

9 Geotopographie und Photogrammetrie

Ernst JÄGER, Steffen PATZSCHKE und Christian HEIPKE

Zusammenfassung

Die Geotopographie hat als Teildisziplin des Vermessungswesens das Ziel, die reale Landschaft zu beschreiben und abzubilden. Den Begriff Geotopographie gibt es seit Mitte der 1990er Jahre, als der damalige Arbeitskreis „Topographie und Kartographie“ der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) kürzer und prägnanter in Arbeitskreis „Geotopographie“ umbenannt worden ist.

Waren einst Karten und textliche Landschaftsbeschreibungen die einzigen Medien zur Speicherung und Darstellung von Landschaftsinformationen, so haben heute vektor- und rasterbasierte Informationssysteme und Datenbanken diese Funktion übernommen. Darin werden die topographischen Daten der Erdoberfläche mit den sichtbaren und teilweise auch mit nicht sichtbaren Gegenständen und Sachverhalten beschrieben. Die sichtbaren Informationen beziehen sich auf die Objektartenbereiche Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer und Relief. Zu den nicht sichtbaren Objekten gehören unterirdische Leitungen sowie die Grenzen administrativer Einheiten oder von Schutzgebieten.

Zu den Verfahren der geotopographischen Datengewinnung gehören photogrammetrische Aufnahmen sowie Methoden der Fernerkundung inkl. des Laserscanningverfahrens und terrestrische Lage- und Höhenaufnahmen, bis vor einiger Zeit auch das Digitalisieren von analogen Kartenvorlagen. Zu den Produkten der geotopographischen Landes- (bzw. Landschafts-) aufnahme gehören Luftbilder, Digitale Orthophotos (DOP), Digitale Geländemodelle (DGM), Digitale Landschaftsmodelle (DLM) sowie analoge und Digitale Topographische Karten (DTK), die im Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS®) zusammengefasst sind. 3D-Gebäudemodelle sind ein Kombinationsprodukt aus Daten des Liegenschaftskatasters und Daten der Geotopographie.

Die geotopographische Landesaufnahme ist seit jeher eine staatliche Aufgabe gewesen, ursprünglich aus militärischen Gründen heraus motiviert, seit langem aber bereits als Infrastrukturmaßnahme des Staates begründet, um Verwaltung und Wirtschaft eine verlässliche Grundlage für vielfältige Planungs- und Entscheidungsprozesse zu geben. Geotopographische Daten sind Geobasisdaten, die erst im Zusammenwirken mit Geofachdaten oder als Basis in der Wertschöpfungskette einer privatwirtschaftlichen Datenveredelung ihr wahres Potenzial zeigen können.

Das Kapitel 9 „Geotopographie und Photogrammetrie“ bezieht sich wegen dieser Basisfunktion der geotopographischen Daten im Wesentlichen auf Entwicklungen und Verfahren des amtlichen deutschen Vermessungswesens, das durch die Bundesländer – teilweise im Zusammenspiel mit Bundesdienststellen – ausgeführt wird und in dem die AdV eine wesentliche ordnende Rolle spielt.

Quelle: Jäger E., Patzschke S., Heipke, C. 2020: Geotopographie und Photogrammetrie. In: Kummer K., Kötter T., Kutterer H., Ostrau S. (Eds.): Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen. vde-Verlag, Berlin, ca. 1280 Seiten, ISBN 978-3-87907-676-5, S. 439-494.

Summary

Geotopography is a specific area of surveying and mapping with the goal to describe and display the landscape. The term “geotopography” was created in the middle of the 1990s , when the Working Committee of the Surveying Authorities of the States of the Federal Republic of Germany (AdV) renamed one of their working groups from “Topography and Cartography” into “Geotopography”, which is shorter and better fits their topics.

Historically, maps and descriptions of landscapes in books or journals have been the only media to store and visualize information about the landscape. Today vector and raster-based information systems and databases fulfil these functions. Topographic data of the Earth’s surface are stored in these systems, describing visible and sometimes also non-visible features and facts. Visible features include data about settlements, transportation, vegetation, waters and relief. Examples of non-visible features are underground pipelines and administrative boundaries of municipalities or protective areas.

Photogrammetry and remote sensing incl. laser scanning are special techniques of geotopographic data capture, as well as terrestrial 2D and 3D measurements, and formerly also the digitisation of analogue maps. Results and related products of topographic surveying techniques are aerial images, Digital Orthophotos (DOP), Digital Terrain Models (DGM), Digital Landscape Models (DLM), 3D building models and analogue or Digital Topographic Maps (DTK). All these digital and analogue products are components of the German Authoritative Topographic Cartographic Information System (ATKIS®), 3D building models are a merged product of cadastral data and geotopography data.

Geotopographic measurement and mapping of the landscape has always been a public task, originally supporting military goals. However, during the last century the main intention has changed to that of being a civilian infrastructure of the German federal states, to provide reliable data to public and private customers supporting them in their development and planning processes. Today, geotopographic data are so-called geospatial reference data. In combination with geodata of other disciplines and also driven by private investment, geospatial reference data offer real application potential.

Because of this basic function of geotopographic data, Chapter 9 mainly deals with developments and methods in use by the public German surveying and mapping agencies, which are organised within the 16 federal states, supported in special fields by some federal agencies. The significant role of AdV is that of a regulating party.

9.1 Geotopographische Landesaufnahme

9.1.1 Kurze geschichtliche Einführung

Die Geotopographie beschäftigt sich als Disziplin des Vermessungswesens im engeren Sinne mit der Erfassung und Darstellung sichtbarer Sachverhalte und Objekte der Erdoberfläche (aus dem Griechischen: geo = Erde, tópos = Ort, grafein = beschreiben, zeichnen). Die Geotopographie verfolgt das Ziel, die reale Landschaft zu beschreiben. Gestützt auf das Vermessungssystem werden zu diesem Zweck die wesentlichen Objekte der Erdoberfläche wie Siedlungen, Verkehrsnetze, Vegetation, Gewässer, Geländeformen und die Grenzen politischer sowie administrativer Einheiten mit Namen und sonstigen beschreibenden Angaben flächendeckend erfasst und in Datenbanken geführt.“ (GOMILLE 2008).

Während sich das Liegenschaftskataster ursprünglich vor dem Hintergrund einer gerechten und vergleichbaren Besteuerung von Grundbesitz entwickelt hat, lag die systematische geotopographische Landesaufnahme wie in den meisten anderen Staaten auch in Deutschland in der Hand militärischer Dienststellen. Speziell in Norddeutschland wurde die topographische Landesaufnahme und Kartenherstellung bis zum ersten Weltkrieg von militärischen Stellen – in Preußen vom Generalstab – durchgeführt, während in Süddeutschland auch zivile Dienststellen beteiligt waren.

Die ersten systematischen Landesaufnahmen mit dem Ziel, Karten im Maßstab 1:100.000 und größer zur Erfassung und Darstellung des eigenen Herrschaftsbereiches herzustellen, wurden im Süden Deutschlands bereits im 16. und 17. Jahrhundert durchgeführt (TORGE 2007). Spätere Landesaufnahmen im 18. Jahrhundert basierten teilweise bereits auf einer von Cassini (III) ausgehenden trigonometrischen Grundlage (z. B. in Bayern, Württemberg, Oldenburg und Sachsen), während beispielsweise die von 1764 bis 1786 durchgeführte Kurhannoversche Landesaufnahme im Originalmaßstab von 1:21.333,3 ganz ohne Triangulation auskam.

In der Napoleonischen Zeit von 1799 bis 1815 setzte sich dann allgemein die Triangulation als geometrische Grundlage der Landesaufnahmen durch, wobei die Messtischaufnahme das vorherrschende Verfahren der topographischen Detailvermessung wurde (TORGE 2007). In Bayern markierte die Einrichtung des „Topographischen Bureaus“ im Jahr 1801 den Beginn der topographischen Landesaufnahme mit dem Ziel, über einen Aufnahmemaßstab 1:28.000 den „Topographischen Atlas des Königreichs Bayern“ im Maßstab 1:50.000 abzuleiten. In Preußen begann im Jahr 1814 der Generalstab mit der systematischen, militärisch geprägten Landesaufnahme; dabei entstanden die Messtischblätter im Maßstab 1:20.000 sowie die abgeleitete „Preußische Generalkarte im Maßstab 1:86.000“.

Nach dem 1. Weltkrieg wurden die Aufgaben der geotopographischen Landesaufnahme mit der Gründung des Reichsamts für Landesaufnahme vom militärischen Zuständigkeitsbereich in die Zuständigkeit des Reichsministeriums des Innern verlagert. Die nunmehr zivile Behörde gliederte sich neben der Zentralabteilung in eine Trigonometrische, eine Topographische und eine Kartographische Abteilung. Die letzten noch militärisch organisierten geotopographischen Dienststellen in Bayern und Württemberg wurden in den 1920er Jahren in zivile Stellen überführt.

Die nächste größere Zäsur folgte im Jahr 1938 mit der Bildung von 13 Hauptvermessungsabteilungen, die als Mittelinstanzen für die Höhenmessungen und die Landeskartenwerke

1:25.000 und 1:50.000 zuständig waren und die noch bestehenden Landesvermessungsbehörden in Bayern, Sachsen, Württemberg, Baden, Hessen und Mecklenburg ersetzt. Für das Gebiet der alten Bundesrepublik ging schließlich mit dem Inkrafttreten des Grundgesetzes im Jahr 1949 die Kompetenz in Bezug auf das Vermessungs- und Katasterwesen auf die Bundesländer über, da dem Bund dafür keine Zuständigkeit zugesprochen worden ist. Für das Gebiet der ehemaligen DDR wiederum erfolgte mit Regierungsbeschluss Anfang der 50er Jahre des vergangenen Jahrhunderts eine zentral gesteuerte komplette Neuaufnahme des Geländes mit dem Ziel, Topographische Karten im Maßstab 1:10.000 zu erstellen (PATZSCHKE 2003). Seit 1990 sind auch die neuen Bundesländer wieder für das Vermessungs- und Katasterwesen zuständig.

Heute gelten die geotopographische Landesaufnahme und die Erstellung und Aktualisierung daraus hervorgehender Produkte (9.1.2) als Infrastrukturleistung des Staates, so dass sich die Ausführungen im Kapitel 9 im Wesentlichen auf die amtliche Geotopographie beziehen.

9.1.2 Bestandteile der geotopographischen Landesaufnahme

Nach KUMMER & MÖLLERING (2005) ist die geotopographische Landesaufnahme neben der Landesluftbildsammlung und den Topographischen Landeskartenwerken integraler Bestandteil der Geotopographie. Während in älteren Vermessungs- und Katastergesetzen der Länder dieser Aufgabenbereich häufig mit der Erfassung (und Führung) von topographischen Gegenständen und Geländeformen umschrieben wurde, beinhaltet der Begriff der geotopographischen Landesaufnahme heute zusätzlich noch das Digitale Basis-Landschaftsmodell des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS®) (KUMMER & MÖLLERING 2005). ATKIS® definiert alle landschaftsbeschreibenden Geobasisdaten, die von Seiten des Staates interessenneutral, lückenlos, homogen sowie aktuell aufgebaut und gepflegt werden und die allen Nutzern in Verwaltung, Wirtschaft und Forschung zur Verfügung gestellt werden.

Im engeren Sinne wurden mit dem Projekt ATKIS® in den 1980er Jahren zunächst nur die Digitalen Landschaftsmodelle (DLM) sowie die daraus abgeleiteten Digitalen Kartographischen Modelle (DKM), heute als Digitale Topographische Karten (DTK) bezeichnet, definiert. Seit dem Redesign von ATKIS® im Zusammenhang mit der Harmonisierung der Landschaftsbeschreibung und der Beschreibung der Daten des Liegenschaftskatasters in der Mitte der 1990er Jahre gehören auch die bildhaften Daten der Photogrammetrie in Form von Luftbildern und Digitalen Orthophotos (DOP) sowie alle Daten der Digitalen Geländemodelle (DGM) dazu. In letzter Zeit hinzugekommen sind darüber hinaus 3D-Gebäudemodelle. Dieser ganzheitliche Ansatz begründet sich durch die vielfältigen Zusammenhänge der einzelnen Modelle untereinander und vereinfacht die Sicht auf die Prozesskette innerhalb der Geotopographie:

- Zur Herstellung von ATKIS®-DOP werden hochgenaue und aktuelle DGM benötigt.
- Die photogrammetrische Aufnahme und Auswertung der Geländeoberfläche war und ist ein gängiges Verfahren, um Geländehöhenpunkte und Bruchkanten zur Ableitung von DGM, und ggf. auch von Höhenlinien, zu erhalten.
- Teile der DGM-Inhalte (z. B. Böschungskanten) sind auch als Objekte im ATKIS®-DLM definiert.
- Auswertungen aus dem DGM in Form von Höhenlinien und markanten Geländehöhenpunkten werden in den ATKIS®-Kartenwerken dargestellt.

- Die DTK werden aus den Daten des DLM abgeleitet.
- DOP dienen als Aktualisierungsquelle des Digitalen Basis-Landschaftsmodells (ATKIS®-Basis-DLM).
- 3D-Gebäudemodelle stellen als Mischprodukt zwischen Geotopographie und Liegenschaftskataster auch eine Verbindung zu anderen Bereichen des amtlichen Vermessungswesens dar.

Die Zusammenhänge werden in Abbildung 9.1 verdeutlicht.

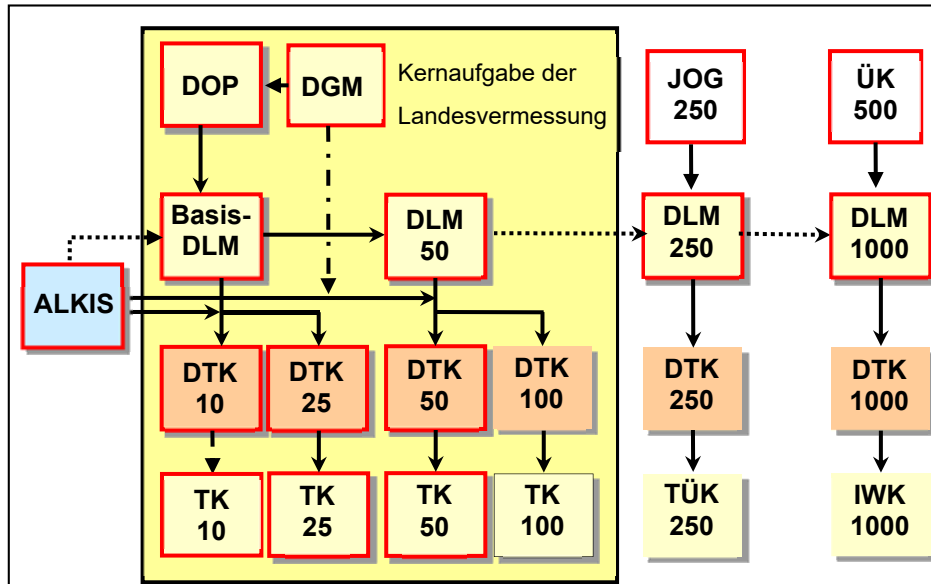


Abb. 9.1: Zusammenhänge innerhalb der ATKIS®-Produktpalette (punktierte Verbindungen gelten für die Aktualisierung)

9.2 Datenerfassung in Lage und Höhe

9.2.1 Einführung

Die geotopographische Datenerfassung dient in erster Linie der bildhaften Dokumentation der Landschaft zu bestimmten Zeitpunkten mit dem Ziel, durch Ausmessung und Interpretation der aufgenommenen Daten dreidimensionale Informationen in Lage und Höhe über den Zustand bzw. die Veränderung der aufgenommenen Landschaft zu gewinnen. Neben bildgebenden Sensoren werden auch Laserscanner verwendet, mit denen durch Laufzeitmessung eines ausgesandten und wieder empfangenen Pulses die Entfernung zwischen Sensor und Erdoberfläche direkt bestimmt werden kann.

Außer Luftbildern werden für viele Anwendungen auch Satellitenbilddaten eingesetzt, die inzwischen mit einer Bodenauflösung von besser als 1 m angeboten werden, beispielsweise für großräumige Oberflächenanalysen in Landwirtschaft und Statistik, sowie zur Erfassung

von Landbedeckung und Landnutzung und deren Änderungen. Photogrammetrisch betrachtet werden Satellitenbilder sehr ähnlich ausgewertet wie Luftbilder. Wurden bislang Satellitenbilder aber wegen hoher Beschaffungskosten, geringerer Interpretationssicherheit und geringerer Genauigkeit gegenüber Luftbildern sowie der Tatsache, dass die Wetterbedingungen im gewünschten Zeitfenster häufig keine Datengewinnung zulassen, nicht routinemäßig für Aufgaben in den deutschen Landesvermessungsbehörden eingesetzt, so erfolgt hier gerade ein Paradigmenwechsel. Mit dem europäischen Erdbeobachtungsprogramm Copernicus liegen Daten verschiedenster Fernerkundungssatelliten frei verfügbar und in hoher zeitlicher Auflösung vor. Diese Daten, die sowohl von optischen als auch von Radar-Sensoren generiert werden, werden zukünftig die klassische Datenerfassung zur Aktualisierung der Geotopographie zumindest ergänzen. Die nachfolgenden Abschnitte geben deshalb neben den bisherigen (klassischen) Methoden und Verfahren der Informationsgewinnung für die Geotopographie auch einen Überblick über die Daten von Copernicus.

9.2.2 Bildflugplanung

Für Bildflüge sind gewisse Standardbedingungen einzuhalten, um zu gewährleisten, dass Luftbildaufnahmen über längere Zeiträume und über Ländergrenzen hinweg eine möglichst einheitliche Qualität aufweisen. Diese Standardbedingungen sind:

- Sonnenschein oder je nach Festlegung hochstehende Wolken mit klaren Sichten;
- Sonnenstand mindestens 30° über Horizont;
- keine Wolken oder Wolkenschatten in den Bildern;
- Befliegungsgebiet frei von Nebel sowie von Hochwasser und Schnee.

Die Bildflugplanung der behördlichen Vermessungsverwaltungen beinhaltet die Unterteilung eines Jahresbildflugprogrammes in sogenannte Bildflugblöcke, deren Größe und Ausdehnung so begrenzt sein sollten, dass ein Bildflug einen bestimmten Block innerhalb einer zusammenhängenden Zeitspanne von 3 bis 4 Stunden abdecken kann. Die Blockgröße variiert in der Regel zwischen 400 km^2 und 700 km^2 . Während die Blöcke früher meist im Anhalt an den Blattschnitt der Topographischen Karte 1:50.000 gebildet wurden, werden bei der Blockbildung heute im Sinne einer Hauptnutzergruppe häufig kommunale Gebietsgrenzen berücksichtigt. Für viele Nutzer, wie auch für die Vermessungsverwaltung zur Fortführung der digitalen Landschaftsmodelle, ist das Frühjahr ab Mitte März der optimale Bildflugzeitpunkt, da zu dieser Zeit der Blick auf die Erdoberfläche noch nicht durch Belaubung beeinträchtigt wird. Andere Fachaufgaben benötigen dagegen Sommerbefliegungen, etwa für die Waldschadenskartierung, bzw. wünschen diese, da sie für Tourismuszwecke besser eingesetzt werden können. Diese unterschiedlichen Anforderungen können nicht mit einem einzigen Bildflug abgedeckt werden. Deshalb ist in einigen Fällen unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte zu entscheiden, wie die Prioritäten zu setzen sind.

Die für die regelmäßige Befliegung zuständigen Landesvermessungsbehörden der einzelnen Bundesländer haben bis zu Beginn der 2000er Jahre einen 5-jährigen Bildflugturnus eingehalten. Dadurch wurden jährlich für etwa 20 % der jeweiligen Landesfläche Luftbilder und daraus Orthophotos hergestellt. Inzwischen ist ein Zyklus von drei Jahren Standard in den Ländern, er wird inzwischen teilweise auf zwei oder ein Jahr verkürzt.

Für eine sichere stereoskopische Erfassung und Auswertung sowie für eine lückenlose so genannte Dichte Bildzuordnung (Dense Image Matching) werden ausreichende Längs- bzw. Querüberdeckungen der benachbarten Luftbildaufnahmen von in der Regel 60 bzw. 80 % (Längsüberdeckung) und 30 % bzw. 60 % in urbanen Gebieten für die Querüberdeckung vorgegeben. Um das zu gewährleisten, sind für Flugkurs, Bildneigung sowie Bildkantung maximale Abweichung von 50 m, 3 gon sowie 5 gon vorgegeben (ADV 2019). Die Bildflugplanungen sehen die streifenweise Aufnahme der Luftbilder in Ost-West-Richtung vor. Zur Erzielung einer geometrischen Orthophotogenauigkeit von besser als $\pm 0,2$ m ist eine geeignete Passpunktanordnung zu wählen.

9.2.3 Digitale Luftbildaufnahmen

Luftbilder entstehen für die Aufgaben der Landesaufnahme meistens durch Senkrechtaufnahmen aus flugzeuggestützten Plattformen, für manche Zwecke wie die Texturierung von 3D Stadtmodellen werden auch Schrägaufnahmen eingesetzt.

Lange Jahre haben analoge Luftbildkameras die topographische Datenerfassung aus der Luft dominiert. Vor gut 15 Jahren wurden sie jedoch von digitalen Luftbildkameras verdrängt, die statt mit Film mit CCD- oder CMOS-Sensoren (CCD: charged coupled device; CMOS: Complementary Metal-Oxide Semiconductor) ausgestattet sind und so einen komplett digitalen Datenfluss erlauben.

Digitale Kamerasysteme besitzen gegenüber analogen Kameras eine Reihe von Vorteilen:

- Da zwischen Sensor und Optik eine starre Verbindung besteht, ist die Wiederherstellung der inneren Orientierung mit Hilfe von Rahmenmarken überflüssig (konsequenterweise besitzen digitale Kameras keine Rahmenmarken). Vielmehr sind die Koordinaten des Bildhauptpunktes sowohl im Pixel- als auch im Bildkoordinatensystem für alle Bilder identisch, sie werden zusammen mit der Pixelgröße, der Kammerkonstanten, den Koordinaten des Bildhauptpunktes sowie der Verzeichnungswerte als Kalibrierwerte angesehen.
- Arbeiten im Photolabor entfallen ebenso wie das nachträgliche Scannen analoger Bilder.
- Digitale Sensoren besitzen eine höhere geometrische Stabilität als Film.
- Digitale Sensoren haben eine höhere radiometrische Empfindlichkeit und ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR: signal to noise ratio), sie liefern in der Regel eine radiometrische Auflösung von mindestens 12 Bit. Daher sind Flüge auch unter schlechten Lichtverhältnissen bzw. mit höherer Fluggeschwindigkeit möglich, auch sind Schattenbereiche besser auswertbar.
- Digitale Kameras liefern typischerweise Bilder in vier verschiedenen Farbkanälen, die simultan aufgenommen werden und koregistriert sind. Dabei wird in der Regel neben den üblichen Farbkanälen Rot-Grün-Blau das Signal im nahen Infrarot als vierter Kanal aufgenommen, das insbesondere für Vegetationsauswertung wichtig ist.

Heute werden für Zwecke der Landesaufnahme ausschließlich digitale Kamerasysteme verwendet.

Luftbildkameras sind in zwei unterschiedlichen geometrischen Varianten erhältlich. Kameras mit flächenhaften Sensoren liefern konventionelle, zentralperspektivische Bilder. Zeilenkameras, die die Bildinformation mit zeilenartig quer zur Flugrichtung angeordneten Bildelementen aufzeichnen, tasten das Aufnahmegebiet gleichzeitig im Vorwärts-, Senkrecht- und

Rückwärtsblick ab, wodurch es zu zumindest drei sich zu 100 % überlappenden digitalen Bildstreifen kommt (Abb. 9.2). Das Ergebnis von Zeilenkameras ist eine Kombination aus Parallelprojektion (in Flugrichtung) und Zentralprojektion (in Zeilenrichtung). Um trotzdem einen geometrisch stabilen Block bilden zu können, benötigen Zeilenkameras zusätzliche Beobachtungen für die Elemente der äußeren Orientierung, die mit GNSS-Empfängern (Global Navigation Satellite System wie GPS und Galileo) und inertialen Messeinheiten (IMU) gewonnen werden. GNSS/IMU Daten werden oft auch für flächenhafte Sensoren verwendet, dort sind sie jedoch optional.

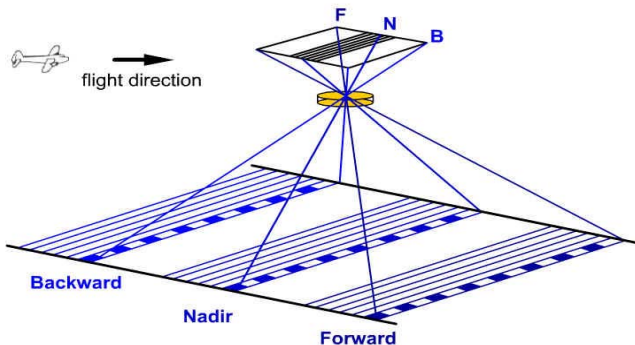


Abb. 9.2: Prinzip der Dreizeilenkamera (MÜLLER 1991)

Digitale Luftbildkameras erreichen eine sehr hohe Bodenauflösung (ground sampling distance, GSD), die gerade bei Flächenkameras im Bereich weniger cm liegt. Bei Zeilenkameras kann die Pixelform am Boden je nach Fluggeschwindigkeit quadratisch oder rechteckig sein, rechteckige Pixel stellen für die Auswertung jedoch keinerlei Nachteile dar. Die GSD ist zum wichtigsten Parameter für die Charakterisierung digitaler Luftbilder geworden, sie übernimmt damit die Rolle des Bildmaßstabs für analoge Luftbilder.

Beispiele für großformatige digitale Luftbildkameras mit Flächensensor sind die DMC III von Leica Geosystems mit einem ca. 15.000 x 25.000 Bildelemente à 3,9 µm großen CMOS-Sensor im panchromatischen Kanal sowie die UltraCam Eagle Prime von Vexcel Imaging, die mehrere CCD-Sensoren besitzt und ein panchromatisches virtuelles Bild mit ca. 15.000 x 23.000 Pixeln à 4,6 µm liefert. Farbbilder werden bei beiden Kameras mit geringerer Auflösung aufgenommen, die (höhere) Auflösung des panchromatischen Kanals wird für Farbbilder mittels der so genannten pan-sharpening Technik erreicht. Die bekannteste Zeilenkamera ist die ADS100 von Leica Geosystems mit einer Zeilenlänge von 20.000 Pixeln à 5 µm für den panchromatischen sowie alle Farbkanäle. Einen umfassenden Vergleich hinsichtlich der geometrischen und radiometrischen Leistungsfähigkeiten unterschiedlicher digitaler Luftbildkameras geben (JACOBSEN ET AL. 2010). In den Landesvermessungsbehörden der Länder sind in den vergangenen Jahren nur Projekte mit Flächenkameras beauftragt worden; Zeilenkameras kamen bisher nicht zum Einsatz.

Neben großformatigen digitalen Luftbildkameras werden am Markt auch Mittelformatkameras angeboten. Sowohl die bereits genannten Firmen als auch Mitbewerber wie IGI und

Trimble bieten derartige Kameras an, meist mit Auflösungen im Bereich von 10.000 x 7.800 Pixeln.

Viel Aufmerksamkeit haben in den letzten Jahren Schrägbildkameras auf sich gezogen (Abb. 9.3). Dabei werden in der Regel so genannte Pentakamera-Systeme angeboten, die aus fünf einzelnen Kameras bestehen, deren optische Achsen senkrecht sowie um jeweils ca. 45 Grad nach vorne, hinten, links und rechts geneigt sind. Solche Systeme werden insbesondere zur Fassadentexturierung von 3D Stadtmodellen verwendet.

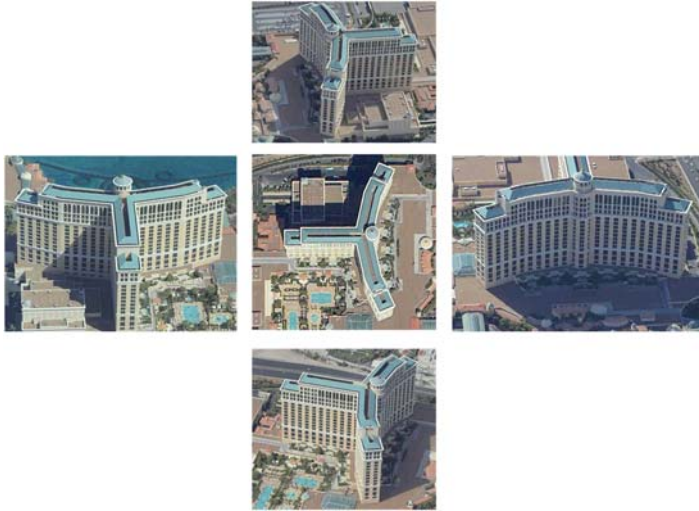


Abb. 9.3: Pentakamera: Kombination einer Nadir Aufnahme mit vier Schrägaufnahmen desselben Gebäudes (© Pictometry). Man beachte: die fünf (Teil-)Aufnahmen wurden von fünf verschiedenen Positionen aufgenommen.

9.2.3 Copernicus

Unter dem Namen GMES (Global Monitoring for Environment and Security) wurde von der Europäischen Union seit Beginn des 21. Jahrhunderts zusammen mit der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) ein europäisches, erdbeobachtungs-basiertes Informationssystem aufgebaut. Inzwischen in Copernicus umbenannt, steht heute eine leistungsstarke Infrastruktur zur Bereitstellung globaler Umweltinformationen zur Verfügung. Die Copernicus-Daten sind offen und frei verfügbar. Zu Copernicus gehören das Satelliten- und das Bodensegment, die Copernicus-Dienste, die Daten der so genannten beitragenden Missionen (contributing missions, u.a. TerraSAR-X, RadidEye) und die in-situ-Daten.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Konzipierung von Copernicus war die Garantie, langfristig vergleichbare Daten aufzunehmen, so dass neben der Dokumentation eines Zustands auch die Erfassung von Prozessen mit mehrjähriger oder jahrzehntelanger Laufzeit möglich ist. Letzteres ist insbesondere für Fragen im Bereich Umwelt von entscheidender Bedeutung. Copernicus kommt dieser Forderung nach, bereits heute sind sowohl für Sentinel-1 als auch für Sentinel-2 die jeweils 3. Generation in Planung und die Finanzierung des Systems ist bereits heute bis weit in die Zukunft gesichert.

Mit den Copernicus-Diensten Landüberwachung, Überwachung der Meeresumwelt, Katastrophen- und Krisenmanagement, Überwachung der Atmosphäre, Überwachung des Klimawandels sowie Sicherheit stehen für sechs Themenbereiche (Abb. 9.4) umfangreiche Grundlageninformationen für vielfältige Anwendungen bereit (COPERNICUS 2019, EHLERT & SCHWEITZER 2018). Für die Datengewinnung wird auf die Sentinel-Satelliten, die Daten der beitragenden Missionen sowie die in-situ-Daten zurückgegriffen. Insgesamt sind 7 verschiedene Sentinel-Satelliten-Typen für spezielle Anwendungsbereiche konzipiert. In-situ-Daten sind die nicht über weltraumgestützte Beobachtungssysteme erhobenen Daten. Das sind z.B. Pegelstände, meteorologische Sensoren oder Geobasisdaten wie Orthophotos oder Digitale Geländemodelle (BUNDESREGIERUNG 2017).



Abb. 9.4: Darstellung der Copernicus-Dienste(COPERNICUS 2019)

Die Sentinel-1 Satelliten sind mit einem Radarinstrument mit synthetischer Apertur (SAR) ausgestattet. Damit können, unabhängig von Regen oder Dunst, bei Tag oder Nacht, Daten z.B. zur Überwachung der Polarregionen oder zur Verfolgung von Schiffrouten auf dem Meer gewonnen werden. Ebenso stehen schnell Informationen für Katastrophenfälle und für Änderungen der Vegetationsdichte zur Verfügung. Die Radardaten spielen daneben im Zuge einer interferometrischen Auswertung (InSAR) eine wesentliche Rolle bei der Erfassung von Höhenänderungen. Die Auflösung beträgt 9 bis 40 Meter, die Wiederholrate 6 Tage.



Abb 9.5: Sentinel 2 (Copyright ESA/ATG medialab)

Die Sentinel-2 Satelliten (Abb. 9.5) sind mit einem optischen Multispektralsensor ausgestattet. Sie liefern Aufnahmen im sichtbaren und infraroten Spektrum (443 nm bis 2190 nm). Durch die Kombination der 13 verschiedenen Spektralkanäle sind aus diesen Daten Aussagen zur Veränderungen der Vegetation, des Pflanzenwachstums, des Wasserhaushaltes sowie zur Änderung der Landbedeckung und Landnutzung ableitbar (Abb. 9.6). Sentinel-2 besitzt je nach Kanal eine Auflösung von 10 bis 60 Metern, die Wiederholrate beträgt 5 Tage (ESA 2018, COPERNICUS 2019). Die sehr hohe Wiederholrate basiert sowohl bei Sentinel-1 als auch bei Sentinel-2 auf dem gleichzeitigen Betrieb zweier baugleicher Sentinel-Satelliten im Orbit.



Abb. 9.6: Balaton, Ungarn, 27.02.2019, contains modified Copernicus Sentinel data (2019), processed by ESA, [CC BY-SA 3.0 IGO](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

Die weiteren Sentinel-Satelliten (3, 4, 5, 5P, und 6), die entweder schon in einer Erdumlaufbahn sind oder deren Start geplant ist, dienen hauptsächlich der Überwachung der Atmosphäre, der Meeresspiegelhöhe und der Eis- und Meeresoberfläche. Als Sensoren sind Spektrometer, Altimeter und optische sowie Radarsensoren im Einsatz. Für die Belange der Datenerfassung für die Amtliche Geotopographie sind vor allem die Sentinel-1 und Sentinel-2

Satelliten von Interesse. Sämtliche Daten der Sentinel-Satelliten sind kostenfrei verfügbar. Der Datenzugang erfolgt über verschiedene Datenportale der ESA bzw. des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).

9.2.4 Laserscanning

Laserscanning wird im Rahmen der topographischen Geländeaufnahme von Flugzeugen aus zur Höhenbestimmung eingesetzt. Dabei werden in hoher Frequenz Laserpulse ausgesendet und mit Hilfe eines Spiegels quer zur Flugrichtung abgelenkt, um die Oberfläche zeilenförmig abzutasten. Durch Messung der Laufzeit der ausgesendeten und nach der Reflexion am Boden wieder empfangenen Laserpulse ergibt sich ein genaues Maß für die Entfernung zwischen Laserscanner und der Erdoberfläche (Abb. 9.7). Die Position des Laserscanners und die Ausstrahlrichtung werden mittels GNSS/IMU und Kalibrierungsdaten bestimmt; Punkte auf der Erdoberfläche ergeben sich dann über polares Anhängen mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 0,20$ m in der Lage und $\pm 0,15$ m in der Höhe. Zur Verbesserung der durch GNSS bestimmten Position des Laserscanners werden in aller Regel mehrere terrestrisch eingemessene, ebene Kontrollflächen wie z. B. Fußballfelder herangezogen. Benachbarte Streifen können auch über eine Streifenausgleichung kombiniert werden, die auf Verknüpfungsflächen – wie Dachflächen – beruht (KAGER 2004).

Insbesondere für die Bestimmung von Geländehöhen in bewaldeten Gebieten bietet das Laserscanning klare Vorteile gegenüber Bildern, denn die Laserpulse können durch die Baumkrone auf den im Bild nicht sichtbaren Boden dringen und werden von dort reflektiert. Die Wellenlänge der Laserscanner liegt typischerweise im nahen Infrarot (ca. 1000 nm oder 1500 nm). Für bathymetrische Messungen werden zusätzlich Systeme mit halber Wellenlänge (grünes Licht) eingesetzt. In diesem Fall wird das Infrarotsignal von der Wasseroberfläche reflektiert, während das grüne Licht ins Wasser eindringt und vom Seeboden reflektiert wird, solange die Wassertrübung nicht zu stark ist. Aus der Laufzeitdifferenz zwischen infrarotem und grünem Puls kann dann die Wassertiefe bestimmt werden.

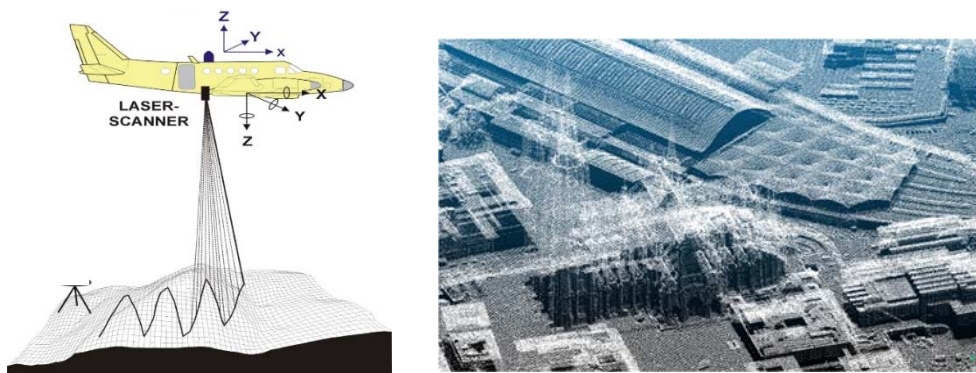


Abb. 9.7: Prinzip des luftgestützten Laserscanning (links) (KRAUSS 2004), Punktwolke aus Laserscanning (rechts) (GEOBASIS.NRW)

Wichtige Parameter eines Laserscanners sind die maximale Flughöhe, die Bodenauflösung des Pulses, die sich aus der Strahlaufweitung ergibt und natürlich von der Flughöhe abhängt, der Öffnungswinkel quer zur Flugrichtung, die Messpunktdichte am Boden, die von der Frequenz abhängt, mit der Laserpulse ausgesendet werden, sowie die Anzahl der Echos, die am Empfänger registriert werden können. Typische Flughöhen liegen zwischen 500 m und 5000 m. Bei 1000 m Flughöhe und einer Strahlaufweitung von 0,25 mrad ergibt sich eine Bodenauflösung von ca. 25 cm. Öffnungswinkel heutiger Modelle liegen bei 60° - 80°. Während die Messpunktdichte Mitte der 1990er Jahre bei etwa einem Punkt auf 10 m² lag, sind mittlerweile Frequenzen von 1 MHz und mehr sowie Auflösungen von 10 bis 100 Punkten/m² möglich. Die Punkte können je nach Scanmuster in Flugrichtung einen größeren Abstand aufweisen als quer dazu. Mehrfachechos können schon seit Jahren registriert werden, dabei wird typischerweise angenommen, dass insbesondere in Wäldern das letzte Echo vom Boden stammt. Moderne, als "full waveform" bezeichnete Systeme sind in der Lage, nicht nur den Ankunftszeitpunkt eines Pulses, sondern auch dessen Form zu detektieren, indem der Puls hochfrequent digitalisiert wird. Durch Analyse der Signalform können Informationen sowohl über die Rauigkeit des Bodens als auch über das vorliegende Material gewonnen werden (WAGNER ET AL. 2006)

Beispiele für am Markt verfügbare Systeme sind die Scanner LMS-VQ-780i und 1560i der Firma Riegler, der Terrain Mapper und der SPL100 von Leica Geosystems, der Orion C ALTM von Teledyne Optech, und der AX80 von Trimble.

9.2.5 Sensororientierung

Die Aufgabe der Sensororientierung besteht darin, für den Zeitraum der Datenerfassung die sechs Elemente der äußeren Orientierung (Position des Projektionszentrums und Blickrichtung der optischen Achse der Kamera bzw. Nullpunkt und Nullpunktstrichtung des Laserscanners) zu bestimmen. Für Flächensensoren sind dies sechs diskrete Werte für jedes Bild, für Zeilenkameras und Laserscanner sechs kontinuierliche, zeitabhängige Funktionen. Sowohl für Bilder als auch für Laserscannerdaten läuft die Sensororientierung zu einem großen Teil automatisch ab, ein menschlicher Operateur sollte allerdings die Ergebnisse kontrollieren und ggf. korrigieren bzw. vervollständigen.

Eingangsgrößen für die Orientierung von Bildern im Rahmen der Aerotriangulation sind neben Kalibrierungswerten für die Kameras (innere Orientierung) Bildkoordinaten der Pass- und Verknüpfungspunkte, Objektkoordinaten der Passpunkte, sowie ggf. GNSS/IMU-Beobachtungen für Projektionszentren und die Blickrichtung der optischen Achse (GNSS/IMU-Beobachtungen sind für Flächensensoren optional). Die Orientierungsparameter werden dann mittels Bündelausgleichung bestimmt. Für manche Zwecke wie die Orthoprojektion können die Bildorientierungen auch durch direkte Sensororientierung, d. h. allein auf der Grundlage der GNSS/IMU-Beobachtungen berechnet werden (HEIPKE ET AL. 2002). Eine Verknüpfung der Bilder untereinander und damit eine Aerotriangulation unterbleiben in diesem Fall. Eingangsgrößen für die Orientierung von Laserscannerdaten sind die GNSS/IMU-Beobachtungen für Nullpunkt und Nullpunktstrichtung des Sensors sowie ebene Passflächen, deren Position und Neigung im Objektkoordinatensystem bekannt ist.

Zur automatischen Aerotriangulation gehört neben der Berechnung der Orientierungsparameter mittels Bündelausgleichung auch die automatische Bestimmung der Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte (homologe Punkte), die mittels digitaler Bildzuordnung gelöst wird.