

Mobiles Laser Scanning:

Technologische Fortschritte bei der Datenakquisition

PETER RIEGER¹, NIKOLAUS STUDNICKA¹, MARTIN PFENNIGBAUER¹, GERALD ZACH¹,
ANDREAS ULLRICH¹

Zusammenfassung: Das einzigartige Leistungsmerkmal moderner Laserscanner, die digitale Signalverarbeitung in Echtzeit („online waveform processing“), kommt bei deren Einsatz im mobilen Laser Scanning (MLS) optimal zur Anwendung. Mit 600.000 Pulslaufzeit-Entfernungsmessungen pro Sekunde ermöglicht das RIEGL VMX-250 MLS-System die Erfassung hochauflösender 3D Geodaten von hoher Genauigkeit bei üblicher Fahrgeschwindigkeit im Straßenverkehr. Mehrzielfähigkeit am neuesten Stand der Technik erlaubt es Laubwerk, Zäune und anderen Hindernisse zu durchdringen. Das Auslesen der kalibrierten relativen Reflektivität gestattet eine entfernungsunabhängige grau-kodierte Strukturierung von z.B. Fassaden und die automatische Erfassung von retroreflektierenden Verkehrszeichen, ebenso unabhängig von der Entfernung. Daten aus dem Feldeinsatz belegen die Genauigkeit der Kalibrierung und die hohe Qualität der georeferenzierten Punktwolke.

1 Einführung

Mobiles Laser Scanning (MLS) ist eine junge Technologie mit rasch wachsender Bedeutung für das gesamte Vermessungswesen. Die zügige Datenerfassung von einer beweglichen Plattform aus bietet im Vergleich zum konventionellen terrestrischen Laser Scanning (TLS) auf den verschiedenen herkömmlichen und auch neuen Anwendungsgebieten bemerkenswerte Vorteile. Laserscanner-Hersteller und Systemintegratoren sind sich des wachsenden Bedarfs an MLS-Systemen durchaus bewusst.

RIEGL trägt dem mit der Entwicklung und Markteinführung des RIEGL VMX[®]-250 MLS-Systems Rechnung, mit dem der Zeitaufwand für Integration, Inbetriebnahme und Daten-Nachbearbeitung auf ein Minimum reduziert wird. Das Gesamtsystem besteht aus zwei zueinander kalibrierten Laserscannern, einem Trägheitsnavigationssystem gekoppelt an ein globales Satellitennavigationssystem und entsprechender Software. Das VMX-250 kann mittels einer durchdachten Montagekonstruktion bequem auf jeden Dachgepäckträger montiert werden. Die in sich geschlossene Kalibrierung der einzelnen Subsysteme bleibt auch bei einer Demontage des Gesamtsystems (z.B. während des Transports) erhalten.

Es folgt ein Überblick über den Systemaufbau, die Spezifikationen und die Systemtechnik. Die angeführten Messergebnisse untermauern die erstklassige Qualität der erfassten Messdaten. Messgenauigkeit, Systemkalibrierung und Mehrzielfähigkeit werden anhand unterschiedlicher Beispieldaten analysiert.

1) alle Autoren:

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 3580 Horn, Österreich, E-Mail: office@riegl.co.at

2 Beschreibung *RIEGL VMX-250*



Abb. 1: *RIEGL VMX-250* Mobile Laser Scanning System montiert am Vermessungsfahrzeug.

Das VMX-250 besteht aus zwei *RIEGL VQ-250* 2D-Laserscannern, einem inertialen Navigationssystem (INS) in Kombination mit einem globalen Satellitennavigationssystem (GNSS), welche die INS-GNSS Einheit bilden, sowie dem in einem portablen Koffer eingebauten Bordcomputer. Die INS-GNSS Einheit umfasst die Elektronik für kinematische Datenverarbeitung in Echtzeit (Real Time Kinematic, RTK) und drei Sensoren: den Sensor für das inertielle Lagemesssystem (Inertial Measurement Unit, IMU), den Radsensor (Distance Measuring Indicator, DMI) und einen GNSS Empfänger mit Antenne. Die Scanner und die INS-GNSS Einheit sind mechanisch fix aneinander gekoppelt auf bzw. in einer stabilen Montagevorrichtung befestigt, die z.B. wie in Abb. 1 dargestellt am Dachträger eines Fahrzeugs montiert wird. Ein einziges Kabel verbindet die Aufnahmeplattform mit der kompakten Steuereinheit im Auto, welche in einem Koffer Platz findet. Diese beinhaltet Stromversorgung, einen Computer mit der Software RiACQUIRE, Wechselfestplatten zur Datenspeicherung und einen handlichen Touchscreen mit einem bequemen Steuerinterface für den Bediener (Abb. 2). Beide Laserscanner werden während der Vermessung synchron betrieben und erfassen so dreidimensionale Daten mit der doppelten Messrate eines einzelnen Scanners.

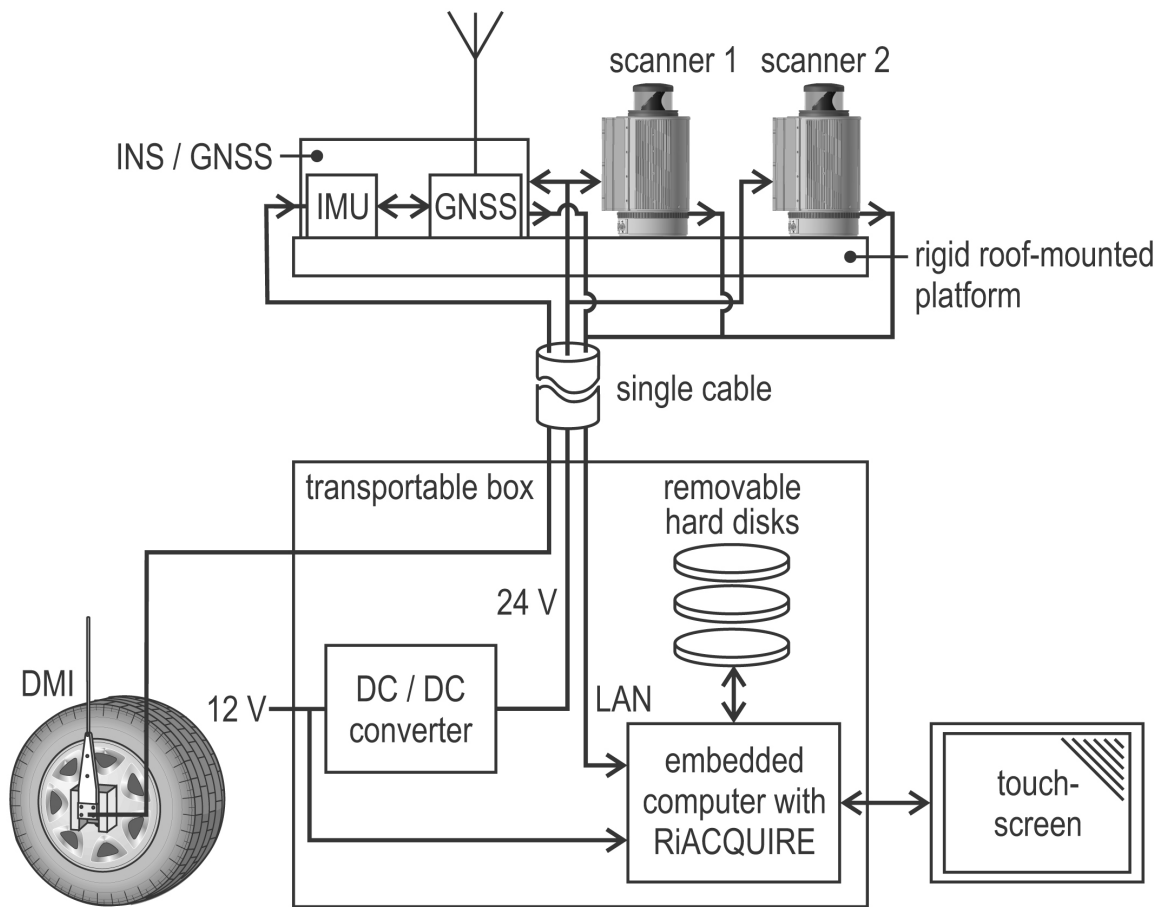


Abb. 2: Blockdiagramm *RIEGL* VMX-250 Laser Scanning System.

Der „Full-Circle“ Laserscanner *RIEGL* VQ-250 ist ein extrem schnelles Profilmessgerät auf Basis eines infraroten Laserstrahls mit geringem Öffnungswinkel und eines schnellen Linienscan-Mechanismus. Der mechanische Aufbau des Scanners ermöglicht eine gleichförmige und zugleich lückenlose 360-Grad-Ablenkung des Laserstrahls. Der *RIEGL* VQ-250 ist kompakt und leicht, kann wahlweise stehend oder liegend und auch auf engstem Raum montiert werden. Seine Eckdaten sowie eine Abbildung sind in Tabelle 1 zu finden.

Herausragende Messleistung und ausgezeichnete Mehrzielauflösung selbst unter widrigen atmosphärischen Bedingungen werden durch die leistungsstarke Laserpuls-Laufzeitmessung, basierend auf *RIEGLs* bewährter Echosignalverarbeitungstechnologie mit Waveform-Analyse in Echtzeit erzielt.

Tab. 1: Spezifikationen *RIEGL* VQ-250 Laserscanner

 <i>RIEGL</i> VQ-250 Laserscanner	Effektive Messrate	50 bis 300 kHz
	Max. Messreichweite	500 m @ $\rho \geq 80\%$ und 50 kHz 75 m @ $\rho \geq 10\%$ und 300 kHz
	Max. Anzahl der Ziele pro Messung	Praktisch uneingeschränkt
	Genauigkeit	10 mm
	Präzision	5 mm
	Laserklassifizierung	Laserklasse 1
	Scanwinkelbereich (einstellbar)	Bis zu 360° „Full Circle“, lückenlos
	Scangeschwindigkeit (einstellbar)	Bis zu 100 Scans/Sek.
	Gewicht	Ca. 11 kg

3 VMX-250 Technologie

3.1 „Waveform“-Datenverarbeitung in Echtzeit

Digitale Echosignalverarbeitung ist die technische Voraussetzung für „Full Waveform“-Analyse und Mehrzielfähigkeit, welche sich im Airborne Laser Scanning bereits seit einigen Jahren bewährt hat (ULLRICH 2005). Dabei werden die digitalen Echosignale während eines Fluges gespeichert und im Anschluss daran prozessiert. Obwohl dies eine differenzierte Objektklassifizierung sowie die Kalibrierung des Reflexionsgrades (BRIESE 2008) ermöglicht, ist dieser zusätzliche zeitaufwändige Arbeitsschritt bei typischen TLS-Anwendungen inakzeptabel. Für die terrestrischen, luftgestützten und mobilen Laserscanner der V-Line[®] hat *RIEGL* eine zukunftsweisende Methode der Echosignalverarbeitung in Echtzeit entwickelt. Wann immer ein möglicher Zielechopuls erkannt wird, werden die geschätzte Pulslaufzeit und Amplitude in Echtzeit ermittelt, indem die abgetasteten digitalen Signale mit gerätespezifischen Referenzpulsen verglichen werden. Das ermöglicht höchst genaue Messresultate über den gesamten Aussteuerungsbereich des Gerätes. Durch die effiziente und hardwareorientierte Implementierung von entsprechenden Algorithmen können die Scanner etwa bis zu 1,5 Millionen Entfernung- und Amplitudenmessungen pro Sekunde ausführen.

3.2 Präzision

Durch Anwendung der beschriebenen „Waveform“-Bearbeitung in Echtzeit werden Messresultate von sehr hoher Präzision, d.h. mit sehr geringem Entfernungsrauschen, erzielt. Wir unterscheiden zwischen der maximalen Abweichung voneinander unabhängiger Entfernungsmessergebnisse eines einzelnen Scanners und jener des VMX-250 Systems, welches die Messungen der beiden zueinander kalibrierten Scanner miteinander kombiniert.

3.2.1 Präzision eines einzelnen Scanners bei Messung auf ebene Oberflächen

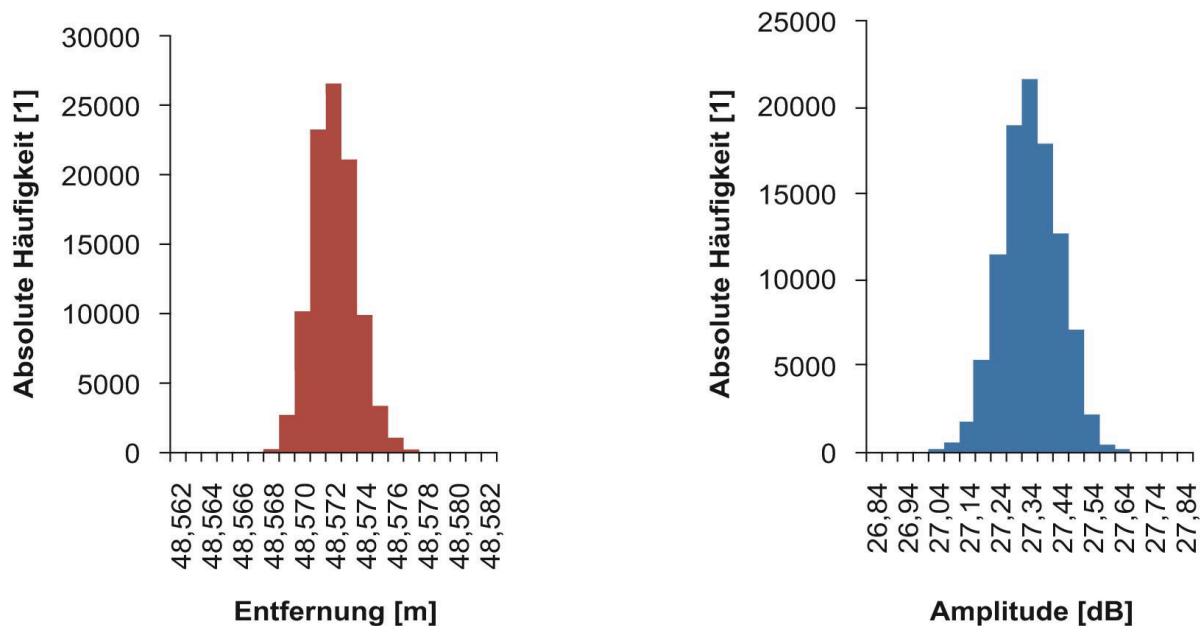


Abb. 3: Absolute Häufigkeit von Entfernungs- und Amplitudenergebnissen bei 100.000 aufeinander folgenden Messungen auf ein weißes, diffus reflektierendes Ziel in ca. 50 m Entfernung.

Um die Punkt-zu-Punkt-Wiederholgenauigkeit der Entfernungs- und Amplitudenmessung des einzelnen Laserscanners zu demonstrieren, wurde ein VQ-250 Laserscanner auf ein diffus reflektierendes Ziel in 50 m Entfernung gerichtet. 100.000 aufeinander folgende Einzelmessungen wurden aufgezeichnet und analysiert. Die Standardabweichung der Entfernungs-messungen (1-Sigma-Entfernungsrauschen) liegt bei nur 1,5 mm, wobei die Standardabweichung der Amplitudenmessungen kleiner als 0,1 dB ist. Die Gesamtentfernungsabweichung (min – max) einschließlich aller Ausreißer beträgt weniger als 20 mm, während die Gesamtamplitudenabweichung unter 1 dB liegt. Die entsprechenden Histogramme sind in Abb. 3 dargestellt.

3.2.2 Präzision des VMX-250 bei Messung auf ebene Oberflächen (einmalige Vorüberfahrt)

Abb. 4 zeigt die hohe Präzision des *RIEGL* VMX-250. Auf einer aufgespannten Werbeplane mit ca. 32 m² Fläche, welche sich in einer mittleren Entfernung von 20 m zum bewegten Scanner befand, wurden etwa 6.000 Punkte (in grün dargestellt) ermittelt. Beschreibt man die ausgewählten Punkte durch eine ebene Fläche und ermittelt die Standardabweichung der Punkte zu dieser Ebene, so ergibt sich das äußerst geringe Entfernungsrauschen von nur 1,6 mm (1-Sigma-Wert). Eine weitere statistische Analyse zeigt die Verteilung dieser Messungen über dem Reflexionsgrad (rechtes Diagramm oben) als auch der Amplitude (rechtes Diagramm unten). Da die Entfernung über den gesamten Zielbereich variiert, spiegelt auch die Amplitude des Echosignals die Entfernungsabhängigkeit der Messung im Ausmaß von rund 6 dB wider. Im

Gegensatz dazu zeigt die von der Entfernung unabhängige Reflektivität eine Abweichung von nur 3 dB. Diese verbleibende Abweichung der Messwerte ist daher im Wesentlichen auf die tatsächlichen Bereiche unterschiedlicher Reflektivität des Zieles selbst zurückzuführen.

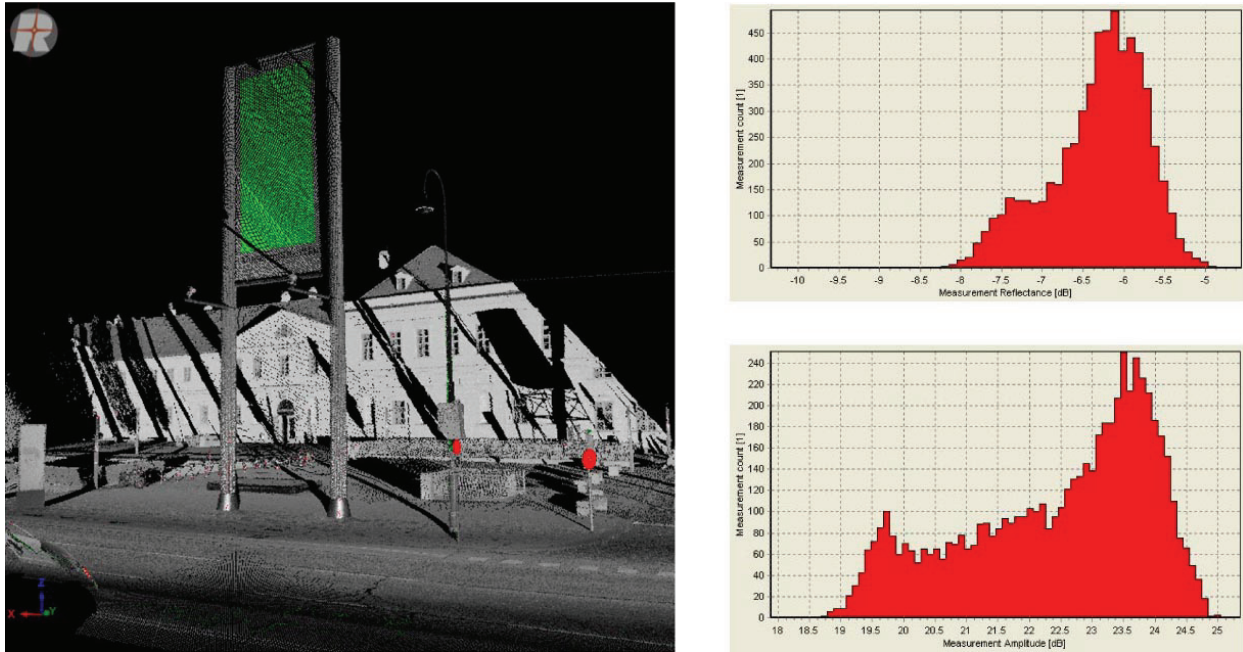


Abb. 4: Links: VMX-250 Punktwolke mit Helligkeitsdarstellung entsprechend der Reflektivität. Grün eingefärbte Punkte sind ausgewählte Punkte, rote Punkte markieren Reflexionsgrade größer als +5 dB. Rechts: Absolute Häufigkeit der ausgewählten Punkte aufgetragen über der Reflektivität (rechts oben) bzw. Amplitude des Echosignals (rechts unten).

3.3 Kalibrierte Amplitude und relativer Reflexionsgrad

Informationen über die Amplitude des Echosignals werden vom Scanner üblicherweise gemeinsam mit jeder Entfernungsmessung bereitgestellt, jedoch wird diese Information normalerweise nicht als Basis für die Ermittlung der tatsächlichen optischen Echopulsamplitude verwendet. Deshalb ist eine zuverlässige Objektklassifizierung und Kalibrierung des Reflexionsgrads nicht einfach zu bewerkstelligen und muss mittels Nachbearbeitung der Daten unter Verwendung von Reflexionsnormalen durchgeführt werden (BRIESE 2008).

Diese Aspekte werden bei den Laserscannern der *RIEGL* V-Line auf elegante Weise berücksichtigt. Sie verfügen über eine streng proportionale Amplitudenausgabe zu einem fixen gerätespezifischen Leistungspegel des Echosignals, wie z.B. der Detektionsgrenze des Gerätes. Für diesen Zweck hat *RIEGL* die ausgelesene Amplitude präzise kalibriert, so dass mit

$$A_{dB} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{echo}}{P_{DL}} \right) \quad (1)$$

für jede Messung eine Amplitude A_{dB} in dB über den gesamten Aussteuerbereich des Gerätes, bezogen auf das Detektionslimit angegeben werden kann. Dabei ist P_{echo} die optische

Spitzenleistung des Echopulses der entsprechenden Messung und P_{DL} die kleinste detektierbare optische Spitzenleistung.

Da diese kalibrierte Amplitude aber auch der grundlegenden Entfernungsabhängigkeit des vom Empfänger erkannten Echosignals unterliegt, ist die Interpretation der Scandaten besonders bei der Kombination von Daten verschiedener Laserscanner und Scanpositionen schwierig. Durch Bestimmung der Entfernungsabhängigkeit der Amplitude anhand einer Normreflektivität $A_{db,ref}$ und durch Vergleich der Echosignalamplituden mit dieser Kurve kann dem Anwender die Kennziffer ρ_{rel} zur Verfügung gestellt werden. Diese repräsentiert den „relativen Reflexionsgrad“, welcher proportional zum logarithmischen Verhältnis des tatsächlichen Reflexionsgrades der Zielfläche und eines rein weißen diffusen Reflektors ist

$$\rho_{rel} = A_{dB} - A_{dB,Ref}(R) \quad (2)$$

Der relative Reflexionsgrad ist somit ein Maß für den absoluten Reflexionsgrad eines Ziels in Bezug auf den Reflexionsgrad des Zieles mit welchem das Gerät kalibriert wurde, nämlich einem standardisierten weißen Ziel mit nahezu 100 % Reflexionsgrad. Dementsprechend wird weißen diffusen Zielen ein Wert um 0 dB und dunkelgrauen diffusen Zielen ein Wert von rund -10 dB zugeordnet, unabhängig davon wie weit das Objekt tatsächlich vom Scanner entfernt ist. Es ist zu beachten, dass dies nur auf Einzelziele zutrifft, nicht aber auf Ziele, die erkannt werden, wenn der Laserpuls in der Folge noch auf eines oder mehrere Ziele trifft oder das Ziel in seiner Ausdehnung kleiner als der Durchmesser des Laserstrahls ist.

Ziele, die eine bessere Richtwirkung als ein Lambert'scher Reflektor besitzen, liefern folglich eine relative Reflektivität größer als 0 dB. Zu diesen Zielen gehören Reflektorfolien, Tripel-spiegel, Autokennzeichen, Verkehrszeichen oder sich spiegelähnlich verhaltende Flächen, wie z.B. Fensterscheiben oder blankes Metall, bei senkrechtem Auftreffen des Messstrahls.

Die Ausgabe der relativen Reflektivität unterstützt sowohl die Veranschaulichung von Scandaten verschiedener Scanner als auch die Objektklassifizierung. Verkehrszeichen, Autokennzeichen und Referenzmarken sind durch ihre retroreflektierende Oberfläche in den aufgezeichneten Daten somit leicht identifizierbar.

3.4 Betrachtungen zur Punktdichte

Beim mobilen Laser Scanning hängt die erzielbare Punktdichte sowie die Punktverteilung von der Messrate des Laserscanners, der Scangeschwindigkeit (oder der Linienscanrate), der Messentfernung und der Fahrgeschwindigkeit ab.

Normalerweise wird eine MLS-Vermessung derart geplant, dass gewünschte Punktdichten und Punktmuster entsprechend den an die Daten gestellten Anforderungen erreicht werden. Diese wiederum hängen von der beabsichtigten Nutzung ab. Beim luftgestützten Laser Scanning wird ein annähernd gleichmäßig verteiltes Punkteraster, zumindest bei der Vermessung flacher Gebiete, üblicherweise von sich aus leicht erreicht und eine gewünschte geringe Änderung kann lediglich durch Variation der Flughöhe und somit der Messentfernung erfolgen. Hingegen liegt es in der Natur der Sache, dass die Punktdichte mobiler Scandaten bedingt durch den weiten Bereich der Messdistanzen stark variiert. Abb. 5 zeigt den Punktabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Entfernungsmessungen einer Scanlinie an einer ebenen Oberfläche in Entfernung r vom Gerät, welcher mit $2\pi LPS/PRR$ gegeben ist. Dabei entspricht LPS der

Scanrate in Linien pro Sekunde und PRR der Laserpulswiederholrate (Pulsrepetitionsrate). Der Abstand zwischen zwei Scanlinien ergibt sich zu v/LPS , wobei v die Geschwindigkeit des Messfahrzeuges ist. Der Kehrwert der Fläche des von diesen beiden Abständen bestimmten Parallelogramms beschreibt die mittlere Punktdichte D

$$D = \frac{\text{LPS}}{v} \cdot \frac{\text{PRR}}{2\pi r \text{LPS}} = \frac{\text{PRR}}{2\pi r v} \quad , \quad (3)$$

angegeben in Punkten pro Quadratmeter, wobei das Resultat unabhängig von der Scanrate ist. Der tatsächliche Punktabstand innerhalb einer Scanlinie ergibt sich aus

$$d = \frac{1}{\text{PRR}} \cdot \sqrt{v^2 + 4\pi^2 r^2 \text{LPS}^2} \quad . \quad (4)$$

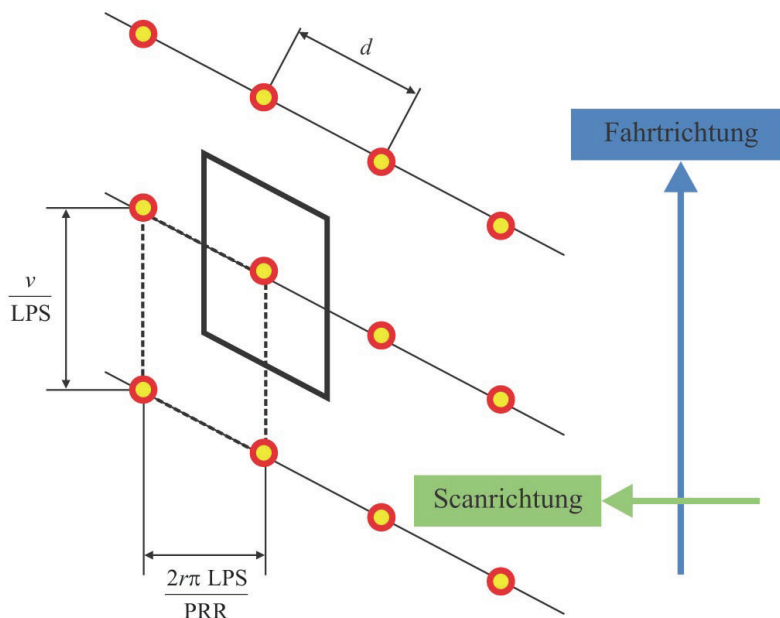


Abb. 5: Schematische Darstellung des Scanmusters auf ebener Oberfläche mit Punktabstand entlang von Scanlinie und Fahrtrichtung.

Meist ist ein regelmäßiges Punktmuster bei einer vorgegebenen Messentfernung gefordert. Der Abstand der Punkte innerhalb einer Scanlinie gleicht somit dem Abstand zweier aufeinander folgender Scanlinien (sprich $d = v/\text{LPS}$). Ein regelmäßiges Punktmuster wird z.B. bei der Darstellung von Fassadenoberflächen gewünscht. Die Scandatenerfassung von weit entfernten Objekten, wie z.B. Stromleitungen, erfordert dagegen eine höhere Punktdichte in der Scanlinie um sicherzustellen, dass der Laserstrahl die Leiterseile auch tatsächlich trifft und so die anschließende Berechnung des Leitungsverlaufs und Durchhangs ermöglicht.

Abb. 6 zeigt die grafische Darstellung der Punktdichte bezogen auf den jeweiligen Messabstand, welche mit dem VMX-250 bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten erzielt wird. Beide Scanner arbeiten mit je 300 kHz Lasertaktfrequenz und liefern somit in Summe 600.000 Laserpulse pro Sekunde.

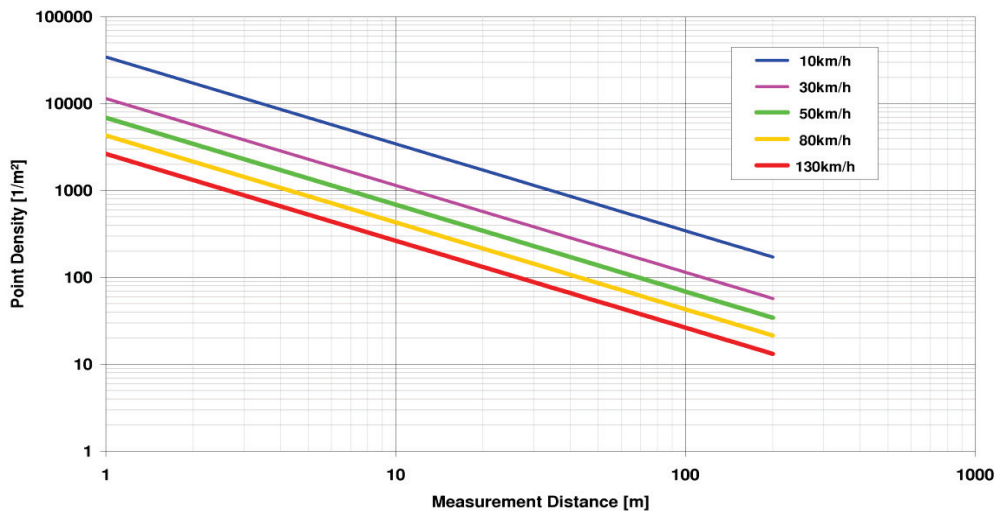


Abb. 6: Punktdichte versus Messabstand in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

Wie bereits vorher angegeben variiert die Punktdichte mit dem Messabstand. MLS-Systeme liefern generell sehr hohe Punktdichten der Straßenoberfläche (dem in den meisten Fällen nächstgelegenen Objekt), was in einer beträchtlichen Datenmenge resultiert. Allerdings ist eine solch hochauflösende Erfassung der Straße in manchen Fällen nicht das vorrangige Ziel. Durch eine gezielte Reduktion der räumlichen Abtastung, bewertet nach linearem Punktabstand und Änderungen des Reflexionsgrades der aufeinander folgenden Messungen, können diese Daten ausgedünnt werden. Die Datenmenge wird somit ohne signifikanten Informationsverlust reduziert. Diese Methode kann in Echtzeit während der Datenaufnahme oder auch in einem ersten Nachbearbeitungsschritt angewendet werden. Durch die Reduzierung der Datenmenge wird auch die Rechenzeit für nachfolgende Bearbeitungsschritte wie Auswertung der Punktwolken oder CAD-Modellierung verkürzt.

3.5 RIEGL VMX-250 Messergebnisse

Um die Leistungsfähigkeit eines VMX-250 Laser Scanning Systems zu demonstrieren, betrachten wir die Punktwolke des Vermessungsdatensatzes von einem Dorf in Niederösterreich, welcher unter guten GNSS-Bedingungen (ausreichende Anzahl an Navigationssatelliten sichtbar) aufgezeichnet wurde. Die Daten wurden beim Befahren der Hauptstraße in entgegengesetzten Richtungen mit jeweils beiden Scannern aufgenommen. Somit wurden die Gebäudeobjekte, u.a. Häuserfassaden, entlang des Straßenzuges in insgesamt vier separaten Scans erfasst. Abb. 7 veranschaulicht die aufgenommenen Daten eines der Gebäude anhand der kombinierten Punktwolke aller vier Scans, wohingegen Abb. 8 die Daten der einzelnen Scans wiedergibt.



Abb. 7: Punktwolke eines Gebäudes, aufgenommen in zwei Vorüberfahrten, und insgesamt einer Kombination von 4 Scans. Die Graustufenwerte resultieren aus der Reflektivität der jeweiligen Oberfläche im Bereich von -25 dB bis +5 dB.

Die Daten wurden mittels der sogenannten Systemkalibrierung (oder „Boresight Alignment“) berichtigt, um die Orientierung der Laserscanner im Koordinatensystem genau festzulegen. Die aufgezeichnete Fahrtroute, die Trajektorie, wird von der INS-GNSS Einheit geliefert. Zusätzlich wird eine ähnliche Vorgehensweise wie beim luftgestützten Laser Scanning (dort bekannt als „Scan Data Adjustment“) angewandt, um die Parameter der Trajektorie beider separater Fahrten in entgegengesetzter Richtung anzugleichen.

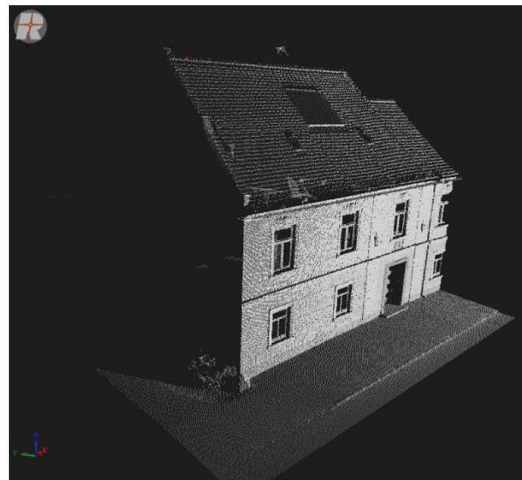
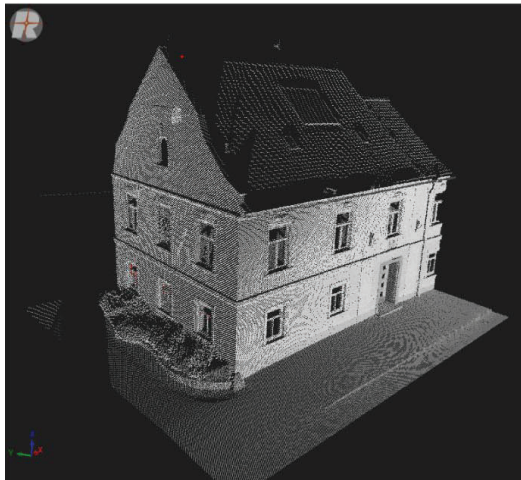
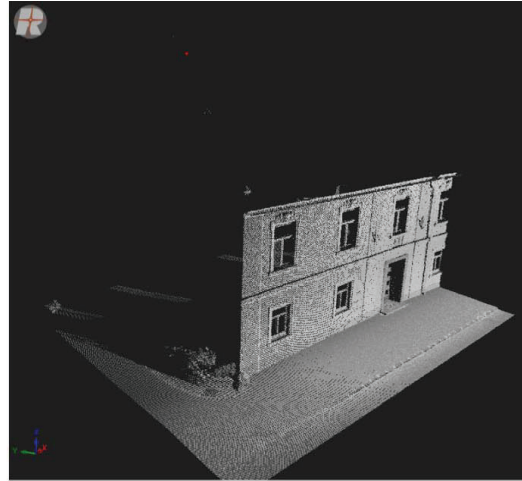
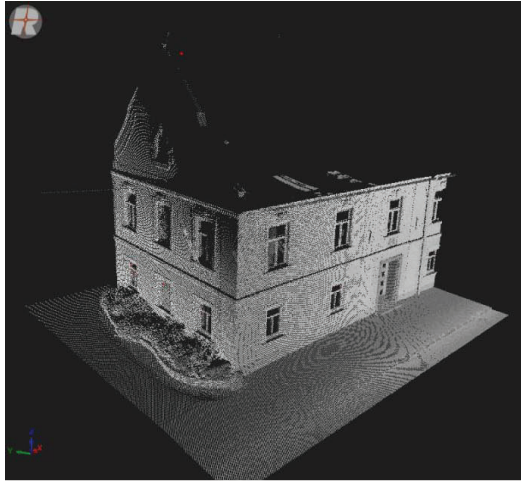


Abb. 8: Punktwolken, aufgenommen in zwei Vorüberfahrten,
 Oben links: Scanner #1 Fahrt 1. Oben rechts: Scanner #2, Fahrt 1.
 Unten links: Scanner #1 Fahrt 2. Unten rechts: Scanner #2, Fahrt 2.

Abb. 8 zeigt augenscheinlich, dass nur Scanner #1 Daten aufnimmt, welche die Fassade im rechten Winkel zur Fahrtrichtung zeigen. Bei Fahrt 1 „blickt“ der Scanner schräg nach hinten, bei Fahrt 2 schräg nach vorne. Im Vergleich zu Fahrt 1 ist bei Fahrt 2 auf der Gegenfahrbahn der Abstand zum Objekt größer, deshalb ist hier auch das Dach sichtbar.

Um die Qualität der Übereinstimmung im Datensatz richtig beurteilen zu können, wurde eine $2 \times 2 \text{ m}^2$ große ebene Fläche der Fassade ausgewählt, wie sie in Abb. 9 eingezeichnet ist. Die korrespondierenden Punkte zugrunde legend wird die Standardabweichung von einer eingepassten Ebene sowohl für die einzelnen Scans als auch für alle vier Scans gemeinsam berechnet. Die Resultate dazu sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Aus der Tatsache, dass die ausgewählte Fassadenfläche aller Voraussicht nach nicht komplett eben ist sondern eine gewisse Rauigkeit aufweist, ergibt sich eine im Vergleich zu den oben genannten Daten leicht erhöhte Standardabweichung. In Summe betrachtet ist der Anstieg der Standardabweichung allerdings nur sehr gering und es können keine merklichen Lücken in den Scandaten erkannt werden.

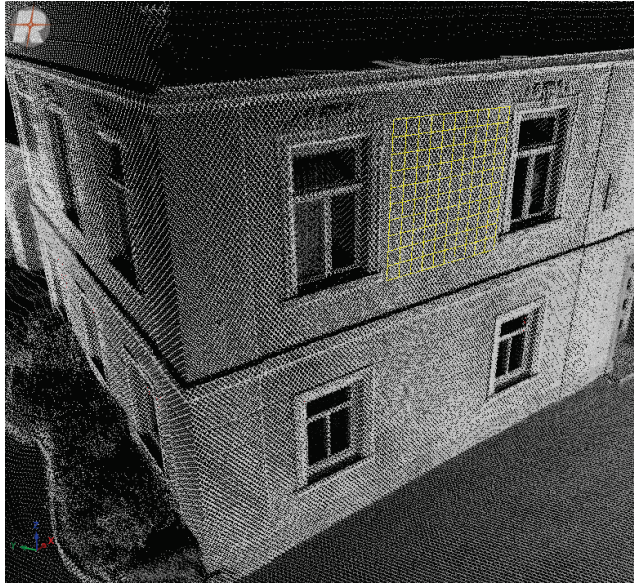


Abb. 9: Als eben angenommene 2x2 m² Fläche einer Fassade des gescannten Gebäudes zur Bestimmung der Standardabweichung der zugehörigen Punkte.

Tab. 2: Überblick über erzielte Standardabweichungen in der ausgewählten Punktwolke für unterschiedliche Kombinationen aus Scannern und Vorüberfahrten.

Scanner	Fahrt	Punkte	Standardabweichung
#1	1	6490	3,4 mm
#2	1	4114	3,2 mm
#1	2	2983	3,1 mm
#2	2	4288	3,3 mm
beide	alle	17875	3,8 mm

Der VQ-250 ist mehrzielfähig, d.h. bei jedem Laserschuss werden alle erfassten Zielechos, die über der Detektionsgrenze liegen, analysiert und mit Koordinaten, Amplitude und zusätzlichen Attributen ausgegeben. Diese Messfunktion ermöglicht es, auch von Zielen, die teilweise durch Vegetation, Zäune, etc. verdeckt sind, Daten zu erfassen.

Abb. 10 zeigt einen Auszug aus einem aufgenommenen Datensatz von einer Stadtautobahn. Die Datenaufnahme erfolgte in zwei separaten Vorüberfahrten in entgegengesetzter Richtung. Der linke Teil von Abb. 10 zeigt eine Flugaufnahme der Autobahn kurz vor der Einfahrt bzw. Ausfahrt eines Tunnels. Im Foto links unten kann eine Fußgängerüberführung ausgemacht werden. Weiters erkennt man eine Lärmschutzwand hinter Bäumen und Büschen entlang des Straßenverlaufes am linken Rand. Das rechte Bild spiegelt die vom VMX-250 gelieferte Punktwolke wieder. Objekte, die im Luftbild von oben erkennbar sind, fehlen in den MLS-Daten, weil die Sicht darauf versperrt ist. Andererseits liefert mobiles Laser Scanning Daten von Flächen, wie dem Inneren des Tunnels oder der Unterseite der Fußgängerüberführung, die für die Luftbildkamera nicht sichtbar sind.



Abb. 10: Datensatz einer Stadtautobahn, aufgenommen mit einer Luftbildkamera (MICROSOFT 2010) (links) und mit dem *RIEGL VMX-250* (rechts).

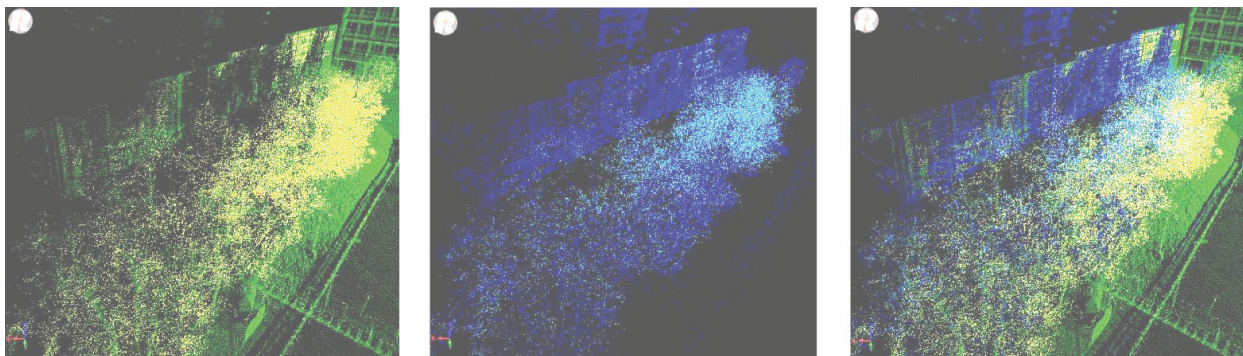


Abb. 11: Punktwolke einer teilweise durch Bäume und Büsche verdeckten Lärmschutzwand. Die Daten stammen aus einer der Vorüberfahrten mit dem VMX-250. Darstellung von Einzelziel- bzw. Erstziel-Daten (links), alle zusätzlichen mit Hilfe der Mehrzielfähigkeit des VQ-250 ermittelten Daten (Mitte) und beide Daten zusammen (rechts).

Ein genauer Blick auf die Laserdaten der Lärmschutzwand, die teilweise von Vegetation verdeckt wird, zeigt die Vorteile der Mehrzielfähigkeit des Scanners. Die aufeinander folgenden Bilder in Abb. 11 visualisieren die entsprechend ihrer Klassifizierung eingefärbten Punkte: Ziele von Lasermessungen mit nur einem einzigen Zielecho sind grün. Wird mehr als nur ein einzelnes Zielecho ermittelt, wird das erste, d.h. das nächstgelegene Ziel, gelb und das letzte, d.h. das am weitesten entfernte Ziel, blau dargestellt. Für den Fall, dass mehr als zwei Ziele ermittelt wurden, werden alle zusätzlichen Zielechos in hellblau eingefärbt.

Eine statistische Auswertung anhand von 240 m^2 der Lärmschutzwand ergibt eine durchschnittliche Punktdichte von 133 Punkten/m^2 unter Berücksichtigung aller ermittelten Zielechos. Zieht man nur jene Daten (Erstziele) in Betracht, die auch ein nicht-mehrzielfähiger Laserscanner ermitteln würde, fiel die durchschnittliche Punktdichte auf nur noch 41 Punkte/m^2 , wodurch beinahe 70 % der Zielechos verloren gehen würden.

4 Literaturverzeichnis

- BRIESE, C., HÖFLE, B., LEHNER, H., WAGNER, W., PFENNIGBAUER, M., ULLRICH, A., 2008: Calibration of full-waveform airborne laser scanning data for object classification, in Proceedings SPIE Laser Radar Technology and Applications XIII, Vol. 6950, 6950H-1 – 6950H-8, Orlando.
- JELALIAN, A.V., 1992: Laser radar systems, Artech House, Boston London.
- RIEGER, P., STUDNICKA, N., PFENNIGBAUER, M., 2008: Boresight alignment method for mobile laser scanning systems, in Proceedings RSPRS, Moskau.
- PFENNIGBAUER, M., ULLRICH, A., 2008: Three-dimensional laser scanners with echo digitization in Proceedings SPIE Laser Radar Technology and Applications XIII, Vol. 6950, 6950U-1 – 6950U-8, Orlando.
- ULABY, F.T., MOORE, R.K., FUNG, A.K., 1981: Microwave remote sensing, active and passive. Volume II: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory. Artech House Inc., Norwood.
- ULLRICH, A., REICHERT, R., 2005: High resolution laser scanner with waveform digitization for subsequent full waveform analysis in Proceedings SPIE Laser Radar Technology and Applications X, Orlando, Vol. 5791, 82-88.
- DATASHEET *RIEGL* VZ-400, *RIEGL*, 2010: www.riegl.com.
- DATASHEET *RIEGL* VQ-250, *RIEGL*, 2010: www.riegl.com.
- <http://www.bing.com/maps/?v=2&cp=s0v6nwjbz7q7&scene=29569712&lvl=2&sty=o&where1=Absberggasse%2C%201100%20Wien>, MICROSOFT 2010.