

# Geiger-Mode – LiDAR-Technologien der nächsten Generation

THOMAS BAHR<sup>1</sup>, NICOLAI HOLZER<sup>1</sup> & PHILIP SMITH<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Die neuen Harris-Lösungen für Geiger-Mode Avalanche Photodiode (GmAPD) LiDAR umfassen Sensorik, Datenprozessierung und Analytik. Nach 15 Jahren Entwicklung für den Militärsektor bietet Harris diese Technologien erstmals im kommerziellen LiDAR-Markt an. Dieser Beitrag beschreibt, warum GmAPD die Effizienz von LiDAR-Akquisitionen steigert, wie der ITI-1000 Sensor eine kostengünstige und hochauflösende 3D-Topographieerfassung von über 1000 km<sup>2</sup>/h ermöglicht, und wie das zugehörige Breitband-Produktionssystem trotz erhöhter Präzision die Verarbeitungsdauer für GmAPD-Punktwolken reduziert. Zur Bewertung der GmAPD LiDAR-Daten, insbesondere für das „3D Elevation Program“ des Geologischen Dienstes der USA (USGS), werden zwei Fallstudien vorgestellt.*

## 1 Einführung

Seit den frühen 1990er-Jahren erlebte der kommerzielle Markt für flugzeuggetragene LiDAR-Systeme ein beeindruckendes Wachstum. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von LiDAR-Punktwolken verbreitete sich auch ihre Nutzung in den unterschiedlichsten Branchen. Für die Expansion dieses Marktes und seine Entwicklung in neuen Anwendungsgebieten müssen jedoch die Kosten gesenkt werden, die mit der großflächigen und präzisen Erfassung von LiDAR-Daten mit hohen Punktdichten sowie deren Produktion verbundenen sind (CARY 2009).

Um dies zu erreichen, hat Harris neue Lösungen für die Sensorik, Datenprozessierung und Analytik von Geiger-Mode Avalanche Photodiode (GmAPD) LiDAR entwickelt. Verglichen mit linear betriebenen LiDAR-Sensoren sind GmAPD-gestützte Systeme wesentlich effizienter. GmAPD-Detektoren erfassen einzelne Photonen und sind darüber hinaus kleinvolumig. Daher lassen sie sich zu großen Feldern kombinieren und mit verfügbaren Lasern betreiben, die Pulsfrequenzen im Sub-Nanosekunden-Bereich aufweisen. Beides ermöglicht die Entwicklung eines GmAPD LiDAR-Systems zur 3D-Topographieerfassung mit einer Abdeckungsrate von z. B. 1000 km<sup>2</sup>/h bei einer Dichte von 8 Punkten/m<sup>2</sup>. In Kombination mit fortschrittlichen Automatisierungstechniken für Breitband-Produktion und Datenanalyse bieten GmAPD-Sensoren neue Möglichkeiten für den kommerziellen Markt.

## 2 GmAPD-Detektorfelder

Im Vergleich zu linear betriebenen Systemen, die Photonen proportional in Stromsignale umwandeln, bestehen Geiger-Mode Detektoren aus einem Feld von Avalanche Photodioden (APDs), die mit hohem Bias betrieben werden. Damit werden große und einfach detektierbare Stromsignale erzeugt, die sich mit digitalen Zeitmesskreisen erfassen lassen, auch wenn nur

---

<sup>1</sup> Harris Corporation, Talhofstraße 32a, D-82205 Gilching,  
E-Mail: [Thomas.Bahr, Nicolai.Holzer]@harris.com

<sup>2</sup> Harris Corporation, 1025 W Nasa Blvd, Melbourne, Florida 32919, USA, E-Mail: psmith29@harris.com

wenige Photonen einfallen. Aus folgenden Gründen sind GmAPD-Detektorfelder hervorragende LiDAR-Empfänger:

- **Geringer Jitter** – GmAPD-Felder integrieren einfache digitale CMOS Zeitmesskreise mit den einzelnen APDs. Bei der Messung der Laserpulslaufzeit reagieren die APDs innerhalb von 100 ps und ermöglichen so eine ausgezeichnete Präzision im Range-Bereich (ITZLER et al. 2010).
- **Hohe Detektions-Sensitivität und -Effizienz** – Derzeit verfügbare GmAPD Elemente weisen eine Photonendetektionseffizienz von bis zu 40 % auf. Dies bedeutet, dass ein reflektierter Puls aus lediglich 5 bis 10 Photonen bestehen muss, damit er mit hoher Wahrscheinlichkeit erfasst wird – eine Größenordnung weniger im Vergleich zu linearen Detektoren. Zusätzlich steigern Mikro-Linsen den effektiven Detektor-Füllfaktor auf ~ 75 %. Damit wird sichergestellt, dass jedes einfallende Photon effizient detektiert wird (ITZLER et al. 2010).
- **Kompakte Detektoren** – Da GmAPD-Detektorelemente keine analogen Verstärkungsschaltungen benötigen, können kompakte LiDAR-Detektorfelder mit hohen Abtastdichten produziert werden.

Dank dieser drei Eigenschaften können GmAPD-Sensoren schneller, höher und mit größeren Schwadbreiten geflogen werden – ohne Abstriche bei der vertikalen Genauigkeit.

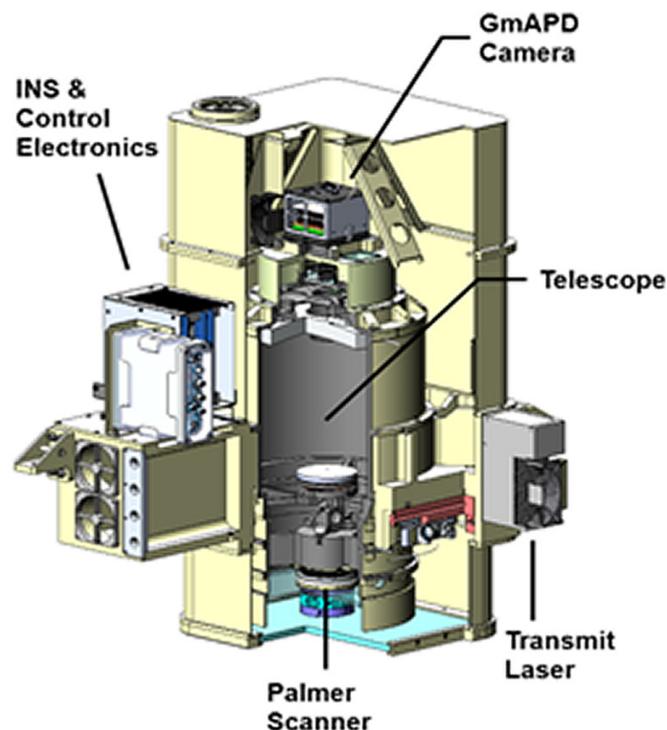


Abb. 1: CAD-Diagramm des Geiger-Mode LiDAR Sensors ITI-1000 (nach SMITH 2015)

### 3 ITI-1000 GmAPD LiDAR-Sensor

Der ITI-1000 GmAPD LiDAR-Sensor (Abb. 1 und Tab. 1) wurde für großflächige Datenakquisitionen mit großen Punktdichten optimiert. Das Konzept sieht den Betrieb in Flughöhen von 4 bis 10 km über Grund vor. Zum Einsatz kommen daher Starrflügelflugzeuge, die mit Druckkabinen ausgestattet sind. Die aufgenommenen Daten müssen mindestens die USGS v1.2 LiDAR-Qualitätsstufe 1 erfüllen, d. h. 8 Punkte/m<sup>2</sup> bei einer Flughöhe von 6 km (HEIDEMANN 2014). Der ITI-1000 nutzt dazu eine gleichachsige Sende- und Empfangseinheit, ausgestattet mit einem 270 mm Palmer Scanner mit 15° Erfassungshalbwinkel.

Tab. 1: Technische Eigenschaften des Geiger-Mode LiDAR Sensors ITI-1000 (nach SMITH 2015)

<b>Flug</b>	
Flughöhe (GND)	4-10 km (6 km nominell)
Fluggeschwindigkeit	280-560 km/h
Schwadbreite	2-5 km (3,2 km nominell)
<b>Palmer Scanner</b>	
Erfassungshalbwinkel	15°
Öffnungsdurchmesser	27 cm
<b>Sendelaser</b>	
Wellenlänge	1064 nm (Klasse IV)
Mittlere Leistung	20 W
Impulsbreite	550 ps
Impulsfolgefrequenz	50 kHz
NOHD / ENOHD	300 m / 2,2 km
<b>GmAPD-Empfänger</b>	
Felddimensionen	32 x 128
IFOV	35 µrad
PDE	30 %
Zeitliche Auflösung	250-500 ps
<b>Abdeckungsrate (mit 50 % Überlappung)</b>	
4 Punkte / m <sup>2</sup>	1100 km <sup>2</sup> /h
8 Punkte / m <sup>2</sup>	1000 km <sup>2</sup> /h
20 Punkte / m <sup>2</sup>	700 km <sup>2</sup> /h

Aufgrund der vorgesehenen Flughöhen sollte der Ausrichtungsversatz zwischen Sende- und Empfangseinheit für eine optimale Überlappung des Sendestrahls mit dem empfangenen Sichtfeld (FOV) elektronisch gesteuert werden können. Für den ITI-1000 wurde die dazu notwendige Technologie entwickelt und zum Patent angemeldet. Des Weiteren ist der ITI-1000 Sensor mit einer automatischen Verschlusssteuerung sowie einem Instrument zur Verfolgung und Kompensation von Mehrfachimpulsen ausgestattet – entscheidende Funktionen bezüglich der operationellen Einsatzflughöhen und Impulsfolgefrequenzen.

Bei der Datenakquisition mit GmAPD-Sensoren erfolgt die Digitalisierung der reflektierten Laserimpulse bereits auf Detektorebene. Daher muss ein anderer Aufnahmeansatz als bei derzeitig linear betriebenen Sensoren verfolgt werden:

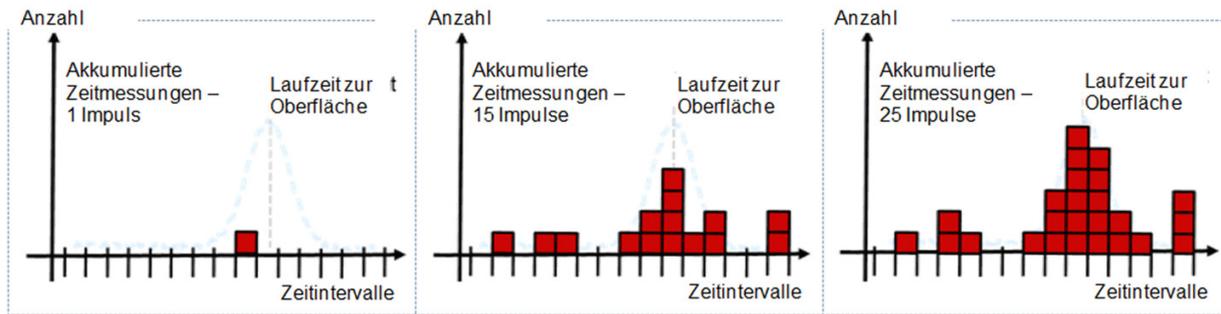


Abb. 2: GmAPD-Sensoren messen die Rangedistanz durch Anpassung der zu erwartenden Impulsform an die akkumulierten Zeitmessungen und Berechnung der gleichen Zeitdifferenz (SMITH 2015)

Auch GmAPD-basierte Systeme berechnen den Range durch eine Laufzeitmessung der Laserimpulse über eine vordefinierte Verschlusszeit. Allerdings werden aufgrund des Binärcharakters der Detektoren Mehrfachimpulse zur Erkennung von Oberflächen in den Daten benötigt. Denn nur durch die Aussendung multipler Impulse innerhalb des gleichen momentanen Sichtfeldes (IFOV) und deren anschließende Akkumulation ist es möglich, eine Oberfläche vom Rauschen zu unterscheiden (Abb. 2). Die Anzahl der emittierten Impulse wird entsprechend der vorgegebenen missionsabhängigen Auflösung und Punktdichte vorprogrammiert.

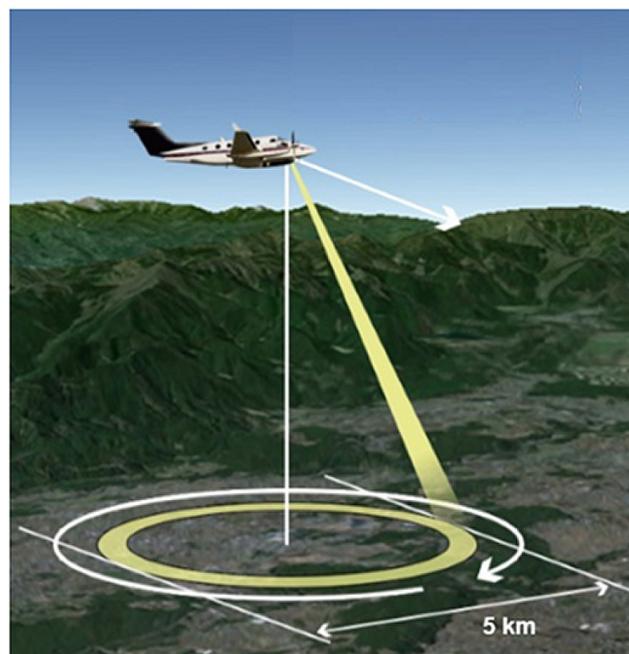


Abb. 3: Aufnahmeprinzip des Palmer Scanner im ITI-1000. Die vorderen und hinteren Scankreise werden während der Prozessierung als einzelne Schwaden behandelt (nach SMITH, 2015)

Für eine optimierte Datenakquisition mit dem ITI-1000 Sensor wurde ein spezielles Aufnahmeverfahren entwickelt (Abb. 3 und 4). Jeder Bodenpunkt wird mit der entsprechenden Impulsfolge in jedem Halbbogen abgetastet. Daraus ergeben sich separate vorwärts- und rückwärts-gerichtete Schwaden. Zusätzlich werden die Flugstreifen unter Berücksichtigung des Rollwinkels mit mindestens 50 % Überlappung ausgerichtet. So wird jeder Bodenpunkt aus vier

verschiedenen Richtungen beleuchtet. Die Daten dieser vier Bögen werden schließlich während der Prozessierung integriert. Dadurch reduzieren sich die Eigenschatten der aufgenommenen Objekte; zudem wird eine höhere Punktdichte erreicht.

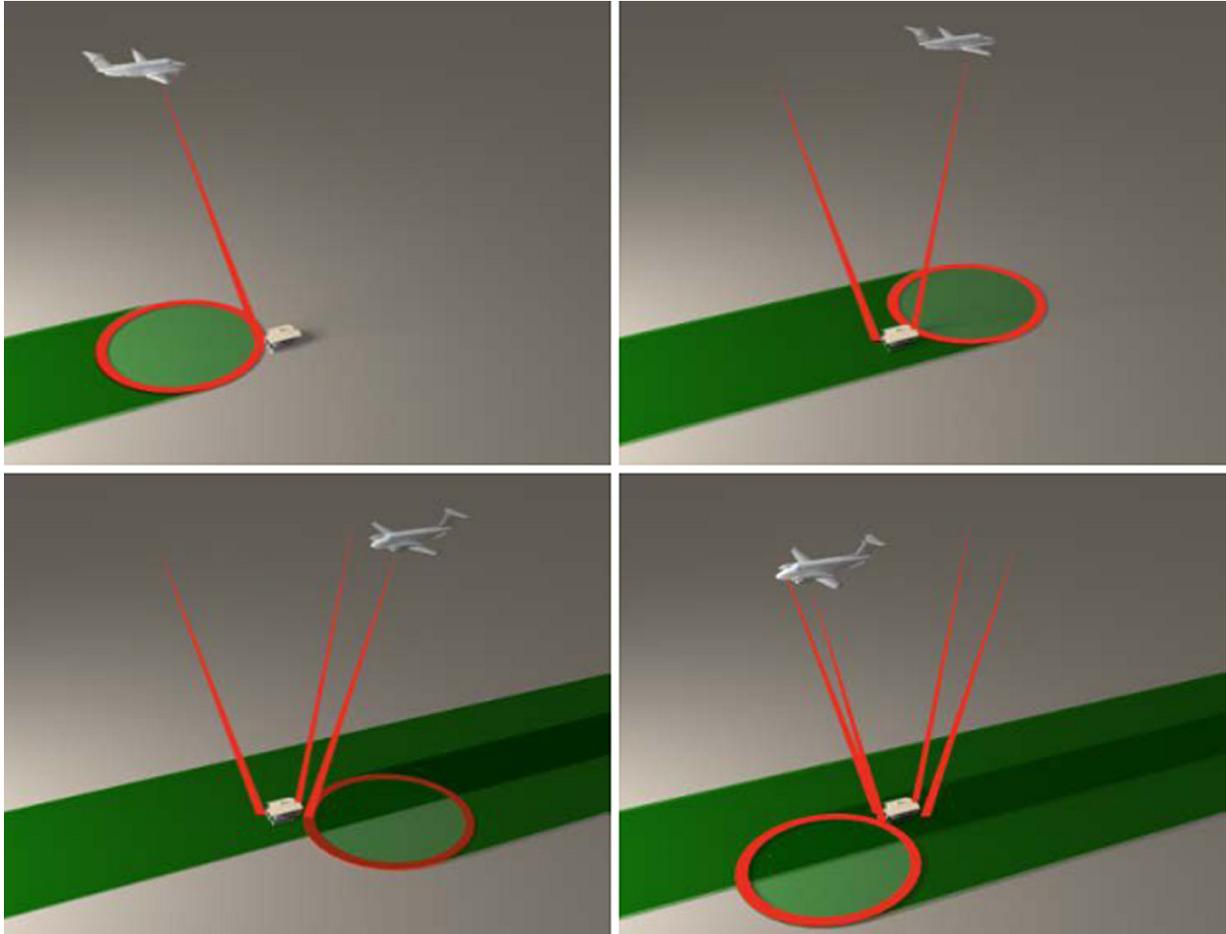


Abb. 4: Aufnahmeprinzip des Palmer Scanner im ITI-1000 mit 50 % Überlappung der Flugstreifen. Jeder erfasste Bodenpunkt wird über vier Kreise und unter vier verschiedenen Winkeln abgetastet (CLIFTON et al. 2015)

#### 4 Großvolumige LiDAR-Datenverarbeitung

Für die Prozessierung großvolumiger LiDAR-Daten aus Akquisitionen des ITI-1000 GmAPD-Sensors zu qualitativ hochwertigen Endprodukten wurde ein automatisierter Arbeitsablauf aufgesetzt (Abb. 5). Die einzelnen Softwarekomponenten für z. B. Sensorkalibrierung, Rauschfilterung oder photogrammetrische Registrierung stammen aus dem Harris-Portfolio. Dabei soll in diesem Beitrag auf zwei wesentliche Verarbeitungsschritte eingegangen werden: die Rauschunterdrückung und die photogrammetrische Registrierung der Punktwolkedaten. Obwohl analoges Verstärkerrauschen kein Problem darstellt, sind GmAPD-Detektorfelder aufgrund ihrer hochsensiblen Erfassungstechnik sehr empfindlich gegenüber Rauschen von anderen Quellen (Abb. 6). Hier dominiert – typisch für alle luftgestützten LiDAR-Systeme – der Anteil solarer Hintergrundsignale. Dieses Rauschen ist bei Tagaufnahmen etwa zwei

Größenordnungen höher als die Dunkel-Zählrate des Instruments (d. h. die Anzahl der Detektionen ohne Lichteinfall) und das Übersprechen zwischen den Detektoren. Das solare Hintergrundrauschen wird durch schmalbandige Interferenzfilter und eine optimierte Verschlusszeit reduziert.

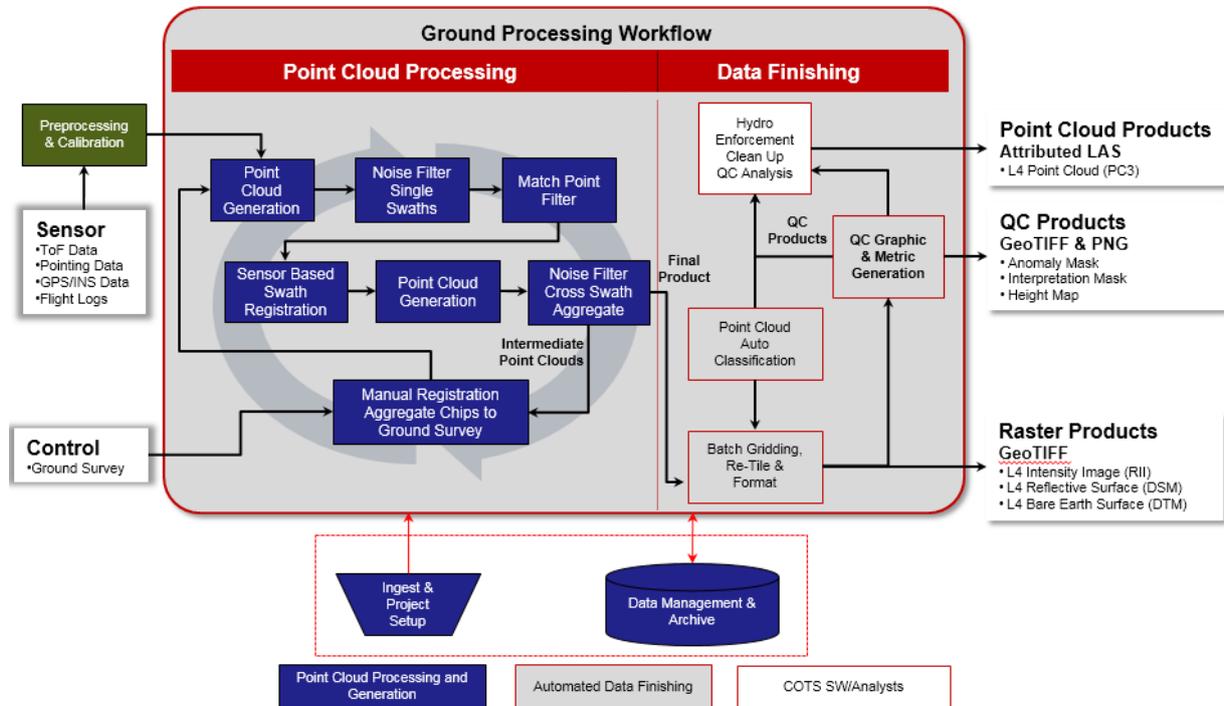


Abb. 5: Automatisierter Arbeitsablauf für die Prozessierung großvolumiger LiDAR-Daten aus Akquisitionen des ITI-1000 GmAPD-Sensors (SMITH 2015)

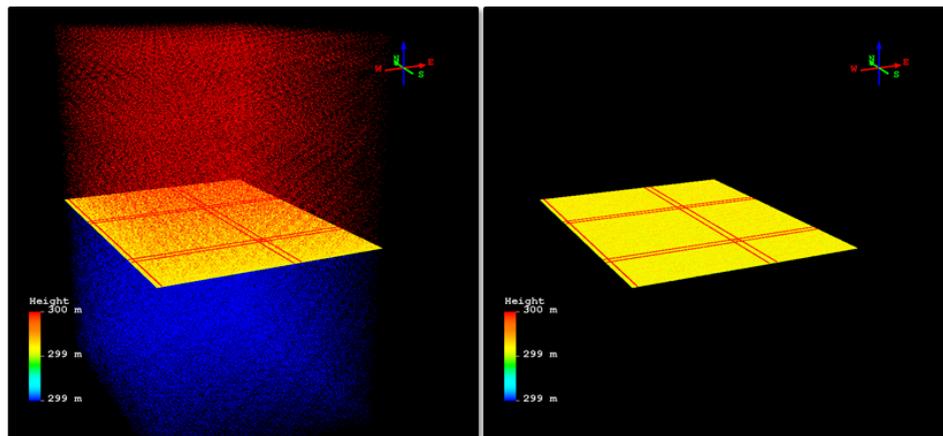


Abb. 6: Aufgrund der Empfindlichkeit von GmAPD-Detektoren weisen die daraus abgeleiteten Punktwolken erhöhtes Rauschen auf (links). Spezielle Filteralgorithmen ermöglichen die Rekonstruktion der Oberflächen (rechts) (SMITH 2015)

Geiger-Mode Sensoren benötigen hochgenaue Flugbahninformationen, da die Punktwolken über die Aggregation multipler Impulse generiert werden. Dazu wurde der ITI-1000 mit Modernster GPS-Technologie ausgestattet. Zusätzlich ist eine echte 3D-Registrierung der Einzelschwaden

(vgl. Kap. 3 und Abb. 3, 4) erforderlich. Hierfür wurde ein Verfahren entwickelt, das auf Basis des Sensormodells einen Bündelausgleich vornimmt (Abb. 7). Die verwendeten photogrammetrischen Registrierungstechniken justieren die Einzelschwaden mittels automatisch erzeugter Verknüpfungspunkte. Bei Bedarf lassen sich Bodenvermessungspunkte (GCPs) in diesen Prozess integrieren.

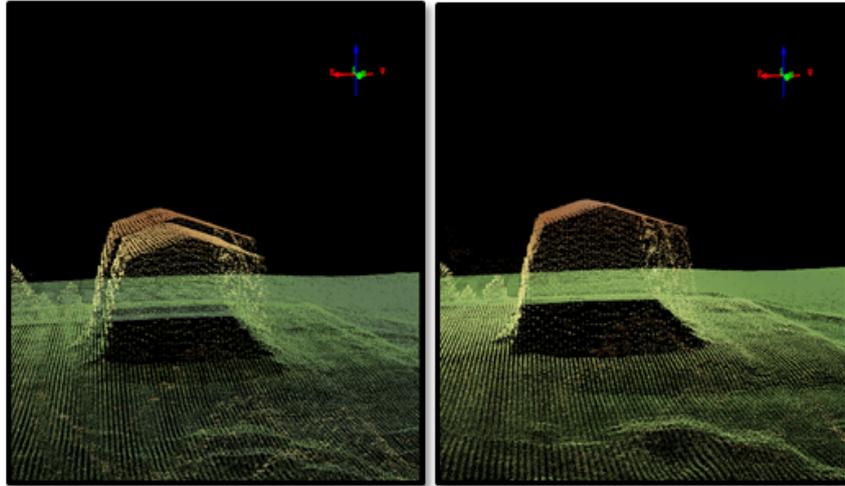


Abb. 7: (Links) Unregistrierte, aus zwei Flugstreifen integrierte GmAPD-Punktwolke. Die fehlerhafte Ausrichtung von Gebäude und Gelände ist vor allem auf Ungenauigkeiten der INS-Flugbahn zurückzuführen. (Rechts) Aggregierte Punktwolke nach vollständigem, sensorbasiertem 3D-Bündelausgleich (SMITH 2015)

## 5 Fallstudie zur Bewertung der GmAPD LiDAR-Daten

STOKER et al. (2016a) untersuchten LiDAR-Daten des Harris GmAPD-Sensors bezüglich ihrer Verwendbarkeit für das „3D Elevation Program“ (3DEP, USGS 2016) des Geologischen Dienstes der USA (USGS). Dafür wurde im September und Dezember 2015 im US-Bundesstaat Connecticut ein ca. 1300 km<sup>2</sup> großes Testgebiet mit dem ITI-1000 Sensor befliegen, bei einer Flughöhe von 7950 m und einer Punktdichte von 25 Punkten/m<sup>2</sup>. Die Referenzdaten wurden in den Jahren 2014 und 2015 mit linear betriebenen LiDAR-Sensoren aufgenommen (z. B. Leica ALS70) und erfüllten die USGS v1.2 Qualitätsanforderungen Q2 (HEIDEMANN 2014).

Die von Harris bereitgestellten, photogrammetrisch kalibrierten LAS Punktwolken (vgl. Kap. 4) wurden von den Firmen Dewberry und Woolpert mit den Softwares Global Mapper, GeoCue, TerraScan, TerraModeler und Microstation ausgewertet.

Der Studie zufolge erfüllten die Geiger-Mode LiDAR-Daten problemlos die Anforderung von 6 cm relativer vertikaler Genauigkeit bei ebenem und leicht hügeligem Gelände („Smooth Surface Repeatability“). Nur bei stark reflektierenden Oberflächen wurden Abweichungen von ~15 cm gemessen (sogenannte „Range Walk“ Effekte), jedoch blieben die Oberflächenformen detailliert erhalten. Die Testergebnisse für die absolute vertikale Genauigkeit sind in Tab. 2 zusammengestellt. Hier entsprechen die Geiger-Mode LiDAR-Daten den Anforderungen der USGS v1.2 Qualitätsstufen Q1 und Q2. Lediglich in Waldgebieten wurde aufgrund des „Leaf-On“ Zustandes während der Datenakquisition der Schwellwert von 29,6 cm überschritten

Allerdings war die Durchdringung des Kronendaches bei den „Leaf-Off“ Daten sehr gut (Abb. 8): aus der Punktwolke wurde eine Bodendichte von 14 Punkten/m<sup>2</sup> abgeleitet. Die aus den Geiger-Mode LiDAR-Daten erzeugten Reflexionsbilder zeigten ähnliche Grauwerteigenschaften wie die Intensitätsbilder der Referenzdaten und erlaubten somit vergleichbare Interpretationen. Im Vergleich von Nacht- und Tagesakquisitionen konnten nur geringe Unterschiede in der Kronendurchdringung bzw. Kronenstruktur nachgewiesen werden. Auch der Rauschanteil wurde durch das solare Hintergrundrauschen nicht wesentlich erhöht – eine Folge der sensorseitigen Rauschunterdrückung und der effizienten Filterung im Rahmen der Datenvorprozessierung (vgl. Kap. 4).

Tab. 2: Test der absoluten Genauigkeit des ITI-1000 (Flughöhe 7950 m) mit Einzelpunkten und digitalen Geländemodellen (nach STOKER et al. 2016a)

USGS Spezifikation (nach HEIDEMANN 2014)		
	Vertikale Genauigkeit unbewachsene Flächen (NVA)	Vertikale Genauigkeit bewachsene Flächen (VVA)
Konfidenzkoeffizient 95 %*	≤ 19,6 cm	≤ 29,4 cm
Test 1 – Einzelpunkte aus der Punktwolke		
ITI-1000	17,0 cm	25,6 cm
USGS QL2 Referenzdaten	12,3 cm	19,8 cm
Test 2 – Digitales Geländemodell		
ITI-1000	15,2 cm	92,0 cm
USGS QL2 Referenzdaten	14,6 cm	25,0 cm

\* Minimale Genauigkeitsanforderungen an USGS v1.2 Qualitätsstufen Q1 und Q2.

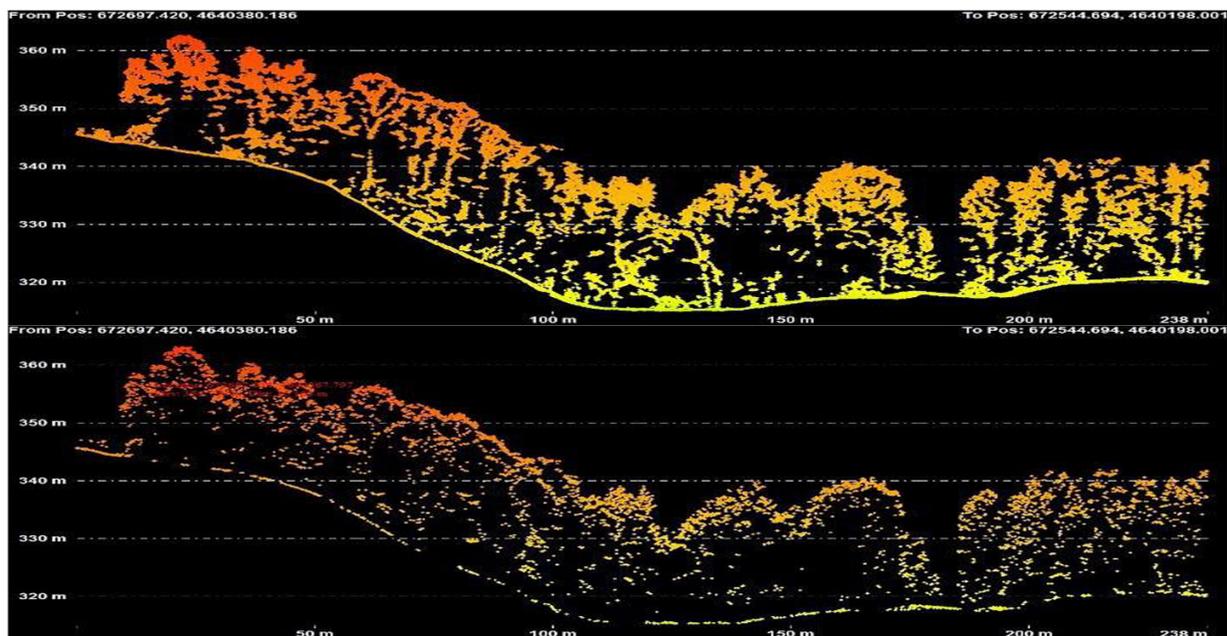


Abb. 8: Profil durch ein Waldgebiet (unbelaubt), aufgenommen mit Geiger-Mode LiDAR (oben, Flughöhe 7950 m) und linear betriebenen LiDAR (unten, Flughöhe 917 m) (STOKER et al. 2016b)

Nicht berücksichtigt wurde in der Studie von STOKER et al. (2016a) die neueste Sensorgeneration mit zahlreichen Verbesserungen, u. a. einem neuen holografischen Element, das eine präzisere Fokussierung und dadurch eine verbesserte Kronendurchdringung ermöglicht.

Auch die Untersuchungen durch FLOOD (2016) zeigen die Fähigkeit von Geiger-Mode LiDAR-Daten, lineare Konstruktionen wie z. B. Versorgungs- und Telefonleitungen auch bei 10-facher Flughöhe detailreich in einer Qualität abzubilden, die visuell den Linear-Mode Vergleichsdaten entspricht (Abb. 9). Dies erlaubt die Extraktion von z. B. Stromleitungen oder Gebäudeumrissen mit herkömmlichen LiDAR-Softwares.

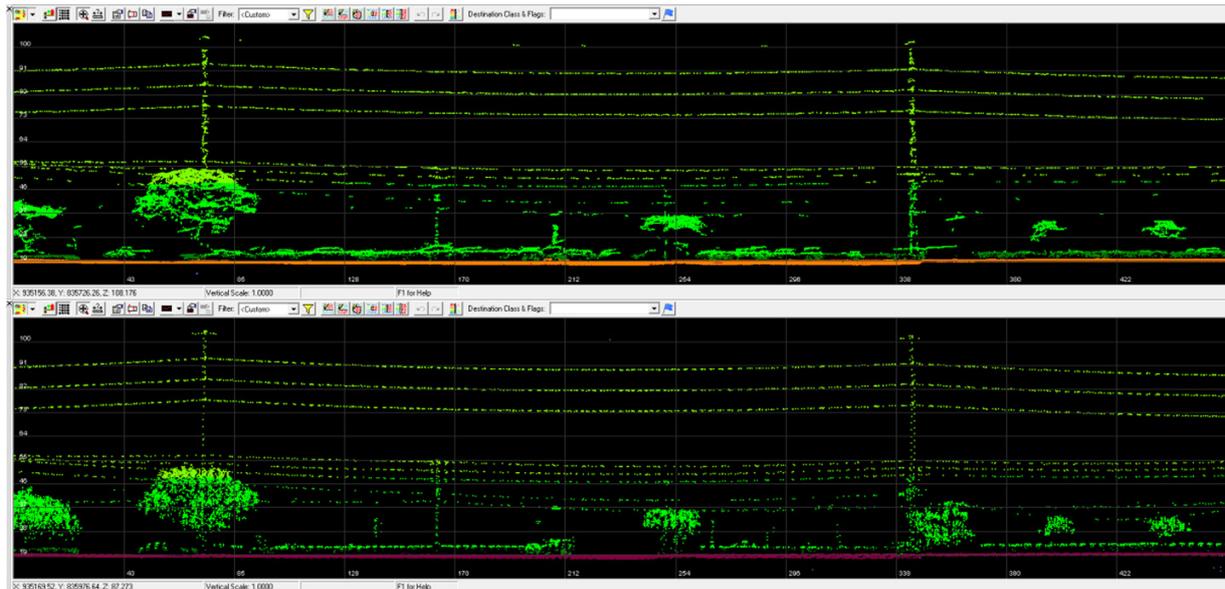


Abb. 9: Versorgungs- und Telefonleitungen in einem Wohngebiet, aufgenommen mit Geiger-Mode LiDAR (oben, Flughöhe 5180 m) und linear betriebenem LiDAR (unten, Flughöhe 518 m) (FLOOD 2016)

## 6 Fazit

Die neuen Harris-Lösungen für Geiger-Mode Avalanche Photodiode (GmAPD) LiDAR umfassen Sensorik, Datenprozessierung und Analytik.

Im Vergleich zu linear betriebenen LiDAR-Systemen können GmAPD-Sensoren wie der ITI-1000 schneller, höher und mit größeren Schwadbreiten geflogen werden – ohne Abstriche bei der vertikalen Genauigkeit. Dies bedeutet eine kostengünstige und hochauflösende 3D-Topographieerfassung. Das zugehörige Breitband-Produktionssystem reduziert trotz erhöhter Präzision die Verarbeitungsdauer für GmAPD-Punktwolken. Aus den resultierenden 3D-Punktwolken lassen sich dann mit einer Suite aus automatisierten und manuellen Werkzeugen hochwertige Endprodukte wie z. B. Oberflächen- und Geländemodelle generieren.

Nach 15 Jahren Entwicklung für den Militärssektor bietet Harris diese Technologien nun erstmals und als einziges Unternehmen im kommerziellen LiDAR-Markt an.

Geiger-Mode LiDAR-Daten können schon bald für das „3D Elevation Program“ des USGS genutzt werden, da die 2014 für linear betriebenes LiDAR definierten Qualitätsanforderungen

derzeit überarbeitet werden. Die aktualisierte Version wird dann Parameter enthalten, die sich aus neuen Technologien wie Geiger-Mode LiDAR ergeben.

## 7 Literaturverzeichnis

- CARY, T., 2009: LiDAR Market: Status and Growth Trends. International LiDAR Mapping Forum, Denver, CO.
- CLIFTON W. E., STEELE, B., NELSON, G., TRUSCOTT, A., ITZLER, M. & ENTWISTLE, M., 2015: Medium Altitude Airborne Geiger-Mode Mapping Lidar System. Proc. SPIE **965**, 946506-1 – 946506-8.
- FLOOD, M., 2016: Geiger-Mode LIDAR Workflow Review. <http://support.geocue.com/geiger-Mode-lidar-workflow-review/>
- HEIDEMANN, H. K., 2014: Lidar base specification. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, 11-B4. doi: 10.3133/tm11B4
- ITZLER, M., ENTWISTLE, M., OWENS, M., PATEL, K., JIANG, X., SLOMKOWSKI, K. & FERRAR, J., 2010: Geiger-Mode Avalanche Photodiode Focal Plane Arrays for Three-Dimensional Imaging LADAR. Proc. SPIE **7808**, 78080C-1 – 78080C-14.
- SMITH, P., 2015: High Density, High Volume Point Cloud Production from Airborne Geiger Mode Lidar. International LiDAR Mapping Forum, Denver, CO.
- SMITH, P. W. & CLIFTON, W., 2012: An Overview of ALS Technology: Geiger-Mode LIDAR. RENSLOW, M. (Hrsg.), Manual of Airborne Topographic LIDAR, Bethesda, MD, ASPRS, 91-96.
- STOKER, J. M., ABDULLAH, Q. A., NAYEGHANDI, A. & WINEHOUSE, J., 2016a: Evaluation of Single Photon and Geiger Mode Lidar for the 3D Elevation Program. Remote Sensing **8**(9), 767.
- STOKER, J. M., ABDULLAH, Q. A. & NAYEGHANDI, A., 2016b: Geiger Mode and Single Photon Counting Evaluation. [https://calval.cr.usgs.gov/wordpress/wp-content/uploads/GM-SPL-evaluation\\_JACIE2016\\_v3.pdf](https://calval.cr.usgs.gov/wordpress/wp-content/uploads/GM-SPL-evaluation_JACIE2016_v3.pdf)
- USGS, 2016: 3D Elevation Program (3DEP). <https://nationalmap.gov/3DEP/>