abb. 8a/b), sind diese in den Abb. 8c/d für das Stadtgebiet lediglich in den glatten Bereichen ausgewiesen. Nur in den glatten Bereichen können

zuverlässige Aussagen über die Passgenauigkeit getroffen werden. Die statistischen Histogrammauswertungen der Abb. 8e/f beziehen sich daher auf die maskierten Höhendifferenzen der Abb. 8c/d. Sowohl die farbkodierten Differenzkarten als auch die Histogramme weisen für den SPL Datensatz höhere Abweichungen auf. Die Standardabweichung der Höhendifferenzen liegt für SPL bei 6 cm im Vergleich zu 2 cm für den Waveform LiDAR Datensatz. In den SPL Daten zeigt sich im städtischen Untersuchungsgebiet auch ein geringer systematischer Offset von ca. 1 cm (Mittelwert: 1,2 cm, Median: 1,3 cm). Ein Faktor 3 im Genauigkeitspotenzial zwischen konventionellem und Single Photon LiDAR wurde auch bereits von MANDLBURGER & JUTZI (2018) anhand eines Datensatzes im spanischen Navarra berichtet.

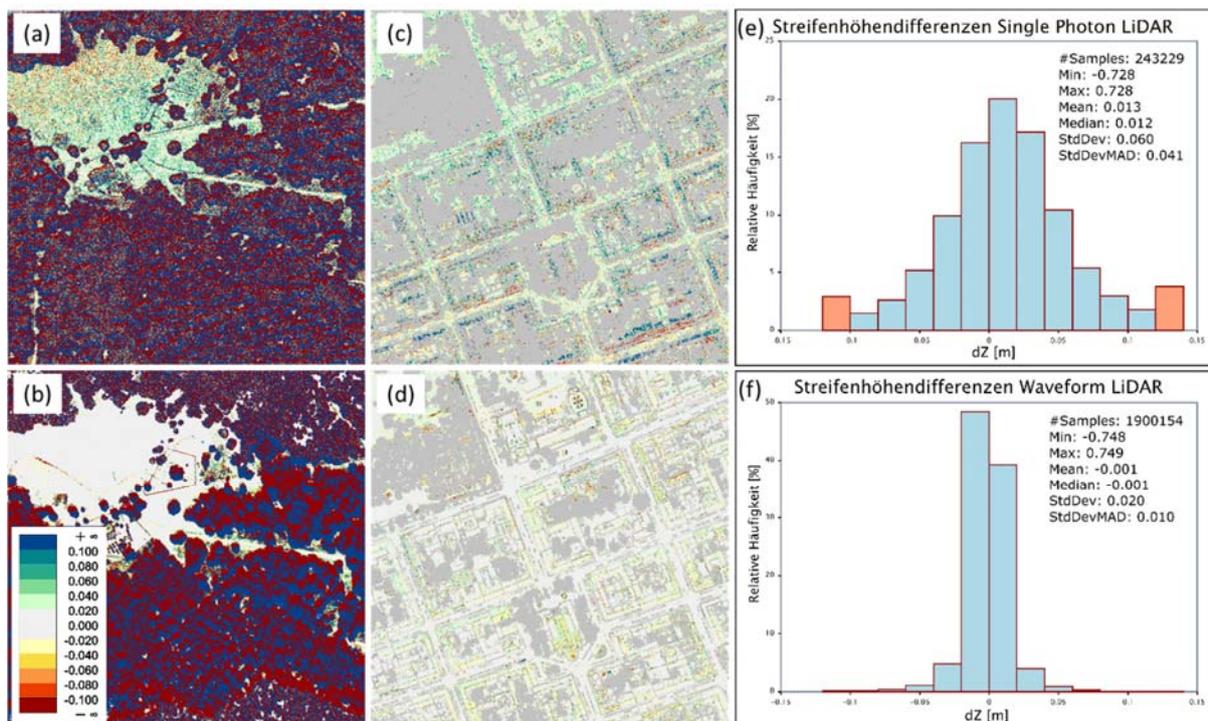


Abb. 8: Streifenhöhendifferenzen [m]: obere Reihe: Single Photon LiDAR, untere Reihe: Waveform LiDAR; (a+b) Untersuchungsgebiet Wald, ungefiltert, (c+d) Untersuchungsgebiet Stadt, raue Bereiche gefiltert, (e+f) Histogramme der der Höhendifferenzen zu (c+d)

Abschließend zeigt die Abb. 9 die Ergebnisse der Untersuchung der Nachbarschaftsgenauigkeit in den glatten Bereichen des städtischen Testgebiets. In Abb. 9a und b sind die Standardabweichung der Gitterpunkthöhen, bestimmt mittels gleitender Schrägebeneninterpolation aus den jeweils 12 nächsten Nachbarpunkten, farbkodiert von blau (0-5 mm) über grün (5-15 mm) bis rot (50 mm) dargestellt. Der SPL Datensatz weist hierbei in den Straßenbereichen eine bessere innere Genauigkeit auf als der Waveform LiDAR Datensatz. In beiden Fällen liegen die Nachbarschaftsgenauigkeiten unter den von den Herstellern angegebenen Werten. Die Standardabweichung der Gitterpunkthöhen ist im Waveform LiDAR über die gesamte Szene relativ konstant. Demgegenüber fällt in den SPL Daten ein größerer Unterschied zwischen Straßenflächen und Dächern auf. Eine

genauere Analyse der Hintergründe dieses Phänomens ist Gegenstand von künftigen Untersuchungen. Jedenfalls kann für den vorliegenden Datensatz keine globale Aussage hinsichtlich der Überlegenheit des einen oder andern Systems mit Hinblick auf die Relativgenauigkeit gemacht werden. Vielmehr weisen die SPL Punkte gegenüber den Waveform LiDAR Daten an manchen Stellen eine deutlich höhere Streuung auf (z.B. Dachfläche in Abb. 9e), während dies an anderen Stellen nicht der Fall ist (z.B. Abb. 9f). Die quantitative Auswertung ergibt für beide Datensätze im Mittel ähnliche Werte (Mittelwert SPL: 12 mm vs. Waveform LiDAR: 9 mm).

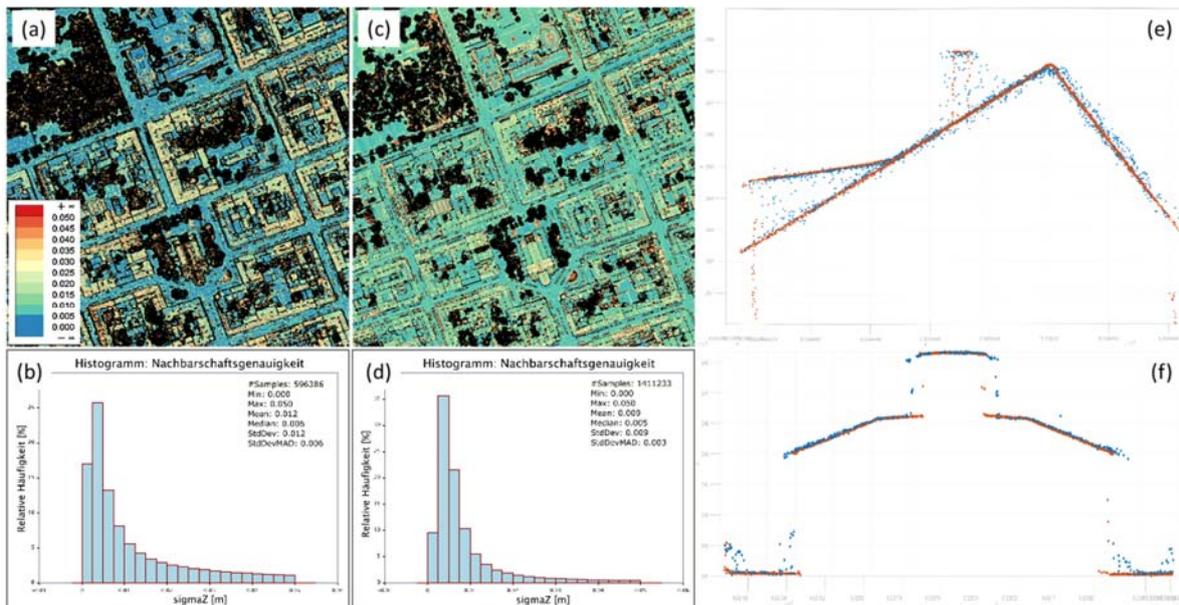


Abb. 9: Nachbarschaftsgenauigkeit; (a+b) Single Photon LiDAR, (c+d) Waveform LiDAR, (e+f) Profilschnitte an unterschiedlich geeigneten Dachflächen, SPL (blau) und Waveform LiDAR (braun)

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden die Funktionsprinzipien von konventionellem Full Waveform Laserscanning und die Einzelphoton-sensitiven Technologien Geiger-mode LiDAR und Single Photon LiDAR beschrieben. Speziell lag der Fokus dabei auf der SPL Technologie, da mit dem Hexagon/Leica SPL100 nunmehr ein Sensor auch in Europa verfügbar ist, der gegenüber herkömmlichen Laserscannern eine höhere Flächenleistung für die Topographieerfassung bei gleicher Punktdichte verspricht.

Mittlerweile liegen zwei Befliegungen eines Teilgebietes der Stadt Wien mit dem SPL100 (Juli 2018) und dem RIEGL VQ-1560i (September 2018) vor. Erste Ergebnisse der Datenevaluierung wurden in dem Beitrag vorgestellt. Dabei kann festgehalten werden, dass (i) mit der SPL Technologie aufgrund der höheren Flughöhe und der daraus resultierenden größeren Streifenbreite weniger Flugstreifen zur Erfassung der selben Fläche bei vorgegebener Punktdichte erforderlich sind,

(ii) die Waveform LiDAR 3D-Punktwolken die Topographie sowie Gebäude prägnanter wiedergeben, (iii) Vegetationsdurchdringung bei der SPL Technologie gegeben ist, diese im Untersuchungsgebiet im Vergleich zu Waveform LiDAR aber moderat war, (iv) das kreisförmige Scanmuster des SPL100 günstig für die Erfassung von Fassaden im Stadtbereich ist, die Straßenfluchten aber aus demselben Grund oftmals abgeschattet sind, und (v) die relative Nachbarschaftsgenauigkeit bei beiden Systemen besser als 5 cm ist, wobei eine höhere Schwankungsbreite beim SPL Datensatz vor allem bei geneigten und schwach reflektierenden Flächen festgestellt werden konnte.

Der vorliegende Beitrag hat Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologie aufgezeigt, wobei die Datenanalyse auch Fragen aufgeworfen hat, deren Beantwortung Gegenstand künftiger Untersuchungen sein wird. Inwieweit Single Photon LiDAR als Ersatz für konventionelles Laserscanning, etwa für einen großflächigen Einsatz in der Landesvermessung ist, hängt in erster Linie von den Nutzeransprüchen ab und kann daher aus wissenschaftlicher Sicht nicht global beantwortet werden.

7 Danksagung

Die Arbeiten von Gottfried Mandlbürger zu diesem Beitrag wurden durch Mitteln der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) im Rahmen des Forschungsprojektes „Bathymetrievermessung durch Fusion von Flugzeuglaserscanning und multispektralen Luftbildern“ unterstützt.

8 Referenzen

- AGISHEV, R., COMERÓN, A., BACH, J., RODRIGUEZ, A., SICARD, M., RIU, J. & ROYO, S., 2013: Lidar with SiPM: Some capabilities and limitations in real environment. *Optics and Laser Technology*, **49**, 86-90.
- BRIESE, C., PFENNIGBAUER, M., LEHNER, H., ULLRICH, A., WAGNER, W. & PFEIFER, N., 2012: Radiometric calibration of multi-wavelength airborne laser scanning data. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **1**, 335-340.
- DEGNAN, J., 2002: Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements. *Journal of Geodynamics*, **34**(3-4), 503-549.
- DEGNAN, J., 2016: Scanning, Multibeam, Single Photon Lidars for Rapid, Large Scale, High Resolution, Topographic and Bathymetric Mapping. *Remote Sensing*, **8**(11), 923-958.
- KIM, S., LEE, I. & KWON, Y. J., 2013: Simulation of a geiger-mode imaging LADAR system for performance assessment. *Sensors (Switzerland)*, **13**(7), 8461-8489.
- Lehner, H. & Briese, C., 2010: Radiometric calibration of Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data based on natural surfaces. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **38**(7B), 360-365.
- MANDLBÜRGER, G. & JUTZI, B., 2018: Feasibility Investigation on Single Photon Lidar Based Water Surface Mapping. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **4**, 109-116.
- PFEIFER, N., MANDLBÜRGER, G. & GLIRA, P., 2015: Laserscanning. In: *Photogrammetrie und Fernerkundung*, 1st ed., 1-51, Berlin Heidelberg: Springer.

- PFENNIGBAUER, M. & ULLRICH, A., 2018: Noisy lidar point clouds: impact on information extraction in high-precision lidar surveying. *Laser Radar Technology and Applications*, **33**.
- PFENNIGBAUER, M., WOLF, C., WEINKOPF, J. & ULLRICH, A., 2014: Online waveform processing for demanding target situations. In *Proc. SPIE*, **90800J**.
- STOKER, J. M., ABDULLAH, Q. A., NAYEGANDHI, A. & WINEHOUSE, J., 2016: Evaluation of Single Photon and Geiger Mode Lidar for the 3D Elevation Program. *Remote Sensing*, **8(9)**, 716-767.
- SUGARBAKER, L. J., CONSTANCE, E. W., HEIDEMANN, H. K., JASON, A. L., LUKAS, V., SAGHY, D. L. & STOKER, J. M., 2014: The 3D Elevation Program Initiative — A Call for Action. US Geological Survey, <https://pubs.usgs.gov/circ/1399/pdf/circ1399.pdf>.
- ULLRICH, A. & PFENNIGBAUER, M., 2016: Linear LIDAR versus Geiger-mode LIDAR: impact on data properties and data quality. In *Proc. SPIE*, **9832**, 983204-983217.
- WAGNER, W., 2010: Radiometric calibration of small-footprint full-waveform airborne laser scanner measurements: Basic physical concepts. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **65(6)**, 505-513.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., MELZER, T., BRIESE, C. & KRAUS, K., 2004: From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **35(B3)**, 201-206.