

# Das Laserscan-DGM von Baden-Württemberg

ANDREAS SCHLEYER, Karlsruhe

## ZUSAMMENFASSUNG

Mit der landesweit flächendeckenden Einrichtung eines neuen, hochgenauen Laserscan-DGM aus einem Guss packt die Vermessungsverwaltung Baden-Württemberg ein Projekt an, das wohl als einmalig in der Bundesrepublik bezeichnet werden kann und mit dem der Vermessungsverwaltung eine Oberflächenbeschreibung des Geländes hoher Qualität zur Verfügung stehen wird. Damit wird es für viele Anwendungen interessant. Bis in den großmaßstäblichen Bereich (z. B. ALK) können Höhenlinien und Böschungen sehr hoher Qualität abgeleitet werden, beim Einsatz in der Orthophotoherstellung wird die Lagegenauigkeit der Objekte wesentlich verbessert werden (wichtig z. B. für die ATKIS-Erfassung). Die Wasserwirtschaftler versprechen sich sehr viel genauere Hochwasserberechnungen und Prognosen durch präzise Simulationen. Aber auch populäre Anwendungen wie virtuelle Flüge über die Landschaft, beispielsweise bei den Wettervorhersagen einer Nachrichtensendung, werden sehr viel realistischer möglich sein. Wird dem DGM ein Orthophoto überlagert, stehen Perspektivansichten von hoher photorealistischer Qualität zur Verfügung. Im Bereich Mobilnetzplanung kann das DOM genauere Ergebnisse liefern. Die Aufzählung der Anwendungen, bis hin zu Ableitungen aus dem DGM wie landesweite Profile, Neigungsmodelle, Neigungsisolines oder Höhengleichlinienpläne, ließe sich beliebig fortsetzen. Die Datenerfassung zur Einrichtung des DGM soll in den Jahren 2000 bis 2003 erfolgen. In vorliegendem Beitrag wird über die vorgesehene Realisierung des DGM, von der Datenerfassung mit Laserscanning über die Datenauswertung bis hin zu den einzelnen Schritten der Datenverarbeitung einschließlich der hierzu erforderlichen Hard- und Software, berichtet. Über konkrete Ergebnisse und Anwendungen wird zu gegebener Zeit zu berichten sein.

## 1. EINLEITUNG

Das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg als Lieferant topographisch-kartographischer Basisdaten ist ständig bestrebt, sein Datenangebot zu vervollständigen und qualitativ, z. B. durch höhere Genauigkeit und Aktualität, zu verbessern, um den Bedürfnissen des Marktes gerecht zu werden. Diese, unter dem Projekt ATKIS zusammengefassten Aktivitäten umfassen

- die Herstellung *Digitaler Orthophotos (DOP)*, die seit Mitte des Jahres 2000 nunmehr landesweit flächendeckend vorliegen,
- die Einrichtung und Fortführung des *Digitalen Landschaftsmodells (DLM)*, das in seiner ersten Ausbaustufe (DLM 25/1) seit Anfang des Jahres 1997 fertiggestellt ist und derzeit weiter vervollständigt und (teilweise spitzentechnisch) fortgeführt wird und
- die Herstellung *Digitaler Topographischer Karten (DTK)*, die derzeit noch durch foliengetrenntes Scannen der jeweils aktuellen topographischen Karten 1 : 25 000, 1 : 50 000 und 1 : 100 000 abgeleitet werden.

Höheninformationen liegen in Baden-Württemberg bislang punktuell in Form des Höhen- und des Lagefestpunktfeldes und flächenhaft in Form von analogen Höhenlinien in den großmaßstäblichen topographischen Karten HFK 25 (Höhenflurkarte 1 : 2 500), DGK 5 (Deutsche Grundkarte 1 : 5 000), den daraus abgeleiteten Höhenlinien in den kleinmaßstäblichen topographischen Karten und in Form des "Digitalen Höhenmodells von Baden-Württemberg (DHM)" vor. Die Situation ist damit geprägt von sehr heterogenen Höheninformationen unterschiedlicher Herkunft und Qualität, die redundante Datenführung hat Dateninkonsistenzen zur Folge. Insgesamt müssen den Höheninformationen damit folgende Mängel bescheinigt werden:

- teilweise keine Fortführung,

- teilweise Repräsentanz der Vegetationsoberfläche,
- Genauigkeit entspricht nicht den Anforderungen,
- unzureichende Punktdichte,
- fehlende morphologische Strukturen,
- fehlende ATKIS-Konformität,
- keine Qualitätsangaben.

Mögen vorliegende Höheninformationen teilweise einzelnen Anforderungen durchaus noch gerecht werden, so steigen mit dem Anwachsen der digitalen Datenbestände in Geoinformationssystemen (GIS) und den damit verbundenen Verknüpfungsmöglichkeiten die Anforderungen und die Nachfrage nach qualitativ hochwertigen, digitalen Reliefdaten.

Das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg hat sich deshalb entschlossen, diese Marktlücke im Angebot digitaler topographischer Geobasisdaten zu schließen, und wird in den Jahren 2000 bis 2003 ein hochgenaues, landesweit flächendeckendes Digitales Geländemodell (DGM) einrichten.

## **2. REALISIERUNG DES DGM**

### **2.1. Europaweite Ausschreibung**

Am 26.08.1999 wurde, nachdem das Pflichtenheft erstellt und vom Wirtschaftsministerium genehmigt wurde, die Einrichtung des neuen DGM im Supplement zum Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften europaweit bekannt gemacht. Von den 22 Firmen, die sich fristgerecht um die Teilnahme an der Ausschreibung beworben hatten, reichten acht Firmen ein Angebot ein. Da in der Ausschreibung die Methode des Aufnahmeverfahrens zur Datengewinnung nicht vorgeschrieben war, reichte das Spektrum der angebotenen Aufnahmemethoden vom klassischen photogrammetrischen Verfahren über Laserscanning bis hin zur Radarinterferometrie. Den Zuschlag erhielt die Firma TopScan mit ihrem Laserscanning-Verfahren, der Vertrag wurde Ende Dezember 1999 unterzeichnet.

### **2.2. Datenerfassung mit Laserscanning**

Die Laserscanner-Messung der Firma TopScan (Wever 1998, 1999) ist ein flugzeuggestütztes Verfahren zur Relieferfassung. Dabei werden von einem im Flugzeug eingesetzten System in regelmäßigen Abständen Laserimpulse ausgesendet, die vom Erdboden und den darauf befindlichen Objekten reflektiert werden. Durch Laufzeitmessung wird die Entfernung zwischen dem Lasersensor und der Geländeoberfläche bestimmt. Der Laserimpuls wird zudem quer zur Flugrichtung durch einen rotierenden Spiegel abgelenkt. Dadurch wird ein Geländestreifen mit einer Zickzacklinie entlang des Flugweges abgetastet. Als Multisensorsystem basiert die Laserscanner-Messung somit auf folgenden Hauptkomponenten:

- Laserdistanzmesser mit Scanvorrichtung,
- Inertiales Navigationssystem (INS) und
- GPS-Empfänger und GPS-Referenzstation (am Boden).

Die dreidimensionalen Laserpunkte werden mit Hilfe von räumlichen Vektoren berechnet, deren Anfangspunkte durch GPS, deren Richtung durch INS und deren Länge durch Entfernungsmessung bestimmt werden. Eine charakteristische Eigenschaft von Laserscannern ist die Unterscheidung von Mehrfachreflexionen. Für einen einzelnen Laserimpuls können über der Vegetation mehrere

Reflexionen beobachtet werden, da Teile des Lichtimpulses an der Vegetation reflektieren können, andere bis auf den Erdboden vordringen. Mit den Laserscannern der neuen Generation können sowohl die ersten Reflexionen (first-pulse) als auch die letzten Reflexionen (last-pulse) aufgezeichnet werden.

Mit Hilfe von Filteralgorithmen, basierend auf den Höheninformationen benachbarter Punkte, werden die erfassten Punkte verschiedenen Punktgruppen zugeordnet (klassifiziert). Man unterscheidet die tiefsten Punkte, auch Bodenpunkte genannt, und die übrigen Punkte, auch als Hochpunkte oder Vegetationspunkte bezeichnet. In der Regel repräsentieren die tiefsten Punkte aus der last-pulse-Aufzeichnung das Gelände.

Die Eckwerte und Parameter zur Datenerfassung des neuen DGM in Baden-Württemberg lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Flächendeckende Aufnahme der gesamten Landesfläche von Baden-Württemberg (ca. 35 800 km<sup>2</sup>).
2. Befliegungszeiten in den vegetationsarmen Wintermonaten Dezember bis April.
3. Mittlerer Abstand der aufgenommenen Punkte 1 m - 2 m.
4. Höhengenaugigkeit der aufgenommenen Punkte  $\pm 0,15$  m (einfache Standardabweichung), d. h., 97 % aller aufgenommenen Punkte stimmen innerhalb von max.  $\pm 0,5$  m mit den tatsächlichen Höhen überein.
5. Georeferenzierung im Bezugssystem ETRS89, Abbildungssystem UTM.
6. Automatische Klassifizierung der aufgenommenen Punkte in Boden- und Hochpunkte.
7. Datenlieferung in Kacheln von 1 x 1 km<sup>2</sup>, gruppiert nach
  - Bodenpunkte aus first-pulse-Aufzeichnung,
  - Hochpunkte aus first-pulse-Aufzeichnung,
  - Bodenpunkte aus last-pulse-Aufzeichnung,
  - Hochpunkte aus last-pulse-Aufzeichnung,
  - Daten zur Ableitung eines DOM und
  - Daten der Reflexionsintensität.
8. Ermittlung von Kontrollflächen durch das Landesvermessungsamt
9. GPS-Messungen auf den Referenzstationen während der Befliegung durch das Landesvermessungsamt (Entfernung Referenzstation zum Flugzeug max. 50 km).

Das für die Datenerfassung in Baden-Württemberg von der Firma TopScan eingesetzte System ist das von der kanadischen Firma Optech Inc. vertriebene ALTM 1225 (Airborne Laser Terrain Mapper) mit einer Messfrequenz von 25 000 Hz, einem Scanwinkel von 0° -  $\pm 20^\circ$ , einer Reichweite von max. 2 000 m, einer simultanen first- und last-pulse-Registrierung und der Erfassung der Reflexionsintensität. Die Systemeinstellungen für die Befliegung Baden-Württembergs sind folgende:

- Messfrequenz: 25 000 Hz
- Scanfrequenz: 25 Hz
- Scanwinkel:  $\pm 20^\circ$
- Fluggeschwindigkeit: 80 m/sek.
- mittl. Flughöhe: 900 m
- Streifenabstand: 300 m, 400 m und 450 m in Abhängigkeit von der Reliefenergie

Aus den Systemeinstellungen ergibt sich ein mittlerer Punktabstand aller Laserpunkte von ca. 1,5 m.

### 2.3. Datenauswertung und Berechnung des DGM

Die Datenerfassung zur Einrichtung des landesweiten DGM soll vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2003, d. h. in vier Befliegungsjahren, erfolgen. Die erste Befliegung hat im April 2000 im Nordwesten Baden-Württembergs (Fläche ca. 1500 km<sup>2</sup>) stattgefunden, die letzte Befliegung ist im Winter 2002/2003 geplant. Insgesamt sollen drei Modelle erstellt werden:

1. ein DGM (Gitterweite 5 m, Genauigkeit  $< \pm 0,5$  m, ohne morphologische Strukturelemente),
2. ein DGM (wie oben, mit morphologischen Strukturelementen) und
3. ein DOM (Gitterweite 10m, Genauigkeit ca. 2m).

Die Datenverarbeitung und die Berechnung der Modelle erfolgt sukzessive nach der Datenlieferung und wird für das DGM ohne morphologische Strukturelemente ca. ein Jahr nach der letzten Datenlieferung fertiggestellt sein.

Dass die Verarbeitung der zu erwartenden großen Datenmengen (insgesamt ca. 3,5 Terrabyte) nicht trivial ist, liegt auf der Hand. Das Landesvermessungsamt hat deshalb bei der Firma INPHO GmbH in Stuttgart eine Studie in Auftrag gegeben, in der die erforderliche Hard- und Software und die notwendige Datenorganisation beschrieben werden.

#### 2.3.1. Hardware

Die Hardwarekonfiguration basiert auf einer Client-Server-Architektur (siehe Abbildung 1) innerhalb eines LAN (Lokal Area Network).

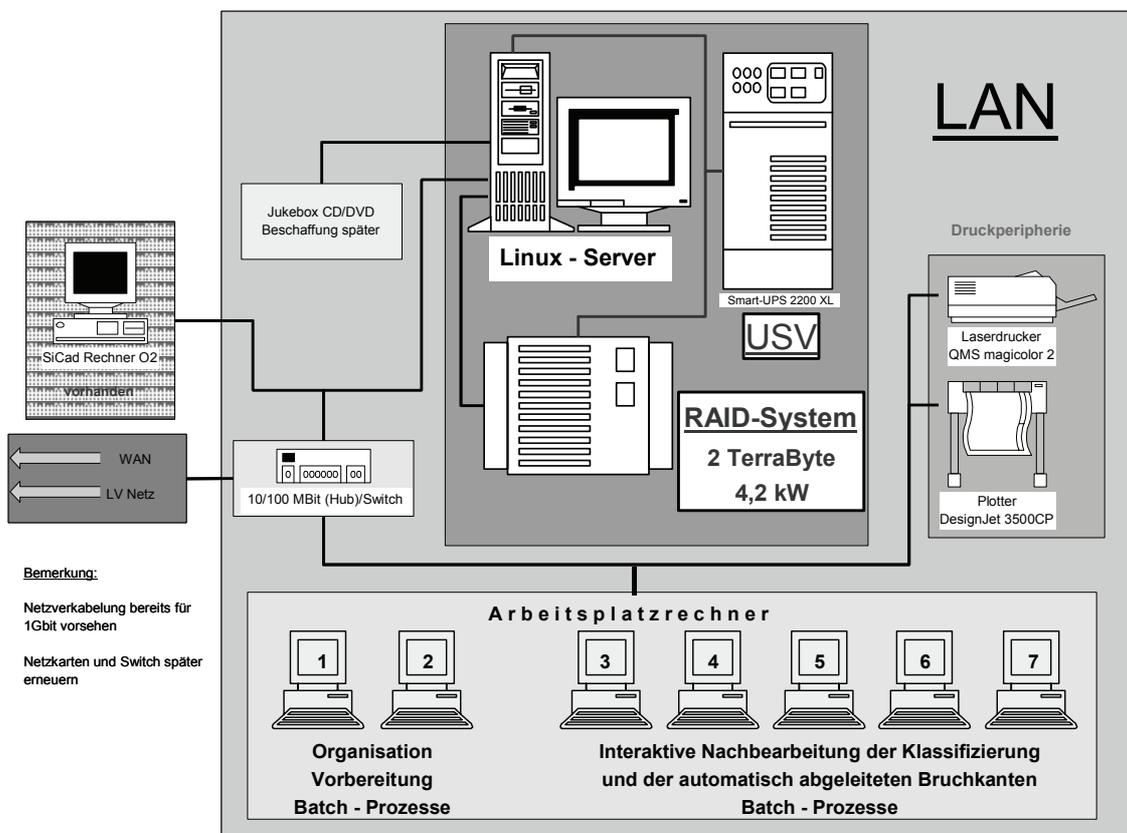


Abb.1 : Hardwarekonfiguration

Für die Datenverarbeitung (Clients) sind insgesamt sieben PC (Arbeitsplatzrechner) vorgesehen. Alle Arbeitsplatzrechner werden mit dem Betriebssystem Windows-NT 4.0 ausgestattet. Als Server dient ein PC mit dem Betriebssystem LINUX, der u.a. die Kommunikation mit einem RAID-System steuert. Dieses RAID-System mit einer Speicherkapazität von 2 Terrabyte dient der Datenhaltung der Laserscandaten und der fertig berechneten Modelle. Zusätzlich werden die Daten verschiedener Bearbeitungszustände auf externen Datenträgern (CD, DLT) gesichert. Der LAN-Server und das Raid-System werden mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) betrieben, um bei Stromausfall ein korrektes Herunterfahren der Systeme sicherzustellen.

### 2.3.2. Software

Seit dem Aufbau des DHM Baden-Württemberg in den 80er-Jahren wird beim Landesvermessungsamt das Programmsystem SCOP (Stuttgart Contur Program) der Fa. Inpho GmbH zur Berechnung und Datenverwaltung digitaler Höhenmodelle eingesetzt. Mit dem Modul GVE (Graphical Viewer Editor) können DHM-Daten interaktiv nachbearbeitet und editiert werden. Auch bei der Einrichtung der neuen DGM / DOM bilden SCOP und GVE die Basis der Softwareumgebung.

Zusätzlich waren und sind jedoch weitere, zum Teil umfangreiche Software-Entwicklungen notwendig. So wurde die Fachhochschule Karlsruhe (R. Jäger und S. Kälber) mit der Entwicklung von drei Programmen speziell für diesen Zweck beauftragt:

- GEOMATRA (Dreidimensionale Georeferenzierung von Massendaten nach strengen Transformationsansätzen) für die Transformation der Laserscandaten in das Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem im Deutschen Hauptdreiecksnetz (DHDN) und in Höhen ü. NN im Deutschen Haupthöhennetz (DHHN).
- EXTRA (Extraktion von DGM-Daten aus Ergebnisdateien der Software GEOMATRA) für die Kachelung der Laserscandaten nach den Koordinatenachsen des Gauß-Krüger-Meridianstreifensystems.
- DGMCheck (Qualitätssicherung von DGM-Datenbeständen auf Basis vorzugebender Kontrollpunkte) für den Vergleich der Laserscandaten mit der Umgebung von lage- und höhenmäßig bekannten Punkten.

Softwarepakete zur automatischen Ableitung von Bruchkanten und deren Editierung befinden sich derzeit in der Entwicklung.

### 2.3.3. Datenverarbeitung

Die Arbeitsschritte zur Erstellung der oben genannten drei Modelle lassen sich im Wesentlichen wie folgt beschreiben (siehe Abbildung 2):

#### Datenaufbereitung

Aus den aufgenommenen Laserscandaten werden durch die Fa. TopScan GmbH verschiedene Punktgruppen gebildet:

- Eine Auswahl der höchsten Punkte innerhalb eines vorzugebenden Gitters (z.B. 5 m) liefert die Daten zur Ableitung eines DOM.
- Die Daten der last-pulse Aufnahme werden automatisch klassifiziert in Bodenpunkte und Hochpunkte. Sie bilden die Basis für das DGM.

- Die Daten der first-pulse Aufnahme, ebenfalls automatisch klassifiziert in Bodenpunkte und Hochpunkte, werden nach der Plausibilitätsprüfung beim Landesvermessungsamt zunächst nicht weiter verarbeitet. Sie können bei Bedarf transformiert und als Rohdaten für spezielle Anwendungen genutzt und verkauft werden, wie z.B. für Stadtmodelle und Leitungsüberwachungen.
- Aus den Daten der Reflexionsintensität wird ein Graustufenbild abgeleitet, das u.a. als Interpretationshilfe bei der interaktiven Nachbearbeitung der Laserscan-Daten genutzt werden kann.

Sämtliche Daten werden im Bezugssystem ETRS89, Abbildungssystem UTM und ellipsoidischen Höhen (bezogen auf GRS80) geliefert. Die Liefereinheiten sind 1x1 km<sup>2</sup> große Kacheln bezogen auf die UTM – Koordinatenachsen.

### Vorverarbeitung

Nach der Datenlieferung führt das Landesvermessungsamt folgende Vorverarbeitung der Daten durch:

- *Prüfung* der Daten auf Vollständigkeit und Plausibilität:  
Hierbei wird geprüft, ob die Datenträger (CD) lesbar und die Daten vollständig und den jeweils richtigen km<sup>2</sup>-Kacheln zugeordnet sind.
- *Transformation* der Laserscanpunkte aus der last-pulse-Aufzeichnung und der Punkte zur Ableitung eines DOM von ETRS89/UTM und ellipsoidischer Höhe nach Gauß-Krüger und Höhen ü. NN (GEOMATRA).
- *Kachelung* der transformierten Punkte in 1x1 km<sup>2</sup> große Kacheln, begrenzt durch die Koordinatenachsen des Gauß-Krüger-Meridianstreifensystems (EXTRA).
- *Qualitätskontrolle* der transformierten Laserscandaten durch Vergleich mit den vom Landesvermessungsamt bestimmten Kontrollflächen, sowie mit nach Lage und Höhe bekannten Punkten (SCOP/DGMCheck).  
Zusätzlich werden zur Datenkontrolle vorhandene Höheninformationen des Landesamts für Flurneueordnung und Landentwicklung und des Landesamts für Straßenwesen verwendet.

### Interaktive Nachbearbeitung, Ableitung morphologischer Strukturelemente

Trotz des hohen Automationsgrades der Laserscanmethode sind umfangreiche interaktive Nacharbeiten notwendig:

- Da die Algorithmen zur automatischen Klassifizierung der Laserscan-Punkte in Bodenpunkte und Hochpunkte auf den Höhendifferenzen benachbarter Punkte beruhen, sind Fehlinterpretationen unvermeidlich. Diese gilt es durch eine interaktive Nachbearbeitung der Klassifizierung zu beseitigen. Hierbei werden falsch klassifizierte Punkte unter Zuhilfenahme von Orthophotos und Gebäuden aus der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) als Interpretationshilfe der richtigen Punktgruppe zugeordnet (Bodenpunkte  $\leftrightarrow$  Hochpunkte). Als Werkzeug dient hier der GVE. Die so gewonnenen bereinigten Bodenpunkte der last-pulse-Aufzeichnungen werden zur Berechnung des DGM verwendet.
- Aus den so bereinigten Daten werden automatisch Bruchkanten abgeleitet, die ebenfalls interaktiv nachbearbeitet werden müssen.

- Bei den Daten zur Ableitung eines DOM sind die für die gewünschte Modellbildung nicht relevanten Objekte zu eliminieren. Hierbei handelt es sich vor allem um Hochspannungsleitungen, hohe Funk- und Fernsehtürme oder Brücken. Diese Objekte werden in einer gesonderten Datei abgelegt, um sie für spezielle Anwendungen, z.B. für die Flugsicherung, wieder in das DOM aufnehmen zu können.

### Gitterberechnung

Aus den interaktiv nachbearbeiteten Daten werden die oben genannten drei Modelle abgeleitet (SCOP).

Für das DOM wird ein 10m-Raster berechnet. Für die DGM mit und ohne morphologischen Strukturelementen ist ein 5m-Raster vorgesehen.

Ein dichteres Raster von 1m ist aufgrund der hohen Aufnahmepunktdichte denkbar, vor allem für das DGM ohne morphologische Strukturelemente.

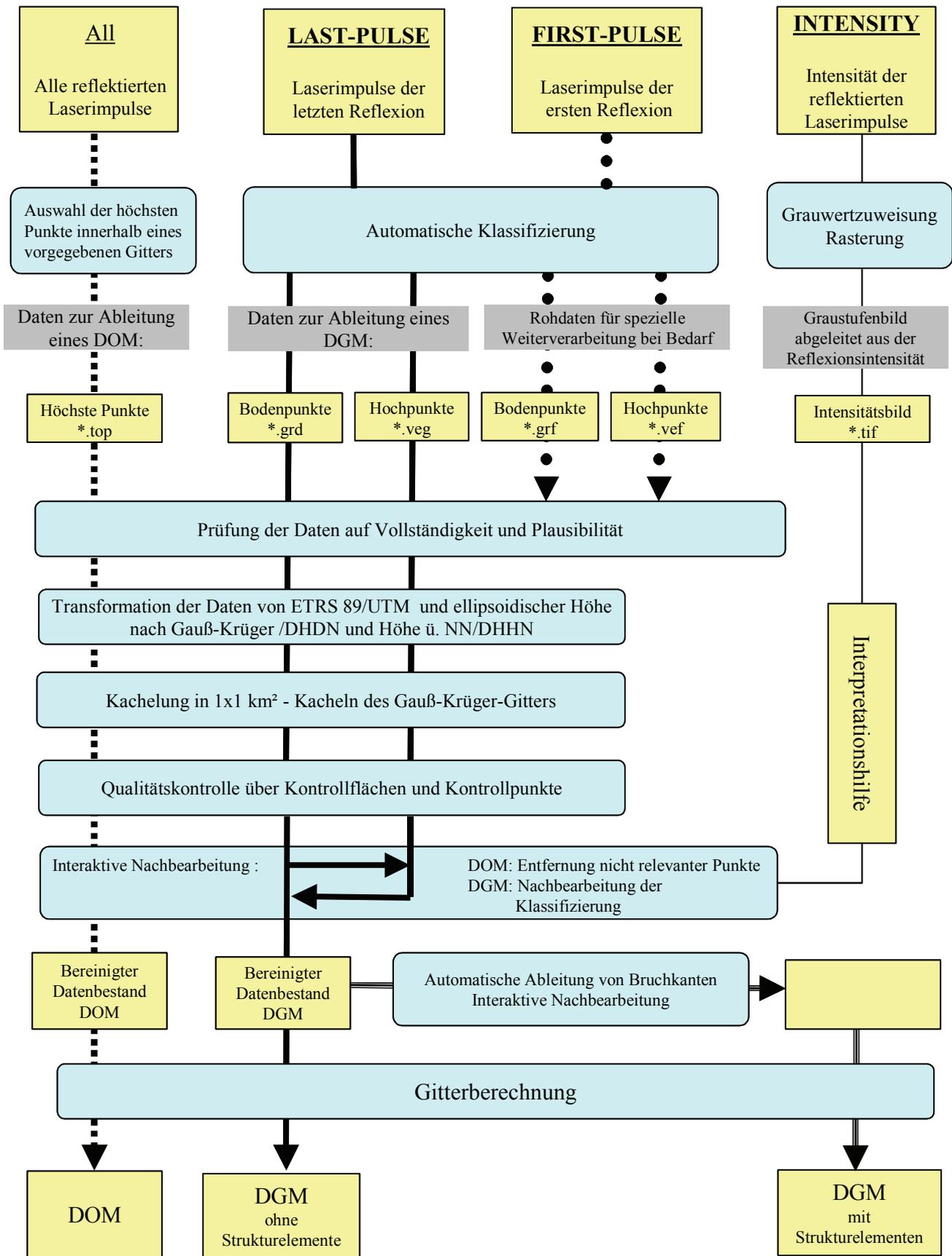


Abb.2: Von den Laserscandaten zum DGM / DOM

### 3. LITERATUR

- AdV, 1999: Technische Verfahren zum Aufbau bundesweit einheitlicher digitaler Gelände- und Oberflächenmodelle, Expertise.- Unveröffentlichter Entwurf der Expertengruppe "Digitale Geländemodelle" im AdV-Arbeitskreis Topographie und Kartographie vom 31.12.1999.
- HOSS, H., 1997: Einsatz des Laserscanner-Verfahrens beim Aufbau des Digitalen Geländehöhenmodells (DGM) in Baden-Württemberg.- Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2/1997, S. 131-142.
- KLEUSBERG, A., KLAEDTKE, H.-G., 1999: Zur Genauigkeit von Digitalen Höhenmodellen aus Radarbefliegungen.- AVN, 6/1999, S. 202-206.
- LOTHHAMMER, K., 2000: Moderne DGM-Generierung.- Mitteilungen des DVW-Landesvereins Baden-Württemberg, 47, 1, S. 5-45.
- REISS, P., 1998: Digitale Geländemodelle - Datengewinnung, Aufbau und Einbindung in ATKIS.- Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (Hrsg.), Auf dem Weg zu einheitlichen Geodaten des amtlichen Vermessungswesens, Vorträge anlässlich des 4. AdV-Symposiums ATKIS, Stuttgart 1998, S. 157-168.
- STIES, M., KRÜGER, S., 1999: Statistische Untersuchung der Differenzen zweier Höhendatensätze.- Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Karlsruhe, Juni 1999, unveröffentlicht.
- STIES, M., 1999: Moderne topographische Erfassungsmethoden im Überblick.- Veröffentlicht beim Workshop "Ermittlung von Überflutungsflächen an Fließgewässern". Karlsruhe 16./17.06.1999.
- STIES, M., u.a., 2000: Comparison of digital elevation data from airborne laser and interferometric SAR systems.- Proc. of the 19. Congress on Photogrammetry and Remote Sensing, July 2000, Amsterdam, Archives of the ISPRS.
- WEVER, C., 1998: Automatische Relieferfassung mittels Laserscannermessung.- Veröffentlicht bei der 12. Informationsveranstaltung der Bayerischen Vermessungsverwaltung am 12.04.1998.
- WEVER, C., 1999: Laserscannermessungen - ein Verfahren setzt sich durch. Geoinformationssysteme (GIS), 2/1999, S. 12-17.