
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Geographisches Institut

3D-LASERSCANNING-PUNKTWOLKEN UND GIS – AKTUELLE ENTWICKLUNGEN

Bernhard Höfle, Andreas Jochem

Zusammenfassung: Die Laserscanning-Technologie – vom Flugzeug oder Boden aus operierend – hat sich in den letzten Jahren zu einer etablierten und weit verbreiteten Methode für die dreidimensionale Erfassung der Erdoberfläche entwickelt. Das primäre Produkt des Laserscannings ist eine unstrukturierte 3D-Punktwolke aller erfassten Objekte und des Bodens. Dieser Beitrag gliedert die Kombinationsmöglichkeiten von GIS und Laserscanning-Software für die Gewinnung von Geoinformation aus der originalen Laserpunktwolke. Anhand von zwei Anwendungsbeispielen – 1) Solarpotenzialanalyse und 2) Vegetationsdetektion – wird die Kombination von GIS-Funktionalität und Punktwolken-Algorithmen im Detail beleuchtet. Es wird aufgezeigt, dass die Analyse der Punktwolke einen wesentlichen Vorteil für viele Fragestellungen gegenüber rasterbasierten GIS-Ansätzen hat, v. a. dort wo vertikale Strukturen (z. B. Hauswände oder Lärmschutzanlagen) oder auch Vegetation untersucht werden. Abschließend wird ein Einblick in die aktuelle und zukünftige Forschung gegeben, die sich mit der Herausforderung der Integration von Laserpunktwolken und den dazugehörigen Analysetools in serviceorientierte Architekturen im GeoWeb beschäftigt.

Schlüsselwörter: Laserscanning, GIS, Punktwolke, Objekterkennung, GeoWeb

3D LASER SCANNING POINT CLOUDS AND GIS – CURRENT DEVELOPMENTS

Abstract: In recent years laser scanning has evolved into an established and widely-used method for the three-dimensional acquisition of the Earth surface. The primary product of laser scanning is an unorganized 3D point cloud of the scanned objects and the underlying ground surface. This paper gives an overview of possible combinations of GIS and laser scanning software in order to extract valuable geoinformation from the original laser point cloud. Based on two specific examples – 1) solar potential analysis and 2) vegetation detection – the combination of GIS functionality and point cloud algorithms is investigated in detail. It is shown that point cloud analysis has major advantages for a great variety of applications compared to raster-based GIS approaches, particularly for the investigation of vertical structures (e. g. building walls and noise barriers) as well as vegetation. Furthermore, insight is given into current and future research challenges dealing with the integration of laser scanning point clouds and respective analysis tools in service-oriented architectures of the GeoWeb.

Keywords: Laser scanning, GIS, point cloud, object detection, GeoWeb

Autoren

Jun.-Prof. Dr. Bernhard Höfle
Dr. Andreas Jochem
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Geographisches Institut
Lehrstuhl für Geoinformatik
Berliner Straße 48
D-69120 Heidelberg
E: hoefle@uni-heidelberg.de
jochem@uni-heidelberg.de

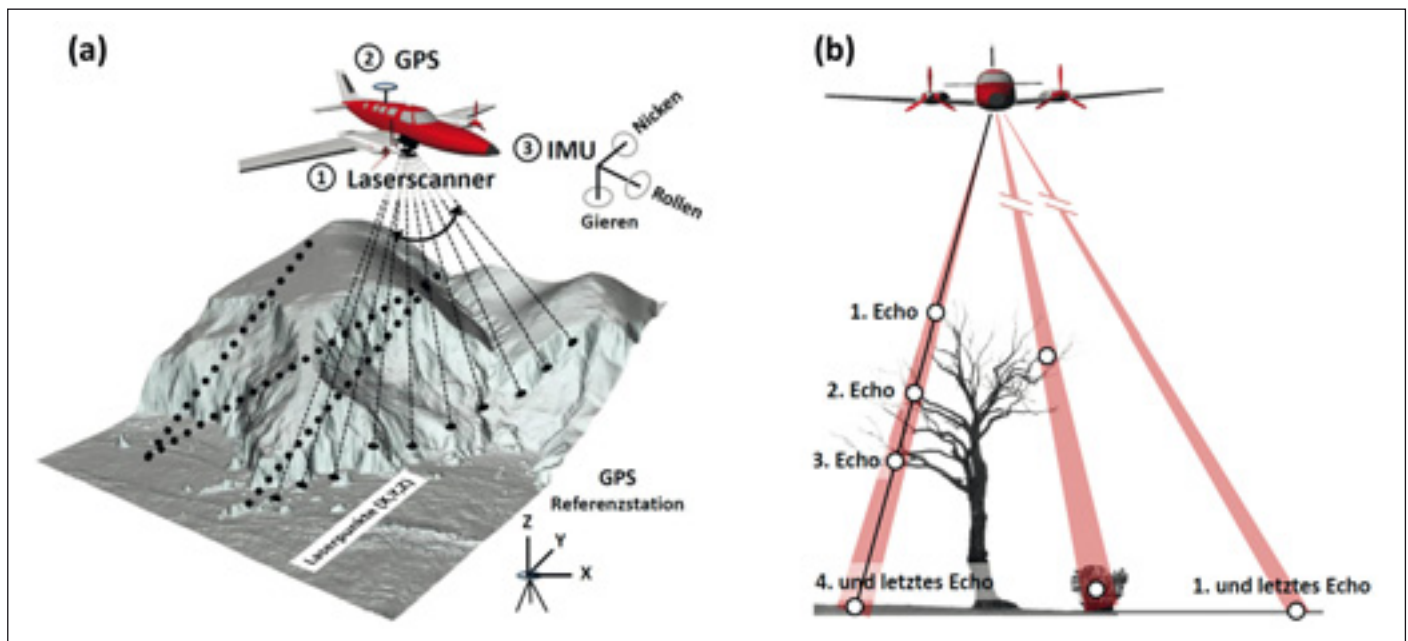


Abbildung 1: a) Messprinzip und Komponenten des Airborne Laserscannings; b) Erfassung mehrerer Lasermesspunkte (Echos) für einen Laserschuss (verändert nach Höfle & Rutzinger 2011)

1 EINLEITUNG

Laserscanning (LS) hat sich innerhalb der letzten Jahre zu einem operationell einsetzbaren Verfahren zur Ableitung hochauflösender 3D-Information entwickelt. Die geometrische Information der abgetasteten Fläche wird dabei mittels Lichtimpuls-Laufzeitmessung erfasst. Das LS-System registriert die ausgesandten Lichtimpulse, welche von einem Objekt reflektiert werden. Die Zeit zwischen ausgesandten und empfangenen Lichtimpulsen wird als Maß für die Entfernung zwischen Sensor und Objekt herangezogen. Man unterscheidet generell zwei Arten von LS-Systemen: 1) fest installierte, bodengestützte Systeme (Terrestrisches Laserscanning, TLS) und 2) mobile, sich fortbewegende Systeme, welche auf mobilen Plattformen wie Flugzeugen/Hubschraubern (Airborne Laserscanning, ALS) oder bodengestützten Fahrzeugen (Mobile Laserscanning, MLS) angebracht sind. Bei beiden Arten von Sensoren wird die geometrische Information der gescannten Oberfläche in Form einer 3D-Punktwolke (XYZ-Koordinaten) gespeichert. Neben der geometrischen Information werden für jeden Punkt noch weitere Attribute, wie zum Beispiel die Stärke des reflektierten Laserschusses erfasst. Genauere Informationen über Laserscanning und die verschiedenen Anwendungsgebiete dieser Technologie finden sich z. B. in Shan & Toth (2008) und Vosselman & Maas (2009). Die Er-

fassung einer 3D-Punktwolke mit einem ALS-Multisensorsystem ist exemplarisch in Abbildung 1a dargestellt.

Die aufgezeichneten Distanzmessungen eines jeden reflektierten Laserimpulses werden als *Echos* bezeichnet. Wie Abbildung 1b zeigt, ist es mit einigen LS-Systemen möglich pro Lichtimpuls mehrere *Echos* zu registrieren. Eine sogenannte *Multi-Echo-Aufzeichnung* ist vor allem in bewachsenen Gebieten oder zum Beispiel an Haus- und Dachkanten der Fall, wo nicht der komplette Lichtimpuls reflektiert wird, sondern ein Teil des ausgesendeten Lichtkegels von darunter bzw. dahinter befindlichen Objekten reflektiert und vom Sensor erfasst wird. Wiederum andere Systeme zeichnen das rückkehrende Signal nicht in einzelnen *Echos*, sondern die gesamte reflektierte Energie als Kurve (engl. *full-waveform*) auf (Mallet & Bretar 2009). Der Einsatz von Zerlegungsverfahren (Dekomposition) erlaubt es, die *full-waveform* in einzelne *Echos* zu unterteilen und ebenfalls in Form einer georeferenzierten 3D-Punktwolke abzuspeichern (Wagner et al. 2006).

Die Verwaltung, Verarbeitung und Analyse der enormen Punktdaten (z. B. $>10^9$ Laserpunkte für 100 km²) stellen große Herausforderungen an die einzusetzende Software. Eine Prozessierung der 3D-Punktdaten in gewöhnlichen Geoinformationssystemen (GIS) ist meist nur durch eine Konvertierung der 3D-Punktwolke in ein

2,5D-Rasterformat möglich. Eine solche Konvertierung ist jedoch mit einem irreversiblen Verlust der dritten Dimension verbunden, reduziert allerdings die zu verarbeitenden Datenmengen wesentlich. Dadurch können sehr große Untersuchungsgebiete mit relativ geringem Rechenaufwand prozessiert und analysiert werden. Viele GIS-basierte Operationen wie zum Beispiel Berechnung von Neigung und Exposition einer jeden Rasterzelle erfordern räumliche Abfragen innerhalb des Datenmodells und die Hinzunahme der jeweiligen Nachbarzellen. Aufgrund der regelmäßigen Anordnung der Rasterzellen sind die Nachbarn einer jeden Zelle von vornherein klar.

Eine Steigerung der Detailgenauigkeit der jeweiligen Operation ist nur durch Verwendung der originalen 3D-Punktwolke und der damit einhergehenden Verwendung der dritten Dimension möglich. Innerhalb von 3D-Punktwolken können räumliche Abfragen allerdings nur durch Anwendung geeigneter räumlicher Indizierungsmechanismen, wie z. B. Kd-Bäume (Bentley 1975), auf effiziente Art und Weise erfolgen. Dies schränkt die Größe des Untersuchungsgebiets allerdings ein, da eine Prozessierung von indizierten Datensätzen von 3D-Punktwolken im begrenzten Arbeitsspeicher des Computers ausgeführt werden. Erste Ansätze dieses Problem zu umgehen sind zum Beispiel in Mandlbürger et al. (2009), Mandlbürger, Briesche et

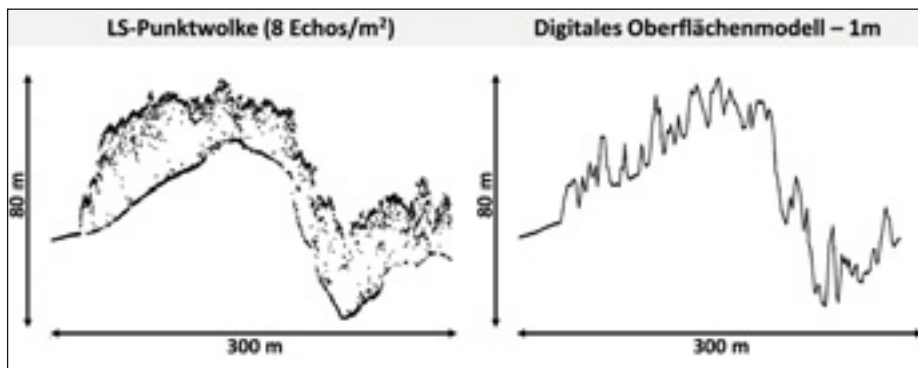


Abbildung 2: Zusätzlich vorhandene 3D-Information der Laserpunktwolke (links) im Vergleich zu dem daraus abgeleiteten 2,5D Digitalen Oberflächenmodell (rechts) (verändert nach Höfle et al. 2006)

al. (2010), Mandlbürger, Otepka et al. (2010) und Jochem et al. (in press) dargestellt.

Bisher existieren nur wenige Systeme, die eine direkte Verarbeitung der 3D-Punktdaten innerhalb eines GIS erlauben. Das Ziel dieses Beitrags ist es, einen Überblick über aktuelle und zukünftige Entwicklungen im Bereich GIS und 3D-Punktdaten theoretisch (Kapitel 2) und praktisch (Kapitel 3) zu geben. Es wird eine Einordnung von Kombinationsmöglichkeiten von GIS und Laserscanning-Software aufgestellt (Kapitel 2) und anhand von zwei Anwendungsbeispielen wird die Kombinationsmethodik im Detail erläutert (Kapitel 3). Zwei ausgewählte Analysen für 1) die Solarpotenzialbestimmung und 2) die Detektion von Stadtvegetation sollen das Potenzial und die neuen Möglichkeiten der GIS-basierten Geoinformationsgewinnung auf Basis von originären 3D-Laserpunktwolken aufzeigen. In Kapitel 4 werden die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen von Laserpunktwolken und GIS im GeoWeb-Kontext erläutert. Der Artikel schließt mit einem zusammenfassenden Fazit im letzten Kapitel.

2 KONZEPTE ZUR KOMBINATION VON GIS UND LASERSCANNING

Hochvolumige 3D-Punktwolken stellen eine besondere Herausforderung für klassische GIS-Desktopprogramme dar. Laserpunkte lassen sich im Grunde sehr gut durch gängige Vektordatenmodelle abbilden, z. B. als Punktobjekt mit XYZ-Koordinaten sowie Attributen. Jedoch sind die zugrunde liegenden Datenstrukturen (z. B. räumliche Indizes), Datenmanagementkonzepte (z. B. Lesen aller Daten eines Layers in den Arbeitsspeicher), Datenformate sowie darauf aufbauende Analyse- und Visualisierungs-

module nicht auf die große Datenmengen und den 3D-Charakter dieser Daten ausgelegt. So sind zum Beispiel eine performante Visualisierung von 3D-Punktwolken oder die Modellierung von 3D-Objekten aus Punktwolken nicht standardmäßig möglich, und 3D-GIS-Analysen auf Basis von 3D-Objekten sind kaum implementiert. 3D-Punktwolken erfordern somit neue bzw. ergänzende Konzepte für die Verwaltung, Analyse und Visualisierung dieser Daten in GIS-Software.

Der bisherige Weg besteht darin die 3D-Punktwolke als ersten Schritt in das Rasterdatenmodell zu überführen, wie z. B. das Digitale Geländemodell (DGM) des Bodens (z. B. ohne Bäume und Häuser) oder das Digitale Oberflächenmodell

(DOM) inkl. aller Objekte. Diese Digitalen Höhenmodelle können dann mit den vorhandenen GIS-Rasteranalysetools weiter prozessiert, analysiert und visualisiert werden. Ein Beispiel für die Ergänzung des GIS um die Rasterisierungsfunktion für sehr große Punktwolken ist in der Open-Source-Software GRASS GIS (GRASS Development Team 2011) mit dem Modul *r.in.xyz* implementiert. Dieses Modul hat keine Einschränkungen was die Datenmenge des Inputs betrifft, kann aber lediglich Werte der Punktwolke für jede Zelle aggregieren und bietet keine Klassifikationsmöglichkeiten für Laserpunktwolken (z. B. Filterung von Nicht-Bodenpunkten). Bei der Überführung der 3D-Punktwolke in ein 2,5D-Rasterdatenmodell kommt es unweigerlich zum Verlust von 3D-Information (vgl. Abbildung 2), v. a. in Bereichen mit hoher vertikaler Höhenvariation (z. B. Vegetation, Hauswände oder Überhänge). Neueste wissenschaftliche Studien haben gezeigt, welches zusätzliche Potenzial in der 3D-Punktwolke steckt und genutzt werden kann, z. B. für die Kartierung und Charakterisierung von Vegetation (Höfle & Hollaus 2010; Mallet et al. in press; Reitberger et al. 2009), die Erstellung von 3D-Gebäudemodellen aus ALS-Daten (Haala & Kada 2010, Jochem et al. in press) und die Extraktion von Objekten aus MLS-Punktwolken (Pu et al. in press; Rutzinger et al. 2011). Daraus

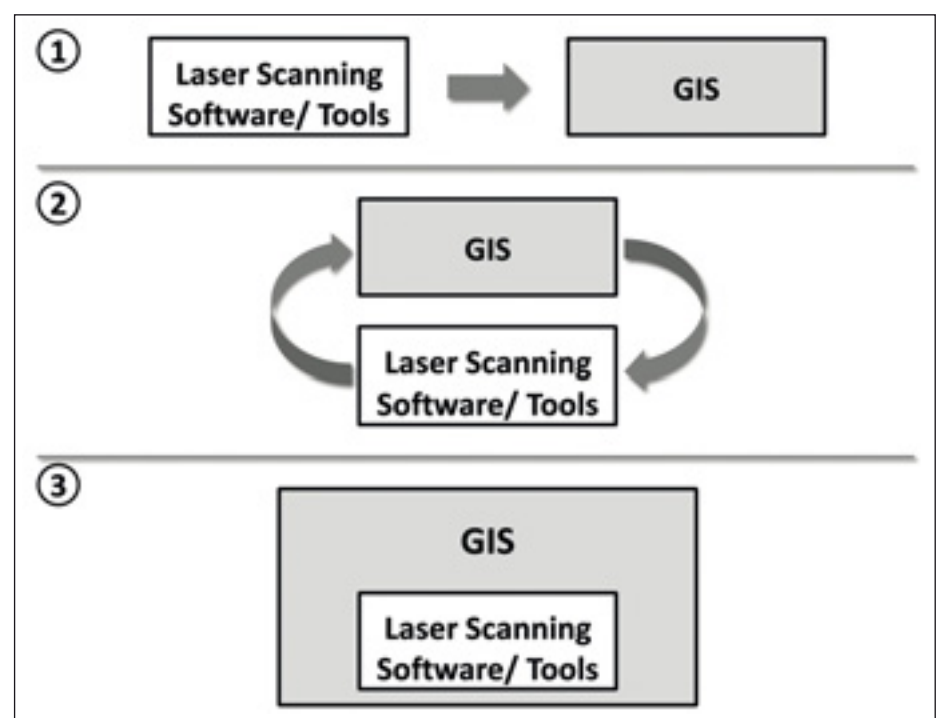


Abbildung 3: Vorwiegende Kombinationsvarianten von GIS- und LS-Software

ergibt sich ein klarer Bedarf und Auftrag, GIS-Software „Punktwolken-tauglich“ zu machen. In den letzten Jahren haben sich mehrere Strategien entwickelt, LS-Punktwolken und GIS-Software zu kombinieren. In Abbildung 3 sind die drei Hauptvarianten exemplarisch aufgezeigt.

Variante 1 zeigt den oben skizzierten Weg der Überführung der Punktwolke in das Rasterdatenmodell mithilfe von Spezialsoftware für die Prozessierung von LS-Punktwolken (z. B. Riegl RiSCANPRO, SCOP++, Terrasolid Pakete). In diesem Ablauf ist keine Adaption und Erweiterung der GIS-Software nötig, da die Standalone LS-Softwarelösungen verbreitete GIS-Datenformate exportieren können. Ein Beispiel für sehr spezifische LS-Software sind die LAStools entwickelt von Martin Isenburg (LAStools 2011). Mit dem LAStool *lasgrid* können Punktwolken in einen Rasterdatensatz (z. B. ASC, TIF, PNG-Format) überführt werden, die dann in GIS-Programmen weiterverwendet werden können.

In Variante 2 werden die Prozessierungsergebnisse der LS-Spezialsoftware im GIS verarbeitet und analysiert und können dann wiederum als Input für die weiterführende Prozessierung in der LS-Software herangezogen werden. Hierfür ist eine gewisse Interoperabilität zwischen den Programmen nötig, was v. a. das Lesen und Schreiben von Geodatenformaten für den Datenaustausch betrifft. Hier kommt vor allem die Bibliothek GDAL (GDAL 2011) zum Einsatz, da die meist verbreiteten Rasterdatenformate unterstützt werden. Viele GIS-Programme, v. a. im Open-Source-Bereich (z. B. GRASS GIS), setzen auf GDAL auf und unterstützen somit das Lesen/Schreiben der kompletten GDAL-unterstützten Datenformate. Ein Beispiel hierfür ist die von der TU Wien entwickelte LS-Software OPALS (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data; vgl. IPF 2011), die es erlaubt aus der rohen Laserpunktwolke, sogar aus full-waveform Sensordaten (vgl. Mallet & Bretar 2009), digitale Rastermodelle in GDAL-unterstützten Formaten zu generieren. OPALS ist eine LS-Software zur automatisierten Datenverarbeitung von den Sensordaten bis hin zu GIS-tauglichen Produkten (z. B. Digitales Geländemodell, Gebäudemodelle). Das modulare Softwarekonzept von OPALS baut auf dem OPALS-Datenmanager auf, der es ermöglicht unlimited große Punkt-

wolken zu verwalten und somit auch verarbeiten zu können (Mandlbürger et al. 2009, 2010b). Komplexe und flexible Workflows werden in OPALS mit Skripting auf Basis der Programmiersprache Python erstellt. Da sehr viele GIS-Programme eine Python Skripting-Schnittstelle haben (z. B. ArcGIS, GRASS GIS, Quantum GIS), eröffnet dies die Möglichkeit LS-Software und GIS-Programme in einem durchgängigen Workflow in einer gemeinsamen Skripting-Sprache (d. h. Python-Skript) zu nutzen. Ergebnisse der LS-Software können im GIS weiterverarbeitet und z. B. mit Vektordatensätzen verschnitten werden, um dann wiederum als Input in der LS-Software genutzt zu werden. Ein Beispiel hierfür ist die Erstellung eines DOM in der LS-Software, die Ermittlung von potenziellen Gebäuden im GIS durch Verschneidung mehrerer Layer und dann die anschließende 3D-Segmentierung und Gebäudemodellierung in der LS-Spezialsoftware (vgl. Höfle et al. 2009). Da GIS- und LS-Software skriptfähig sind, können solche Workflows auch direkt in OGC WPS-Prozessen unter Verwendung von z. B. PyWPS (PyWPS Development Team 2011) abgebildet werden. Dies macht eine verteilte Prozessierung mit komplexen Workflows auf Basis standardisierter Schnittstellen innerhalb einer Geodateninfrastruktur möglich.

Die dritte Variante in Abbildung 3 zeigt die Integration von LS-Funktionalität direkt in ein bestehendes GIS-Programm, was durch eine Erweiterung der Kernsoftware oder über die Ergänzung durch Addons/Extensions gelöst werden kann. Esri ArcGIS 10 unterstützt nativ die Verwaltung von Laserdaten entweder als Terrain- oder Rasterdatentyp in der *Geodatabase* und stellt Basis-Prozessierungstools zur Verfügung (z. B. Konvertierung der Punktwolke in einen Rasterdatensatz mit dem „Point to Raster“ Tool) (vgl. Esri 2011). Weiterführende Laserdatenanalysen wie die Detektion von Objekten (z. B. Gebäude) können jedoch nur über zusätzliche kostenpflichtige Extensions, z. B. den LIDAR Analyst (Overwatch 2011) durchgeführt werden. Im Open-Source-Bereich wird ebenfalls bereits einzelne Funktionalität für die weiterführende Verarbeitung von Laserdaten standardmäßig in GIS-Programmen angeboten. In GRASS GIS ist z. B. ein Workflow zur DGM-Erstellung implementiert und im Standard-Release verfügbar. SAGA GIS hat ei-

nen eigenen *Point Cloud* Datentyp und unterstützt die Visualisierung von Punktwolken (SAGA GIS 2011). Weiterführende Analysen (z. B. Klassifikation von Laserpunkten), wie die Verwaltung landesweiter Datensätze, können über das kommerziell verfügbare Softwarepaket LIS als Erweiterung zu SAGA GIS erworben werden (LIS 2011).

3 ANWENDUNGSBEISPIELE VON LASERPUNKTWOLKEN UND GIS

Um die vorgestellte Einordnung der Kombinationsvarianten zu verdeutlichen, werden in diesem Kapitel zwei Methoden vorgestellt, die GIS- und Laserscanning-Software miteinander auf unterschiedliche Weise kombinieren, mit dem Ziel Geoinformation aus der 3D-Punktwolke zu gewinnen.

3.1 PUNKTWOLKEN-BASIERTE 3D-SOLARPOTENZIALANALYSE FÜR GEBÄUDE

Die solare Energiequelle, durch Solarthermie oder Photovoltaik, hat den großen Vorteil, dass nachhaltig Energie dort erzeugt werden kann, wo sie verbraucht wird – an Gebäuden für private Haushalte und Betriebe. Entscheidend für die Planung und Installation ist die Bestimmung des potenziellen Energieertrags einer Anlage. Eine detaillierte dreidimensionale Datengrundlage der lokalen (Nahverschattung) und großräumigen Situation ist entscheidend für die Aussagekraft der Solarpotenzialanalyse. Die nutzbare Fläche geeigneter Dächer ist limitiert und es besteht ein Nutzungskonflikt mit landwirtschaftlichen Flächen. Aus diesem Grund wird jüngst vermehrt das Potenzial und somit die Eignung von freien, bis dato ungenutzten Flächen (z. B. vertikale Hauswände und Lärmschutzanlagen) für die Installation von Solaranlagen untersucht.

Im Bereich der Solarpotenzialanalyse greifen die meisten Analysen auf ein 2,5D-Rastermodell zurück, um die eintreffende solare Energie zu berechnen (z. B., Fu & Rich 2002; Hofierka & Sári 2002; Pons & Ninyerola 2008; Vögtle et al. 2005). Diese Modelle können jedoch nicht mit der 3D-Punktwolke kombiniert werden. Dadurch werden „echte“ 3D-Formen (z. B. Dachüberhänge, überhängende Vegetation) nur unzulänglich berücksichtigt. Durch die Hinzunahme der dritten Dimension können die starken lokalen Gradienten der eintreffenden Solarstrahlung (verursacht durch z. B. lokale Hangneigung, Exposition und

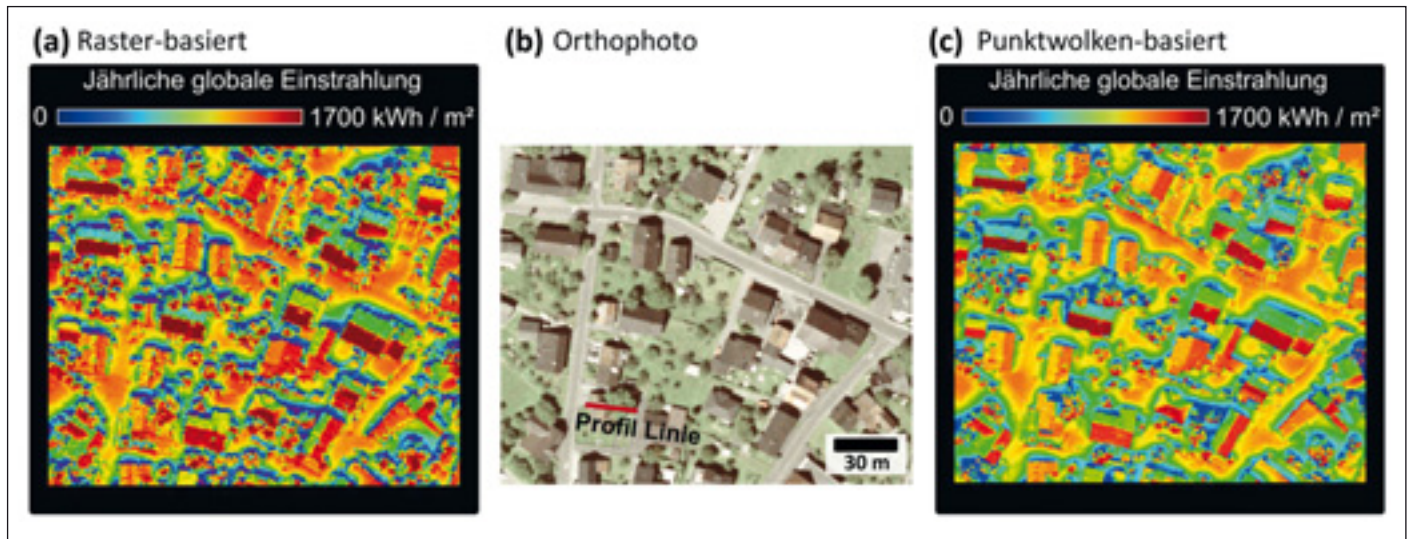


Abbildung 4: Eintreffende jährliche globale Einstrahlung in kWh/m²: a) auf Basis des 1-m-DOM mit dem SAGA GIS Standard-Modul berechnet; b) Orthophoto mit Profil-Linie für Abbildung 5; c) 3D-Solarstrahlungsmodellierung auf Basis der originalen Laserpunktwolke (vgl. Jochem et al. 2009a) (Datenquelle: LVA Vorarlberg)

Abschattung umliegender Objekte) mit höherer Detailgenauigkeit modelliert werden. Bisher gibt es nur wenige Modelle, die die volle 3D-Information für Solarpotenzialanalysen heranziehen (z. B. Jochem, Höfle, Rutzinger, Pfeifer 2009). Dadurch ist auch die Möglichkeit gegeben, den Einfluss von Objekten, die gegenüber den Sonnenstrahlen eine gewisse Durchlässigkeit aufweisen (z. B. Vegetation), zu berücksichtigen (Jochem, Höfle, Hollaus, Rutzinger 2009). Im Gegensatz zu bisher gängigen 2,5D-GIS-basierten Solarpotenzialanalysen ermöglicht eine 3D-Berechnung der eintreffenden

solaren Energie eine Berücksichtigung der Verschattungseffekte in 3D wie durch hervorstehende Dächer oder Vegetation, welche die entsprechenden Objekte teilweise verdecken.

Für die Implementierung der hier vorgestellten Methoden und Algorithmen wurde sowohl die oben genannte Variante 2 und Variante 3 (vgl. Abbildung 3) herangezogen, mit OPALS (OPALS 2011) als LS-Software und SAGA GIS (SAGA GIS 2011) als GIS-Framework. Genauere Informationen über die entwickelten Arbeitsabläufe zur Durchführung der 3D-Solar-

potenzialanalyse finden sich in Jochem et al. (2009a), Jochem et al. (2009b) und Jochem et al. (2010).

Um die genannten Unterschiede in der Wahl der Eingangsdaten und des Datenmodells (Raster versus Punktwolke) zu verdeutlichen, ist in Abbildung 4 der Vergleich einer rasterbasierten Berechnung auf Basis des DOM mit SAGA GIS (Modul *Potential Incoming Solar Radiation*) und einer 3D-Punktwolken-basierten Solarpotenzialanalyse, entwickelt von Jochem et al. (2009a), dargestellt. Die abweichende Größenordnung der absoluten Werte (kWh/m²) lässt

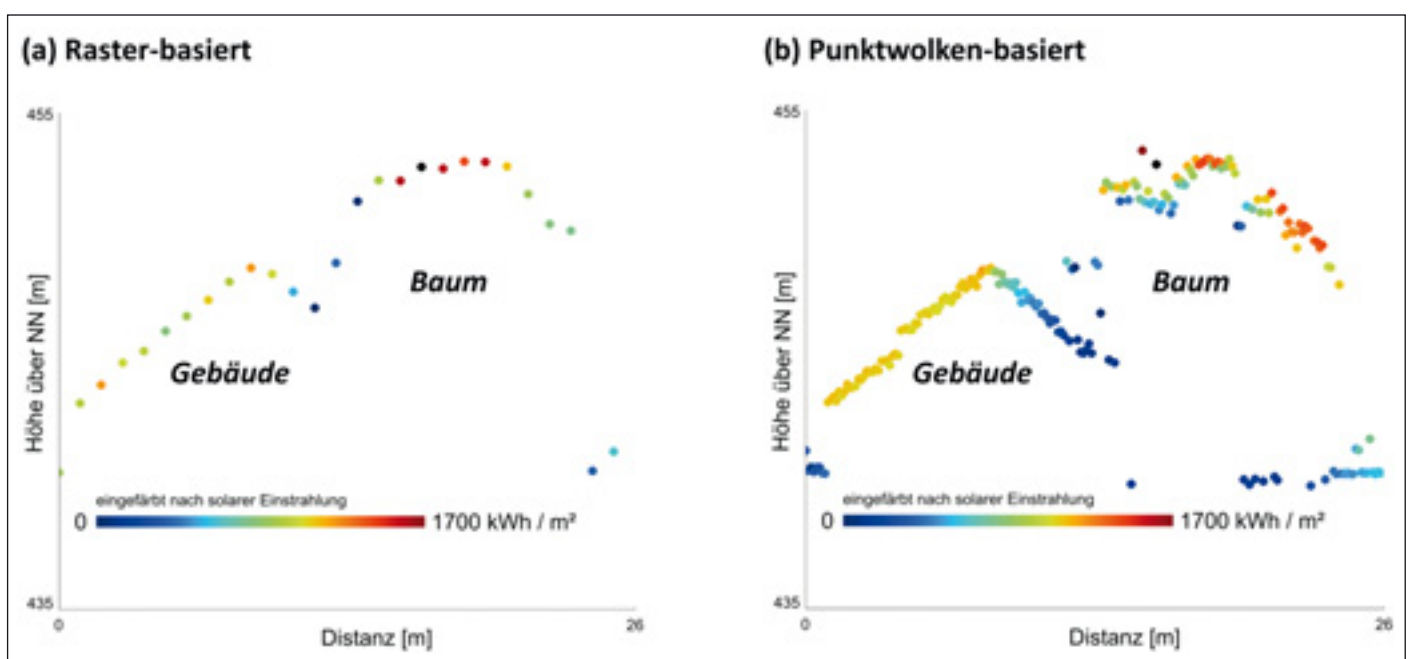


Abbildung 5: Vergleich der Ergebnisse der Solarstrahlungsberechnung im a) Raster-Datenmodell und b) in der Laserpunktwolke dargestellt im 1 m breiten Transekt durch die Rasterzellen (1-m-DOM) bzw. Punktwolke (Datenquelle: LVA Vorarlberg)

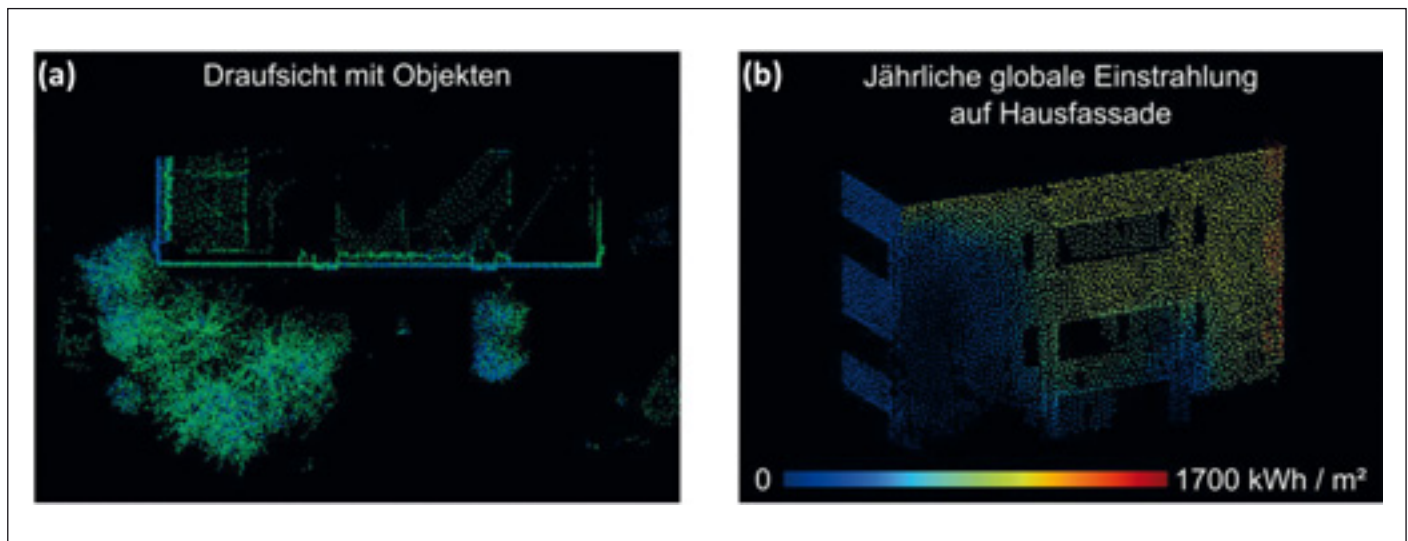


Abbildung 6: Solarpotenzialanalysen auf Basis von Mobile Laserscanning-Daten. Vegetationsobjekte führen zu einer verringerten solaren Einstrahlung auf Hausfassaden (Datenquelle: Topscan GmbH).

sich durch die abweichende Methodik der Einstrahlungsmodellierung in den beiden Ansätzen erklären (z. B. Berücksichtigung der indirekten Strahlung), wobei die lokalen Unterschiede durch die Modellierung in unterschiedlichen Datenmodellen (Raster/Punktwolke) und v. a. durch die unterschiedliche Berücksichtigung der Abschattung zu erklären sind. Die verwendete Punktwolke von Feldkirch (Österreich) wurde mit dem flugzeuggestützten Laserscanner Leica ALS-50 und einer mittleren Punktdichte von 17 Punkten pro m^2 erfasst. Das DOM wurde mit der Zielaufösung von 1 m erstellt, welche der Auflösung des landesweit verfügbaren Lasermodells entspricht. Für die Berechnung des DOM wurde die maximale Laserpunkthöhe jeder Zelle zugeordnet.

Generell ist zu sehen, dass südlich ausgerichtete Objekte deutlich mehr solare Einstrahlung empfangen als nördlich ausgerichtete Objekte, oder jene Objekte, die durch andere Objekte verschattet werden. Für ebene Flächen ohne Feinstrukturen (z. B. Straßenflächen), wo die Oberflächennormale sich lokal wenig ändert und gut im Rastermodell bestimmt werden kann, sind kaum Unterschiede zu erkennen. Die größten Differenzen zeigen sich v. a. bei hoher Vegetation, wo Vegetation abschattet sowie auch in den Einstrahlungswerten für die Vegetationsbereiche (Abbildung 5). Dies lässt sich damit erklären, dass in der Punktwolke für jeden Punkt (innerhalb eines Baums) die abschattende Wirkung berücksichtigt wird und auch die Ermittlung der Einstrahlung für jeden Laserpunkt durch-

geführt wird (und nicht nur pro 1-m-Zelle ein Wert). Da das DOM die maximalen Objekthöhen enthält, wird die Schattwirkung von durchlässigen Objekten wie eben von Bäumen (v. a. im laubfreien Zustand) überschätzt.

Für die großflächige Abschätzung des Solarpotenzials haben rasterbasierte Ansätze im GIS ihre berechtigten Vorteile (v. a. Performance) und können regionale Gunstgebiete ausweisen. Die Modellierung für vertikale Objekte kann jedoch nicht durchgeführt werden. Hier wird das hohe Potenzial der Verwendung der originalen Punktwolke ersichtlich und macht sich vor allem bei der Berechnung der eintreffenden solaren Energie auf Hausfassaden, die mithilfe von MLS erfasst wurden bemerkbar. In solchen Fällen ist eine 2,5D-rasterbasierte Anwendung nur sehr schwer bis gar nicht möglich, da eine Verdeckung der Hausfassaden durch andere Objekte nicht berücksichtigt werden kann.

Abbildung 6 zeigt das Ergebnis einer 3D-Solarpotenzialanalyse von MLS-Daten nach der Methode von Jochem et al. (2011), welche analog für die oben vorgestellte ALS-Punktwolke in Abbildung 4c eingesetzt wurde. Die verwendete Punktwolke eines Straßenzugs in Bonn wurde mit einem Optech LYNX MLS-System (montiert auf einem Auto) von der Straße her aufgenommen. Der Punktabstand orthogonal zur Scanrichtung hängt von der Distanz der abgetasteten Objekte (z. B. Hauswand) zum Scanner ab, die im Vergleich zu ALS im Straßenraum sehr dynamisch sein kann

(z. B. 2-100 m Entfernung zum Scanner). Die mittlere Punktdichte für straßennahe Objekte liegt bei mehreren hundert Punkten pro m^2 . In der verwendeten Methode werden die vertikalen Hausfassaden durch die Anwendung von Segmentierungsalgorithmen innerhalb der 3D-Punktwolke detektiert und anschließend für die Berechnungen herangezogen. Verschattungseffekte werden ebenfalls innerhalb der Punktwolke berücksichtigt. Genauere Informationen über dieses Vorgehen finden sich in Jochem et al. (2011). Wie in Abbildung 6 zu sehen, werfen die Bäume einen deutlichen Schatten auf große Teile der Hausfassade. Die dargestellte Fassade wäre somit nur eingeschränkt für Solaranlagen nutzbar unter der Voraussetzung, dass die Vegetation nicht entfernt wird. Die Einstrahlungsmodellierung einer potenziellen vegetationsfreien Landschaft kann durch vorangehende Vegetationsdetektion in den Laserdaten und die Entfernung der entsprechenden Vegetationslaserpunkte erreicht werden (vgl. Kapitel 3.2; Jochem et al. 2009b). Die vorgestellte Methodik für Hausfassaden eignet sich analog für z. B. Lärmschutzanlagen und andere vertikale Objekte, die mit rasterbasierten Workflows nicht modelliert werden können.

3.2 GIS-BASIERTE DETEKTION VON STADTVEGETATION MIT ALS-DATEN

Dieses Beispiel zeigt die Erweiterung der GIS-Funktionalität (Variante 3) um eine objektbasierte Raster- und Punktwolkenanalyse

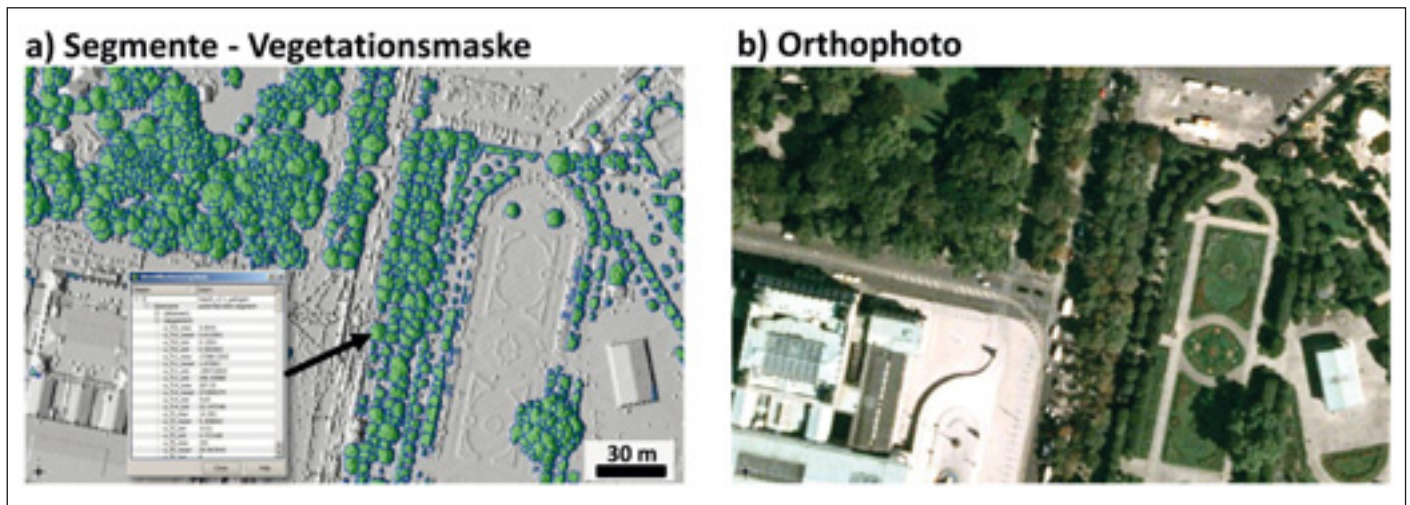


Abbildung 7: a) Klassifizierte Vegetationssegmente als GIS-Vektorlayer (in grün mit blauen Segmentgrenzen) in der Innenstadt von Wien; b) Orthophoto (Datenquelle: MA41, Stadt Wien)

se von ALS-Daten mit dem Ziel hohe Stadtvegetation (Bäume) vollautomatisch nach der Methode von Höfle & Hollaus (2010) zu kartieren. Die Stadt Wien (MA41 2011) verfügt über einen full-waveform ALS-Datensatz mit Punktdichten bis zu 50 Echos/m². Dies erlaubt die Ableitung von hochauflösenden Höhenmodellen (z. B. 0,5 m Zellgröße). Für die Klassifikation von Objekten im sehr komplexen Stadtgebiet stellt die originale Punktwolke mit ihren zusätzlichen Echoattributen (z. B. Stärke des Echos) eine wichtige Datenquelle dar. Die hohe Punktdichte erlaubt jedoch keine aufwendigen punktwolkenbasierten Auswertungen (z. B. Segmentierung in der Punktwolke) für große Gebiete aufgrund des großen Datenvolumens und der damit verbundenen Rechenzeiten. Darum wurde in dieser Studie ein Hauptaugenmerk darauf gelegt, eine Methode zu entwickeln, die für große Gebiete anwendbar ist, aber trotzdem auf den zusätzlichen Informationsgehalt der Punktwolke zurückgreifen kann. Ferner ist die Integration (*Variante 3*) von Punktwolken-Tools in das GIS ein wesentlicher Vorteil gegenüber einer allein stehenden Neuentwicklung, da die bereits vorhandenen Konzepte zur Verwaltung und Analyse von Raster- und Vektordaten genutzt werden können.

Zu diesem Zwecke wurde im Framework des Open Source GRASS GIS (GRASS Development Team 2011) eine objektbasierte Raster- und Punktwolkenanalyse entwickelt. Der raster- und punktwolkenbasierte GIS-Workflow der Vegetationsdetektion beinhaltet folgende Schritte:

1. Konvexe Objekte werden mit einer kantenbasierten Segmentierung im normalisierten DOM (d. h. DOM minus DGM) erkannt und als einzelne Segmente (also Polygone) erfasst.
2. Für diese Segmente werden mehr als 100 Attribute basierend auf geometrischen und topologischen Segmenteneigenschaften sowie Punktwolkeninformationen abgeleitet (z. B. mittlere Höhe des ersten Echos, Anzahl der Nachbarsegmente).
3. Diese angereicherte Attributtabelle wird dann in einem weiteren Schritt herangezogen, um die Segmente mithilfe eines *Decision Tree* Klassifikators in Vegetation und Nicht-Vegetation zu klassifizieren.
4. In einem letzten Schritt werden die einzelnen Segmente der Klasse „Vegetation“ zu einer Vegetationsmaske zusammengeführt, indem die Grenzen zwischen Segmenten entfernt werden (*dissolving*). Die Ergebnisse zeigen eine hohe Klassifikationsgenauigkeit mit z. B. mehr als 95 % richtig erkannten Alleebäumen, wobei weniger als 15 % der erkannten Vegetationssegmente sich mit Gebäuden (v. a. Hauswände) überlappen (Abbildung 7). Probleme treten im Bereich von strukturierten Hauswänden auf, die eine ähnliche Signatur in den Laserdaten aufweisen wie hohe Vegetation.

Es konnte gezeigt werden, dass eine operationelle Auswertung von hochvolumigen 3D-Laserpunktwolken mit GIS-Workflows möglich ist. Im Speziellen liefert der kom-

binierter Raster- und Punktwolkenansatz zur Segmentierung und Klassifikation von Vegetation bereits erfolgsversprechende Ergebnisse und eine Übertragung auf andere Oberflächenklassen, z. B. Gebäude (vgl. Höfle et al. 2009), ist Fokus zukünftiger Studien.

Vergleichbare Ansätze zur Vegetationsdetektion operieren entweder auf Rastereingangsdaten (z. B. Rottensteiner et al. 2007) und/oder auf der Laserpunktwolke (z. B. Carlberg et al. 2009). Oft werden Laser-Rastermodelle mit Orthophotos kombiniert. Secord & Zakhor (2007) verwenden eine bildbasierte Segmentierung (Region Growing) mit anschließender objektbasierter Klassifikation unter Einbeziehung der Punktwolke zur Vegetationserkennung. Hierbei werden Segmentattribute aus der Punktwolke (z. B. lokale Höhenvariation der Punkte definiert als maximale minus minimale Höhe) und aus den Farbwerten des Orthophotos (Farbton, Sättigung und Helligkeit) abgeleitet und mit SVM (Support Vector Machine) klassifiziert. Carlberg et al. (2009) verwenden die originale 3D-Punktwolke zur Landbedeckungsklassifikation in vier Klassen (Wasser, Boden, Dächer und Bäume). Durch die Kaskadierung von binären unüberwachten Region Growing Klassifikationen mit anschließender segmentbasierter überwachter Klassifikation können Bäume mit > 89 % Genauigkeit erkannt werden. Hauptmerkmal für Bäume ist die räumliche Verteilung der Laserpunkte in 3D parametrisiert über die Eigenwerte der Hauptkomponentenanalyse der Laserpunkte in einem Segment. Die meisten

Ansätze sind jedoch Spezialentwicklungen und nutzen kein GIS bzw. sind nicht in ein GIS integriert, wodurch der vorhandene Funktionsumfang, die Erweiterungsmöglichkeiten und die Interoperabilität zwischen Datenformaten, Datenmodellen (z. B. Raster-/Vektordatenmodell) und Funktionalität (z. B. Schnittstellen zwischen Klassen/Bibliotheken) meist eingeschränkt ist.

4 LASERPUNKTWOLKEN UND GIS IM GEOWEB-KONTEXT

Die in Kapitel 2 vorgestellten Konzepte konzentrieren sich auf die Verknüpfung von GIS und Laserscanning-Funktionalität auf einer sehr implementierungsnahen Ebene ohne weitere Berücksichtigung der Einbettung in eine größere Infrastruktur. Die letzten Jahre haben jedoch sehr eindrücklich gezeigt, dass service-orientierte Architekturen (SOA) und v. a. das Web als leicht zugängliches Medium die nächste Generation von Geoinformationsnutzung, das GeoWeb, markieren. Die GIS-Aufgaben werden vermehrt über standardisierte Web-Dienste (vgl. OGC 2011) abgebildet und administrativ in Geodateninfrastrukturen (GDI) zusammengefasst. Im GeoWeb-Kontext gilt für Laserpunktwolken dasselbe wie für alle anderen Geodaten, wie z. B. die Standardisierung von Zugriff, Datenformaten und Spezifikation von Metadaten. Aufgrund der enormen Datenmengen von Punktwolken und der noch sehr wissenschaftlich abgezielten Analysefunktionalitäten der Daten sind jedoch neue Konzepte der Verwaltung, Prozessierung, Analyse und Visualisierung über das Web nötig. So ist es – z. B. anders als bisher üblich – vorzuziehen, die Funktionalität zu den großen Daten zu transferieren als umgekehrt. Da Laserpunktwolken sehr wertvolle Geoinformation beinhalten und ein wichtiger Datensatz für GDIs sind, werden diese Herausforderungen in jüngster Zeit verstärkt erforscht.

Das wohl führende Beispiel für Laserpunktwolken im GeoWeb ist das NSF geförderte Projekt „*GEOscience Network (GEON)*“ (Owens & Keller 2003), das IT-Experten und Geowissenschaftler zusammenbringt. GEON verfolgt das Prinzip einer Cyberinfrastruktur als verteiltes

Netzwerk für Geodaten, Analyse- und Visualisierungstools und Rechenkapazitäten (*High-Performance Computing*). In GEON stellt die *OpenTopography Facility* (Crosby et al. 2011; OpenTopography 2011) ein skalierbares und modulares Workflow-Konzept (*GEON Conceptual LiDAR Workflow*) zur Verfügung, mit dem neue Datensätze so wie Tools sehr einfach hinzugefügt und über ein Webportal bedient werden können. Somit stellt OpenTopography Daten und Tools gleichsam webbasiert zur Verfügung. Bis dato ist OpenTopography ein zentrales und geschlossenes System. Zentral heißt, dass Daten, Tools und Rechenkapazitäten am San Diego Supercomputer Center verwaltet werden. Im Sinne einer SOA wäre es aber nötig, gewisse Tools mit externen Daten verwenden bzw. umgekehrt Daten von OpenTopography mit externen Webservices prozessieren zu können. Die Tools von OpenTopography beschränken sich auf „*Search & Retrieval*“, die Berechnung von Digitalen Höhenmodellen aus der Punktwolke und die Visualisierung der Ergebnisse.

Um die genannten, noch ausstehenden, Herausforderungen auf europäischer Ebene zu diskutieren, wurde von der European Science Foundation (ESF) ein sogenannter *Exploratory Workshop* zum Thema „*Laser Scanning Spatial Data Infrastructure (LaSDI)*“ (Höfle et al. 2011) gefördert und im September 2011 in Heidelberg abgehalten. Ziel war es internationale Wissenschaftler aus Geoinformatik und Fernerkundung/Photogrammetrie zusammen zu bringen, um die entscheidenden Forschungsfragen zu identifizieren. Es wurde mit Konsens festgestellt, dass Laserpunktwolken eine sehr wichtige Datenquelle für 3D-Geoinformation sind, aber dass es kaum Standards für die Integration des speziellen Datentyps in SOA gibt. Laserdaten und Prozessierungs- und Analysetools gehören zusammen: Hier muss ein Paradigmenwechsel stattfinden, von bisher getrennten *Repositories* für Daten und Tools (z. B. in verschiedenen Webservices) zu stärker integrierten Lösungen, unter Einbehaltung der Flexibilität und vor allem Interoperabilität. Hierfür ist eine klare Beschreibung der Prozesse nötig (z. B. Taxonomie und Me-

tadaten). Die daraus entstehenden Geodaten- und Analyseinfrastrukturen (GDAl), wie z. B. OpenTopography, sollen es erlauben, neue Workflows aus bestehenden atomaren Tools zu erstellen, und somit die „Wiederverwertbarkeit“ und den Mehrwert von Algorithmen und v. a. der kostenintensiven Ausgangsdaten zu garantieren.

5 FAZIT

Laserscanning hat sich in den letzten Jahren zu einer etablierten Methode für die Erfassung von 3D-Geodaten entwickelt. Laserscanning-Systeme auf verschiedenen Plattformen (terrestrisch, flugzeuggestützt) ermöglichen die Aufnahme von 3D-Datensätzen mit verschiedenen Ziel-Auflösungen (von mm bis m). Die hohe Datendichte und die hohen Datenvolumina sowie der 3D-Charakter dieser Daten stellen jedoch besondere Anforderungen an die Verwaltung, Analyse und Visualisierung von 3D-Laserpunktwolken. Bis vor einigen Jahren konnten Punktwolken in gängigen GIS-Programmen weder verwaltet noch analysiert und visualisiert werden. Aktuelle Forschung im Schnittbereich zwischen Geoinformatik und Fernerkundung/Photogrammetrie verdeutlicht jedoch den Vorteil der direkten Nutzung der 3D-Punktwolke für 3D-GIS-Analysen (z. B. Solarpotenzialanalyse, Vegetationskartierung). Ein großes Potenzial ist in der kombinierten objektbasierten Raster- und Punktwolkenanalyse zu sehen, da hier die Vorteile beider Domänen ausgenutzt werden können: schnelle Rasterprozessierung unter Verwendung der reichhaltigen GIS-Rastertools bei gleichzeitigem Zugriff auf die 3D-Punktwolkeninformation. Immer mehr kommerzielle so wie Open-Source-GIS-Programme unterstützen seit kurzer Zeit Laserscanning-Punktwolken (z. B. SAGA GIS), was den Bedarf an weiteren Schritten in Richtung vollfunktionsfähiges 3D-GIS (v. a. in der Analyse) sehr deutlich macht. Zukünftige Forschung wird sich verstärkt mit der Einbindung von Punktwolken in GeoWeb-Infrastrukturen (oder auch Cyberinfrastrukturen) beschäftigen, wobei Daten und Analysetools zusammen gehören, um einen Mehrwert für diese 3D-Daten und die darauf aufbauenden Algorithmen erzeugen zu können.

Literatur

- Bentley, J. L. (1975): Multidimensional binary search trees used for associative searching. In: Communications of the ACM, 18 (9), S. 509-517.
- Carlberg, M.; Gao, P.; Chen, G.; Zakhor, A. (2009): Classifying urban landscape in aerial LiDAR using 3D shape analysis. In: Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Cairo, Egypt, 7-10 November, S. 1701-1704.
- Crosby, C. J.; Arrowsmith, J. R.; Nandigam, V.; Baru, C. (2011): Online access and processing of LiDAR topography data. In: Keller, G. R.; Baru, C. (Eds.): Geoinformatics – Cyberinfrastructure for the Solid Earth Sciences. Cambridge University Press, S. 251-265.
- Esri (2011): Lidar Analysis in ArcGIS 10 for Forestry Applications. <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/lidar-analysis-forestry-10.pdf>, Zugriff 12/2011.
- Fu, P.; Rich, P. M. (2002): A geometric solar radiation model with applications. In: Computers and Electronics in Agriculture, 37 (1-3), S. 25-35.
- GDAL (2011): GDAL – Geospatial Data Abstraction Library: Open Source Geospatial Foundation. <http://gdal.osgeo.org>, Zugriff 12/2011.
- GRASS Development Team (2011): Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://grass.osgeo.org>, Zugriff 12/2011.
- Haala, N.; Kada M. (2010): An update on automatic 3D building reconstruction. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65 (6), S. 570-580.
- Hofierka, J.; Štúr, M. (2002): The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In: Proceedings of Open source GIS – GRASS users conference 2002. Trento, Italy.
- Höfle, B.; Hollaus, M. (2010): Urban vegetation detection using high density full-waveform airborne LiDAR data – Combination of object-based image and point cloud analysis. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, S. 281-286.
- Höfle, B.; Mücke, W.; Dutter, M.; Rutzinger, M.; Dörninger, P. (2009): Detection of building regions using airborne LiDAR – A new combination of raster and point cloud based GIS methods. In: Proceedings GL_Forum Salzburg, S. 66-75.
- Höfle, B.; Pfeifer, N.; Zipf, A. (2011): Laser Scanning Spatial Data Infrastructure (LaSDI). Scientific Report of ESF Exploratory Workshop, 8-11 September, Heidelberg, 18 p. <http://lasdi.uni-hd.de>, Zugriff 12/2011.
- Höfle, B.; Rutzinger, M. (2011): Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. In: Zeitschrift für Geomorphologie, 55 (2), S. 1-29.
- Höfle, B.; Rutzinger, M.; Geist, T.; Stötter, J. (2006): Using airborne laser scanning data in urban data management – set up of a flexible information system with open source components. In: Proceedings UDMS 2006: Urban Data Management Symposium. Aalborg, Denmark, S. 7.11-7.23 (on CD-ROM).
- IPF (2011): OPALS – Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data. <http://www.ipf.tuwien.ac.at/opals/>, Zugriff 12/2011.
- Jochem, A.; Höfle, B.; Hollaus, M.; Rutzinger, M. (2009): Object detection in airborne LiDAR data for improved solar radiation modeling. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38 (3/W8), S. 1-6.
- Jochem, A.; Höfle, B.; Rutzinger, M. (2011): Extraction of Vertical Walls from Mobile Laser Scanning Data for Solar Potential Assessment. In: Remote Sensing, 3 (4), S. 650-667.
- Jochem, A.; Höfle, B.; Rutzinger, M.; Pfeifer, N. (2009): Automatic roof plane detection and analysis in airborne LiDAR point clouds for solar potential assessment. In: Sensors, 9 (7), S. 5241-5262.
- Jochem, A.; Höfle, B.; Wichmann, V.; Rutzinger, M.; Zipf, A. (in press): Area-wide roof plane segmentation in airborne LiDAR point clouds. In: Computers, Environment and Urban Systems. in press (DOI: 10.1016/j.compenvurb-sys.2011.05.001).
- Jochem, A.; Wichmann, V.; Höfle, B. (2010): Large area point cloud based solar radiation modeling. In: Böhner, J.; Conrad, O.; Hengl, T. (Eds.): SAGA Third Degree. Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie, 21 (in press).
- LIS (2011): Laserdata GmbH: <http://www.laserdata.at>, Zugriff 12/2011.
- LASTools (2011): <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>, Zugriff 12/2011.
- MA41 (2011): Stadtvermessung Wien – MA41. <http://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/>, Zugriff 12/2011.
- Mallet, C.; Bretar, F. (2009): Full-waveform topographic LiDAR: state-of-the-art. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64 (1), S. 1-16.
- Mallet, C.; Bretar, F.; Roux, M.; Soergel, U.; Heipke, C. (in press): Relevance assessment of full-waveform lidar data for urban area classification. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2011.09.008.
- Mandlbürger, G.; Brieske, C.; Otepka, J.; Höfle, B.; Pfeifer, N. (2010): Verwaltung landesweiter Full Waveform Airborne Laser Scanning Daten. In: Proceedings 3-Ländertagung 2010, D-A-CH Conference, DGPF Tagungsband, 19, S. 356-365.
- Mandlbürger, G.; Otepka, J.; Karel, W.; Wagner, W.; Pfeifer, N. (2009): Orientation And Processing of Airborne Laser Scanning Data (OPALS) – Concept and first results of a comprehensive ALS software. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38 (3/W8), S. 55-60.
- Mandlbürger, G.; Otepka, J.; Karel, W.; Wöhler, B.; Wagner, W.; Pfeifer, N. (2010): OPALS (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data) – Konzept und Anwendungsbeispiele einer wissenschaftlichen Laserscanning Software. In: Proceedings 3-Ländertagung 2010, D-A-CH Conference, DGPF Tagungsband, 19, S. 376-387.
- OGC (2011): Open Geospatial Consortium (OGC). <http://www.opengeospatial.org>, Zugriff 12/2011.

OpenTopography (2011): NSF OpenTopography Facility. <http://www.opentopography.org>, Zugriff 12/2011.

Overwatch (2011): LIDAR Analyst. http://www.overwatch.com/products/lidar_analyst.php, Zugriff 12/2011.

Owens, T. J.; Keller, G. R. (2003): GEON (GEOscience Network): A first step in creating cyberinfrastructure for the geosciences. In: *Electronic Seismologist*, 74 (4). http://www.seismosoc.org/publications/SRL/SRL_74/srl_74-4_es.html, Zugriff 12/2011.

Pons, X.; Ninyerola, M. (2008): Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data. In: *International Journal of Climatology*, 28, S. 1821-1834.

Pu, S.; Rutzinger, M.; Vosselman, G.; Oude Elberink, S. (in press): Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2011.08.006.

PyWPS Development Team (2011): Python Web Processing Service (PyWPS) Software. <http://pywps.wald.intevation.org>, Zugriff 12/2011.

Reitberger, J.; Schnörr, C.; Krzystek, P.; Stilla, U. (2009): 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, S. 561-574.

Rottensteiner, F.; Trinder, J.; Clode, S.; Kubik, K. (2007): Building detection by fusion of airborne laser scanner data and multi-spectral images: Performance evaluation and sensitivity analysis. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62 (2), S. 135-149.

Rutzinger, M.; Höfle, B.; Oude Elberink, S.; Vosselman, G. (2011): Feasibility of Facade Footprint Extraction from Mobile Laser Scanning Data. In: *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)*, 3/2011, S. 97-107.

SAGA GIS (2011): System for Automated Geoscientific Analyses. <http://www.saga-gis.org>, Zugriff 12/2011.

Secord, J.; Zakhori, A. (2007): Tree Detection in Urban Regions Using Aerial Lidar and Image Data. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4 (2), S. 196-200.

Shan, J.; Toth, C. (2008): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. CRC Press Inc., Taylor & Francis Ltd.

Vögtle, T.; Steinle, E.; Tóvári, D. (2005): Airborne laserscanning data for determination of suitable areas for photovoltaics. In: *IAPRS. Enschede, The Netherlands*, S. 215-220.

Vosselman, G.; Maas, H. G. (2010): *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing.

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. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 60 (11), S. 100-112.

IMPRESSUM // PUBLICATION INFORMATION

gis.SCIENCE – Die Zeitschrift für Geoinformatik ISSN 1869-9391 // Redaktion: Gerold Olbrich, olbrich@vde-verlag.de, Tel.: +49(0)69-840006-1121 // Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill, ralf.bill@uni-rostock.de, Tel +49(0)381-498-3200 // Editorial Board: Prof. Dr. Lars Bernard, TU Dresden; Dr. Andreas Donaubaue, TU München; Prof. Dr. Max Egenhofer, University of Maine Orono; Prof. Dr. Manfred Ehlers, Universität Osnabrück; Prof. Dr. Klaus Greve, Universität Bonn; Dr. Stefan Lang, Universität Salzburg; Prof. Dr. Stephan Nebiker, Fachhochschule Nordwestschweiz; Prof. Dr. Matthäus Schilcher, TU München; Prof. Dr. Josef Strobl, Universität Salzburg // Anzeigen: Katja Hanel, VDE VERLAG GMBH, Telefon +49(0)69/840006-1341, hanel@vde-verlag.de // Abonnement-Service und Adressänderung: Kerstin Grzechnik, +49(0)69/840006-1380, Fax: -1398 // gis.Science erscheint im: Wichmann Verlag im VDE VERLAG GMBH, Bismarckstraße 33, 10625 Berlin, Tel. +49(0)30/34 80 01-0, Fax +49(0)30/34 80 01-9088, www.wichmann-verlag.de // Geschäftsführung: Dr.-Ing. Stefan Schlegel, Margret Schneider // Verlagsleiter Zeitschriften: Ronald Heinze // Druck: H. Heene-mann GmbH & Co. KG, Berlin // Erscheinungsweise: 12 x jährlich, davon 4 Ausgaben gis.SCIENCE, 6 Ausgaben gis.BUSINESS plus 2 Sonderthemenhefte gis.TRENDS+MARKETS // Jahresabonnement (12 Hefte): Inland 157,25 EUR inkl. Versandkosten, europäisches Ausland 166 EUR, sonstiges Ausland 178 EUR inkl. Versandkosten, Studenten/Auszubildende 89,00 EUR inkl. Versandkosten, Mitglieder des Deutschen Dachverbandes für Geoinformation e.V. (DDGI) erhalten das Abo im Rahmen ihrer Mitgliedschaft // Bezugszeitraum: Ein Abonnement gilt für mindestens ein Jahr und verlängert sich jeweils um das folgende Kalenderjahr, wenn es nicht bis zum 15. November eines Jahres gekündigt wurde. Bei Nichterscheinen aus technischen Gründen oder höherer Gewalt entsteht kein Anspruch auf Ersatz. // Alle in gis.SCIENCE erscheinenden Beiträge, Abbildungen und Fotos sind urheberrechtlich geschützt. Reproduktion, gleich welcher Art, können nur nach schriftlicher Genehmigung des Verlags erfolgen. // © 2012 VDE VERLAG, Berlin • Offenbach.