

© Kompetenz in drei Dimensionen...

## Case Study

3D HighTech-Prospektion aus der Luft  
„Airborne Laserscanning“ - Anwendungen  
in der Archäologie und Denkmalpflege

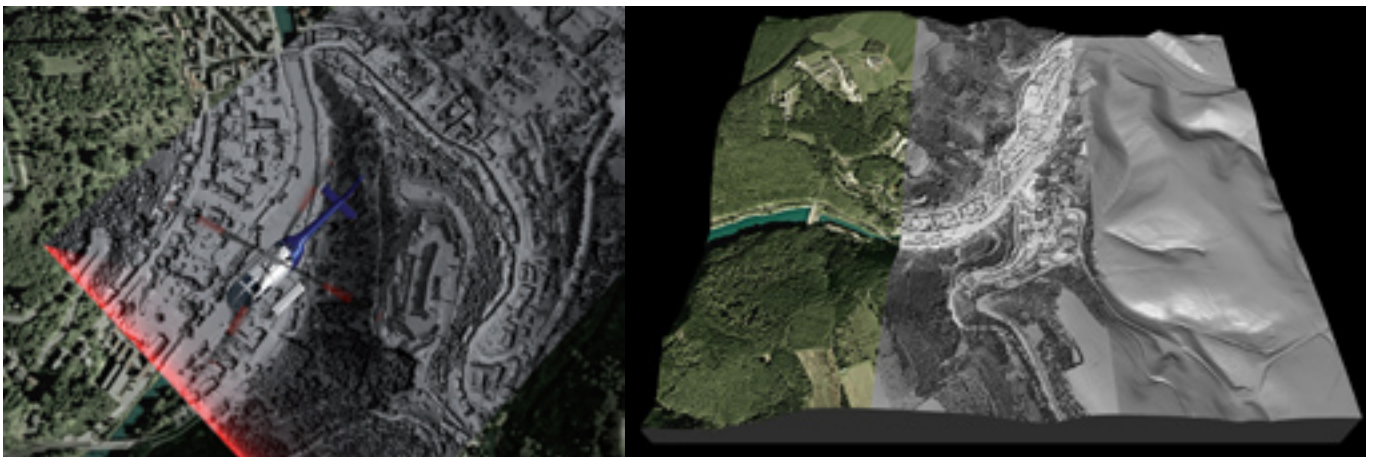
*Mongolei. Karabalgassun - „Orchon-Expedition“ 2007.*

*Airborne Laserscanning Dokumentation der gesamten Stadtanlage des 8./9. Jh. (ca. 43 km<sup>2</sup>)  
im Auftrag des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI Bonn, Prof. Hüttel).*

## Airborne Laserscanning“ - Anwendungen in der Archäologie und Denkmalpflege

Das Airborne-Laserscanning-Verfahren hat sich in den letzten 10 Jahren weltweit bei der Generierung von digitalen Höhenmodellen etabliert. Diese Datenmodelle bilden die Basis für Planungen im Bergbau, der Wasserwirtschaft, für den Straßen- und Städtebau und viele andere Bereiche.

In der Archäologie revolutioniert der erst in den letzten Jahren begonnene, systematische Einsatz dieser Prospektionsmethode das Quellenbild. Mittels eines Landschaft-Scans kann in kurzer Zeit auf relativ großen Flächen ein sehr detailliertes, aktuelles Abbild der Landschaftsoberfläche gewonnen werden. Oft nur noch mit wenigen Dezimetern Höhe erhaltene Siedlungen oder Wall-Graben-systeme, aber auch verschliffene Grabhügel und alte Wegesysteme, Flur- und Ackergrenzen lassen sich in den Scans identifizieren. Durch die hohe Durchdringungstiefe der Laserscans ist es heute möglich den Bewuchs - insbes. die Waldvegetation – auszufiltern und die darunter verborgenen Geländedenkmäler genauer zu bestimmen.



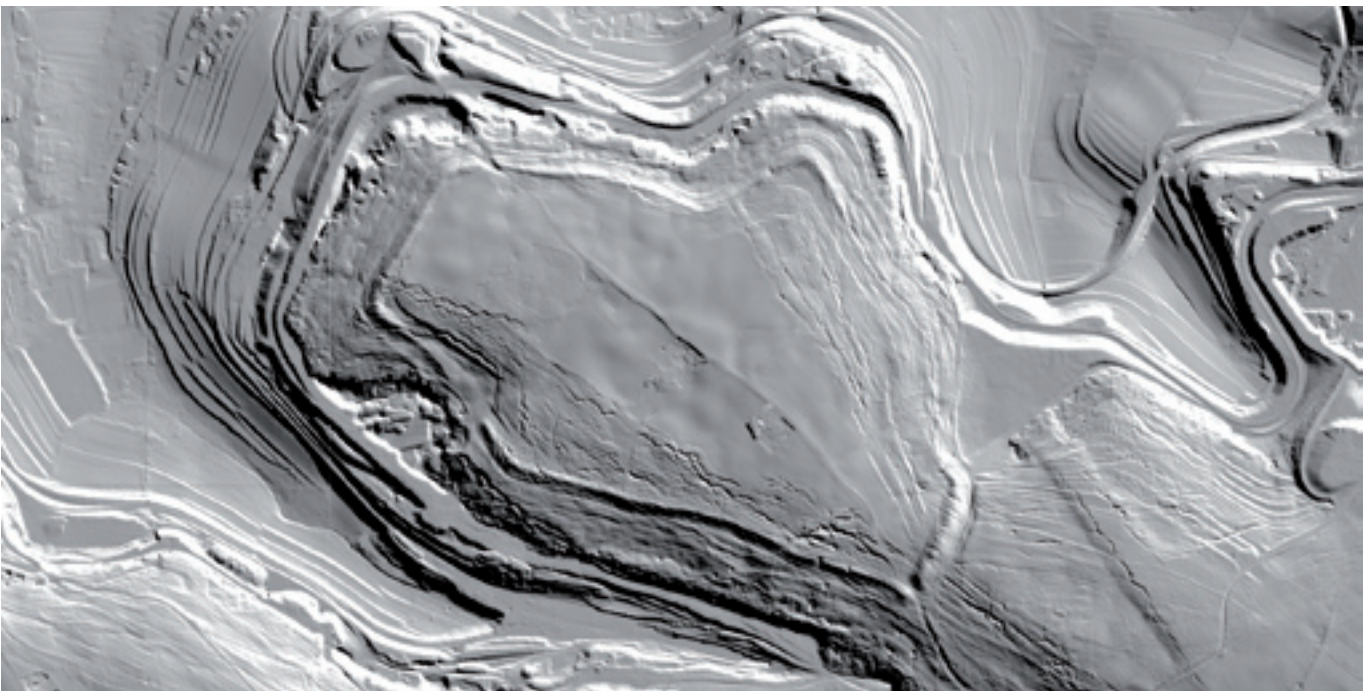
Für die prähistorischen und historischen Fundlandschaften in den Wäldern zeichnet sich mit dieser Technologie eine ähnlich revolutionäre Kenntnisverbesserung ab, wie sie ab den 70er Jahren mit der luftbildarchäologischen Methode erzielt werden konnte.

Die Archäologen, Ingenieure und Datenauswertungsspezialisten der ArcTron 3D GmbH arbeiten mit dem notwendigen fachspezifischen archäologischen Hintergrundwissen und generieren mit spezifischen Softwarelösungen hochgenaue Oberflächenmodelle. Bei diesem Arbeitsprozess werden aus den Laserdaten bekannte, potenzielle und unsichere archäologische Befunde identifiziert und kartiert.

*Burg Vianden (Luxemburg).*

*Links: Helikopterbefliegung in der 3D-Visualisierung.*

*Rechts: 3D-Geländemodell in verschiedenen Darstellungen: mit und ohne Vegetation und Bebauung und mit den Texturdaten der RGB-Luftbildphotogrammetriekamera.*



*Titelberg (Luxemburg). Keltisches Oppidum (Stadtanlage) mit Ringwallanlage.*

*Oben: Während der Befliegung wurde mit der hochauflösenden Luftbildphotogrammetrie-Kamera das maßhaltig entzerrte Orthofoto dieser bedeutenden keltischen Siedlung erzeugt.*

*Unten: Die Vegetationsdaten sind im DTM gefiltert. Sehr deutlich wird hier der unter Wald liegende Ringwall - also die verfallene ehemalige Stadtmauer - sichtbar. Bemerkenswert sind auch die vielen tiefen Bodenrillen, die sich durch im Untergrund zusammenbrechende Stollenanlagen aus der Zeit des Eisenerzabbaus (19./20. Jh.) erklären. Der Berg „arbeitet“ massiv und schädigt dadurch natürlich auch die erhaltene archäologische Substanz. Das in Mehrjahresabständen zu wiederholende Laserscanning ermöglicht ein zuverlässiges „Monitoring“ der entstehenden Veränderungen.*

## Technisches Funktionsprinzip

Die Laserscan-Systeme sind im Flugzeug, Helikopter oder - wie bei unserer neuesten und für die Archäologie und Denkmalpflege kostengünstigsten und flexibelsten Entwicklung - in einem Gleitschirm-Ultraleichtfluggerät integriert.

Die Objekt- und Geländeaufnahme basiert auf der fächerartigen Aussendung von gepulsten Laserstrahlen in diskreten Zeitabständen. Mit heutiger Technologie werden bis zu 160.000 Lasermesswerte pro Sekunde gesendet und empfangen. Dieser gepulste Laser ist im Fluggerät installiert und kann von dort mittels eines schnell rotierenden Spiegels einen quer zur Flugrichtung liegenden, bis zu mehrere hundert Meter breiten Geländestreifen abtasten.

Die Laserstrahlen werden von der natürlichen Erdoberfläche, der Vegetation oder anthropogenen Geländeobjekten und -strukturen reflektiert.



Der Scanner erzeugt auf diese Weise in kürzester Zeit hunderte Millionen Messpunkte. Gemessen wird mit „Lichtgeschwindigkeit“, nämlich die Laufzeitdifferenz zwischen emittiertem und reflektiertem Laserlichtstrahl.

Aufwändig ist dabei die Bestimmung von exakter Position und Winkel jedes einzelnen Laserimpulses. Hierfür kommen zwei kombinierte, aber grundsätzlich verschiedene Technologien zum Einsatz, nämlich die Inertial-Navigation (autonome, räumliche Winkelbestimmung) und die Satelliten-Navigation (GPS – Globales Positionierungs System, Ortsbestimmung über ein Satellitennetzwerk).

Aus der Berechnung der Winkel und Laufzeit des Laserstrahls während des sog. Postprocessings werden die gewonnenen Laserdaten in Einzelpunkte mit dreidimensionalen Weltkoordinaten aufgelöst.

*Die ALS-Technologie steht in unterschiedlichen Fluggeräten zur Verfügung. Wegen der höheren Punktedichte kommen aber für archäologische und denkmalpflegerische Aufgaben fast nur Befliegungen mit Helikoptern oder Ultraleichtfliegern in Frage.*

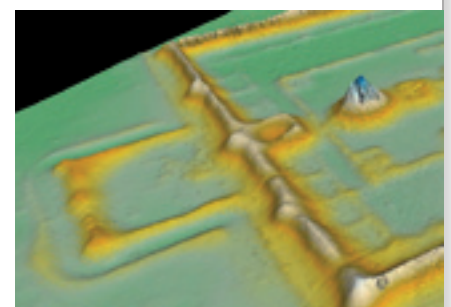
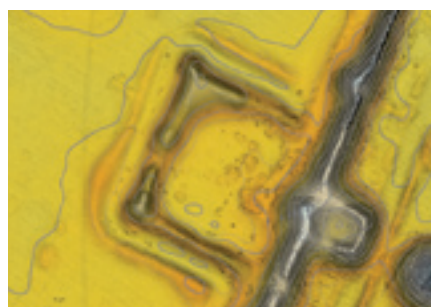
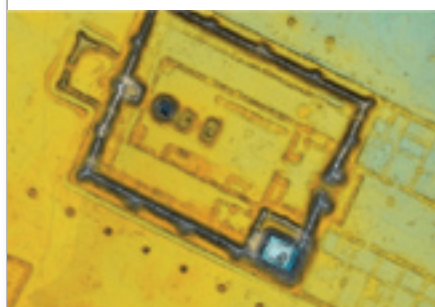
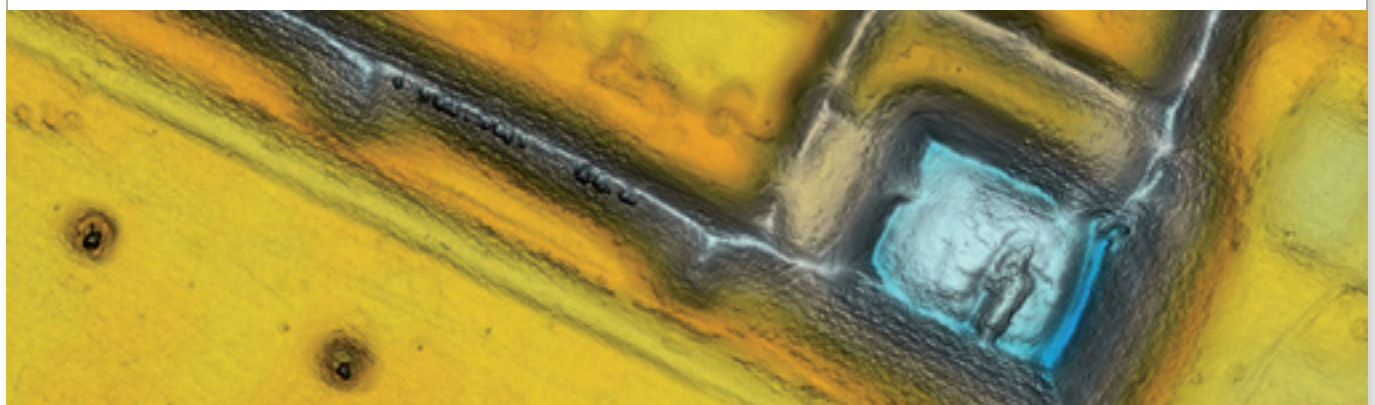
## Befliegung

Die ausgewählten Gebiete werden mit einem Laserscanner in einzelnen, parallelen Streifen vollständig befliegen, wobei alle für eine spätere Auswertung notwendigen Daten erfasst werden. Quer zur Flugrichtung überlappen sich diese Streifen. Während des Messfluges werden die Messda-

ten sämtlicher Sensoren (GPS, Inertial Navigation System (INS), Laserscanner, RGB-Kamera) synchron aufgezeichnet. Zusätzlich registriert mindestens eine Bodenstation differenzielle GPS-Daten für die spätere Berechnung des exakten Flugpfades.



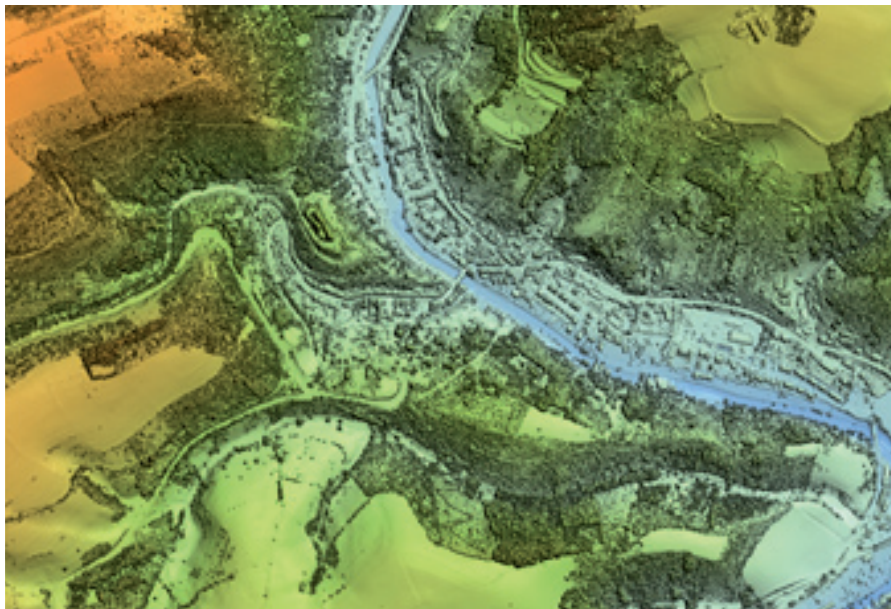
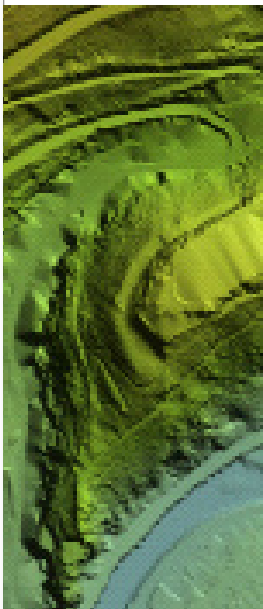
Karabalgassun - Mongolei. „Orchon-Expedition“ 2007.  
Links: Für die Befliegung stand ein MI-8 Helikopter zur Verfügung. Rechts: Die FH Karlsruhe lieferte mit einer Bodenstation die nötigen GPS-Referenzwerte.



Karabalgassun - Mongolei. „Orchon-Expedition“ 2007. Verschiedene Darstellungen des Zentralbereiches der Stadt mit der Palast- und Tempelanlage. Auch die obertägig nur noch flach erhaltenen Bodenstrukturen lassen sich hier präzise filtern und dreidimensional herausarbeiten.

## Erfassen der Höhendaten

Heutige Laserscanner führen effektiv bis zu 160.000 Entfernungsmessungen in der Sekunde aus. Bedingt durch den Systemaufbau ist die Messpunktdichte konstant und hängt von der gewählten Flughöhe und der Geschwindigkeit ab. Je nach eingesetztem Fluggerät werden ca. 4 Laserpunkte pro m<sup>2</sup> (Flugzeug), oder 10-15 (UL oder Helikopter) erreicht. Für spezielle Aufgaben können auch bis zu 50 Punkte/ m<sup>2</sup> oder mehr gemessen werden. Die hohe Messdichte stellt sicher, dass auch relativ kleinräumige Strukturen wie Entwässerungsgräben oder Bruchstrukturen etc. zuverlässig erkannt werden. Darüber hinaus gewährleistet diese Messdichte die sehr genaue Lokalisierung von Gebäudeumrissen. Das typische Reihenhaus mit 80 m<sup>2</sup> Grundfläche wird so mit etwa 400-800 Messungen erfasst und im 1-m-Raster mit 80-160 Höhenwerten beschrieben. Mittels Airborne Laser Scanning erzeugte digitale Höhenmodelle werden heute mit einer Rasterweite von 1m und besser sowie einer Höhenauflösung im nahen Subdezimeterbereich ausgegeben. Die horizontale Lagegenauigkeit der Modelle ist (für jeden Rasterpunkt) besser als  $\pm 0,2$  m und die absolute Höhengenaugigkeit (gegenüber dem lokalen Geoid) ist besser als  $\pm 0,15$  m (gültig für 95,7 % aller Rasterwerte).



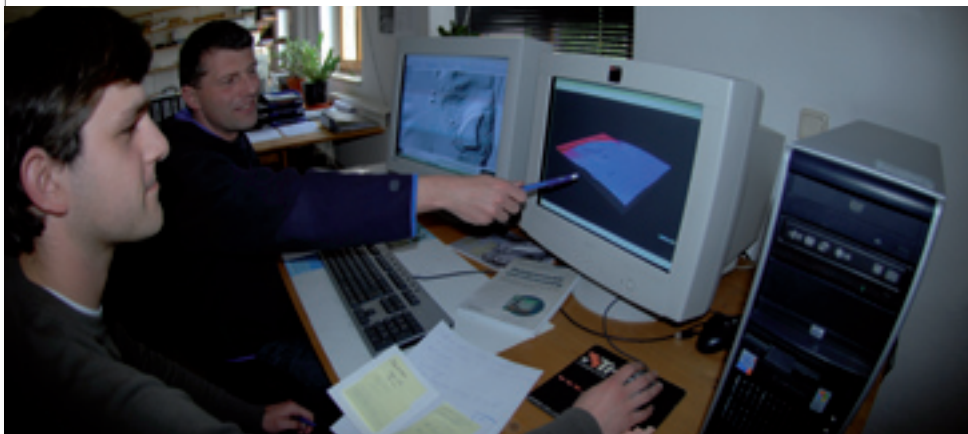
*Burg Vianden (Luxemburg).  
Photorealistisches 3D-Modell der gesamten Burganlage.*

Die Basisverarbeitung der Laserscannerdaten führt zu einem Höhenmodell, das präzise die Geländeoberfläche (Oberkante der Vegetation, Dachhöhen der Häuser etc.) beschreibt; ein derartiges Höhenmodell wird oft auch DSM (Digital Surface Model) genannt. In einem weiteren Arbeitsschritt können höhere Vegetation und auch Gebäude rechnerisch entfernt werden, so dass ein Höhenmodell der Erdoberfläche (DTM, Digital Terrain Model) entsteht.

## Grundlegende Datenverarbeitung

Die je nach Projektumfang und gewünschtem Endergebnis unterschiedlich aufwändige Datenprozessierung - das sog. Postprocessing - erfolgt in verschiedenen Schritten teils automatisch, teils manuell:

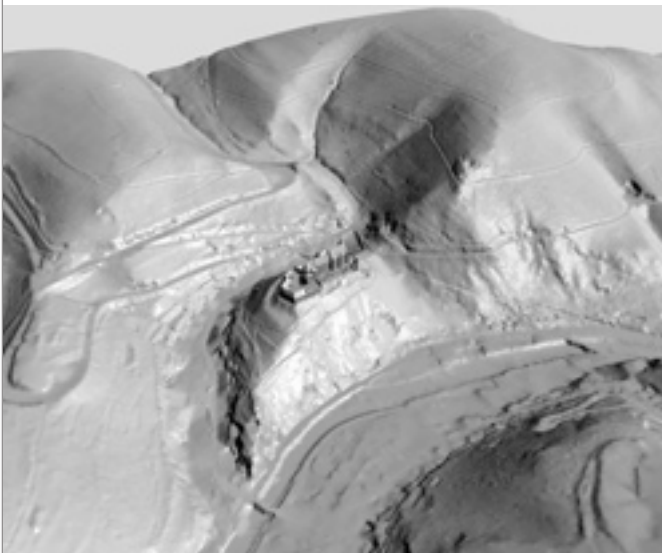
- Synchronisation der Laserdaten mit INS/(D)GPS-Positionsdaten über die atomuhrgenauen GPS-Zeitstempel in beiden Datensätzen.
- Datenreduktion: bei hohen Laserscanner-Messraten liegen aufeinanderfolgende Scanzeilen in Flugrichtung nur etwa 0,1 m auseinander. Daher wird hier mittels statistischer Verfahren auf eventuelle Fehlmessungen untersucht und die Datenmenge durch Plausibilitätsprüfungen reduziert. Die Art der Datenreduktion (First- oder Last Pulse) orientiert sich an der Anwendung: wird ein genaues Bodenmodell (DTM) gewünscht, werden größere Entfernungen bevorzugt. Für ein Oberflächenmodell (DSM) werden dagegen Messungen aus geringeren Entfernungen bevorzugt. Für spezielle Auswertungen (z.B. Textur-/Rauigkeitsanalysen) kann die Datenreduktion in diesem Schritt auch unterdrückt werden.
- Geokodierung: Die Position des reflektierenden Objekts auf der Erdoberfläche wird aus der Laufzeitdifferenzmessung sowie der Position und der Orientierung des Sensors berechnet. Abschließend wird in ein Zielkoordinatensystem umgerechnet und gleichzeitig die Geoidkorrektur angebracht. Nach diesem Schritt liegen alle Messdaten im endgültig gewünschten Koordinatensystem vor (z. B. GK, Meridianstreifen 9°, Bessel Elipsoid, Datum Potsdam, Pegel Amsterdam).
- Weitere Koordinatentransformationen: sofern keine allgemeingültigen Transformationsparameter vorliegen können lokale Transformationsparameter aus mindestens sieben, sowohl in WGS84 als auch im lokalen Koordinatensystem bekannten Punkten, ermittelt werden.
- Am Ende dieses Arbeitsschrittes liegen die gemessenen Höhen für jeden Flugstreifen in metrischen Zielkoordinaten in einer ASCII-Datei vor (x,y,z-Werte).



## Flächendeckendes Datenmodell

Im nachfolgenden Schritt wird aus den einzelnen Flugstreifen ein flächendeckendes Modell generiert.

- Relative Kalibrierung (Angleichung der Streifenhöhen-Unterschiede): benachbarte Flugstreifen müssen in Lage und Höhe fehlerfrei zueinander passen. Unterschiede in den GPS Satellitenkonstellationen können, je nach Befliegungszeitpunkt, zu erheblichen Lage- und Höhenfehlern führen. Daher ist eine Prüfung und eventuelle Anpassung benachbarter Flugstreifen notwendig, besonders wenn sie nicht kurz nacheinander beflogen wurden.



*Burg Vianden (Luxemburg).*

*Links: Das aus den Airborne Laserscanning-Daten errechnete 3D-Geländemodell wurde hier mit den zusätzlichen, terrestrisch gewonnenen Laserscanning-Daten verschnitten. Rechts: Als Endergebnis lassen sich dann auch hochgenaue und hochaufgelöste 3D-Orthofotos der vermessenen Denkmäler generieren.*

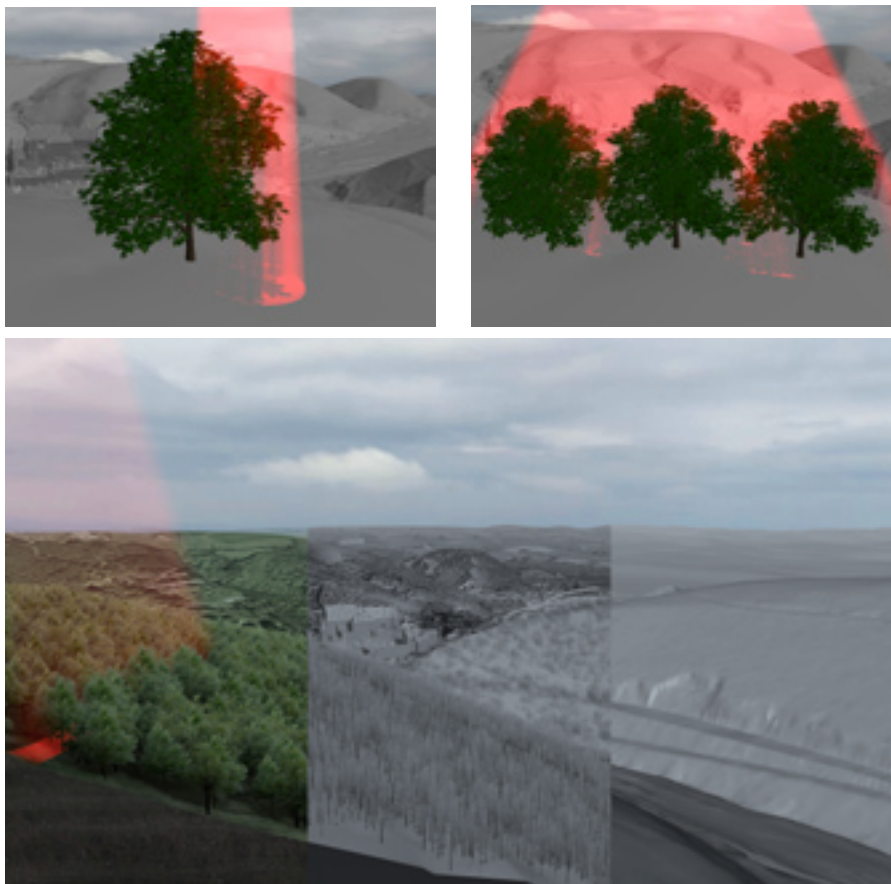
- Überführung der einzelnen Flugstreifen in regelmäßige Arbeitsraster und Festlegen einer endgültigen Rasterweite. Dazu wird aus den Lasermesswerten ein enges, quadratisches Raster mit variabel festzulegender Rasterweite (0,25 m–100 m) erzeugt. Aufgrund der hohen Durchdringungsfähigkeit in Vegetationsbereichen ist es möglich zwei separate aber flächenkongruente, hochgenaue digitale Höhenmodelle zu erzeugen:
  - das DSM (Digital Surface Model): Oberflächenmodell mit Vegetation und Bebauung
  - das DTM (Digital Terrain Model): Bodenmodell ohne Vegetation und Bebauung



## Automatisierte Datenfilterung bis zum 3D-Geländemodell

Das Ergebnis der bisherigen Arbeitsschritte ist ein präzises Oberflächenmodell (DSM) im Zielkoordinatensystem und gewünschten Raster (üblicherweise im 1-m-Raster).

In dichter bewachsenen Bereichen enthält allerdings das DSM noch Restvegetation und Bebauung, die für ein Bodenmodell (DTM) beseitigt werden müssen. Sofern gewünscht kann vom DSM zum DTM weiter verfeinert werden.



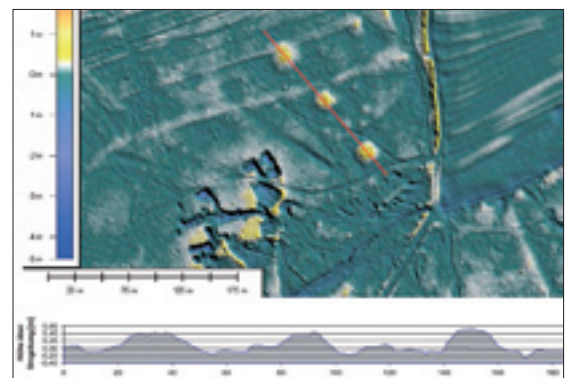
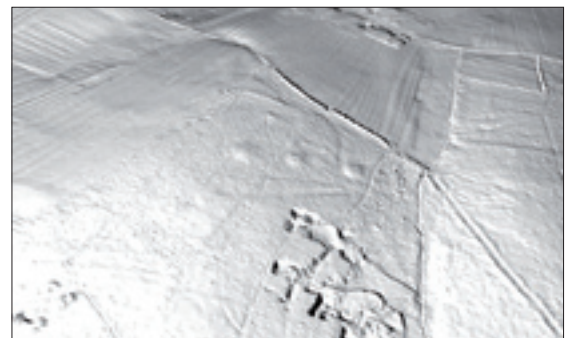
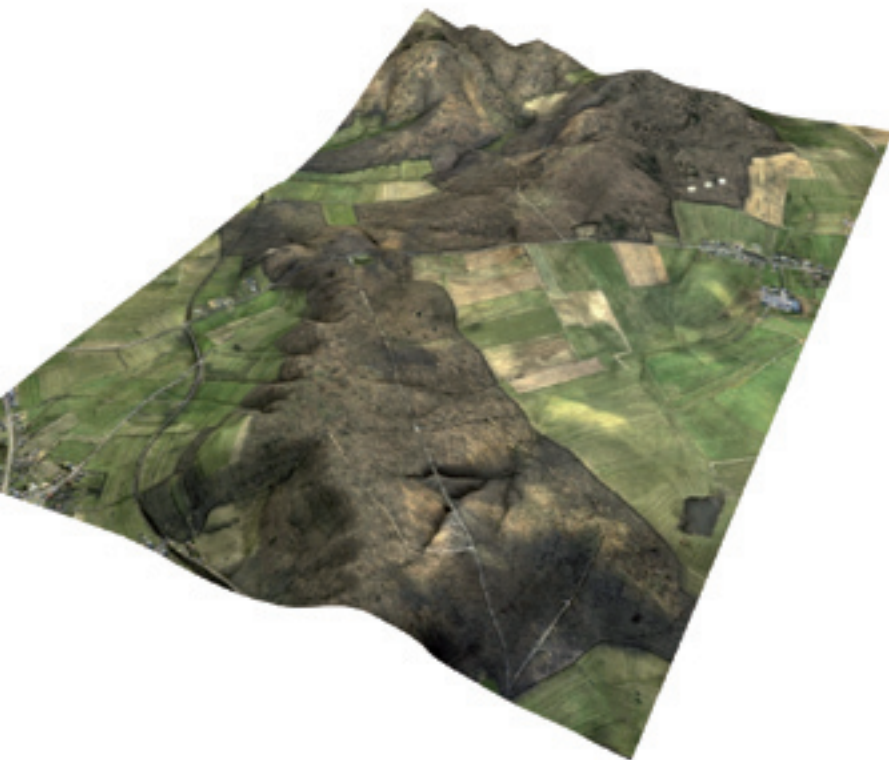
*Burg Vianden (Luxemburg). Grafiken zum Funktionsprinzip. Während des Laserscannens erreichen immer einzelne Lichtstrahlen den Boden, so dass aus diesen Daten das Bodenmodell errechnet werden kann. Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, finden die Befliegungen über Wald aber meist in der vegetationsarmen Periode statt.*

Für die Beseitigung der restlichen Vegetation und Bebauung stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, die je nach lokalen Gegebenheiten verwendet werden. Generell muss dazu festgehalten werden, dass niedrige Vegetation (Höhe kleiner 1,5 m) nur sehr schwer automatisch von natürlichen Oberflächeneffekten zu unterscheiden ist. Im Allgemeinen können daher Filteralgorithmen ca. 80% der Vegetation vollautomatisch beseitigen, der Rest muss interaktiv nachbearbeitet werden.

## Weitere ableitbare Datenprodukte

Verschiedene weitere Ableitungen aus den Digitalen Höhenmodellen erzeugt mit dem Airborne Laser Scanning Verfahren sind u.a.:

- maßstabsgerechte georeferenzierte Schnitte, beliebige Länge (ca. 200 Schnitte in einer Stunde)
- variable digitale Raster: 1 m, 2 m, ... 5 m, ... 10 m etc. zur schnellen Datensichtung & -bearbeitung
- Simulation von Grundwasserwiederanstieg (beispielsweise in beliebigen Meter-Abständen)
- Berechnung von Isolinien mit unterschiedlichen Isolinienabstand (z.B. 0.1m, 0.5m, 1m ...)
- Volumenbestimmungen & Massenberechnungen mit variablen Planungshorizonten
- Monitoring sowie betriebliche Sicherheitsüberwachung
- Leistungskontrolle
- Planungsgrundlagen für Zulassungs- und Genehmigungsverfahren mit Umweltverträglichkeitsprüfung etc.



### Clemency (Luxemburg).

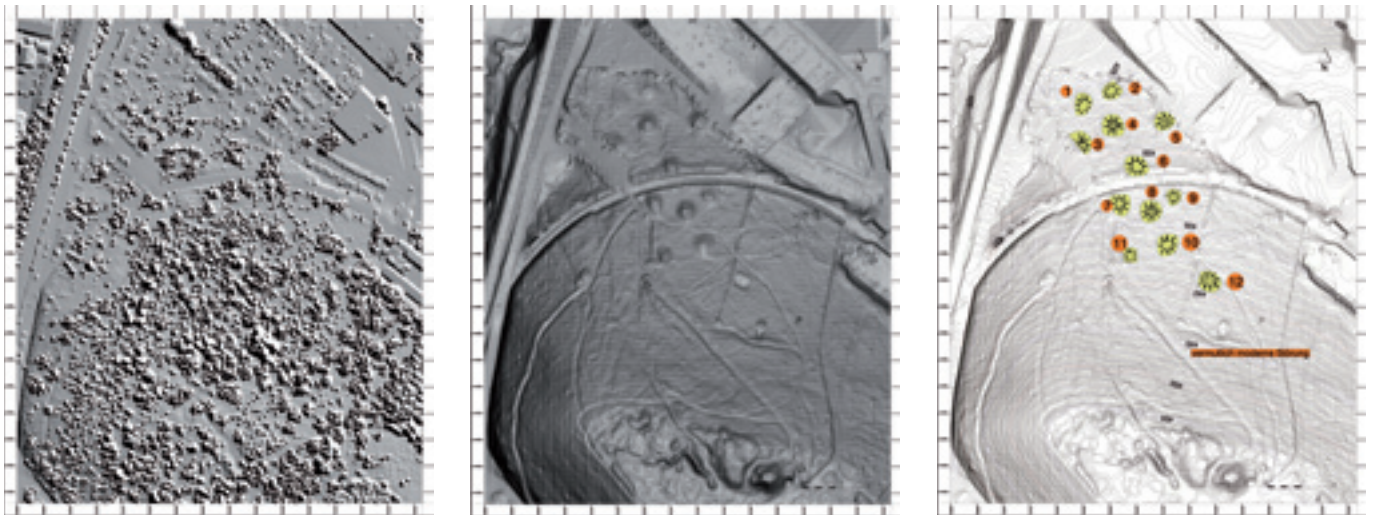
Airborne Laserscan-Daten im Bereich einer bis dahin unbekanntenen eisenzeitlichen Grabhügelgruppe.

Die stark verflachten Grabhügel liegen im 3D-Modell (links) im bewaldeten Gelände. Sie sind als drei kleine weiße Punkte (im Bild rechts oben) markiert. Auf Grund ihrer großen Durchmesser (> 20m) und geringen Höhe (< 0,5m) sind sie selbst vor Ort im Wald kaum zu erkennen. In der sehr fein höhenabgestuften farbigen Auswertung (rechts unten) werden sie jedoch überdeutlich (gelb) sichtbar.

Nachdem die Grabhügelgruppe während der Befliegungen neu entdeckt worden war, konnten archäologische Kontrollgrabungen von Dr. Jeannot Metzler ein früh-eisenzeitliches Grabhügelfeld nachweisen. Grafik rechts unten: Dr. Andreas Schäfer, Universität Jena, Lehrstuhl für Ur- und Frühgeschichte.

## Spezifische fachwissenschaftliche archäologische Auswertung

Bei **ArcTron 3D** sind wir als archäologisches Forschungs- und Dienstleistungsunternehmen zusätzlich auf die Auswertung der Geländemodelle nach archäologischen Kriterien spezialisiert. Fachwissenschaftler, Informatiker und Ingenieure arbeiten Hand in Hand, um mit spezifischen Filtern die archäologischen Befunde optimal in den Daten herauszuarbeiten, zu analysieren und zu strukturieren. Durch Einsatz von Full Waveform Filtern, mit denen das gesamte Frequenzband des Airborne Laserscanners analysiert werden kann, lassen sich insbesondere in stärker bewaldeten Gebieten sehr gute Ergebnisse erzielen.



*Aalen-Wasseralfingen (Baden-Württemberg). Dokumentation eines hallstattzeitlichen Grabhügelfelds. Links: DSM (Digital Surface Model) mit der Lage im lichten bis dichten Laubwald. Mitte: DTM (Digital Terrain Model) ohne Vegetation. Rechts: Planinterpretation. In dem durch Baumaßnahmen bedrohten Grabhügeln fanden anschließend Ausgrabungen durch das LAD Baden-Württemberg (Dr. Krauß) statt.*

In der archäologischen Planauswertung und Kartierung werden bereits bekannte Informationen mit den neuen Messdaten kombiniert. In den Plänen kann dann gezielt nach Verdachtsregionen gesucht werden. Die gesicherten und potentiellen archäologischen Befunde werden von archäologisch ausgebildeten Ingenieuren speziell herausgearbeitet und ggf. zur Prüfung im Gelände vorbereitet. Die Daten werden anschließend in standardisierte GIS/CAD-Kartierungen umgesetzt.

Für die ALS-Daten liefern wir außerdem bei größeren Projekten eine einfach bedienbare 3D-Software aus, die es Ihnen erlaubt, schnell und effizient auf die Landschaftsmodelle zuzugreifen, Strecken zu vermessen, Flächen zu bestimmen, selbst Schnitte durch identifizierte Objekte zu legen, Detailkarten auszudrucken oder überhöhte 3D-Modelle zu visualisieren.

Mit einer Reihe von Projekten für eine Vielzahl unterschiedlicher Auftraggeber haben wir für die Archäologie in den letzten Jahren mit unserer Arbeit verschiedene neue Standards für die archäologische Auswertung von ALS-Daten entwickeln können.

## Einige Projektreferenzen in Auswahl ...

Archäologische Airborne Laserscanning Projekte. Insgesamt konnten wir seit 2005 ca. 50 Projekte in den Bereichen Archäologie und Denkmalpflege realisieren. Bitte fragen Sie uns bei Interesse nach der vollständigen Referenzliste.

Burg Vianden (Luxemburg) Untersuchungsgebiet: ca. 16 km <sup>2</sup>	Kleinlandschaft um die Burg Vianden mit Topografie des Burgbergs, alten Wegesystemen und zahlreichen anderen Befunden. Kombination mit terrestrischen Laserscan-Aufnahmen in einem EU-geförderten Forschungsprojekt.
Bernstorf bei Freising (Bayern) Untersuchungsgebiet: ca. 16 km <sup>2</sup>	Bronzezeitliche Höhensiedlung mit mittelalterlicher Abschnittsbefestigung und umgebender archäologischer Kleinlandschaft. Auftraggeber: Gemeinde Kranzberg und Universität Frankfurt a.M.
Ipf (Baden-Württemberg) Untersuchungsgebiet: ca. 12 km <sup>2</sup>	Der „heilige Berg“ Baden-Württembergs. Vorgeschichtliche Höhensiedlung mit komplexen Wallstrukturen. Auswertung vorhandener Befliegungsdaten der Vermessungsbehörden. Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg
Bartholomäberg – Silbertal – Gaflunatal, Montafon (Österreich) Untersuchungsgebiet: ca. 20 km <sup>2</sup>	Vorgeschichtliche Höhensiedlung und Bergbauspuren (Stollen, Pinggen, Halden etc.). Kombination mit terrestrischen Laserscans. Auftraggeber: Universität Frankfurt a.M. - Montafon Forschungsprojekt (Prof. Krause)
Limes (Bayern, Baden-Württemberg) und Odenwaldlimes (Hessen) Gesamtstrecke: ca. 230 km	Komplette Helikopter-Aufnahme und Auswertung des Weltkulturerbes mit Dokumentation der römischen Limesstrukturen, Wachtürme und Kastellanlagen im Umfeld (Projektdauer: 2007-2009). Auftraggeber: Landesämter für Denkmalpflege Bayern, Baden-Württemberg und Hessen.
Mongolei, Karabalgassun Untersuchungsgebiet: ca. 43 km <sup>2</sup>	ALS-Dokumentation der in der mongolischen Grassteppe gelegenen Stadtanlage des 8./9. Jh. n. Chr. Auftraggeber: Deutsches Archäologisches Institut Bonn (Prof. Hüttel).

Unsere Partner im Bereich des Airborne Laserscannings sind:



**Autodesk®**  
Authorised Developer

**ArcTron**

**ArcTron 3D GmbH**

Ringstraße 8  
D-93177 Altenthann  
Germany

Tel.: +49 9408 8501 0  
Fax: +49 9408 8501 21  
E-Mail: [info@arctron.de](mailto:info@arctron.de)  
Web: [www.arctron.de](http://www.arctron.de)