

Mit Datenfusionierung Mehrwerte schaffen – Ein Expertensystem zur Baufallerkundung



Stefan Geßler



Thomas Krey



Karin Möst



Robert Roschlaub

Zusammenfassung

Am Beispiel der Baufallerkundung wird aufgezeigt, wie durch eine Kombination verschiedener Daten und der Festlegung neuer Prozessabläufe bestehende Aufgaben mit hoher Effizienz flächendeckend umgesetzt werden können.

1. Einleitung

Am Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) sind vielfältige qualitätsgesicherte Daten vorhanden. Die Daten werden auf gesetzlicher Grundlage aufgaben- und maßstabsbezogen erfasst.

Einerseits ist die Ableitung neuer Produkte durch eine Kombination maßstabsbezogener Daten mit hochauflösenden Daten schwierig. Andererseits steht für die Anwender die Kombination von Daten und ihre Verfügbarkeit im Fokus neuer Entwicklungen. Die Digitalisierung bietet die Chance, unterschiedliche Daten maßstabsunabhängig und in verschiedenen Formaten für verschiedenste Anwendungen bereitzustellen. Diese Daten müssen hoch aktuell sein und zugleich auch den

Anforderungen der Wirtschaft genügen. Beispielsweise hat die Versicherungswirtschaft neben der Verwaltung ein großes Interesse an einem aktuellen Gebäudebestand zur Policierung von Verträgen bis hin zur Bewertung von hochwassergefährdeten Gebäuden oder zur Begutachtung nach einem Schadensereignis.

Nach einem Beschluss der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) sollten bis zum 1. Januar 2019 3D-Gebäudemodelle mit standardisierten Dachformen im sogenannten "Level of Detail 2" (LoD2) deutschlandweit in Eigenverantwortung der Länder fertiggestellt werden. Das Großprojekt der bayernweiten 3D-Gebäude-Ersterfassung lief von 2012 bis ins erste Quartal 2019. Eine spezielle Erfassungssoftware für die automatisierte Erkennung von standardisierten Dächern aus Laserscanning-Punktwolken und den Gebäudegrundrissen des Liegenschaftskatasters erleichterte die Datenerfassung der 9 Millionen Gebäude Bayerns erheblich. Nachdem 3D-Gebäude bereits in Form eines Klötzchenmodells als LoD1 über die Zentrale Stelle für Hauskoordinaten und Hausumringe (ZSHH) zentral vertrieben werden, steht das LoD2 als zweite Ausbaustufe der 3D-Gebäudemodelle vor seinem deutschlandweiten Vertrieb. Nach einem weiteren Beschluss der AdV sollen von den Ländern bis Anfang des Jahres 2023 die klassischen Digitalen Orthophotos (DOP) als sogenannte TrueDOP zur Verfügung gestellt werden [AdV 2017]. Hohe Gebäude und Objekte werden im TrueDOP ohne Umklappeffekte und daher lagerichtig dargestellt. Das TrueDOP wird im Rahmen der Produktion aus einem bildbasierten Oberflächenmodell (bDOM) berechnet, welches definitionsgemäß Höheninformationen enthält.

Während in einigen Veröffentlichungen die Gebäudeerkennung samt der Typisierung von Dachstrukturen aus Satellitendaten oder Luftbildern im Fokus der Aktivitäten steht [Alidost 2018, Marmanis et al. 2016, Valinger 2015], kann in Deutschland diese Aufgabe durch die LoD2-Gebäude als vollständig abgeschlossen betrachtet werden. Zukünftig gilt es, diese Datenbestände fortzuführen. In Bayern gehört zur Fortführung auch die Erfassung von Altbaufällen. Das sind Gebäude, die teilweise schon vor Jahren errichtet, aber nie katastertechnisch erfasst wurden und somit im Liegenschaftskataster fehlen. Aufgrund der nicht vorhandenen Grundrisse im Liegenschaftskataster wurden diese Altbaufälle nicht im Rahmen der 3D-Gebäudeerfassung als LoD1 oder als LoD2 modelliert.

Im Folgenden wird ein Verfahren zur Baufallerkundung durch eine Datenfusionierung aus bDOM-Daten, den Gebäudegrundrissen der Digitalen Flurkarte (DFK) und dem Digitalen Geländemodell (DGM) erläutert, das als Expertensystem aufgebaut wurde und die Ämter für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (ÄDBV) in ihrer Arbeit unterstützen soll. Das Konzept dient als Beitrag zur Fortführung des Liegenschaftskatasters und der LoD2-Gebäudemodelle.

2. Datengenerierung für die Baufallerkundung

Seit jeher ist die Erfassung von lokalen Änderungen im Höhenmodell von Interesse für die Nutzer. Dies betrifft vor allem erosionsgefährdete Gebiete, Baumaßnahmen und auch Veränderungen in der Vegetation. Bis vor einigen Jahren wurden kleinräumige Geländeänderungen ausschließlich vor Ort mit Tachymeter und Prisma erfasst. Für großräumige Veränderungen wurden Befliegungen mit Airborne Laser-scanning (flugzeuggestütztes Laserscanning) durchgeführt (Bild 1).

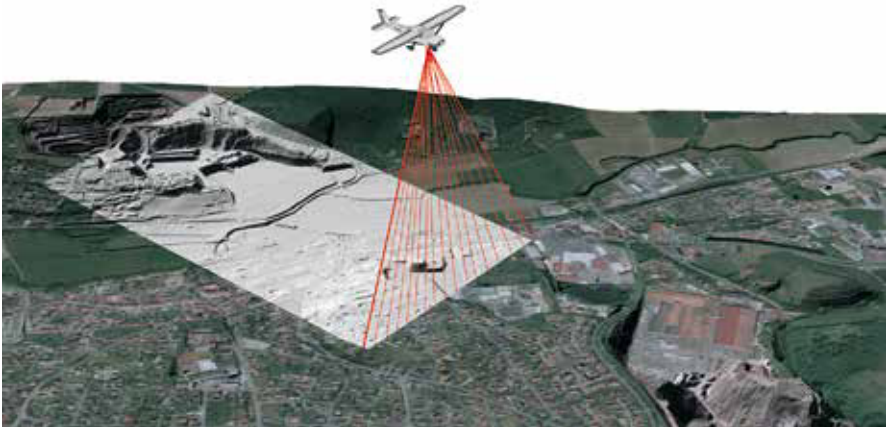


Bild 1: Befliegung mit Laserscanner, Airborne Laserscanning

Mittlerweile steht ein weiteres Höhenmodell aus Bilddaten zur Verfügung. Die als Bayernbefliegung bekannte und seit dem Jahr 2017 in einem Zweijahreszyklus durchgeführte Digitale Luftbildbefliegung wird mit einer Bodenauflösung von 20 cm sowie einer Längsüberdeckung von 80 % und einer Querüberdeckung von 60 % befliegen. Aus den digitalen Luftbildern lässt sich ein bildbasiertes Digitales Oberflächenmodell (bDOM) ableiten, das seit dem Jahr 2016 für Bayern flächendeckend zur Verfügung steht. Die konsequente Fortsetzung der Anpassung an die Fachtechnik ist die Produktion eines mittels Orthogonalprojektion abgeleiteten Digitalen Orthophotos als sogenanntes TrueDOP. Mit dem bDOM liefert die Digitale Photogrammetrie ein Höhenmodell, das in einer Rasterweite von 40 cm als 2.5D-Modell vorliegt und aus einer dreidimensionalen Punktwolke durch Korrelation mehrerer digitaler Luftbilder (dem sogenannten Image Matching) aus einem 3D-Modell abgeleitet wurde (Bild 2). Das bDOM kann an vegetationsfreien Stellen ersatzweise für Laserpunktwolken verwendet werden – insbesondere dann, wenn die Airborne Laserscanning-Befliegung bereits länger zurückliegt. In der Praxis hat sich bei der Fortführung von 3D-Gebäudemodellen und der Fortführung des DGM die Verwendung der Gitterpunkte des

regelmäßigen bDOM vielfach als ausreichend herausgestellt [Hümmer et al. 2014, Krey et al. 2016].



Bild 2: 3D-Punktwolke aus Image Matching (links) und abgeleitetes bDOM (rechts)

In vegetationsfreien Gebieten ist es mit dem bDOM möglich, Geländeänderungen zu detektieren. Zusätzlich können in Zukunft die Höhendifferenzen aus den Höhenmodellen verschiedener Epochen berechnet werden. Als Nutzer kommen Kunden in Betracht, die Änderungen im Oberflächenmodell für ihre Auswertungen brauchen. In der Vermessungsverwaltung sind dies unter anderem die ÄDBV. Für sie sind die noch nicht erfassten Gebäudeveränderungen von Interesse. Gebäudeveränderungen wie Neubauten, Aufstockungen, Anbauten oder Abrisse bilden sich in Form von Höhenänderungen im Oberflächenmodell ab. Daher können zur Detektion von Gebäudeveränderungen Höhenmodelle die entscheidenden Hinweise liefern.

2.1 Wahl der Erfassungsgrundlage

Daten aus Airborne Laserscanning sind die erste Wahl bei der Detektion von Höhenänderungen. Der Laser erfasst sowohl die Oberfläche als auch den Boden, da der Laserstrahl bei Befliegungen während der vegetationsarmen Zeit bis zum Boden durchdringt. Bei der Prozessierung werden die erfassten Laserpunkte in Gebäude-, Boden- und Nichtboden-Punkte klassifiziert (Bilder 3 u. 4). Anschließend kann aus der klassifizierten Punktwolke ein Digitales Geländemodell (DGM) oder ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) berechnet werden (Bild 5). Anwendungsbezogen können Laserpunkte zusätzlich mit R-G-B-Werten aus dem TrueDOP eingefärbt werden.

Zunächst liegt es nahe, die bayernweit verfügbaren Daten aus Airborne Laserscanning für die Baufallerkundung zu verwenden, da sie mit einer hohen Genauigkeit vorliegen.

Darüber hinaus ermöglichen die aus der Airborne Laserscanning-Befliegung resultierenden unterschiedlichen Reflektionen des Laserstrahls (first-, intermediate-, last- und only-Return) eine Trennung künstlicher Bauwerke von der Vegetation. Dächer, die unter der Vegetation liegen, lassen sich klassifizieren. Die reflektierten Laserstrah-

len haben gegenüber den bDOM-Daten aus Image Matching zudem ein deutlich geringeres Rauschverhältnis.

Das aus der Bayernbefliegung abgeleitete bDOM ist im Unterschied zu dem aus der Punktwolke des Airborne Laserscanning abgeleiteten DOM nicht klassifiziert, hat jedoch zusätzlich R-G-B-Farbwerte und den Infrarotwert gespeichert. Das bDOM entspricht einem Oberflächenmodell, d.h. die Erdoberfläche und alle darauf befindlichen Objekte werden abgebildet.

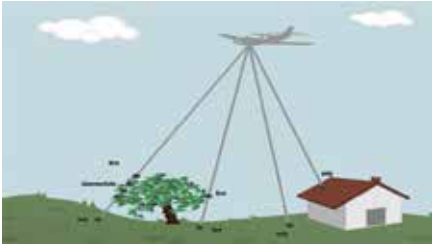


Bild 3: Laserscanning, first- intermediate-, last-, only>Returns

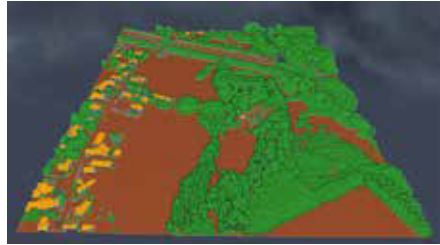


Bild 4: klassifizierte Laserpunktwolke (Boden-, Nichtboden- und Gebäudepunkte)

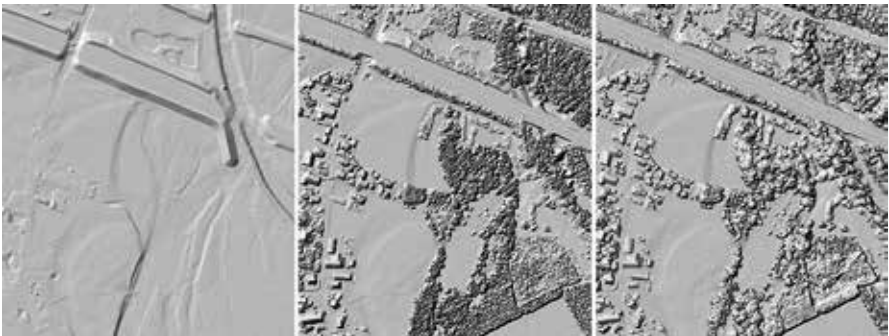


Bild 5: Geländemodell aus Laserscanning

Oberflächenmodell aus Laserscanning

Oberflächenmodell aus Image Matching

Die Qualität der abgeleiteten Höheninformationen ist im Hinblick auf das Rauschverhalten und die Modellierung zwischen den Laserdaten und einem bDOM sehr unterschiedlich (Bilder 6a und 6b). Dies wird im direkten Vergleich der Profilsichten deutlich. Laserdaten weisen in der Profilsicht wenig Rauschen auf und bilden Kanten schärfer ab. Das aus der Korrelation abgeleitete bDOM reagiert auf die Radiometrie in den Luftbildern sensitiv. Dies hat ein höheres Rauschverhalten zur Folge. Gebäude, die von Vegetation überdeckt sind, werden im Höhenprofil der Laserdaten klar erkannt, während das Gebäude im Höhenprofil des bDOM teilweise verschwindet.

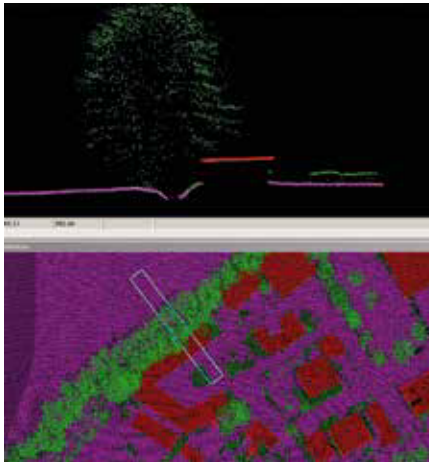


Bild 6a: Gebäude unter Vegetation in LiDAR-Punktwolke



Bild 6b: Gebäude unter Vegetation in Matching

Die bDOM-Daten haben jedoch mit der seit dem Jahr 2017 im Zweijahreszyklus durchgeführten Bayernbefliegung den entscheidenden Vorteil der Aktualität, d. h. jedes Jahr steht für die Hälfte von Bayern ein aktuelles Oberflächenmodell aus Bild-daten zur Verfügung, während das aus dem sehr kostenintensiven Airborne Laser-scanning abgeleitete DOM eine Aktualität von bis zu 10 Jahren aufweisen kann. Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben ist das bDOM in diesem Fall trotz der fehlenden Klassifizierung und des stärkeren Rauschens die zum Einsatz kommende Daten-grundlage zur Baufallerkundung.

2.2 Definition des Prozessablaufes

Zur Einführung eines neuen Prozessablaufs zur Datengenerierung für die Baufallerkundung ist es erforderlich, eine einfache Lösung zu etablieren, ohne dass der Einsatz mehrerer unterschiedlicher Programme erforderlich ist. Es sollen bereits vorhandene Softwarepakete zum Einsatz kommen. Weiterhin soll die Möglichkeit bestehen, große Bereiche schnell zu prozessieren und Prozessparameter flexibel anzupassen. Dies ist das Ziel des im Folgenden beschriebenen Expertensystems.

Die verwendeten Ausgangsdaten liegen im binären laz-Format vor. Dieses Datenformat ist optimiert für die Speicherung und Prozessierung von Punktwolken. Unterschieden werden muss bei der Prozessierung, ob Baufälle detektiert werden sollen, die älter sind als das für die Verarbeitung herangezogene älteste bDOM. In diesem Fall ergibt sich als Lösungsansatz, die Differenz aus dem aktuellen bDOM zum

DGM zu berechnen (normalisiertes Oberflächenmodell, nDOM). Hiermit wird der komplette vorhandene Gebäudebestand abgebildet. Allerdings verbleibt nach der Prozessierung ein großer Anteil an Vegetation im Datensatz. Für die anschließende Durchmusterung ist dies eine nicht zu unterschätzende Erschwernis. Soll nur die Veränderung im Gebäudebestand innerhalb einer Aktualisierungsperiode des bDOM ermittelt werden, ist das Differenzhöhenmodell aus den zwei bDOM-Datensätzen vorteilhaft. Die Prozessierung der Daten verläuft gleich, deshalb soll hier nur auf das Differenzmodell aus den beiden bDOM-Epochen eingegangen werden.

Das Differenzhöhenmodell, das aus zwei bDOM-Epochen berechnet und als tDOM bezeichnet wird, enthält zusätzlich Farbinformationen, die ausschließlich aus dem aktuelleren bDOM stammen; es werden keine Farbwerte der beiden zugrundeliegenden Epochen interpoliert.

Das tDOM bildet jegliche Höhenänderung in der Oberfläche zwischen den ausgewählten bDOM-Epochen ab, also auch Änderungen in der Vegetation, einen unterschiedlichen Wasserstand bei der Erfassung oder unterschiedliche Verkehrssituationen (Bild 7).

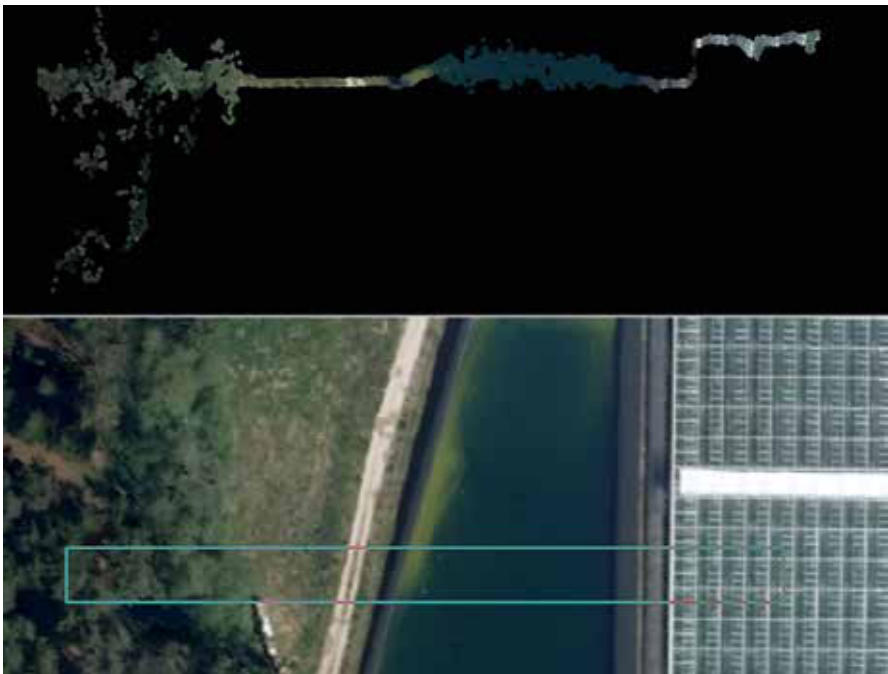


Bild 7: Profilquerschnitt (oben) eines tDOM (Vegetations- Wasserstands- und Gebäudeveränderung) und Profilausschnitt in der Draufsicht (unten)

Aufgabenorientiert, wie zur Baufallerkundung, lässt sich das tDOM daher nicht ohne Vorprozessierung verwenden.

Zur Vorprozessierung sind Indikatoren oder Mechanismen und Filter notwendig, um Fehldetektionen von nicht vorhandenen Baufällen zu minimieren, die aufgrund des Höhenrauschens des tDOM verursacht werden können oder durch eine Höhenänderung, die nicht ursächlich aus der Bebauungssituation entstanden ist.

Die Verarbeitung der Daten stützt sich auf die Höhenänderungen, Farbinformationen und geometrische Filter.

Erste Filterstufe „Höhenfilter“

Ein erster grober Filtermechanismus entfernt alle Punkte mit Höhendifferenzen von kleiner $\pm 2,3$ m sowie mit Höhenwerten unter -50 m und über $+100$ m. Die Grenzwerte ergeben sich empirisch. In Bayern herrschen ländliche Räume vor. Hochhäuser werden nur vereinzelt gebaut, die Höhe von Garagen liegt im Allgemeinen über $2,3$ m. Die gefilterten Daten werden zusätzlich als Zuwachs und Abnahme attribuiert.



Bild 8: Punktwolke nach erster Filterung (Höhe)

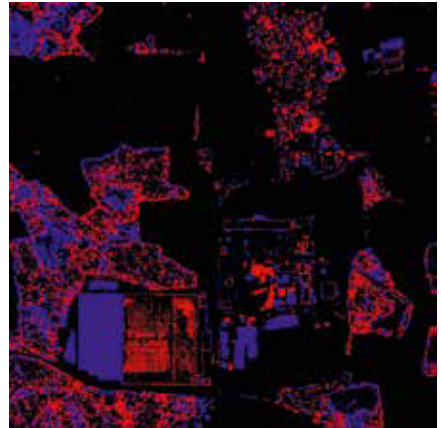


Bild 9: Punktwolke nach erster Filterung, blau=Zunahme, rot= Abnahme

Zweite Filterstufe „Farbfilter“

Der zweite, bereits detailliertere Filter berücksichtigt die Farbwerte der einzelnen Punkte und zusätzlich den Vegetationsindex (NDVI). Dieser wird aus den Rot- und Infrarotwerten (NIR) im tDOM berechnet. Der NIR-Wert wird als Intensitätswert im tDOM mitgeführt:

$$NDVI = \frac{(NIR - Rot)}{(NIR + Rot)}$$

Die Verwendung der Farbwerte und des Vegetationsindex als Filterindikator birgt gewisse Unsicherheiten. Wie oben erwähnt, stammt die Farbe im berechneten tDOM immer nur aus dem aktuelleren bDOM. Zur Filterung kann also nur der Farbwert sowie der Vegetationsindex dieses Bildes ausgewertet werden.

Die Luftbildbefliegung erfolgt durch verschiedene Flugfirmen, die unterschiedliche Hard- und Software einsetzen. Hieraus und aus der Befliegung zu unterschiedlichen Zeiten, Beleuchtungsverhältnissen und Vegetationsperioden ergeben sich inhomogene Werte in den Farbkanälen für gleiche Objekte am Boden. Diese Farbunterschiede werden bei einer Gesamtschau der Fluglose deutlich. Häufig bilden sich die Losgrenzen durch klare horizontale und vertikale Linien ab (Bilder 10 u. 11).



Bild 10: Farbabweichungen zwischen den Fluglosen

Farbabweichungen der Punkte werden im Rahmen der Prozessierung nicht berücksichtigt und können bei der Auswertung von Baufällen in einzelnen Befliegungsbereichen zu Problemen führen. Die verwendeten Schwellenwerte (Thresholds) für die einzelnen Farbkanäle und den Vegetationsindex sind durch Versuche empirisch ermittelt, unbeachtlich der im Abschnitt 3 zur Statistik ausgeführten berechneten Vertrauensintervalle. Die empirisch ermittelten Werte liefern in Abhängigkeit von den Ausgangsdaten unterschiedlich gute Ergebnisse (Bild 12).

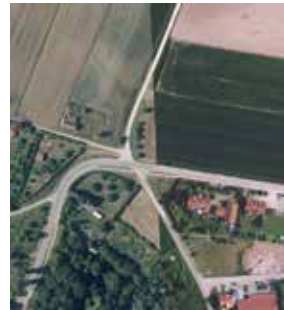
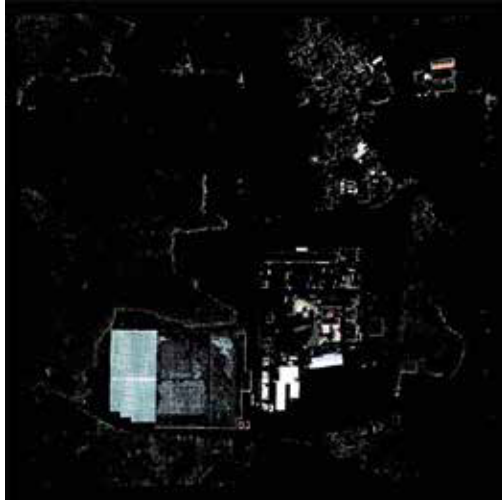


Bild 11: Farbabweichung an vertikaler Losgrenze



*Bild 12: Punkt-
wolke nach
zweiter Filterung
(RGB)*

Dritte Filterstufe „Rauschfilter“ und „Planarität“

Die nach der Höhen- und Farbfilterung verbleibenden Punkte werden einer weiteren Datenfilterung unterzogen. Das „Entrauschen“ geschieht durch den Vergleich benachbarter Punkte hinsichtlich ihrer Höhenänderung in einem definierten Umkreis. Hiermit ist eine weitere Aussonderung der durch Änderungen in der Vegetation verbliebenen Punkte möglich. Das Ergebnis ist eine stark ausgedünnte Punkt- wolke im binären laz-Format (Bild 13).



*Bild 13: Punkt-
wolke nach dritter Filter-
stufe (Rauschfilter)*

Die nach der dritten Filterstufe verbleibenden fehlerhaften Punkte werden vor allem durch Höhenänderungen in der Vegetation verursacht.

Untersuchungen der Filterung anhand der Planarität haben ergeben, dass Waldbereiche häufig fälschlich als Gebäude erkannt werden und das Ergebnis nicht signifikant verbessert wird (Bilder 14 und 15). Die Filterung nach Planarität wird deshalb nicht durchgeführt.

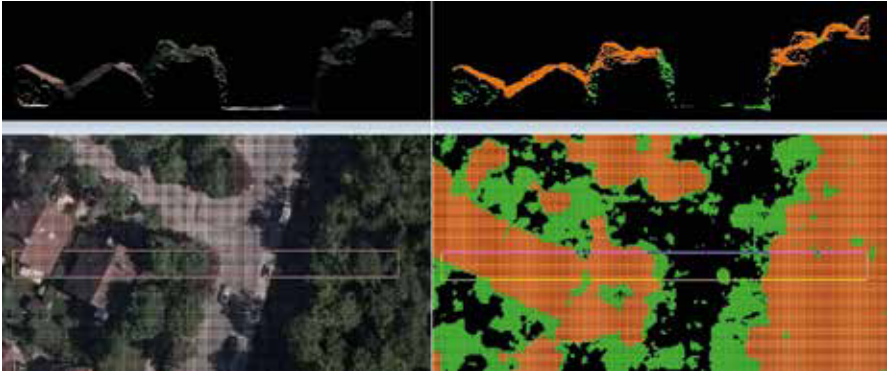


Bild 14: Klassifizierung anhand der Planarität, als planare Flächen (orange) werden Gebäude und dichte Vegetation erkannt

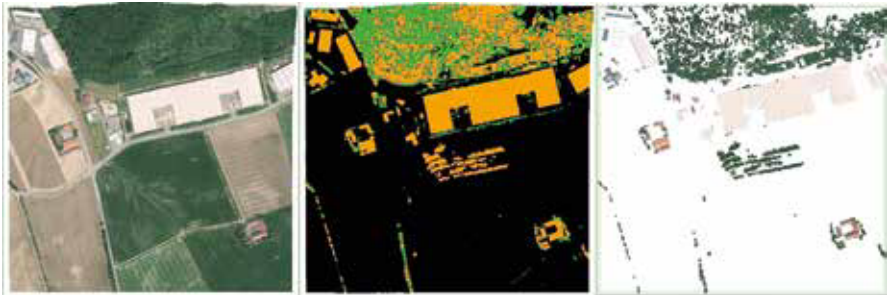


Bild 15: Ergebnisse aus der Filterung anhand der Planarität, Vegetation wird als Gebäude erkannt

Vierte Filterstufe „Geometrie“

Für die weitere Verwendung am ADBV müssen die Daten aus dem binären laz-Format in ein Format überführt werden, das in den Workflow für die Baufallerkundung eingebunden werden kann. Hier bietet sich das Format Shape an. Es ist nicht ziel führend, die Punkte als solche in Shape umzuwandeln, es ist vielmehr erforderlich, umhüllende Shapepolygone um die einzelnen Punktinseln zu erzeugen. Der Vorteil dieser Methode ist, dass Gebäude schnell anhand ihrer Form als solche zu erkennen sind. Außerdem können die entstehenden Umringspolygone zunächst generalisiert und dann weiter gefiltert werden, z. B. nach ihrer Fläche, der Anzahl der Brechpunkte, dem Verhältnis von Fläche zum Umfang und der Länglichkeit (Angularity). Da die verbleibende Datenmenge relativ gering ist, können die bis jetzt in einer km²-Kachelung vorliegenden Polygone zur einfacheren Bearbeitung in größere Einheiten zusammengefasst werden.

Die Umringspolygone im Shape-Format werden mit LAsTools (Rapidlasso GmbH) erzeugt, anschließend werden sie mit Hilfe einer FME Workbench (FME=Feature Manipulation Engine, Safe Software) gefiltert und in Einheiten von 100 km² zusammengefasst. Die Polygone werden generalisiert, Spikes und doppelte Punkte entfernt und die Korrektheit der entstandenen Geometrie geprüft. Polygone mit einer Fläche unter 6 m² werden herausgefiltert. Auch Polygone mit einer Anzahl von weniger als 50 Brechpunkten werden eliminiert. Formfilter (Umfang im Verhältnis zur Fläche und Länglichkeit) reduzieren die fehlerhaft erkannten Gebäudeveränderungen weiter (Bild 16).

Als Ergebnis resultieren zwei getrennte 3D-Shapepolygon Datensätze für Zu- und Abnahme.

In den 3D-Shapepolygonen werden die Fläche des jeweiligen Polygons, die Anzahl der Brechpunkte, die Minimal- und Maximalhöhe der Brechpunkte, der maximale Höhenunterschied der Punkte sowie die Werte des Umfangs zur Fläche und Länglichkeit als Attribute mitgeführt. Dies ermöglicht eine weitere Filterung bei der Einbindung und Visualisierung der Daten in einem GIS-System.

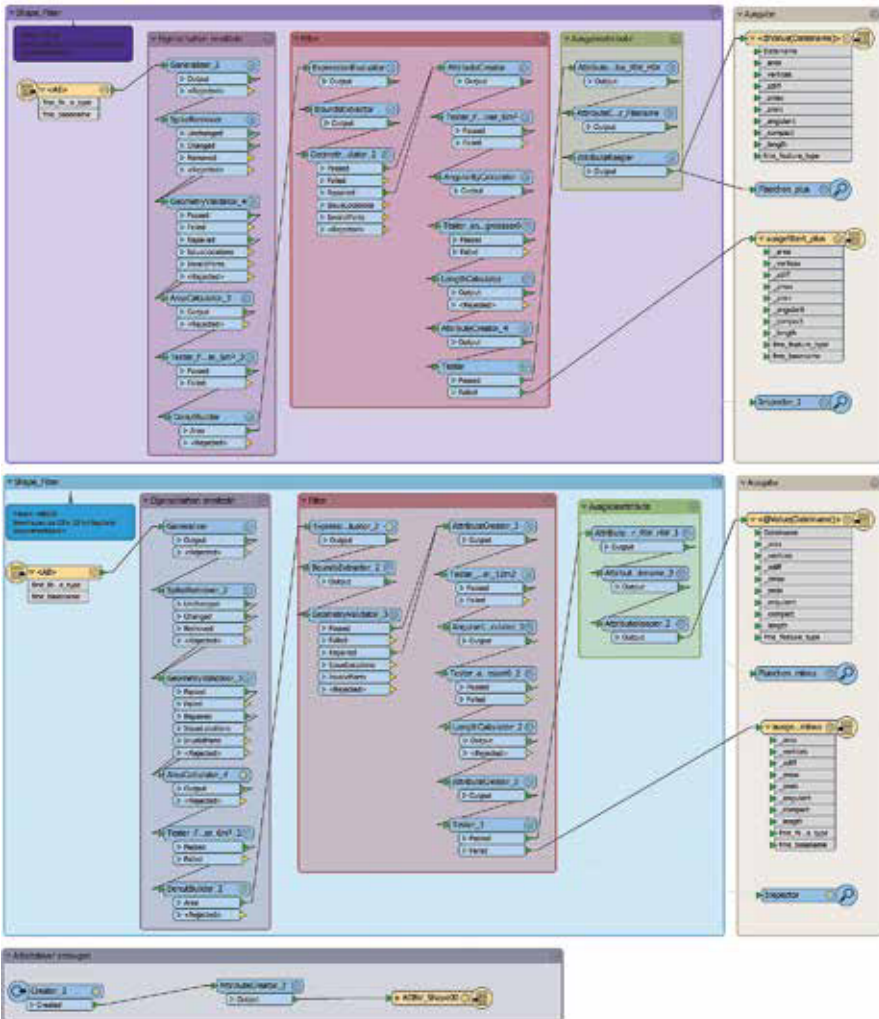


Bild 16: Komplexität der eingesetzten FME Workbench zur Prozessierung der Daten

Alle bei der Prozessierung verwendeten Parameter können einfach verändert werden. Eine erneute Prozessierung des tDOM kann in kurzer Zeit erfolgen. Auch die Prozessierung eines nDOM ist in gleicher Weise möglich.

Die Verarbeitung großer Datenmengen erfolgt sehr performant. Die Hälfte der Landesfläche von Bayern kann so nach Vorliegen der Ausgangsdaten (nDOM, tDOM)

innerhalb weniger Stunden prozessiert werden. Die Verarbeitung kann auf mehreren Rechnern gleichzeitig erfolgen. So kann die Prozessierungszeit weiter verkürzt werden.

Tabelle: Beispielhafte Prozessierungsdauer des tDOM für 2248 km²

Softwarepaket	Dauer
LAStools	
Daten nach Höhe filtern und klassifizieren	30 min
Daten nach Farben filtern	4 min
Daten entrauschen	9 min
Umringpolygone Zunahme erstellen	3 min
Umringpolygone Abnahme erstellen	2 min
FME	
Umringpolygone filtern und zusammenfassen	6 min
Summe	54 min

2.3 Analyse eines statistischen Ansatzes

Zur Verbesserung des auf den R-G-B-Farbkanälen und des Vegetationsindex beruhenden Farbfilters galt es zu prüfen, ob statistische Methoden bessere Filterergebnisse liefern könnten. Den Untersuchungen lag die Idee zu Grunde, Dächer über ihre charakteristischen R-G-B-Werte zu identifizieren. Dazu wurden aus einer Testkachel in der Größe von 1 km² alle darin liegenden Gebäudeumringe der DFK im bDOM ausgeschnitten. Anschließend wurden gebäudeweise Histogramme berechnet. In den für jedes Gebäude nach R-G-B-Werten getrennt berechneten Histogrammen ist auffällig, dass jeweils für jede Dachfläche Peaks in jedem Farbkanal erscheinen. Ein Gebäude mit einem Satteldach hat zwei Peaks. Ein Flachdach hingegen nur einen Peak in jedem Farbkanal (Bild 17). Die Ursache liegt vermutlich in den unterschiedlichen Schattenschlägen der Dachflächen zur Sonne, denn im bDOM erscheinen die gleichen Ziegel für jede Dachfläche bei unterschiedlicher Ausrichtung zur Sonne in unterschiedlichen Farben.

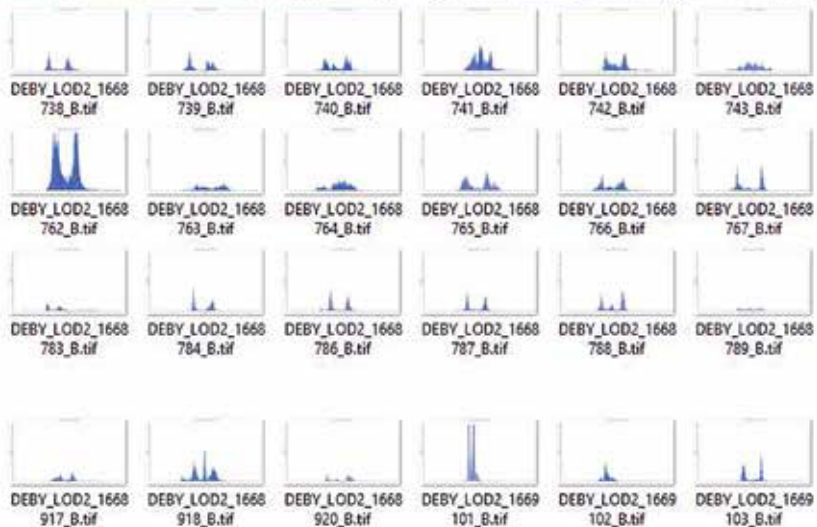
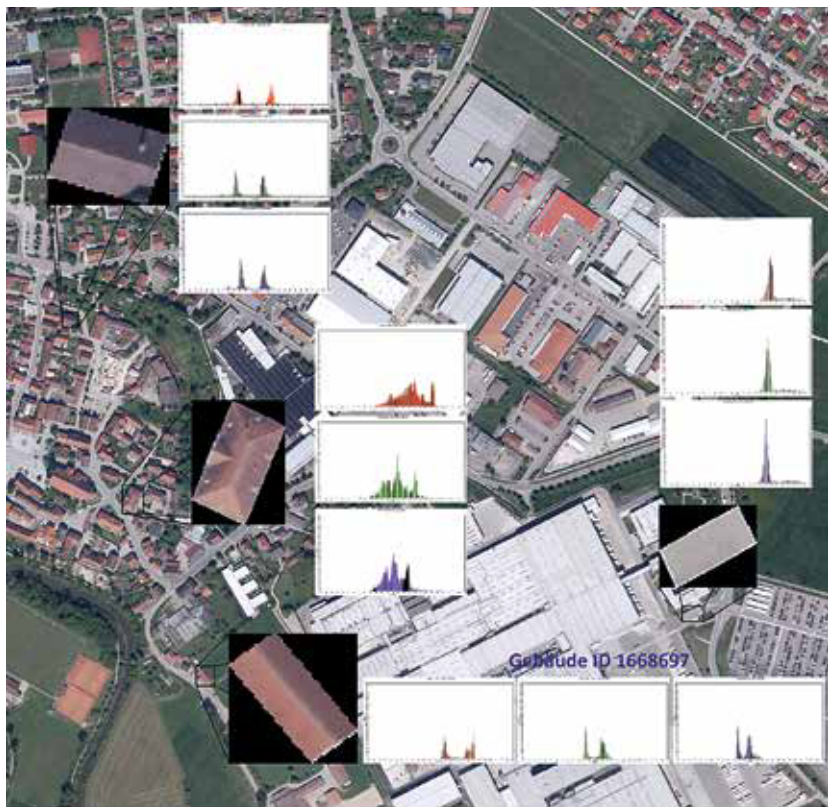


Bild 17: Charakteristische Peaks in den R-G-B-Farbkanälen von Dächern in der Testkachel mit 493 Dächern (oben) und als Ausschnitt über mehrere Dächer im blauen Farbkanal (unten)

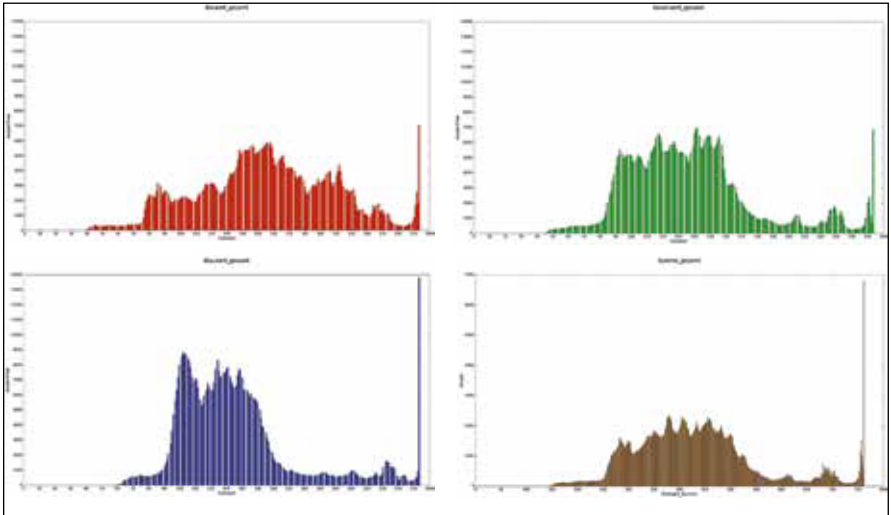


Bild 18: Summe aller roten (l.o.), grünen (r.o.), blauen (l.u.) Farbwerte in der Testkachel sowie deren Gesamtsumme

In der untersuchten Testkachel liegen 493 Dachflächen mit 527271 Pixeln. Für jede Dachfläche lässt sich ein Histogramm von allen Pixeln bestimmen, die innerhalb einer Dachfläche liegen. Werden für alle Dachflächen einer Testkachel die Histogramme getrennt nach dem R-G-B-Wert aufsummiert, so ergibt sich ein Überblick über die Streuung der einzelnen Farbwerte und deren Häufigkeit je Farbkanal (Bild 18). Während im blauen Farbkanal sich annähernd eine Glockenkurve über die 493 Dachflächen abbildet, überdecken die Histogramme über die Summen der roten und grünen Farbwerte fast die gesamte Bandbreite der je Farbkanal zwischen 0 und 65.535 liegenden möglichen Farbwerte, die auf eine Skala von 0 bis 255 normiert wurden. Anstelle einer nach Farbkanälen getrennten zweidimensionalen Histogramm-Darstellung, können die $n=527271$ Pixel aller Dachflächen auch dreidimensional dargestellt werden (Bild 19). Im vorliegenden Fall zeigt sich für die Dachflächen ein sehr scharf abgegrenztes Cluster, das auf eine hohe Ähnlichkeit der charakteristischen Farbeigenschaften von Dachflächen hinweist. Eine eingehendere statistische Auswertung der Pixel scheint daher vielversprechend.

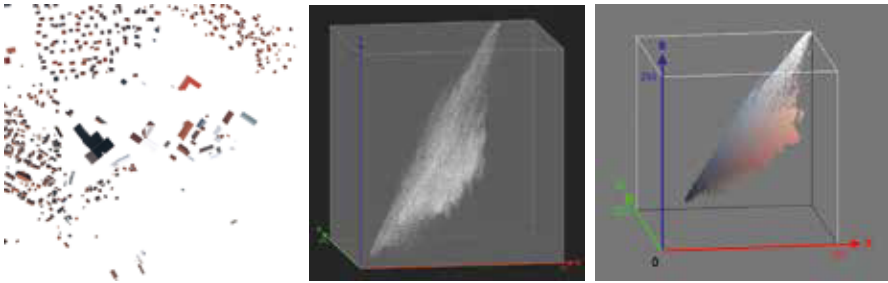


Bild 19: Darstellung der Pixel aller Dachflächen (links) im normierten R-G-B-Koordinatensystem (mitte) und als kolorierte Punktwolke (rechts)

Aus den Histogrammen lassen sich je Farbkanal die arithmetischen Mittelwerte (\bar{R} , \bar{G} , \bar{B}) und die Standardabweichung eines Pixels vom arithmetischen Mittel (σ_{R_i} , σ_{G_i} , σ_{B_i}) sowie die Standardabweichung aller Pixel vom arithmetischen (σ_R , σ_G , σ_B) Mittel bestimmen.

Die Auswertung im roten Farbkanal für die $n=527271$ Pixel aller Dachflächen der Testkachel ergibt:

arithmetisches Mittel im Rotkanal $\bar{R} = 155,34$

Standardabweichung eines Pixels vom Mittelwert $\sigma_{R_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} = 43,65$

Standardabweichung des arithmetischen Mittelwertes $\sigma_R = \frac{\sigma_{R_i}}{\sqrt{n}} = 0,06$

Entsprechendes gilt für die beiden anderen Farbkanäle in Grün und Blau. Für den grünen Farbkanal ergeben sich für das arithmetische Mittel $\bar{G} = 137,93$ mit $\sigma_{G_i} = 40,45$, für den Blaukanal $\bar{B} = 136,76$ mit $\sigma_{B_i} = 39,57$.

Der Mittelwert im roten Farbkanal des Daches ID1668697 (997 Pixel) ergibt sich zu:

arithmetisches Mittel im Rotkanal $\bar{R} = 165,29$

Standardabweichung $\sigma_{R_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} = 23,26$

Standardabweichung des arithmetischen Mittelwertes $\sigma_R = \frac{\sigma_{R_i}}{\sqrt{n}} = 0,74$

Entsprechendes gilt für die beiden anderen Farbkanäle in Grün und Blau. Für den grünen Farbkanal des Daches ergeben sich für das arithmetische Mittel $\bar{G} = 133,67$ mit $\sigma_{G_i} = 18,32$, für den Blaukanal $\bar{B} = 123,52$ mit $\sigma_{B_i} = 16,03$.

Mit Hilfe dieser Standardabweichungen je Farbkanal lassen sich Vertrauensbereiche, die sogenannten Konfidenzintervalle, bestimmen. Diese werden in der Statistik verwendet, um Aussagen treffen zu können, ob beispielsweise ein gemessener Wert mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit innerhalb des berechneten Vertrauensintervalls liegt, in dem der wahre Wert des gemessenen Wertes liegen soll.

Im vorliegenden Fall ist das Vertrauensintervall des arithmetischen Mittels für jeden Farbkanal zu bestimmen. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Pixel der Dächer in jedem Farbkanal normalverteilt sind. Von den arithmetischen Mittelwerten (\bar{R} , \bar{G} , \bar{B}) ausgehend, wird je Farbkanal ein zweiseitiger Vertrauensbereich berechnet, mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit (Konfidenzniveau) von 99 %, in dem beispielsweise im Rotkanal der wahre Wert des arithmetischen Mittels $\mu_{\bar{R}}$ liegen soll. Mit Blick auf den Tabellenwert (Quantil) der heranzuziehenden t -Verteilung ergibt sich bei einer Stichprobe, die wir mit n bezeichnen wollen, von $n=527271$ Dachflächenpixeln in einer Testkachel folgender Freiheitsgrad von $n-1=527270$ für die t -Verteilung [Graf et al. 1987, Roschlaub 1992]. Diese Stichprobe liegt deutlich über einem tabellarischen Strichprobenumfang von 500. Daher ist für den zweiseitigen Test mit nun $99,5 \% = \frac{1}{2} (100\%+99\%)$ der Tabellenwert 2,58 zu entnehmen, der dem Wert einer unendlichen Stichprobe entspricht.

Die Auswertung unserer Testkachel ergibt für das Vertrauensintervall im roten Farbkanal in Bezug auf den wahren Wert des arithmetischen Mittels ($\mu_{\bar{R}}$) über alle Dachflächen mit $n=527271$ Pixeln:

$$\bar{R} - (2,58 * \frac{\sigma_{R_i}}{\sqrt{n}}) < \mu_{\bar{R}} < \bar{R} + (2,58 * \frac{\sigma_{R_i}}{\sqrt{n}}) \text{ bzw. } 155,19 < \mu_{\bar{R}} < 155,49$$

Für die einzelne Dachfläche ID 1668697 mit $n=997$ Pixeln beträgt das Konfidenzintervall hingegen:

$$\bar{R} - (2,58 * \frac{\sigma_{R_i}}{\sqrt{n}}) < \mu_{\bar{R}} < \bar{R} + (2,58 * \frac{\sigma_{R_i}}{\sqrt{n}}) \text{ bzw. } 163,39 < \mu_{\bar{R}} < 167,19$$

Im Verhältnis zu dem zwischen 0 und 255 liegenden möglichen Wertebereich je Farbkanal, ist dieses Vertrauensintervall sehr schmal. Wenn anstelle der Standardabweichung des arithmetischen Mittels $\sigma_{\bar{R}}$ die Standardabweichung eines einzelnen Messwertes vom arithmetischen Mittel σ_{R_i} verwendet wird, wächst das Vertrauensintervall um \sqrt{n} erheblich und ergibt sich für die drei Farbkanäle rot, grün und blau zu:

Wertebereich aller Dächer:

$$\begin{aligned} 42,72 < \mu_{R_i} < 267,96 \\ 33,57 < \mu_{G_i} < 242,29 \\ 34,67 < \mu_{B_i} < 238,85 \end{aligned}$$

Wertebereich Dach ID 1668697

$$\begin{aligned} 105,28 < \mu_{R_i} < 225,30 \\ 86,40 < \mu_{G_i} < 180,94 \\ 82,16 < \mu_{B_i} < 164,88 \end{aligned}$$

Mit Hilfe der zuvor berechneten Intervalle kann untersucht werden, ob die aus den Gebäudegrundrissen der DFK bereits bekannten Dächer bei einer erneuten Klassifizierung im bDOM wiedererkannt werden. Hierbei wird jedes Pixel im bDOM überprüft, ob es gleichzeitig in den berechneten Vertrauensintervallen der drei Farbk채n채 liegt. Erfüllt das untersuchte Pixel diese Voraussetzung, dann wird es als Dach klassifiziert.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigt jedoch, dass einige der in der DFK dokumentierten Dächer, deren Farben in den Randbereichen liegen, wie z. B. sehr helle bis weiße Fabrikhallen oder sehr dunkle Dächer, nicht als Dächer identifiziert werden. Das gilt auch, wenn anstelle des Vertrauensintervalls des arithmetischen Mittels ($\mu_{\bar{R}}$) das Vertrauensintervall für die Einzelmessung (μ_{Ri}) verwendet wird. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass sich die Dächer in einem bDOM aus den berechneten Vertrauensintervallen nicht ausreichend gut identifizieren lassen, obwohl in den R-G-B-Werten jede einzelne Dachfläche je nach Sonneneinstrahlung signifikante Werte aufweist.

3. Erzielte Ergebnisse

Aus dem zuvor beschriebenen Verfahrensablauf des etablierten Expertensystems sollen nun einige Ergebnisse beispielhaft veranschaulicht werden. Die nach der Prozessierung detektierten Gebäude sind auf den ersten Blick vollständig erfasst. Fehldetektionen konnten durch die Prozesskette des etablierten Expertensystems weitestgehend herausgefiltert werden (Bild 20). Nur im Gewässerbereich sind deutlich erkennbare störende Restflächen nach der Filterung übriggeblieben.



Bild 20: Überblick der erkannten Gebäude (rosa) sowie der aus zwei bDOM-Epochen berechneten Gebäudeveränderungen (rot)

Im Folgenden werden Detailausschnitte näher betrachtet. In den im Bild 21 markierten Bereichen wird bereits durch einen direkten visuellen Vergleich der TrueDOP-Epochen von 2014 und 2017 deutlich, dass im roten Kreis das Dach verändert wurde, während im gelb markierten Kreis sich in den vergangenen drei Jahren nichts verändert zu haben scheint.

Wird diese Szene mit der aktuellen DFK überlagert, ist zu erkennen, dass das Gebäude im gelben Kreis derzeit nicht in der DFK gespeichert ist und somit vom Außendienst noch nicht eingemessen wurde. Die in den TrueDOP-Epochen erkennbaren Veränderungen im Dach hatten keine Veränderung des Gebäudegrundrisses zur Folge, sodass diese Änderungen folgerichtig nicht in der DFK erfasst sein können.

Ob die Veränderungen des Daches einer Aufstockung oder einer Abtragung entspricht, kann lediglich aus dem tDOM ermittelt werden. Im vorliegenden Fall ist mit dem tDOM festzustellen, dass zwischen den Jahren 2017 und 2014 das Dach aufgestockt wurde. Umgekehrt liefert das tDOM jedoch keine Hinweise auf ältere, nicht eingemessene Baufälle, die sogenannten Altbaufälle, wenn das Gebäude wie im vorliegenden Fall bereits vor dem Jahr 2014 erbaut wurde. Das tDOM kann nur Neubauten erkennen, die zwischen den betrachteten Zeiträumen der zur Berechnung des tDOM zu Grunde liegenden bDOM-Epochen liegen – also hier zwischen 2014 und 2017.



Bild 21: TrueDOP-Epochen aus den Jahren 2014 und 2017



Bild 22: TrueDOP aus dem Jahr 2017 gemeinsam mit der aktuellen DFK (grau)



Bild 23: Überlagerung der DFK mit dem blauen nDOM (links) und dem roten tDOM (rechts)

In einem weiteren Beispiel wird aus den Bildern 24 bis 26 deutlich, dass auch in einem schlecht zugänglichen Fabrikgelände bauliche Veränderungen in einfacher Weise und mit sehr guten Ergebnissen mit Hilfe des entwickelten Expertensystems detektiert werden können. Es werden sowohl die seit 2014 nicht eingemessenen Gebäude und Fabrikhallen als Altbaufälle detektiert als auch erfolgte Hallenerweiterungen zwischen 2014 und 2017.



Bild 24: TrueDOP aus den Jahren 2014 und 2017



Bild 25: TrueDOP aus dem Jahr 2017 gemeinsam mit der aktuellen DFK (grau)



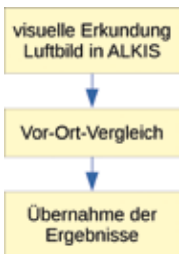
Bild 26: Überlagerung der DFK mit dem blauen nDOM (links) und dem roten tDOM (rechts)

Folgerung:

- Änderungen in der Gebäudehöhe können bei unverändertem DFK-Grundriss nur im tDOM erkannt werden.
- Änderungen im Gebäudegrundriss können sowohl im nDOM als auch im tDOM erkannt werden: Neubauten und Gebäudeabrisse lassen sich im tDOM erkennen, wenn diese in den betrachteten Zeitintervallen tatsächlich errichtet oder abgerissen wurden; weiter zurückliegende Bebauungen können nur über das nDOM erfasst werden.

4. Nutzung an den Ämtern für Digitalisierung, Breitband und Vermessung

Die Baufallerkundung an einem Amt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (ADBV) erfolgt in der Praxis in mehreren Schritten. Ein Mitarbeiter vergleicht visuell die neuesten Luftbilder mit dem Gebäudebestand im Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS). Dabei muss Flurstück für Flurstück das TrueDOP nach Dächern durchmustert werden, für die in ALKIS noch kein Gebäudeobjekt erfasst wurde. Die Interpretation der Luftbilder ist eine mühsame und ermüdende Tätigkeit, die dem Bearbeiter am Bildschirm ein hohes Maß an Konzentration und Ausdauer abverlangt.



Die so gefundenen potentiellen Baufälle müssen vor Ort daraufhin überprüft werden, ob es sich tatsächlich um einmessungspflichtige Gebäude handelt. Zum einen können Flächen im TrueDOP fälschlicherweise als Gebäudedächer interpretiert werden, zum anderen gibt es Mindestgrößen für die Darstellung von Gebäuden und Bauwerken im Liegenschaftskataster. Beide Aspekte können nur vor Ort verifiziert werden, da im TrueDOP keine Aussage darüber getroffen werden kann, wie der Gebäudekörper unter der vermeintlichen Dachfläche beschaffen ist.

Die Ergebnisse des Vor-Ort-Vergleichs werden anschließend in die Systeme am ADBV übernommen. Tatsächlich einzumessende Baufälle werden in ALKIS vorgemerkt und die Vermessung vorbereitet. Fälle, die sich nicht als einmessungswürdig herausgestellt haben, werden mit Hilfe des freien Geoinformationssystems QGIS als Shape-Dateien dokumentiert, um bei nachfolgenden Baufallerkundungen eine erneute Überprüfung des Objekts zu vermeiden.

Dieser aufwändige Prozess könnte durch die vorprozessierten Daten des LDBV erleichtert werden. Für einen ersten Praxistest wurden dem ADBV Ansbach die vorprozessierten Shapepolygone des tDOM zur Verfügung gestellt. Es bestand die Hoffnung, durch den Einsatz des tDOM den Ablauf gegebenenfalls vereinfachen,

zumindest aber unterstützen zu können. Ein Problem bei der bisherigen Vorgehensweise ist, dass ein durchgängiger digitaler Workflow mit den bisherigen Mitteln des ADBV nicht machbar ist.

Die erste Überlegung für den Test am ADBV war deshalb, bei welchem Prozessschritt das tDOM zum Einsatz kommen könnte. Mit den aktuellen Systemvoraussetzungen am ADBV können die Daten des tDOM sinnvoll nur im ersten Schritt, bei der visuellen Durchmusterung der Luftbilder (DOP), zur Unterstützung der Baufallerkundung verwendet werden.

Dazu wurden alle verfügbaren Geoinformationen in ALKIS bereitgestellt. Neben der dort geführten amtlichen Flurkarte mit den aktuellen Gebäudepolygonen waren dies:

- die für Zu- und Abnahme unterschiedlich attributierten Shape-Dateien des tDOM,
- die DOP beider Epochen (Befliegungen aus den Jahren 2014 und 2017) sowie
- die Shapes der „nicht-einmessungswürdigen“ Baufälle aus vorangegangenen Erkundungen.

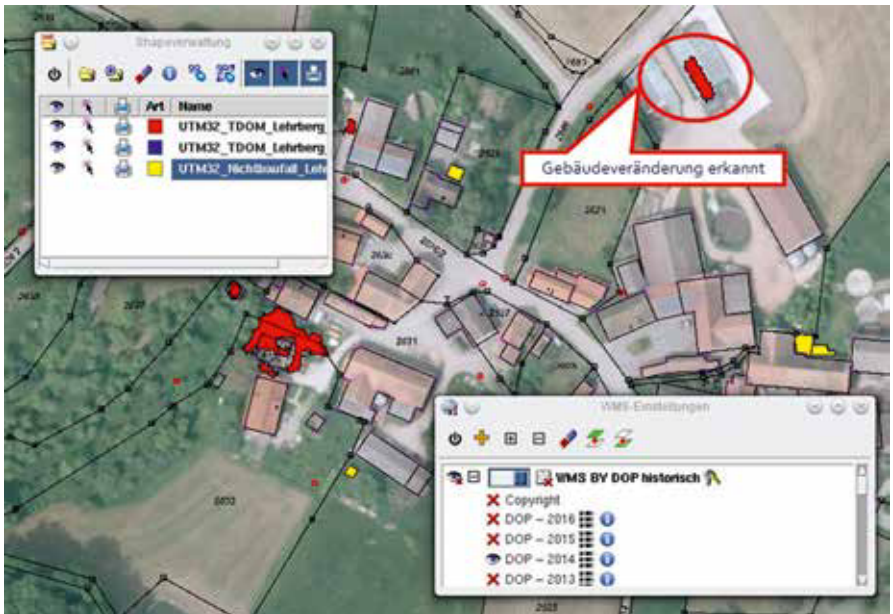


Bild 27: Am ADBV mit ALKIS visualisierte Gebäudeveränderungshinweise (rot)

Im Verlauf des Tests hat sich deutlich ergeben, dass für den Bearbeiter am Bildschirm die zusätzlichen Informationen des tDOM eine erhebliche Erleichterung seiner Tätigkeit darstellen. Durch die farbliche Kennzeichnung der im tDOM detektierten Höhenunterschiede hat er einen deutlichen visuellen Hinweis auf mögliche Neubauten und sieht auf den ersten Blick, wo eine genauere Betrachtung lohnt. Er kann in vielen Fällen auf die mühsame Interpretation von möglichen Dachflächen im Luftbild verzichten, was die Arbeit weit weniger ermüdend macht.



Bild 28: Am ADBV mit ALKIS visualisierte Neubaufälle (blau)

Auch der Abriss eines Gebäudes ist leicht erkennbar, da er meist durch eine deutliche geometrische Farbfläche angezeigt wird.

Fehldetektionen

Neben den Gebäuden liefert das tDOM naturgemäß alle Höhenänderungen zwischen den Epochen, die nicht durch die Vorprozessierung herausgefiltert werden. Farbmarkierungen, die auf diese Weise meist durch Veränderungen in der Vegetation entstehen, können aufgrund der unregelmäßigen Geometrie durch den Betrachter jedoch auf den ersten Blick als solche erkannt werden. Es gibt aber auch zahlreiche andere Gegenstände und Bauwerke, wie zum Beispiel Lastwägen, Holzstöße oder Silos, die das tDOM als Höhenänderung anzeigt. Auch diese können durch den Bearbeiter meist leicht identifiziert werden.

Unterbliebene Detektion

Schwieriger für den Bearbeiter sind die Fälle, in denen Baufälle durch das tDOM nicht erkannt werden können. Dies ist regelmäßig dann der Fall, wenn der Höhenunterschied beider Epochen aus unterschiedlichen Gründen nicht signifikant ist, z. B. zunächst vorhandene Vegetation wird durch ein neues Gebäude ersetzt (Bild 29 und 30).



Bild 29: Über die tDOM-Epochen 2014 und 2017 nicht identifizierbare Gebäudeveränderungen



Bild 30: Gebäudeneubau wird nur im nDOM erkannt (links), negative Höhenänderung durch Baumfällung wird im tDOM erkannt (rechts).

Beispielsweise kann die Anzeige des Baufalls fehlen, wenn der Höhenunterschied zu einem vorher an gleicher Stelle abgerissenen Gebäude zu gering ist oder dort vorher ähnlich hoher Bewuchs abgeholzt wurde. Außerdem gibt es auch Gebäude, die bereits in der ersten Luftbild-Epoche vorhanden waren, aber aus unterschiedlichen Gründen in ALKIS erst noch zu erfassen sind (Altbaufälle). Für diese Fälle muss auf das nDOM zurückgegriffen werden.

Trotzdem ist das tDOM eine sehr willkommene Ergänzung zu den bisherigen Werkzeugen. Es stellt eine erhebliche Prozessunterstützung beim visuellen Vergleich der Luftbilder mit dem Gebäudebestand in ALKIS dar. Alle damit befassten Mitarbeiter betonen den positiven Effekt der farblichen Hinweise und erklären, dass die sonst sehr ermüdende Bildschirmtätigkeit dadurch wesentlich erleichtert wird.

Die Baufallerkundung anhand von Oberflächenmodellen steht erst am Anfang. Das Verfahren wird voraussichtlich bald Standard am ADBV werden und die Detektionsergebnisse könnten durch weitere Tests, die Optimierung der angewandten Filter und die Verwendung des nDOM noch verbessert werden.

Denkbar ist auch eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Prozessschritte und die Verwirklichung eines durchgängigen digitalen Workflows. Voraussetzung wäre hier die Ausstattung der Mitarbeiter mit geeigneter Hardware, um die Erkundung und Übernahme der Daten direkt vor Ort erledigen zu können. In jedem Fall hat das tDOM das Potential, den Prozess der Baufallerkundung zu erleichtern und künftig zu vereinfachen.

5. Ausblick und Schluss

Die Anforderungen aus der Praxis zeigen, dass die Fortführung ganz maßgeblich über die Qualität eines Datenbestandes bestimmt. Daher darf auch zukünftig nicht die Erfassung möglichst vieler thematischer Daten und Objekte im Vordergrund stehen, sondern vielmehr die Erfassung eines vollständigen Datenbestandes, der weitestgehend automatisiert erfasst und in einem geeigneten Zyklus fortgeführt werden kann. Für die Baufallerkundung wäre die Fortführung durch eine zyklische Durchmusterung sicherzustellen. Trotz eines unterstützenden, automatisierten Prozesses bleibt die personalintensive visuelle Durchmusterung aller bebauten Flurstücke im Luftbild und ein Vor-Ort-Vergleich vorerst weiterhin notwendig. Im Fall der Baufallerkundung hilft es aber, die Qualität, die Aktualität und die Vollständigkeit im Liegenschaftskataster zu verbessern.

Am Beispiel der Baufallerkundung aus bDOM-Daten wurde gezeigt, dass Punktwolken durch eine Datenfusionierung in Kombination mit dem DGM und der DFK die ideale Datengrundlage zur Extraktion von Bauwerken und Bauwerksobjekten bilden. Obwohl in den R-G-B-Werten des bDOM jede einzelne Dachfläche je nach Sonneneinstrahlung signifikante Werte aufweist, können über Vertrauensintervalle keine globalen statistischen Werte ermittelt werden, die eine Klassifizierung von Dächern in einem bDOM mit hoher Treffersicherheit ermöglichen. Die Farben der Dächer sind über eine große Summe zu verschieden, um sie über die Farbwerte alleine klassifizieren zu können. Sicherlich lassen sich zukünftig auch andere Methoden einsetzen, wie Methoden der künstlichen Intelligenz (KI), um Dachflächen aus einem bDOM mit einer hohen Trefferquote zuverlässig zu extrahieren und um sie anschließend zur Baufallerkundung mit den Gebäudegrundrissen der DFK vergleichen zu können. Aktuell werden an sechs Ämtern für Digitalisierung, Breitband und Vermessung die

mit Hilfe des beschriebenen Expertensystems berechneten Baufälle für den gesamten Amtsbezirk eingehend untersucht, um vor allem Vergleichszahlen zwischen den berechneten und den tatsächlichen Baufällen zu erhalten. Diese Daten können auch für weitere Untersuchungen dienen, die beispielsweise mit Methoden der KI berechnet werden.

Bei all der Euphorie über die erzielten Ergebnisse hat die Datenfusionierung auch ihre Grenzen, denn es sollten nur diejenigen Daten miteinander kombiniert werden, die eine gleichartige Erfassungsgenauigkeit haben. Mitunter kann es dazu führen, dass ungenaue Daten zunächst nacherfasst werden müssen, um neue Anwendungen und Nutzergruppen erschließen zu können.

Literatur:

AdV 216, Plenumsbeschluss 128/6, 128. Tagung des Plenums der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland, September 2016 in Bad Neuenahr-Ahrweiler

AdV 2017, AK GT Beschluss 30/2, zur Überführung des ATKIS-DOP20 in die Qualitätsstufe TrueDOP, April 2017 in Saarlouis

Alidoost, F., Arefi H. (2018): A CNN-Based Approach for Automatic Building Detection and Recognition of Roof Types Using a Single Aerial Image, *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science (ISPRS)*, Nr. 86, pp. 235-248.

Graf, U., Henning, H., Stange, K., Wilrich, P. (1987): *Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik*, Springer Verlag, Berlin.

Hümmer, F., Roschlaub, R. (2014): Die Zukunft ist dreidimensional – 3D-Gebäudemodelle in Bayern, *DVW-Mitteilungen*, Heft 2/2014, S. 165-176.

Krey, T., Märkl, P., Möst, K., Roschlaub, R. (2016): Partielle Fortführung eines Digitalen Geländemodells aus Laserscanning mittels bildbasierter Digitaler Oberflächenmodelle, *DVW-Mitteilungen*, Heft 1/2016, S. 9-26.

Marmanis, D., Datcu, M., Esch, T., Stilla, U. (2016): Deep Learning Earth Observation Classification Using ImageNet Pretrained Networks, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 13, No. 1, pp. 105-109.

Roschlaub, R. (1992): Berechnung von Quantilen verschiedener statistischer Verteilungen, Zeitschrift für Vermessungswesen, 117. Jg., Heft 6, S. 323-35.

Valinger, J. (2015): Automatic rooftop segment extraction using point clouds generated from aerial high resolution photography, <https://pdfs.semanticscholar.org/4a08/d12b549f4685d859c6432ae26db930b5c796.pdf>, 13.03.2019. ■■■