



## Über Innovationen in der (Luft-)Bildmessung

Franz Leberl und Michael Gruber, Graz

### Kurzfassung

Die Innovationsraten in der Luftbildmessung haben sich in den vergangenen Dezennien beschleunigt. Getrieben sind sie von den Fortschritten erstens im Computing, zweitens in der Bildgebung und drittens in der Internet-inspirierten Anwendung. Wir beschreiben diese Innovationen und ihre Auswirkungen auf das eigenständige Fachgebiet der Photogrammetrie. Darin haben sich alle nur denkbaren Aspekte verändert und bewegt, seien es die akademischen Einrichtungen, die Industrie, die Apparaturen, die Datendienstleistungen, die Fachliteratur, die Tagungen, die Geldflüsse und die Internet-inspirierten Anwendungen. Aufgrund ihrer Verursacher im Computing und in der Sensorik sind die Innovationstreiber heute in der Informatik zu finden. Die Positionierung der Photogrammetrie als Fachgebiet ist in diesem veränderten Umfeld neu zu bedenken.

Wir berichten von photogrammetrischen Projekten, welche aus 16 Terabytes an Luft- oder terrestrischen Bildern Punktwolken mit 100 Milliarden Koordinatentripeln einer Stadt wie Graz errechnen. Und wir erahnen eine Zukunft, in der eine Diversifizierung von Bildquellen aus fahrenden Autos, dem Internet und Drohnen auf neuartige Anwendungen am Telefon und im Internet trifft. Im Zentrum stehen Innovationen der Rechenverfahren, welche in der Lage sind alle Informationsquellen unserer Umwelt zu berücksichtigen und in einem Weltkoordinatenmodell ein 3D-Weltmodell zur Anwendung zu bringen. Navigation und 3D-Modellierung der Umwelt verschmelzen zu einer neuen Sicht auf Geodatenerzeugung und ihre Nutzung.

**Schlüsselwörter:** Photogrammetrie, Sensoren, Plattformen, Sensor-Pose, Bildanalyse, Datenprodukte, Internet-Mapping, Punktwolken, Structure-from-Motion, 3D-Weltmodell

### Abstract

Innovation rates in aerial photogrammetry accelerated during recent decennia. This is being driven by progress in computing, progress in digital imaging and progress in Internet-inspired applications. We describe these innovations and their effect on the separate discipline of photogrammetry. In this, all conceivable aspects have undergone changes. This addresses academic institutions, the industry, the devices, the data services, the literature, the conferences, the money flows and the Internet-inspired applications. Since the innovations are being driven by computing and sensing, their main forces are in computer science. This requires that the field of photogrammetry revisit its position in a changed environment.

We report on photogrammetry projects that use 16 Terabytes of aerial or terrestrial source data to develop point clouds with 100 billion 3D coordinate triplets in a city like Graz. And we develop a sense of a future in which photogrammetry can rely on imagery from everyday driving cars, from the Internet, from unmanned aerial devices, meeting new Internet-driven applications on smart phones. Computing algorithms will get developed that use all the diverse information sources of our environment in a World coordinate system to apply a 3D World model. Navigation and mapping merge into a new paradigm for the creation and application of geo-information.

**Keywords:** Photogrammetry, Sensors, Platforms, Sensor-pose, Image analysis, Data products, Internet-mapping, Point clouds, Structure-from-motion, 3D World model

## 1. Panta Rhei – Das photogrammetrische Umfeld

### 1.1 Photogrammetrie als eigenständiges Fachgebiet

Wir sprechen über die Photogrammetrie, die sich seit etwa 150 Jahren zu einem eigenständigen wissenschaftlich-technischen Fachgebiet herausgebildet hat. Man kann sie *eigenständig* durch 8 Elemente begründen, welche auch manch andere Fachgebiete definieren. Es sind dies zunächst (1) die Universitäten mit eigenen Professuren und deren klarer Zuständigkeit, weiters (2) nationale und internationale

Fachgesellschaften, natürlich (3) Lehrbücher und gewidmete Zeitschriften, (4) abgegrenzte Fachabteilungen in der Verwaltung, (5) eine global agierende erzeugende Zuliefer-Industrie für Werkzeuge, mit welchen dann (6) Firmen Arbeitsflüsse entwickeln, die (7) erkennbare Produktfamilien erzeugen und schließlich (8) eine Vielzahl von Anwendern dieser Produkte, welche dieses System in Bewegung halten.



Abb. 1: Autonavigation in einem 3D Modell. Viele Beispiele sind im Internet unter dem Suchbegriff Car Navigation with Augmented Reality zu finden, dem auch dieses Beispiel entnommen ist.

Diese Elemente eines eigenständigen Fachgebietes sind für jedermann klar sichtbar. Bemerkenswert ist die Dynamik der Veränderungen. Wir wollen dies in diesem Beitrag sichtbar machen. Es erfordert keine wesentliche analytische Fähigkeit zu erkennen, dass die Entwicklungen des Computing diese Dynamik bestimmen. Betrachten wir diese 8 Elemente.

## 1.2 Die Welt der Anwender – # 8

Die explosionsartige Vermehrung der Zahl der Anwender für photogrammetrische Produkte sehen wir alleine schon im Verkehrswesen und den Smartphones mit ihren Bedürfnissen nach Geoinformation (Abb. 1). Jeder Erdenbürger ist potentiell mehrmals täglich ein Anwender. Das unterscheidet sich sehr von der Vergangenheit, wenn das Kartenlesen eine zu erlernende Kunst darstellte und Produkte meist nur von Experten konsumiert wurden. Es geht heute um Geodaten und computergestützte Navigation, während es vormals um die „Kunst“ des Kartenlesens ging.

## 1.3 Die Datenprodukte – # 7

Die Produkte selber unterliegen einer ständigen Dynamisierung. Der Begriff *Geoinformation* beschreibt den Übergang vom 2D-Papierplan mit kodierter 3. Dimension zum digitalen 3D-Weltmodell mit einem Detailreichtum, der sich am menschlichen Umfeld und den Bedürfnissen einer Augmented Reality orientiert (Abb. 2). Damit ist ein Datenvolumen im Exabytes-Bereich vorzuhalten und zu erneuern [Leberl, 2014].

## 1.4 Datenproduktion – # 6

Der Charakter jener Unternehmungen und Verwaltungseinrichtungen, welche diese Produkte erzeugen, vorhalten und erneuern, ändert sich. Statt nur regional tätiger Firmen mit Bildflugzeugen und einem manuell ausgerichteten Datenverarbeitungsfluss sind es nun einige wenige global agierende Betreiber von Internet-Suchmaschinen, die den Großteil der Inhalte solcher 3D-Weltmodelle erstellen. Abb. 3 stammt aus dem Projekt „Global Orthophoto“ der Firma Microsoft [Walcher, Leberl, Gruber, 2012]. Abb. 4 zeigt die Marktentwicklung für Geodaten. Ein Wachstum auf jährlich 14 Milliarden USD im Jahr 2022 wird vorausgesagt [Montello, Hepner, Boermann, 2011].

## 1.5 Industrie der photogrammetrischen Werkzeuge – # 5

Die Zulieferindustrie schrumpfte durch einen Übergang zunächst von Glas, Metall und Elektrik zu spezialisierten Stereo-Computer-Arbeitsplätzen, und dann weiter durch den Übergang zur Software für völlig automatische Prozesse auf generische persönliche Computer. Ein umfassender Gerätepark für eine photogrammetrische Datengewinnung reduziert sich heute auf einige Sensoren, typisch geometrisch kalibrierte (Luft-) Bildkameras und ein Rechenzentrum. Die

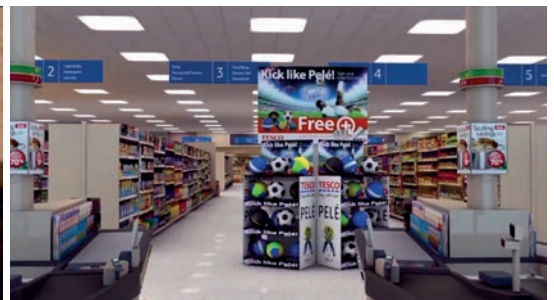


Abb. 2: Eine Betrachterin erfährt einen virtuellen Supermarkt via einem Oculus System (li). Die Firma Oculus wurde im Jahr 2014 von Facebook gekauft. Der virtuelle Supermarkt liegt als 3D-Modell vor (re) und wird interaktiv durchwandert. Waren werden begutachtet und durch Anklicken gekauft. Dieses Beispiel wird von TESCO in Korea realisiert (aus [http://www.youtube.com/watch?v=08S86X\\_5CrS](http://www.youtube.com/watch?v=08S86X_5CrS)).

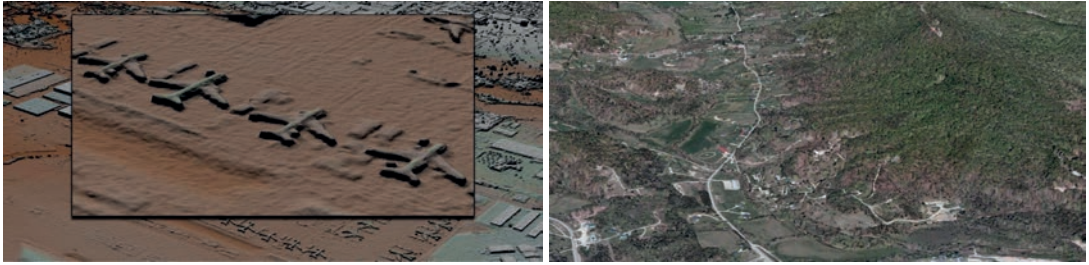


Abb. 3: Illustration der Geodaten aus dem Projekt „Global Orthophoto“ der Firma Microsoft [siehe Walcher, Leberl, Gruber, 2012]. Das digitale Höhenmodell liefert Punkte im Abstand von 0,3 bis 1 Meter. Das Orthophoto (re) wird dem DSM (Digital Surface Model) überlagert und kann in einer Vogelperspektive betrachtet werden. Das Projekt produzierte ein DSM und Orthophotokarten von Nordamerika und Westeuropa im Ausmaß von 10 Millionen Quadratkilometern in 30 Monaten mit einer Auflösung von 30 cm [aus Walcher, Leberl, Gruber, 2012].

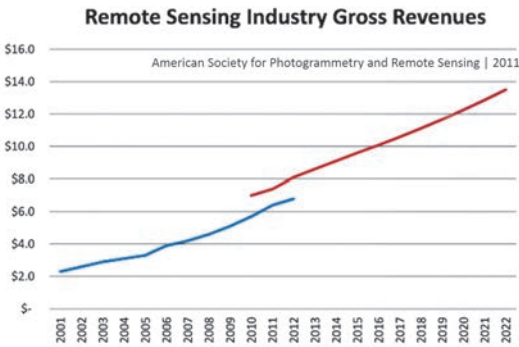


Abb. 4: Der Markt für Geoinformation wird in einer Studie der amerikanischen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung von heute USD 7 Milliarden im Jahr 2022 auf USD 22 Milliarden anwachsen [Montello, Hepner, Boermann, 2011]. Die blaue Kurve markiert die tatsächliche Marktgröße in der Vergangenheit, die rote Kurve zeigt die Prognose.

einst klare Trennung von den Erzeugern der Werkzeuge für die Photogrammetrie mit damals klingenden Firmennamen wie Wild, Kern, Zeiss, Galileo, OMI, Fairchild usw. einerseits und deren Anwendern andererseits wird durch eine Neigung zu proprietären Arbeitsflüssen in globalen Internet-Firmen wie Google, Microsoft und Apple infrage gestellt.

**1.6 Fachabteilungen – # 4**

Fachabteilungen in der Verwaltung und bei großen Unternehmungen haben sich von einer Spezialisierung auf photogrammetrische Prozesse hin zur Geoinformation gewandelt. Besondere photogrammetrische Geräte sind durch Computersoftware ersetzt, die ehemalige Photogrammetrie-Abteilung ist nunmehr in der IT-Infrastruktur aufgelöst.

**1.7. Lehrbücher und Fachzeitschriften – # 3**

Innovationen für die photogrammetrischen Aufgaben entstehen heute vor allem in der Informatik und dem maschinellen Sehen, der Computer Vision. Es stellt sich die Frage, inwiefern ein Lehrbuch der Computer Vision, wie jenes von Hartley und Zissermann [2003], noch Raum für einen gesonderten Text der Photogrammetrie übrig lässt.

Fachzeitschriften widmen sich vermehrt den Themen der Satellitenfernerkundung und des Geoinformationswesens. Die Zahl der eingereichten Fachartikel mit photogrammetrischem Inhalt reicht oft nicht mehr zur Veröffentlichung einer periodisch erscheinenden photogrammetrischen Zeitschrift. Dies steht in krastem Gegensatz zu einer wachsenden Zahl von Zeitschriften mit sehr hohen Impact-Faktoren zu Themen des maschinellen Sehens. Ein Beispiel ist die Zeitschrift IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.

**1.8 Nationale und international Gesellschaften – # 2**

Die Erosion der Industrie und die Veränderungen in der Datenproduktion hat die Teilnehmerzahl internationaler technisch-wissenschaftlicher Photogrammetrie-Kongresse reduziert. Obwohl global die wissenschaftliche Reisetätigkeit allgemein zugenommen hat, ist sie im Falle der Photogrammetrie gesunken. Gleichzeitig ist aber eine Plethora nationaler und global agierender Gesellschaften der Computer Vision entstanden, die heute mit Teilnehmerzahlen rechnen dürfen, die jene vergangener Photogrammetrie-Kongresse bei weitem übersteigen. Abb. 5 illustriert diese Entwicklung von der Photogrammetrie zur Computer Vision.



## 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)



Abb. 5: Ein Stimmungsbild der Plenarsitzung bei der 2012 Jahrestagung der American Society for Photogrammetry and Remote Sensing in Sacramento mit unter 1000 Teilnehmern versus die brodelnde Betriebsamkeit bei einer Unzahl von internationalen Tagungen zur Computer Vision mit mehreren 1000 Teilnehmern und einer beachtlichen Zahl an Weltfirmen als Sponsoren.

### 1.9 Bildungseinrichtungen – # 1

Professuren und akademische Einrichtungen der Photogrammetrie sind nach dem zweiten Weltkrieg weltweit und in großer Zahl entstanden. Und weltweit hat sich ein Trend gezeigt, diese akademischen Exzellenzzentren nach Abtreten der Gründergeneration nicht weiter zu betreiben. Dramatisch sichtbar ist dies in den USA. Zum Teil sind die Inhalte dieser Einrichtungen zur Geoinformation mutiert, zum Teil ist der Fokus in die Satellitenfernerkundung gewandert (Abb. 6). In Österreich wurde die Zahl der fokussierten Vollzeit-Photogrammetrie-Lehrstühle zuletzt auf 1 an der TU Wien reduziert.

Bemerkenswert ist, dass in allen Texten des ehemaligen holländischen „Tempels der Photogrammetrie“ ITC (heute Fakultät für Geoinformationwissenschaften und Erdbeobachtung der Universität Twente) das Wort Photogrammetrie völlig verschwunden ist.

### 1.10 Trotz enormer Dynamik ein Bedeutungsverlust

Natürlich fließt alles, alles verändert sich, und das ist gut so. Unbestreitbar ist Geoinformation in seiner Bedeutung enorm gewachsen. Eindeutig ist auch die Vervielfachung der eingesetzten Ressourcen zur Innovation in der Gewinnung von Geoinformation. Es ist daher schwer verständlich, dass die Bedeutung der Photogrammetrie mit ihren Ausprägungen an Universitäten, bei Kongressen und in der Innovationsliteratur nicht auch zugenommen hat. Eine Erklärung liegt wohl in der explosionsartigen Ausbreitung der Computer Vision innerhalb der Informatik, deren

Dynamik jene in der Entwicklung der Photogrammetrie unterläuft [Leberl, Bischof et al., 2010].

## 2. Panta Rhei – Vom Bild zum Datenprodukt

### 2.1 Vom Flächenflugzeug zu „Alles was sich bewegt“

Fast ein Jahrhundert lang war die Photogrammetrie nahezu ausschließlich mit Messungen aus Bildern befasst, die aus Flächenflugzeugen aufgenommen wurden. Nur die Nahbereichsphotogrammetrie verwendete Bilder, die meist terrestrisch mittels handgehaltener Kameras erstellt wurden.

Satellitenbilder verfügten ab etwa 1972 (System Landsat) zunächst mit 80 m über eine ungenügende geometrische Auflösung um photogrammetrisch verwendet zu werden; das trifft aber mit Pixelgrößen im Bereich von 30 cm nicht mehr zu, die nun von kommerziellen Unternehmen angeboten werden. Und im Zuge der besonderen Bedeutung von 3D-Stadtmodellen hat es sich sehr rasch eingebürgert, Kameras auf Fahrzeugen aller Art zu montieren, seien dies Autos oder Micro Aerial Vehicles (MAVs) wie etwa Quadcopter (Abb. 7) oder auch unbemannte Flächenflugzeuge. Kameras werden auf Roboter montiert, welche dann autonom eine Szene erfassen. Innenräume werden von manuell geführten Kameras abgebildet.

Mit dem erweiterten Portfolio von Plattformen wurde auch die Disziplin bei der geometrisch optimierten Bilderfassung gelockert. Solange die Bilder einander überlappen, sind sie nützlich, aber dass sie eine regelmäßige Anordnung von Bildblöcken mit standardisierten Vorwärts- und Seitwärtsüberlappungen ergeben, ist nicht mehr

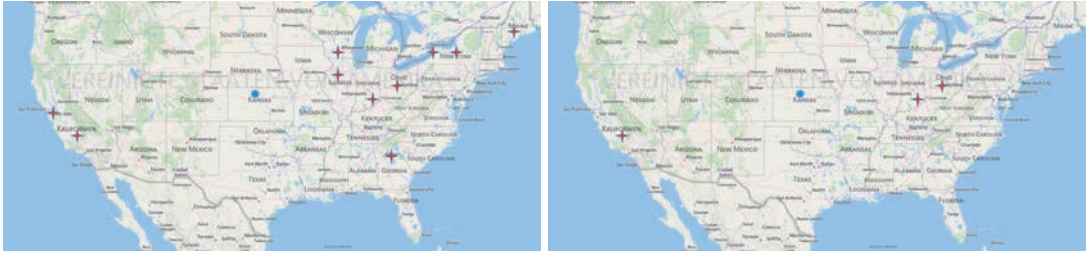


Abb. 6: Entwicklung der Zahl der gewidmeten Lehrstühle für Photogrammetrie in den USA in 1970 (li) versus 2014 (re). Die rückläufige Zahl wird durch einen Zuwachs an Professuren für Computer Vision und Geografische Informationssysteme kompensiert.



Abb. 7: Ein Micro-Aerial Vehicle (MAV) im Flug und in der Werkstatt [Wendel, Irschara, Bischof, 2011]. MAV ist die in der Robotik übliche Bezeichnung. In der Vermessung spricht man eher von Unmanned Aerial Systems (UAS). Die Kamera ist mit ihren Systemkomponenten im MAV-UAS Fluggerät integriert.



Abb. 8: Nicht standardisiert sind die Bildverbände aus neuen unkonventionellen Fahrzeugen, etwa einem MAV, wie hier vom Grazer Schlossberg [Wendel, Irschara, Bischof, 2011; siehe auch [aerial.icg.tugraz.at](http://aerial.icg.tugraz.at)].

wichtig. Grund für die Bedeutung der standardisierten Bildblöcke war die Einfachheit der Ermittlung von Näherungswerten für die Sensorpose und die Notwendigkeit, die Stereobetrachtung zu ermöglichen. Mit neuen Methoden der näherungsweise Posen-Berechnung, und auch mit der automatischen Bildüberlagerung wurden die standardisierten Bildverbände irrelevant (Abb. 8).

## 2.2 Sensorvielfalt

Geometrisch präzisionskalibrierte Kameras sind nunmehr auch nicht mehr die alleinige Voraussetzung für photogrammetrische Vermessungen. Zunächst wurde ab etwa 1970 durch die Fernerkundung die Vielfalt von Sensoren in Richtung Radar-, Schall-, Multispektral- und passive Radiometriesensoren erweitert. Gemessen wurden nicht nur die Geometrie einer Szene, sondern auch verschiedene andere Parameter wie etwa Feuchte, Temperatur oder Rauheit.

Heute sind auch einfache Amateurkameras, manchmal Videokameras für 3D-Vermessungen im Einsatz. Aus der Luft werden Bilder mittels schräg stehender Kameras erzeugt. Mit der Erfindung der CCD-Flächensensoren im Jahre 1970 (Nobelpreis 2009 an W. S. Boyle und G. E. Smith) wurde ab etwa 2000 der Film irrelevant. Luftbild-Kameras sind seit etwa 2003 digital und verwenden lichtempfindliche Elemente in einer Zeile oder auch Flächenanordnung.

LIDAR hat sich seit etwa 2000 rasch in die Photogrammetrie eingenistet [Baltsavias, 1999],

weil damit sehr schnell eine 3D-Punktwolke erzeugt werden konnte, während dies mit film-basierten Luftbildkameras einfach nicht möglich war. LIDAR wird topographisch aus Flugzeugen und Fahrzeugen zur Anwendung gebracht. Innenräume werden stationär vermessen.

Durch den Übergang vom Film auf gänzlich digitale Kameras und Arbeitsflüsse ist es nunmehr möglich, detailreiche Punktwolken sehr rasch auch aus Bildern zu erstellen. Damit entsteht eine Konkurrenz zwischen der direkten LIDAR-Punktwolke und der berechneten bild-basierten Punktwolke [Leberl, Irschara et al., 2010]. Dies wird im Abschnitt 4 näher betrachtet.

## 2.3 Sensorpositionen und Orientierungen

Die Aerotriangulierung von photogrammetrischen Bildblöcken stand im Zentrum vieler Dissertationen in den Dekaden bis etwa 2000. Seither hat die direkte satellitengestützte Positions- und Orientierungsbestimmung von Kameras die Aerotriangulierung in eine Sonderrolle gedrängt. Für eine Vielzahl an Anwendungen reichen differentielle GNSS-Messungen aus, um Bilder im 3D-Raum zu orientieren und durch einen Prozess des „Dead-Reckoning“ auch 3D-Koordinaten zu bestimmen. Heute liefern GPS und IMU Orientierungsparameter im Bereich von  $\pm 3$  bis  $\pm 20$  Zentimetern. Die Triangulierung kann dies noch etwas verbessern und erzielt Genauigkeiten im Sub-Pixelbereich. Im Bild sind das oft Werte von  $< \pm 1 \mu\text{m}$  oder  $< \pm 0.1$  Pixel.

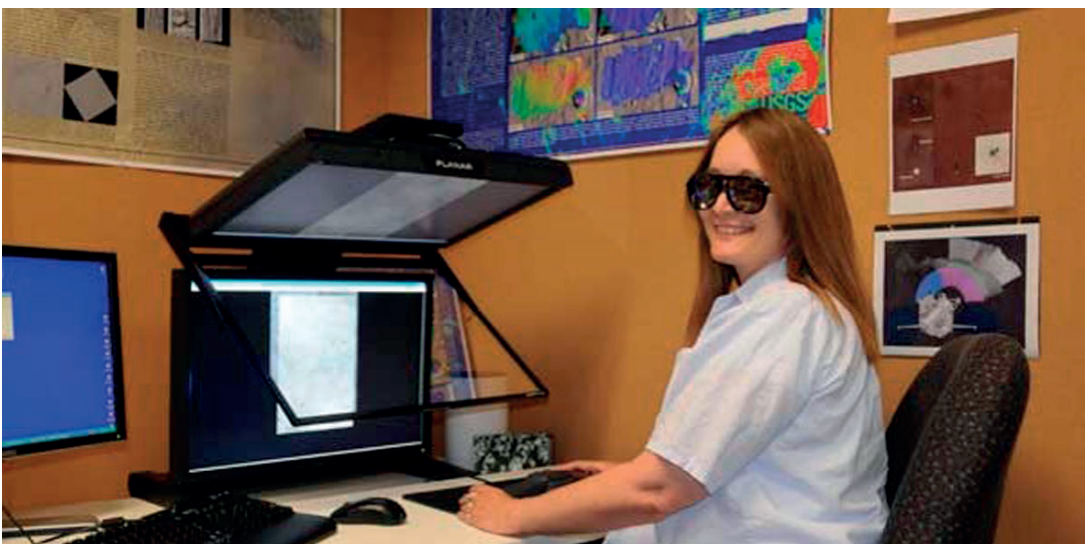


Abb. 9: Ein digitaler Arbeitsfluss in der Bildauswertung verwendete abgetastete Filmbilder. Das Zweibild-Paradigma der traditionellen Photogrammetrie blieb erhalten. Die Informationsgewinnung war weiterhin manuell, wenn auch die Arbeit zur Gänze digital ablief (© USGS).

## 2.4 Informationsgewinnung

Die stereoskopisch geführten sogenannten Analytischen Auswertegeräte sind seit etwa dem Jahr 2000 gänzlich obsolet und werden seit dieser Zeit auch nicht mehr geliefert. An ihre Stelle traten zunächst manuell gesteuerte PCs mit einem Stereobildschirm (Abb. 9). Zwei Bilder wurden betrachtet und 3D-Koordinaten konnten von Hand vermessen und interaktiv mit einer Bedeutung versehen werden. Die automatische Informationsgewinnung blieb lange noch eine unerfüllte Hoffnung.

Heute hat der voll-digitale Arbeitsfluss in Verbindung mit sehr erhöhten Bildüberlagerungen dazu geführt, dass neue Auswerteverfahren dichte Punktwolken im Bereich von 200 Millionen Punkten pro Bild erzeugen können (Abb. 10) und damit nicht nur 3D-Punktwolken, sondern auch verarbeitete und interpretierte Höhenmodelle erstellt werden. Vegetation wird automatisch klassifiziert, Straßenzüge können verfolgt werden, der Traum der automatischen Befüllung eines GIS mit 3D-Daten scheint erfüllbar.

## 2.5 Mensch-Maschine-Interaktion

Noch vor 10 Jahren wurde alle GIS-Information interaktiv und von Hand am Stereomonitor aus 2 überlappenden Bildern gemessen. Nur das Orthophoto war Gegenstand einer vollautomatischen Erzeugung, vor allem, wenn eine 3D Punktwolke mittels LIDAR-Verfahren gewonnen und mit Bildinformation zusammengeführt werden konnte.

Der photogrammetrische Stereo-Monitor wird heute von einer interaktiven Benutzerschnittstelle abgelöst. Jeder Objektpunkt wird nicht länger auf 2, sondern auf vielen Bildern abgebildet. Dies verunmöglicht es dem zwei-äugigen menschlichen Betrachter, diese Bildmenge auch visuell zu verarbeiten. Bei hohen Bildüberlagerungen kommt es unweigerlich zu vormals unvorstellbar

großen Bildmengen. Wenn einst ein Bildblock von 150 Bildern ausreichte, um eine Stadt wie Graz zu vermessen, so sind heute durchaus 3000 solche Bilder gebräuchlich. Diese müssen interaktiv betrachtet und verarbeitet werden. Neuartige Softwareverfahren kommen dazu zur Anwendung, welche im Abschnitt 6.1 angesprochen werden.

Manuelle Dateneingaben betreffen oft nur die semantisch beschreibende Information und die Qualitätskontrolle. Automatische Verfahren schlagen geometrische Formen und Bedeutungen vor, der Mensch prüft und verbessert. Nicht in allen Fällen ist dazu ein Raumeindruck notwendig. Das einst belächelte Mono-Plotting auf einem Einzelbild mit Hintergrund-DGM wird ein durchaus nützliches Messverfahren. Der photogrammetrische Auswerter hat nicht länger das Monopol auf Bildmessung und Interpretation.

## 2.6 Von der Landkarte zum 3D-Weltmodell

Das Orthophoto war der erste Vorbote einer neuen Zeit mit einer Diversifizierung der Datenprodukte aus Bildmessverfahren. In Ansätzen gab es dieses Orthophoto schon in den Zwischenkriegsjahren, danach mittels industriell produzierender optisch-mechanischer Geräte. Der wirkliche Durchbruch des Orthophotos gelang erst mit dem Übergang auf digitale Bildverarbeitung, wobei die Filmbilder durch Abtastgeräte in Pixel-Matrizen umgewandelt, geometrisch korrigiert und schließlich wieder auf Film projiziert werden konnten.

Die klassischen Produkte der Photogrammetrie waren Punkteverzeichnisse nach einer Aero-triangulierung, die Strichkarte, das Orthophoto und das digitale Geländemodell DGM. Mit der Entwicklung des GIS entstanden digitale Versionen von Strichkarten mit Kanten und Knoten der Strichinformationen, die diversen Schichten eines GIS und dichte DGMs.



Abb. 10: Aus vertikalen und schräg aufgenommenen Luftbildern, wie hier im Falle von Salzburg mit einem Ultra-Cam-Osprey-Schrägbild (li), werden sehr dichte Punktwolken erzeugt, die pro Quadratmeter bis zu 1000 Punkte beinhalten können, eben zu jedem Bildpunkt ein Koordinatentripel im Gelände (re).

### 3. Panta Rhei – Diversifizierung der (Luft-) Bildkameras

#### 3.1 Vom Standard zur Diversifizierung

In der versunkenen Welt der Glas- und Filmbilder wurden die Kameras strikt standardisiert. Es war klar, was eine Normal-, Weit- oder Überweitwinkelgeometrie darstellt. Wer auch immer eine Luftbildkamera erzeugte, produzierte diese Standardformate. Die zu kaufenden Filmrollen erzwangen dasselbe Format von  $23 \times 23 \text{ cm}^2$ , die Überlappungen waren genau 60 % in Flugrichtung und 20 % quer dazu. Damit ergaben sich einfache Standards für die Ermittlung von Näherungswerten für die Triangulierung. Mit Standardwerten für das Basis-Höhenverhältnis konnten einfache Regeln die zu erwartenden Genauigkeiten definieren. In Nordamerika führte dies zu den sogenannten C-Faktoren für die Flughöhen, um ein gewisses Höhenlinienintervall zu rechtfertigen. Es war vollkommen klar, dass die Zahl der Bilder für ein Projekt für die zu erreichenden Genauigkeiten zu minimieren war. Nur ja nicht zu tief fliegen, nur ja nicht die Überlappung höher werden lassen als absolut notwendig war. Jedes Filmbild kostete Geld für den Film, dann im Fotolabor und schließlich bei der Verarbeitung mit Stereo-Paaren. Je mehr Bilder, desto mehr Arbeit musste für die Aero-triangulierung budgetiert werden. Die Zahl der Stereopaare wuchs mit der Zahl der Bilder und desto mehr Handarbeit musste erledigt werden. Farbe? Falschfarben-Infrarot? Nur wenn die Farbinformation unerlässlich war.

Diese Zwänge sind heute völlig obsolet. Digitale Bildverarbeitungsverfahren können diverse Bildformate problemlos akzeptieren. Die digital erfassten Bilder haben keine variablen Kosten, daher kann ein Projekt mit sehr vielen Bildern befliegen werden, ohne dadurch Zusatzkosten zu verursachen. Farbe und Infrarot erzeugen

im digitalen Arbeitsfluss keine extra Kosten. Die Triangulierung ist vollautomatisch, die Erfassung der Höheninformation, und daher die Stereobearbeitung, ist voll automatisiert und daher ist eine Minimierung der Bilderzahl kein Thema mehr.

Das menschliche Auge ist nicht mehr das wichtige Paradigma für den digitalen Arbeitsfluss. Daher können Bilder mit mehr als den nur 3 Farbkanälen zur Anwendung kommen und statt dem Zweibildpaar entsteht das digitale „Multi-Auge“ zur Nutzung von 10 und mehr Bildern für eine einzelne Messung. Schließlich stellt sich die Frage, ob parallele optische Achsen für überlappende Bilder noch notwendig sind. Die Antwort ist nein. Damit eröffnet sich die Möglichkeit für die Anwendung von Schrägbildern, wo die Bildüberlappungen dem menschlichen 3D-Sehsinn Schwierigkeiten bereiten. Aber der digitale Arbeitsfluss kann solche Bilder verarbeiten.

Der Sehsinn hat seine Bedeutung als Vorbild besonders dramatisch eingebüßt, wenn man Bilder mittels CCD-Zeilen in langen Bildstreifen erzeugt, wie dies in der Leica ADS-100 Luftbildkamera der Fall ist (siehe [www.leica-geo-systems.at/de/Leica-ADS100-Airborne-Digital-Sensor\\_103271.htm](http://www.leica-geo-systems.at/de/Leica-ADS100-Airborne-Digital-Sensor_103271.htm)). Die Farbe wird durch Filter auf mehreren CCD-Zeilen erfasst und es entsteht ein Streifen für jeden Farbkanal. 3D wird durch Verwendung von Mehrfachzeilen gemessen, die unabhängig Bilder nach vorne, nach hinten und vertikal nach unten erzeugen. Damit entstehen 3 einander überlappende Bildstreifen. Mit zwei Augen sind jeweils nur 2 der erfassten Streifen betrachtbar. Die Verarbeitung erfordert den digitalen Arbeitsfluss.

#### 3.2 Farben

Es werden heute nur mehr Farbbilder erzeugt und zwar fast immer mit 4 Farbkanälen in Blau, Grün, Rot und Infrarot (Abb. 11). Dem wird oft ein höher aufgelöster panchromatischer 5. Kanal



Abb. 11: Beispiel eines (a) Rot-Grün-Blau Farbbildes mit 3 cm Pixeln einer UltraCamXpin in Leibnitz; (b) eines Falschfarbenbildes aus 10 cm Pixeln in Infrarot-Rot-Grün aus Gleisdorf und (c) eines Schneebildes mit schwieriger Radiometrie in Schladming mit 15 cm Pixeln. Die Radiometrie umfasst etwa 7.000 Grauwerte, die den oft nur etwa 100 Grauwerten in typischen Luftfilmbildern gegenüberstehen.



beigefügt, um die geometrische Detailtreue zu erhöhen. Das „Bild“ besteht dann aus 5 gesondert erfassten Bändern oder Kanälen, die als Einheit verwendet werden. Während im digitalen Arbeitsfluss diese 5 Bildkanäle durchaus automatisch verarbeitet werden können, setzt eine Visualisierung der Bilder für den menschlichen Betrachter voraus, dass dem Auge einfache rot-grün-blaue Bilder dargeboten werden. Durch verschiedene Verfahren werden aus diesen 5 Kanälen je 1 Farbbild und 1 Falschfarbenbild erzeugt. Das Farbbild entsteht durch Einfärbung des panchromatischen Bildes unter Verwendung einer Transformation des Farbraumes in einen Raum der Intensität-Farbe-Sättigung. Man ersetzt die Intensität aus dem RGB-Bild durch das panchromatische Bild und transformiert in den RGB-Farbraum zurück. Analog ist das Verfahren für das Falschfarbenbild.

Man verwendet Kameras, die diese 5 Kanäle gesondert aufzeichnen und andere Kameras, die das RGB-Bild in einem einzigen Kanal erfassen.

Eine panchromatische Kamera hat im Bildfeld eine CCD-Anordnung mit Mikrofiltern, welche jedem Pixel ein Farbband zuweisen. Damit stellt der Messwert jedes panchromatischen Pixels je einen grünen, blauen oder roten Wert dar, je nachdem, welches Filter dem Pixel vorgeschaltet ist. Man spricht von einem Bayer-Muster. Die drei Farbauszüge in Rot, Grün und Blau entstehen durch eine Interpolation dieser Farben ausgehend von den einzelnen Pixeln des Schwarz-Weiß-Bildes und dem Wissen, wie die Farbfilter arrangiert sind.

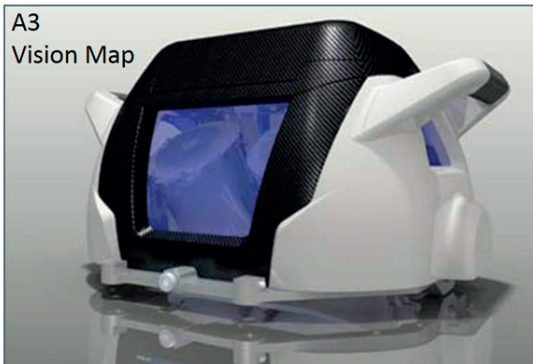
Bei der Bildaufzeichnung mittels mehrfacher CCD Bildzeilen entstehen gesonderte Farbkanäle. Diese gilt es zusammenzufügen. Da alle Farbkanäle gleich hoch geometrisch aufgelöst sind, gibt es keine Aufgabe der „Einfärbung“. Aber da die einzelnen Farbkanäle gesondert aufgezeichnet sind, gilt es, diese geometrisch präzise zu überlagern. Dazu werden Bildüberlagerungsverfahren genutzt.



ADS 100 | Leica



DMC 250  
Intergraph



A3  
Vision Map

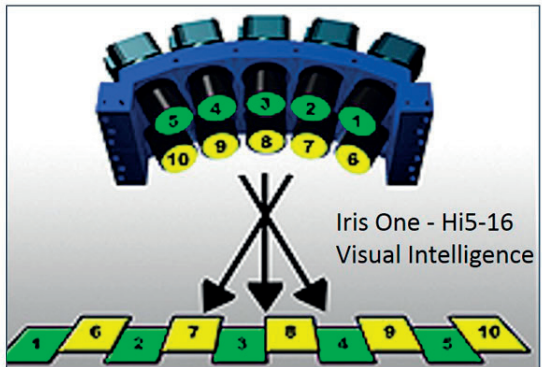


Abb. 12: Vier Luftbildkameras mit unterschiedlichen Technologien. Die Hexagon-Leica ADS100 ist eine Zeilenkamera (oben li), die DMC II 250 von Hexagon-Intergraph (oben re) verwendet einen monolithischen großen Flächensensor, Vision Map A3 (unten li) schwenkt ein Objektiv in einer Panorama-Bewegung, Visual Intelligence (unten re) koppelt mehrere unabhängige Kameras in einem Panorama-Arrangement.

### 3.3 Von der klassischen Luftbild-Filmkamera zum Großformat-UltraCam-Bild

Als im Jahr 2000 beim Amsterdamer XX. Internationalen Kongress für Photogrammetrie und Fernerkundung erstmals digitale Luftbildkameras gezeigt wurden, war klar, dass die Zukunft bunt sein würde. Die beiden damals führenden Unternehmen der Luftbildindustrie Zeiss und Leica zeigten zwei Ansätze, die verschiedener nicht sein konnten und die bisherigen Standards pulverisierten. Abb. 12 zeigt diese Ansätze in aktuellen 2014-Versionen. Im Fall Z/I Imaging (nunmehr Hexagon-Intergraph) wurde die Digitalversion eines Luftbildes zunächst dadurch erzeugt, dass 4 kleinere Teilbilder erfasst und mittels Software zu einem Großformat-Bild zusammengefügt wurden.

Im Fall Leica wurden kontinuierliche Streifenbilder, und zwar eines pro Farbkanal und Blickrichtung akquiriert. Vier Farbenkanäle vertikal nach unten und drei Blickrichtungen (nach vorne, nach hinten und nach unten) mit panchromatischen Bildern ergaben insgesamt 7 gesonderte Streifenbilder. Durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeuges als Kameraplattform konnten Bildstreifen entstehen, die zunächst alle Plattformbewegungen als geometrische Störungen beinhalten. Eine photogrammetrische Bearbeitung und Auswertung solcher Bilder benötigte einen neuartigen Arbeitsfluss.

Ab 2010 zeigt Z/I Imaging, innerhalb von Intergraph heute die Nachfolgeabteilung der Photogrammetrieabteilung von Zeiss, ein Kamerakonzzept mit einem sehr großen panchromatischen CCD Sensor (Abb. 13) und 4 kleineren

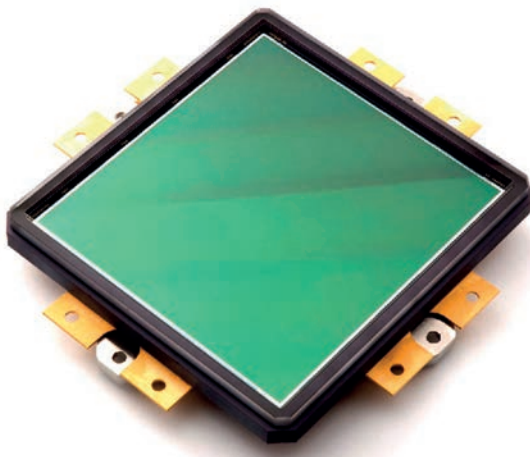


Abb. 13: Der heute größte Flächensensor von DALSA mit etwa 17.000 mal 14.000 Bildpunkten

Sensoren für Farbe und Infrarot. Wenig später stellt Leica einen Flächensensor mit etwa 60 MegaPixel vor. Dieses Kameraprodukt wird auch als Mehrkopflösung beworben und das führt nun wieder zur Lösung mit 4 Teilbildern, die später durch Software zu einem vollständigen Bild zusammengesetzt werden. Durch die Akquisition von Intergraph durch Hexagon im Herbst 2010 werden die Kameraprodukte von Leica und Intergraph nun vom gleichen Eigentümer kontrolliert.

Ab 2000 wurde die Frage gestellt, was denn die gleichwertige geometrische Auflösung eines Digitalbildes sein müsste, um dem Filmbild ebenbürtig zu sein. Man muss annehmen, dass im Filmbild die (binäre, also schwarze) Körnung die Auflösung begrenzt. Es ist nachweisbar, dass die Information im Filmbild zur Gänze erfasst ist, wenn mit einer Pixelgröße von etwa 25 µm auf 8 Bit pro Farbauszug abgetastet wird [Perko, Gruber, 2002]. Es zeigt sich auch, dass geometrische und radiometrische Auflösungen miteinander verknüpft sind. Damit ist die Digitalversion des traditionellen 23 cm x 23 cm Filmbildes in einem Pixelgitter von 9.000 x 9.000 8-Bit-Pixeln wiederzugeben. Von Anfang an waren die Digitalkameras bei der geometrischen Auflösung überlegen, auch weil sie von vornherein mit mehr als 8 Bit auflösten.

Die im Jahr 2000 gezeigten Luftbildkameras ermutigten Konkurrenten, ebenfalls Digitalkameras zu entwickeln. Im Mai 2003 wurde daher die Grazer Luftbildkamera UltraCam der Firma Vexcel Imaging GmbH der Weltöffentlichkeit bei einer Tagung in Alaska vorgestellt und fand unmittelbar großen Anklang [Leberl et al., 2003]. Sehr rasch wurde mit der neuen Technologie ein Weltmarktanteil von 50% bei großformatigen Digital-Luftbildkameras erobert (Abb. 14). Begründet wurde dieser Erfolg durch Vorteile gegenüber der Konkurrenz. Dies betraf die hohe geometrische Genauigkeit, die radiometrische Farbtiefe, die günstigen Herstellungskosten und daher den Produktpreis sowie das geringere Gewicht und die höhere Wiederholrate bei der Bildauslösung, welche erhöhte Bild-Überlappungen ermöglichte.

Die UltraCam-Lösung beruht auf einer einfachen, jedoch überzeugenden Idee, wie man aus kleinen Bildkacheln ein großes Flächen-Bild zusammenfügen kann. Die CCD-Technologie liefert Bildformate von damals etwa 4.000 x 2.700 Bildpunkten. Wie erhält man damit ein Luftbild von 11.500 x 7.500 Bildpunkten? Man nutzt 4 Objektive, die alle dasselbe Gesichtsfeld haben, welches diese 11.500 x 7.500 Bildpunkte enthal-

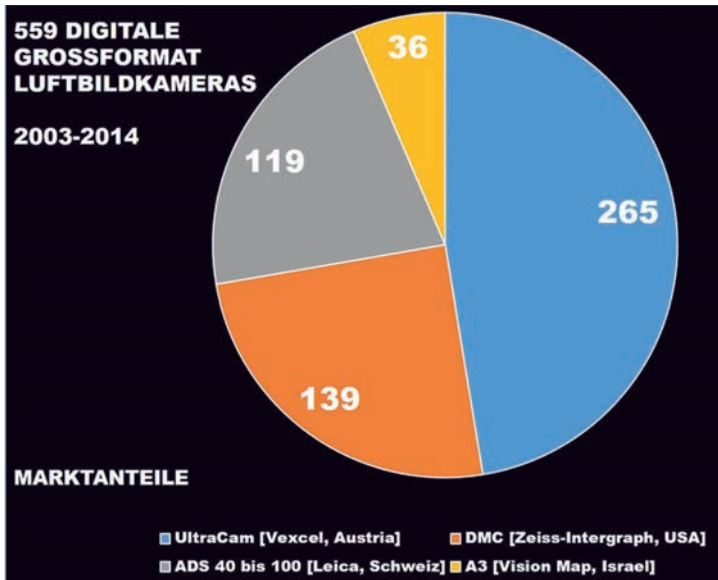


Abb. 14: Aufteilung des Welt-Marktes für großformatige digitale Luftbildkameras

ten könnten, wenn es nur CCD-Flächensensoren dieses Formates gäbe. In die Bildebene jedes Objektivs werden 1 bis 4 CCD-Sensoren montiert, insgesamt 9 solcher Sensoren, jeder mit den 4.000 x 2.700 Pixeln. Jeder Sensor liefert bei der Auslösung der Kamera eine Bildkachel. Diese überlappen einander und können damit sehr genau zu einem Großbild zusammengefügt werden. Abb. 15 illustriert die heute aktuellen Versionen der UltraCam Familie.

Es zeigt sich, dass Bilder aus einem derartigen Ansatz eine innere Bildgenauigkeit von 1/10 Pixel liefern [Gruber, Ladstädter, 2011]. Die Radiometrie ist das Ergebnis der Elektronik, des Objektivs und der CCD-Qualität. Mehr als 7.000 bzw.



Abb. 15: Die aktuellen 4 UltraCam-Modelle der Grazer Firma Vexcel Imaging, eine 100% Tochter von Microsoft

$2^{13}$  verschiedene Grauwerte können mit dieser Technologie erfasst werden. Man spricht daher von einer Radiometrieauflösung mit nahezu 13 Bit. Das stellte eine enorme Verbesserung gegenüber dem Film mit nur 8 Bit pro Farbkanal dar. Oft lieferte Film gar nur 6 bis 7 Bit oder 64 bis 128 verschiedene Grauwerte [Perko, 2004].

Die Technologie der CCD-Flächensensoren entwickelte sich seit 2003 weiter, die CCDs wurden größer und die Pixel kleiner. Dies ermöglichte die Verdichtung der Geometrieauflösung, sodass das neueste UltraCam-Modell mit dem Namen Eagle heute Bilder mit 20.010 x 13.080 liefert [Wiechert, Gruber, 2013].

Eine Lösungsvariante, die UltraCam-G, verwendete eine abgeänderte Objektiv- und Sensoranordnung, um für eine wirtschaftlich optimale Orthophotoerzeugung Bilder mit 28.000 x 3.880 Pixeln zu belichten [Walcher, Leberl, Gruber, 2012].

Wir finden heute im Wesentlichen drei verschiedene großformatige Luftbildkameras, wobei man mit *großformatig* heute Luftbildkameras mit etwa 20.000 Pixeln quer zur Flugrichtung bezeichnet. Hier ist die Flächenkamera von Zeiss, heute Intergraph-Hexagon, als Modell DMC-II 250 im Angebot; die Streifenkamera von Leica wird heute als Modell ADS100 geliefert, und von Microsoft-Vexcel wird die UltraCam-Eagle erzeugt. Es gibt noch weitere Angebote aus den USA (Visual Intelligence) und Israel (Vision Map A3), aber deren Rolle am Markt ist kaum erkennbar.

Die Welt der sogenannten Mittelformatkameras mit bis zu 10.000 Bildpunkten quer zur Flugrichtung ist vielfältiger und eine Anzahl von Herstellern bietet eine Reihe von Produkten an. Das im Vergleich zu den Großformatkameras kleinere Bildformat hat Nachteile im Hinblick auf die Produktivität bei der Erfassung von großen Projektgebieten. Geringere Anschaffungskosten und eine Unterstützung durch moderne Flugführungssysteme und automatisierte Auswertprozesse machen diese Kameras trotzdem attraktiv für die Befliegung von kleinen Bereichen oder



Abb. 16: Schräg abbildende UltraCam Osprey und Beispiel eines Schrägbildes vom Kunsthaus in Graz. Die Bodenauflösung im Schrägbild variiert zwischen 7cm und 15 cm.

auch für spezielle Aufgaben. Oft werden diese Kameras mit LiDAR Scannern kombiniert.

### 3.4 Schräg abbildende Kameras und das Modell UltraCam Osprey

In der Internet-Kartographie betrachtet man zunächst das Straßenmuster. Nähert man sich einer Szene auf der Erdoberfläche, so entsteht der Wunsch, den Detailreichtum für den Betrachter durch Luftbilder zu erhöhen. Statt nur die Hausdächer zu sehen, will der Betrachter die Hausfassaden sehen. Das hat den Appetit auf Schrägaufnahmen aus der Luft angeregt. Es ist auch durchaus möglich aus derartigen Schrägaufnahmen einfache Messungen über die dargebotenen Gebäude abzuleiten. Daraus entstand ein Angebot an speziellen Kameras für Schrägaufnahmen. Pionier dieser Entwicklung war die Firma Pictometry, heute Eagleview (siehe [www.eagleview.com](http://www.eagleview.com)). Petrie [2009] verfasste eine Übersicht diverser Lösungen. Heute gibt es eine Reihe von Anbietern solcher Kameras. Am interessantesten sind Lösungen, die sowohl die traditionellen Vertikalbilder liefern, als auch im selben Bildmessflug Schrägaufnahmen erfassen können.

Aus Österreich stammt die Lösung UltraCam Osprey [Gruber & Walcher, 2013, 2014; Abb. 16]. Die Vertikalbilder werden einem Arbeitsfluss zur Erstellung traditioneller Datenprodukte zugeführt und entsprechen den Anforderungen einer photogrammetrischen Messkammer. Neben dem panchromatischen Präzisionsbild wird für die Vertikalaufnahme auch Farbe und nahes Infrarot registriert. Die gleichzeitig erfassten Schrägaufnahmen verbessern die Details der Fassaden und liefern eine Erhöhung der Redundanz bei

etwaigen Berechnungen. Die Salzburger Punktwolke aus Abb. 10 entstammt aus einer Kombination von vertikalen und schräg aufgenommenen UltraCam-Luftbildern.

## 4. Seit 1999 die Punktwolke

### 4.1 Definition

Die Idee, dass man eine terrestrische Szene mittels eines LiDAR-Sensors abtastet und damit eine Wolke von dicht angeordneten 3D-Punkten erzeugt, wurde ab etwa 1999 unter Photogrammetern diskutiert [Baltasvias, 1999]. Es entstand ein neues Datenprodukt direkt beim Auslesen der Sensordaten, eine sogenannte Punktwolke. Das Objekt ist die Erdoberfläche, wie man sie aus der Luft betrachtet. Oder es ist eine terrestrische Straßenszene, wie man sie aus einem fahrenden Auto wahrnimmt. Das Objekt mit seinen Häusern, Bäumen, Verkehrsflächen usw. wird durch Punkte mit 3 Koordinaten dargestellt. Sind die Punkte dicht genug angeordnet, so liefern sie ein treues Modell des Objektes im 3D-Raum. Landet ein Vermessungsflugzeug oder stoppt ein fahrendes Vermessungsauto, so werden die Daten aus dem LiDAR-Sensor ausgelesen und der Betrachter hat sofort und unmittelbar ein schwarz-weißes Rohbild der 3D-Formen des Objektes durch die Punktwolke (Abb. 17).

Dieses Datenprodukt faszinierte in den späten 90er-Jahren die Fachwelt. Bis dahin wurde die 3D-Objektform aus Filmbildern errechnet. Dazu mussten die Filmbilder im Labor entwickelt, dann trianguliert werden. Darauf folgte eine Abtastung zur Erzeugung von digitalen Versionen der Filmbilder. Damit konnte mittels automatischer Bildüberlagerung eine (oft gestörte und unvollständige) Punktwolke des Objektes errechnet werden.



Abb. 17: LiDAR Punktwolke aus einem fahrenden Auto in Graz. Die Punktdichte beträgt in diesem Fall auf den Hausfassaden etwa 60 Punkte pro  $m^2$  (Streetmapper im Auftrag von Microsoft).

Wochen konnten vergehen, bis die Punkte gemessen waren, die das Objekt darstellten. Die neue Technologie der LiDAR-Messung beflügelte den Appetit auf eine schnelle Befriedigung. LiDAR trat einen Siegeszug an.

## 4.2 LiDAR

In der Vermessungswelt von heute sind LiDAR-Sensoren allgegenwärtig. Große internationale Tagungen befassen sich mit der Technologie und ihren Anwendungen (siehe [www.lidarmap.org](http://www.lidarmap.org)), wobei sie sich dagegen verwehren, von photogrammetrischen Fachgesellschaften vereinnahmt zu werden. Sie erzeugen Abstandsmessungen mit Hilfe eines Laserstrahls, der auf einen rotierenden Spiegel projiziert wird und eine Objektzeile abtastet. Durch Bewegung der Sensor-Plattform werden die Objektzeilen zu einer dichten flächenhaften Punktanordnung zusammengefügt. In den Rohdaten stecken die Unregelmäßigkeiten der Plattformbewegungen, also etwa des Flugzeuges oder des Autos. Es besteht die nicht-triviale Aufgabe, Punktwolken aus verschiedenen Autofahrten oder Fluglinien in einem übergeordneten Koordinatensystem zusammenzufügen.

Dass diese Innovation der Photogrammetrie zuzuordnen ist, ist in der Wiener Schule der Photogrammetrie unbestritten [Kraus, 2004]. Dort spricht man von „Laserscanner Bildern“ und rechtfertigt damit die Zugehörigkeit des Themas zur Photogrammetrie. Um *Bildmessung* im engeren Sinne handelt es sich bei den 3-dimensionalen Punktwolken aus LiDAR-Sensoren allerdings nicht.

## 4.3 Bildgeneriert

Die Alternative, aus Bildern mit einem Stereoverfahren ebenfalls Punktwolken zu erzeugen, wurde erst durch den voll-digitalen Arbeitsfluss wettbewerbsfähig. Ein Beispiel wurde in Abb. 10 gezeigt. Der Weg vom hoch-überlappenden Verband von Digitalbildern über die automatische Triangulierung und eine automatische Stereomessung führt sehr schnell zur Punktwolke, allerdings sofort im übergeordneten Koordinatensystem und mit simultaner Auflösung etwaiger Diskrepanzen in den Überlappungsbereichen der Fluglinien oder Autofahrten.

Während die Dichte der LiDAR-Messungen von der Geschwindigkeit der Sensorplattform und der Abtastrate der Laser-Echos bestimmt wird, ist jene aus Bildern durch die Pixelzahl und Pixelgröße im Objektraum gegeben. Die neuen Verfahren der Computer Vision mit der Bezeichnung „Structure from Motion“ [siehe Hartley und Zissermann, 2003] liefern einen 3D-Punkt zu jedem Pixel. Jedem Bild sind damit 100 Millionen und mehr Punkte zuzuordnen. Hat das Luftbild eine Pixelgröße von 3 cm, so werden pro Quadratmeter 1.100 3D-Farbpunkte erzeugt.

## 5. Sensoren der Fernerkundung

### 5.1 Die Genese der Fernerkundung

In den frühen 60-er-Jahren entstanden in den USA der Begriff und das Fachgebiet des Remote Sensing. Die Ursprünge liegen in militärischen Beobachtungsgeräten und Methoden, die auch für zivile Problemstellungen anwendbar schienen. Die Bezeichnung entstammt einer ersten Tagung im Jahr 1962, bei welcher die bis dahin geheimen Entwicklungen veröffentlicht wurden. Veranstalter waren die WillowRun Laboratories der Universität von Michigan, welche später in Environmental Research Institute of Michigan ERIM umbenannt und aus dem Universitätsverband ausgegliedert wurde. Gegen Ende der 60er-Jahre schwappte diese Entwicklung nach Europa über und wurde im Deutschen mit dem Begriff Fernerkundung benannt. Die diversen Geowissenschaften, die Geographie und natürlich die Photogrammetrie sahen darin eine Erweiterung ihres jeweils eigenen Fachgebietes. Aus „Photogrammetrie“ wurde „Photogrammetrie und Fernerkundung“. Ziel der Fernerkundung war vor allem die Interpretation der beobachteten Objekte. Aus welchen Materialien besteht es? Wie alt ist es? Wie feucht ist es? Wie rau ist seine Oberfläche? Was ist es? Wie gesund ist die Vegetation? Und natürlich

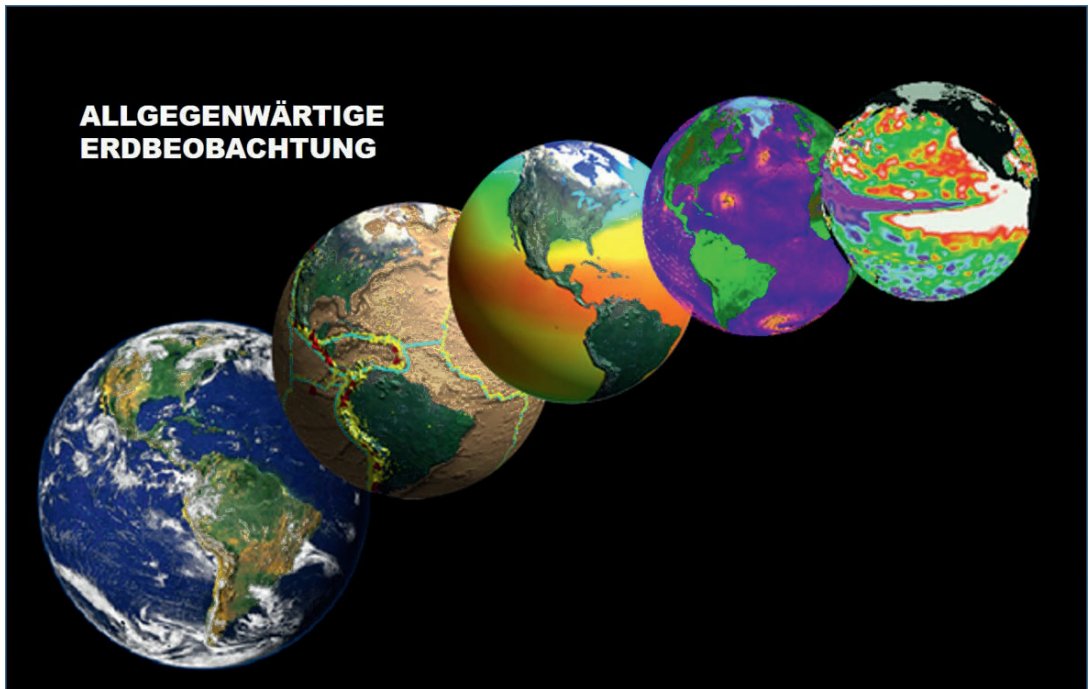


Abb. 18: Die gesamte Erde wird aus hunderten Satelliten mit einer Vielfalt an Sensoren beobachtet (Bereitgestellt von Charles Toth, Ohio State University)

besteht auch die zentrale photogrammetrische Frage nach der Lage und Größe der Objekte.

## 5.2 Elektromagnetisches Spektrum

Getrieben wurde die Fernerkundung von der Erfindung neuartiger Sensoren, die von Flugzeugen und Satelliten aus die Erdoberfläche beobachten. Auch Sensoren im Wasser zur Beobachtung der Meeresböden fallen in die Fernerkundung. Diese neuen Sensoren erweitern die Nutzung des elektromagnetischen Spektrums erstens mit dem Wunsch, alle Spektralbereiche von der kosmischen Strahlung bis zu den Radiowellen zur Beobachtung der Erde zur Anwendung zu bringen. Zweitens besteht der Wunsch, das Spektrum in kleine Spektralbereiche aufzuspalten und möglichst viele solcher Bereiche gesondert und in Kombination miteinander zu nutzen. Abb. 18 fasst diese Vielfalt an Daten über die Erde zusammen.

## 5.3 Radarsensoren

Der Weg von den ersten Radar-Systemen des 2. Weltkrieges zu den heutigen Satellitensystemen war lang. Radar ist ja ein Akronym für *Radar Detection and Ranging* und hat zunächst mit Bildgebung nichts zu tun. Es diente der Entdeckung von reflektierenden Objekten vor

einem einförmigen Hintergrund, also Schiffen auf dem Meer oder Flugzeugen am Himmel und der Messung der Distanz zum Objekt. Die Idee der Bildgebung und Messung der Rückstrahlung der Erdoberfläche nahm langsam Gestalt an. Prof. Rinner war ein Pionier dieser Idee und bearbeitete sie noch während seiner Zeit als Marineoffizier in Berlin [Rinner, 1948].

Heute verfügt die Fernerkundung, und damit die Luftbildmessung, über bildgebende Radarsensoren zur aktiven Beleuchtung der Objekte im Mikrowellenbereich und unter Verwendung der Polarisierung. Multiple Radarbilder werden interferometrisch ausgewertet. Synthetisches Apertur-Radar SAR ist heute auf vielen Satelliten zur Dauerbeobachtung der Erdoberfläche im Einsatz und erweitert den Bereich des elektromagnetischen Spektrums ganz entscheidend [Henderson, Lewis, 1998]. Die interferometrischen Messverfahren [iSAR] liefern digitale Höhenmodelle mit einem Detailreichtum und einer Genauigkeit im Bereich der Wellenlänge und Pixelgröße, also durchaus bis in die 10 cm (Abb. 19).

Die Themenstellungen entsprechen sehr oft genau jenen, welche auch in der traditionellen Photogrammetrie im Mittelpunkt stehen. Es gibt



**Abb. 19:** Synthetisches Apertur-Radar SAR kann heute geometrische Auflösungen im Bereich von 10 cm erreichen und zu interferometrisch erfassten Höhenmodellen gleicher Dichte führen. Das Beispiel zeigt ein Bild aus dem System von Sandia Laboratories mit 10 cm Pixeln und ein Luftbild derselben Szene (Quelle: Richard Carande, NevaRidge Inc., Boulder, Colorado).

daher den Begriff der Radargrammetrie, die sich eindeutig als Erweiterung der Photogrammetrie darstellt.

**5.4 Passive Radiometrie**

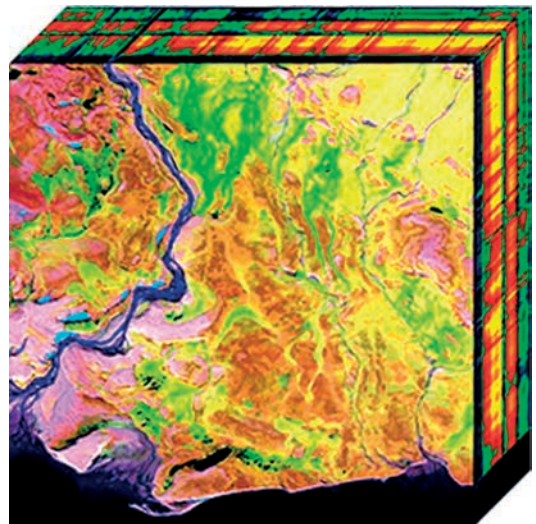
Eine in einem Flugzeug oder Satelliten mitgetragene Antenne kann die passiven Strahlungen messen, welche von allen Körpern abgegeben werden, solange sie warm sind, also eine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt haben. Damit wird etwa die Temperatur der Gewässer erfasst. Eine Antenne liefert die Messung zu einem „Punkt“ der Erdoberfläche. Ein Bild entsteht durch Bewegung der Antenne auf der Plattform und die Plattform-Bewegung. Im Zentrum des Interesses ist die Erfassung von Objekteigenschaften, die sich aus der Abstrahlung rückrechnen lassen. Man spricht von „Inversionen“. Es besteht aber immer auch die Frage nach dem „wo“ der Beobachtungen, womit die traditionelle photogrammetrische Gedankenwelt gefordert ist.

**5.5 Multispektrale Bildgebung und Wärmebilder**

Am Anfang der 1960-Fernerkundung stand die multispektrale Beobachtung, welche heute in hyperspektralen Sensoren kulminiert. Ideen dazu entstanden schon zu Zeiten der Luft-Filmbilder, weil man mehrere Kameras mit unterschiedlichen Filtern ausstattete, um die spektralen Eigenschaften von Objekten zu erfassen. Diese Mehrfachkamera-Ansätze waren unpraktisch und nicht sehr erfolgreich.

Multispektral wird die Bildgebung wenn das von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenlicht spektral aufgespalten wird und die einzelnen Farbkanäle gesondert gemessen und in je ein

Flächenbild umgewandelt werden. Hunderte solcher Bilder können entstehen, wenn das Spektrum in hunderte Teile zerlegbar ist. Jedem Objektpunkt wird ein Spektralmuster zugeordnet und somit wird es denkbar, Objektpunkte aufgrund ihrer spektralen Signatur zu klassifizieren. Der nahe Infrarotbereich wird mittels derselben Sensoren erfasst wie das sichtbare Licht. Geht man aber in längerwellige Infrarot-Bereiche, sprechen wir von Wärmestrahlen und es werden eigene Sensoren für die Strahlungsmessung notwendig. Multispektrale Bildgebung umfasst das sichtbare Licht und das nahe Infrarot. Die Wärmestrahlung wird wegen der dafür notwen-



**Abb. 20:** Hyperspektrale Sensoren erzeugen Bilder in sehr vielen Spektralkanälen, welche man oft als Kubus visualisiert (Quelle [http://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral\\_imaging](http://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral_imaging))

digen Sensorik gesondert als Wärmebildgebung bezeichnet. Ein Handbuch gibt es von Lillesand, Kiefer, Chipman [2007].

Hyperspektral sind Bilder mit hunderten Spektralbändern. Die Strahlung eines Objektpunktes wird so aufgespreizt, dass sie von einer ganzen 1D-Sensor-Zeile aufgenommen wird. Eine Zeile von Objektpunkten füllt daher einen ganzen 2D-Flächensensor. Mit der Sensorbewegung wird Objektzeile nach Objektzeile abgetastet und es entsteht ein 3D-Datenwürfel zur Darstellung der Spektralmessungen eines flächenhaften Objektes (Abb. 20).

## 5.6 Sonar

Eine eigene bildgebende Welt befasst sich mit dem Meeres- oder Gewässerboden. In Analogie zum Radar handelt es sich hier um *Sound Navigation and Ranging*. Militärisch interessiert die Entdeckung und Verortung von Schiffen und Unterseebooten. Daraus entwickelte sich in Analogie zum Radar die Bildgebung zur Erfassung der Meeresböden (Abb. 21). Ein Höhenmodell des Meeresbodens kann heute mit interferometrischen Sonar-Systemen gewonnen werden. Die Methoden der Radargrammetrie sind weitgehend auch auf Sonar-Daten anwendbar.

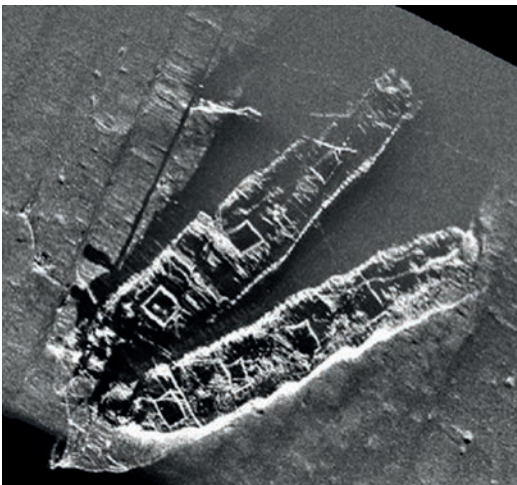


Abb. 21: *Sound Navigation and Ranging* kann auch zur Bildgebung verwendet werden. Gezeigt wird ein Paar versunkener Schiffe vor der Küste von Massachusetts (Quelle [http://www.sciencebuzz.org/topics/35W\\_bridge\\_collapse\\_minneapolis/recovery\\_technology](http://www.sciencebuzz.org/topics/35W_bridge_collapse_minneapolis/recovery_technology))

## 6. Structure-from-Motion

### 6.1 Traditionelle Zweibildphotogrammetrie

Die Photogrammetrie hat sich aus der Zweibildmessung unter Verwendung des menschlichen Sehsinns entwickelt. Das Stereobildpaar und

das menschliche Augenpaar sind das Fundament der photogrammetrischen Methode. Es sind viele Bildpaare, die einen Bildverband oder Block bilden. Ein Bildpunkt definiert einen Projektionsstrahl zum Objektpunkt. Zwei Projektionsstrahlen schneiden einander im Raum und begründen damit die Berechnung der 3D-Lage jedes abgebildeten Punktes.

Es gibt zwei fundamentale Aufgaben der Photogrammetrie. *Erstens* ist die Lage und Orientierung der Kamera zu jedem Bild mittels einer Triangulierung zu berechnen. Heute bezeichnet man dies oft als Kamera-Pose. Dies erfolgt durch Messungen aller Projektionsstrahlen ausgewählter Objekte. In einem klassischen Bildverband findet man zu jedem der Verknüpfung dienenden Objektpunkt 6 Bilder, in welchen dieser eine Verknüpfungspunkt abgebildet ist, also werden 6 Strahlen jedem Objektpunkt zur Berechnung der Kamera-Pose zugeordnet. Invers gesehen sind in jedem Bild 9 Objektpunkte auszuwählen, die entlang des Bildrandes angeordnet sind. Nehmen wir an, eine große Stadt wäre durch 170 mal  $60 \approx 10.000$  einander überlappende Bilder in einem Bildblock abgebildet. Dieser Bildverband wird durch  $9 \times 10.000 = 90.000$  Bildpunkte verknüpft. Diese 90.000 Bildpunkte definieren im Objektraum 15.000 Objektpunkte. Man berechnet in der Triangulierung daher 60.000 unbekannte Parameter der Kamerastandpunkte und -orientierungen, und dazu die 45.000 Koordinatenwerte der 3D-Verknüpfungspunkte im Objektraum.

*Zweitens* ist nach Ermittlung der Kamera-Pose der Bildinhalt auszuwerten und ein 3D-Datenmodell der Objektszene zu erstellen. Dies erfolgt pro Bildpaar und weitgehend von Hand unter Verwendung der Stereobetrachtung. Die aus jedem Bildpaar erfassten Daten passen durch die Lösung der ersten Aufgabe der Triangulierung geometrisch zusammen. Ein traditionell erfasstes Höhenmodell würde pro Stereobildpaar etwa 65k (65.000) Messungen umfassen und für den 10.000-Bilder-Block daher 1.3 Milliarden Punkte.

Die photogrammetrischen Arbeitsflüsse sind bis zuletzt nur zu einem bescheidenen Ausmaß automatisch abgelaufen. Praktisch sind durch die Einschränkung auf die Zweibild-Methode nicht einmal die digitalen Höhenmodelle ausreichend automatisch erfassbar gewesen. Die manuelle Nachbearbeitung der automatischen Rohdaten zur Füllung der Datenlöcher und Korrektur der groben Ausreißer brachte unzureichende Einsparungen, um automatisch vorzugehen.



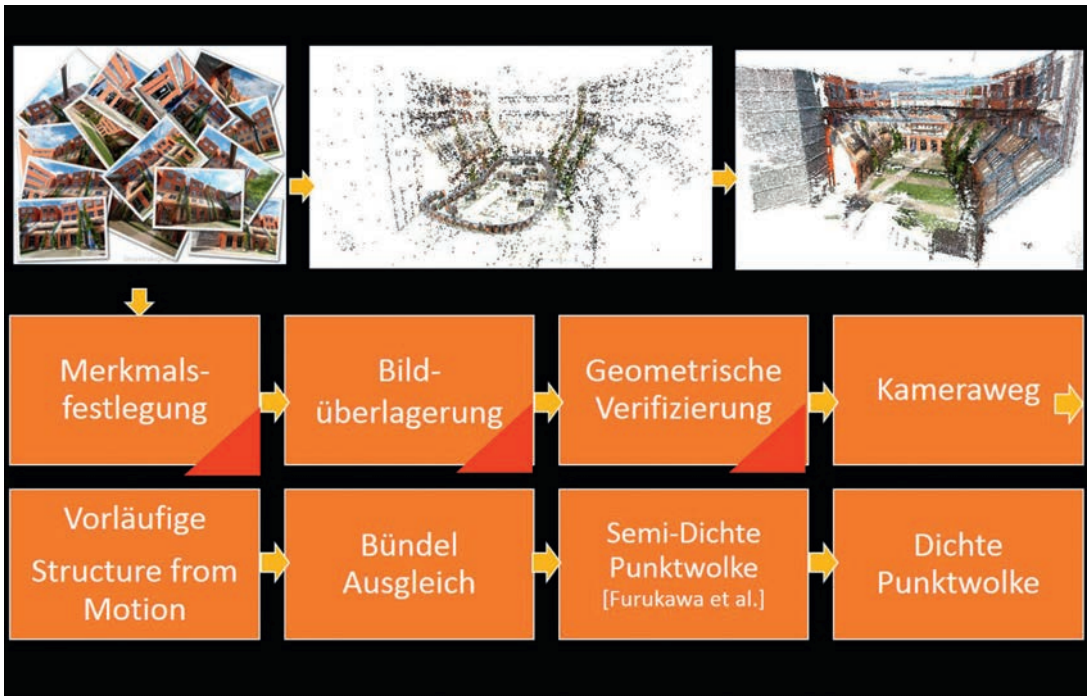


Abb. 22: Übersicht des Verfahrensablaufes der neuen SfM-Methode der Mehrbildauswertung zur Erzeugung von 3D-Punktwolken [aus Wendel et al., 2012]

**6.2 Structure-from-Motion: Vielbildphotogrammetrie**

In der Computer Vision, die sich der Informatik zuordnet, waren die photogrammetrischen Methoden zunächst nur von geringem Interesse. Von Anfang an galt es, die Bilder vollautomatisch zu verarbeiten und man meinte, in der Photogrammetrie seien manuelle Verfahren üblich. Man lief mit Video- und Einzelbildkameras durch Städte, betrachtete Objekte von allen Seiten und entwickelte Gedanken, wie diese Mengen an Bildern ohne menschlichen Eingriff verarbeitet werden können. Daraus entwickelte sich die mit SfM *Structure-from-Motion* bezeichnete Methode. Die „Bibel“ über diese Methode ist von Hartley und Zissermann [2003] verfasst worden. Auf ganz natürliche Art waren die Bildverbände so gestaltet, dass jedes Objekt 10 bis 20 Mal abgebildet wurde. Es galt, die Objektgeometrie aus einer ungeordneten Menge vieler Bilder zu beschreiben.

Abb. 22 fasst den Arbeitsfluss eines typischen Structure-from-Motion-Verfahrens (SfM) zusammen. Die erste Aufgabe stellt den Zusammenhang zwischen den Bildern her. Dazu werden herausragende Bildmerkmale in jedem Bild ermittelt und dieses Muster von Bildpunkten

aus jedem Bild wird mit allen anderen Bildern verglichen, um die Überlappungen festzustellen. Damit entsteht eine Wolke von Passpunkten, welche die Bilder verknüpfen. Das ist die Grundlage der Triangulierung mit dem Ergebnis der Kamera-Posen und einer spärlichen Punktwolke (scarce point cloud). „Spärlich“ ist für den Alt-Photogrammeter mit seinen 9 Bildpunkten pro trianguliertem Luftbild eine Provokation oder Fehlbezeichnung. SfM produziert pro Bild vielleicht 20.000 Bildpunkte, sodass in der Objektszene innerhalb des Gesichtsfeldes eines Luftbildes als Ergebnis der Triangulierung ebenfalls 20.000 3D-Objektpunkte anfallen. Und dies wird mit „spärlich“ oder „scarce“ bezeichnet.

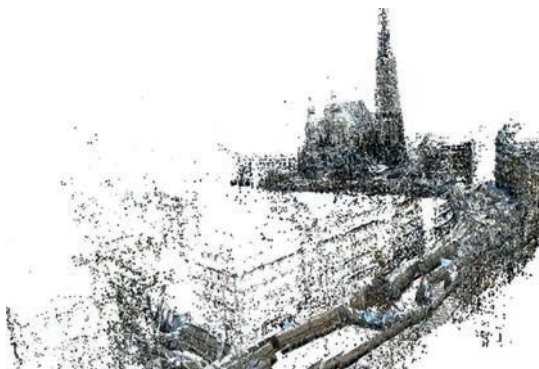
Diese Terminologie erklärt sich durch den folgenden Arbeitsschritt des SfM-Arbeitsflusses. Es wird eine dichte (dense) Punktwolke ermittelt, indem jedem Pixel im Bild eine 3D-Position zugeordnet wird. In einem Luftbild mit 20.000 x 14.000 Pixeln entsteht dabei eine Punktwolke mit 280 Millionen Punkten pro Gesichtsfeld eines einzigen Luftbildes. Das Verfahren ermittelt im Objekt-raum zu jeder 3D-Zelle die Wahrscheinlichkeit, dass sie auf der Objektoberfläche liegt. Es sind dabei alle Bilder betroffen, die diese Zelle abbilden. Daher ist das Zweibild-Paradigma irrelevant

geworden. Alle 10 oder 20 Projektionsstrahlen der hoch überlappenden Bilder werden in der Berechnung berücksichtigt. Das Ergebnis ist übrigens nicht eine 2,5D-Punktwolke der Objektoberfläche, sondern ein wirkliches 3D-Modell der Szene, solange die Bilder die 3D-Form zeigen (Abb. 23).



*Abb. 23: Das Eiserne Tor in Graz mit einem Glasaufzug neben der Mariensäule. Es ist die vertikale Struktur modelliert, um zu illustrieren, dass eine wahre 3D-Datenstruktur sinnvoll ist. Siehe auch Abb. 1 für eine wahre 3D-Modellierung (Quelle: Tom Pock, TU Graz)*

Der neue SfM-Ansatz ist robust und auf verschiedenste Bildgebungs-Szenarien anzupassen. Bilder aus allen möglichen Kameras und Sensorplattformen werden im selben Modus und Arbeitsfluss bearbeitet, seien dies Bilder aus handgetragenen Kameras, von Innenräumen, mittels MAVs oder nach traditionellen Bildflugregeln erfolgen. Die wesentliche Voraussetzung sind höhere Überlappungsraten als man sie in der Traditionsphotogrammetrie gewohnt war. Abb. 24 zeigt einen Bildverband aus einer ma-



*Abb. 24: Ein Bildverband aus dem Straßenniveau der Kärntnerstraße in Wien wird mittels SfM-Methode trianguliert, sodass eine dünne Wolke an Triangulierungspunkten entsteht. Auch die Kameraposen sind ein Triangulationsergebnis (Quelle Tom Pock, TU Graz).*

nuellen erfassten Bildfolge in der Wiener Kärntnerstraße und dem Stephansdom.

## 7. IT - Infrastruktur

### 7.1 Datenmengen

Wir haben bei den dichten Ergebnis-Punktwolken von 280 Millionen Werten pro großformatigem Luftbild gesprochen und in der Triangulierung pro Bild an die 20.000 Punkte zu bearbeiten. Ein Stadtgebiet wie jenes von Graz umfasst etwa 150 km<sup>2</sup>. Mit einer Pixelgröße von 5 cm würde das Stadtgebiet durch eine Punktwolke mit 60 Milliarden Werten beschrieben werden. Nehmen wir an, dass ein Luftbildblock mit UltraCam-Eagle erfolgen wird, wobei die Überlappungsraten nach vorne 90 % und zur Seite 80 % wären. Jedes Einzelbild hat 20.010 × 13.080 Pixel. Es wird ein Datensatz mit 10.200 Bildern erfolgen und jedes Bild liefert 1,6 Gigabytes. Daher ist ein Datengebilde mit 16 Terabytes zu bearbeiten.

Eine interaktive Überprüfung der Bilder erfordert ganz neue Ansätze des Umgangs mit riesigen Datenmengen. Abb. 25 illustriert eine Benutzeroberfläche, welche dem Betrachter gestattet mit diesen 10.000 Bildern komfortabel zu interagieren. Was noch vor wenigen Jahren eine unmögliche Aufgabe war, ist heute realisierbar. Diese neuen Visualisierungsverfahren betreffen alle visuellen Datenbestände, daher auch die unmittelbare Interaktion mit sehr großen photogrammetrischen Bildverbänden [Reitinger et al., 2012].

### 7.2 Rechenzeiten

Der Triangulierungsschritt eines SfM-Arbeitsflusses mit dem Ergebnis der Posen und „dünnen“ Punktwolke ist heute mit einem Durchsatz von mehreren großformatigen Luftbildern pro Minute

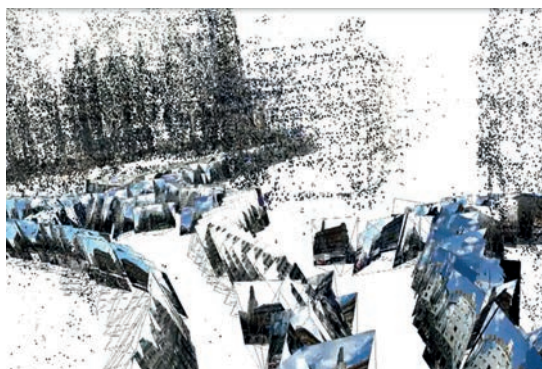




Abb. 25: Sehr große Bildverbände mit tausenden Luftbildern erfordern die Verfügbarkeit von Benutzerschnittstellen am Computer, die es ermöglichen, alle Bilder eines Verbandes übersichtsmäßig anzuzeigen und in Echtzeit in jedes beliebige Detail zu zoomen. Die Beispiele zeigen einen 3.000-Photoblock aus Graz und einen Wiener Block mit 2.700 Luftbildern.

anzusetzen. Mit 10.000 Bildern entspräche dies einigen Stunden. Nähme die Berechnung einer „dichten“ Punktwolke pro Großformatbild an einem einzelnen zeitgemäßen PC eine Stunde in Anspruch, so wären allein dafür 10.000 Rechenstunden oder 420 Rechentage anzusetzen. Wir müssen für große Projekte mit Rechenjahren kalkulieren, welche ein derartiges Projekt nicht realisierbar erscheinen lassen.

**7.3 Speicherkosten und das Wunder der GPUs**

Speichermedien liegen im Jahr 2014 pro Terabyte im Bereich von unter USD 50. Die Verfügbarkeit von mehreren Graphical Processing Units (GPU) als Erweiterung eines einzigen persönlichen Rechners kann dessen Durchsatz um einen Faktor 100 beschleunigen. Damit erreichen wir eine 5 cm Punktwolke von Graz mit nur einem

Rechner in 4 Tagen. Es obliegt einer geschickten Parallelisierung eines Projektes, um den Durchsatz mittels mehreren Rechnern auf eine erwünschte Rate zu drücken. Aus Rechenjahren wird ein Rechentag.

**8. Perspektiven**

Ein Abgänger des Vermessungsstudiums des Jahres 1967 an der TU Wien arbeitete damals mit Brunsviga Kurbelrechnern und Logarithmentafeln, um in einigen Stunden einige wenige 3D-Koordinatentripel zu berechnen. Abb. 26 erinnert an das Werkzeug einer 1967-Staatsprüfung an der TU Wien. Sicher hatte dieser Abgänger vor 50 Jahren nicht im Entferntesten davon geträumt, dass am Ende seiner Laufbahn 16 Terabytes an digitalen Bildern innerhalb von Tagen an einem persönlichen Kleinrechner zu 100-Milliarden-Koordinatentripel eines Höhenmodells mit einer

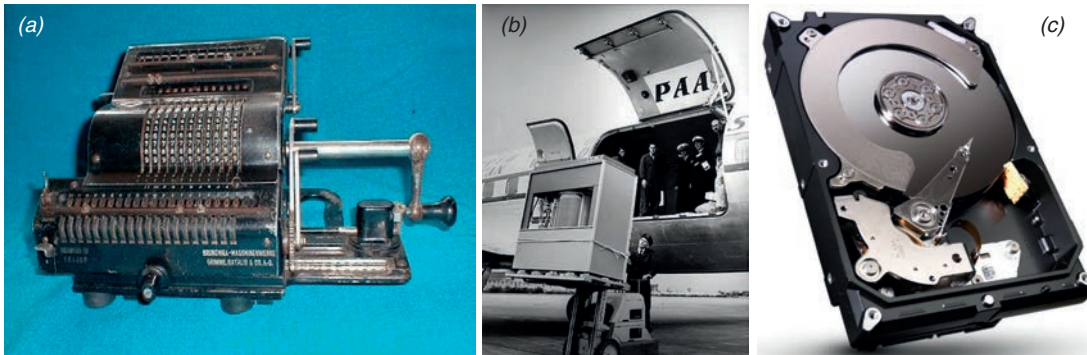


Abb. 26: Die Rechnerentwicklung seit 1960: (a) Kurbelmaschine der Firma Brunsviga, welche 1967 bei der Staatsprüfung an der Technischen Universität Wien mit Logarithmentafeln angewendet wurde. (b) Plattenstation einer IBM 350 mit 3,1 Mbyte – ~ USD 160K. (c) Aktuelle 4 TB-Platte für einen Notebook Computer – ~ USD 100. Seit 1960 verbesserten sich Speicher um einen Faktor 1 Milliarde. Rechnersysteme verbesserten sich allerdings um 1 Billion (Quelle: Wikipedia).

Maschenweite von 5 cm verarbeitet werden. Wie soll diese Entwicklung weitergehen? Womit sollte eine Studienabgängerin des Jahres 2014 am Ende ihrer Berufslaufbahn rechnen?

Schon heute kann davon gesprochen werden, dass die Sensoren, die Speicher, die Prozessoren und die Softwarealgorithmen die meisten Beschränkungen in der Photogrammetrie und Computer Vision beseitigt haben. Es gilt nicht mehr, dass Aufgaben wegen mangelnden Speichervolumens oder unzureichender Rechenkapazitäten unrealisierbar blieben. Dennoch sehen wir am Horizont viel Neues.

Zunächst wird die *Bildgebung* wohl wesentlich weiter diversifiziert werden. Wir werden Quelldaten in der Form von terrestrischen Amateurphotos, von Inhalten diverser Bilddatenbanken im Internet und aus Smart Phones haben, aus unbemannten Miniaturflugkörpern, aus einer Unzahl fahrender Autos mit ihren nach vorne, hinten und zur Seite gerichteten Kameras, aus unbemannten und Batterie-betriebenen Flugkörpern, die in den Straßenschluchten entlang fliegen. In einer Stadt wie Graz sind dann nicht mehr nur 10.000 großformatige Luftbilder, sondern Millionen kleinformatige terrestrische Bilder zu verarbeiten.

Auch werden wir neue *Algorithmen* haben, welche nicht nur Bilderverbände bearbeiten, sondern alle vorhanden Informationen über unsere Umwelt mitberücksichtigen können, also die Orthophotos, Straßendatenbanken, Grundstücksgrenzen, digitalen Höhen- und Gebäudemodelle. Verbesserungen der Positionsbestimmungen durch GNSS und Orientierungsmessungen mittels Inertialsensoren werden viele der geometrischen Aufgaben erleichtern und sicherstellen, dass alle Messungen in einem einzigen Weltkoordinatensystem ausgetauscht werden können. Weit mehr Augenmerk wird damit auf die Erneuerung von Datenbeständen gelegt werden als der heutige Fokus auf die erstmalige Erzeugung zulässt.

Geodaten und ihre Visualisierung haben schon bedeutende und tiefgreifende Erweiterungen ihrer *Anwendungen* erfahren. Das ortsbewusste Internet und das GIS sind bedeutende Treiber für diese Erweiterungen. Nun steht zu erwarten, dass die „Mixed Reality“ in Verbindung mit dem Smart Phone und dem tragbaren Rechnen (wearable Computing) die allgegenwärtige Nutzung von Geodaten mit stets wachsendem Detailreichtum antreiben werden.

Die Anwendung in der Navigation erhöht die Anforderungen an 3D-Weltmodelle durch die

Notwendigkeit, alle Daten in Echtzeit bereitzustellen und gegen aktuelle Bildinformation abzugleichen. Es eröffnet sich das weite Feld der simultanen Navigation und Geodatenerfassung.

Wie sehr diese Entwicklungen weiterschreiten können, ist vor allem eine Funktion der *Vergünstigung des Rechnerwesens*. Nach der Regel von Moore [Moore, 1965] würde eine fortgesetzte Gültigkeit dieser Regel in 30 Jahren den Verbesserungs-Faktor von 1 Million ergeben. Unvorstellbar wären die Folgen einer solchen Entwicklung.

### Danksagung

Im Vorfeld des Vortrages zur Verleihung der Friedrich-Hopfer-Medaille hat Franz Leberl Hilfe in mehreren Gesprächen erhalten, die er mit Stewart Walker, derzeit Präsident der American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, als auch mit dessen Stellvertreter Charles Toth (Ohio State University) führen konnte. Wolfgang Walcher von Microsoft und Fritz Fraundorfer mit Tom Pock vom Heimatinstitut an der TU Graz stellten diverse Bilder und Videos für den Vortrag und diesen Text zur Verfügung.

### Referenzen

- Baltsavias, M. (1999): A comparison between photogrammetry and laser scanning, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, pp 83–94.
- Gruber, M., Ladstädter R. (2011): Results from UltraCam Monolithic Stitching, Proceedings of the American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 1-5 May, 2011, Milwaukee, WI.
- Gruber M., Walcher W. (2013): Oblique Image Collection – Challenges and Solutions, Proceedings of the Photogrammetric Week 2013, September 2013, Stuttgart, DE.
- Gruber M., Walcher W. (2014): Calibrating the new UltraCam Osprey Oblique Aerial Sensor, Proceedings of the EuroCOW 2014, February 2014, Castelldefels, Spain.
- Hartley R., Zisserman A. (2003): Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 655 p.
- Henderson Floyd, Anthony J. Lewis, eds. (1998) *Principles & applications of imaging radar*. John Wiley & Sons Publishers, 896 pp.
- Kraus K. (2007): Photogrammetry – Geometry from Images and Laser Scans. 2. Auflage. Verlag Walter de Gruyter, Berlin. 451 p.
- Leberl F. (2014): 10<sup>18</sup> – Ein virtuelles 3D Modell der Welt, in Nachhaltige Entwicklungen an der Technischen Universität Graz.
- Leberl F., Bischof H., Pock T., Irschara A., and Kluckner S., (2010): Aerial Computer Vision for a 3D Virtual Habitat, IEEE Computer, vol. 43, no. 6, p. 24-31.
- Leberl F., Irschara A., Pock T., Meixner P., Gruber M., Scholz S., Wiechert A. (2010): Point Clouds: LIDAR versus 3D Vision, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 76, p. 1123-1134.
- Leberl F., Gruber M., Ponticelli M., Bernögger S., and Perko R. (2003): The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System, in Annual Convention of the American

Society for Photogrammetry and Remote Sensing [ASPRS], Anchorage, Alaska, 2003, Proceedings by ASPRS.

Lillesand T., Kiefer R., Chipman J. [eds] (2007): Remote Sensing and Image Interpretation, 6th Edition John Wiley and Sons, 768 p.

Mondello Ch., Hepner G., Boermann S. (2011): ASPRS Ten-Year Remote Sensing Industry Forecast. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 77, No. 11, pp. 1081-1095.

Moore G. (1965): Cramming More Components onto Integrated Circuits, Electronics (Volume 38, Number 8), pp. 114-117.

Perko R., Gruber M. (2002): Comparison of Quality and Information Content of Digital and Film Images. ISPRS Commission III Symposium in Graz, Austria. Archives of the ISPRS, Vol. XXXIV, Part 3B, available from GITC bv, Lemmer, The Netherlands, pp. B206-B209.

Perko R. (2004): Computer Vision for Large Format Digital Aerial Cameras. Dissertation an der Technischen Universität Graz (online.tugraz.at).

Petrie G. (2009): Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 75, No. 2, p. 102-107.

Reitinger B., Sormann M., Zebedin L., Schachinger B., Hoefler M., Tomasi R., Lamparter M., Gruber B., Schiester G., Kobald M., Unger M., Klaus A., Bernögger S., Karner K., Wiechert A., Ponticelli M., Gruber M. (2012): UltraMap V3 – A revolution in aerialphotogrammetry, Intl. Archives Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXIX B4, Melbourne 2012, Australia.

Rinner K. (1948): Die Geometrie des Funkmessbildes. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse.

Walcher W., Leberl F., Gruber M. (2012): The Microsoft Global Ortho Program. ISPRS Annals for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. I-4, pp 53-58.

Wendel A., Hoppe C., Bischof H., Leberl F. (2012): Automatic Fusion of Partial Reconstructions. ISPRS Annals for Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. I-3, pp 81-86.

Wendel A., Irschara A., Bischof H. (2011): 3D Vision Application for MAVs: Localization and Reconstruction. Proc. Intl. Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT).

Wiechert A., Gruber M. (2013): News from the UltraCam Camera LineUp, Proceedings of the American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 24-28 March, 2013, Baltimore, MD.

#### **Anschrift der Autoren**

em. o. Univ.-Prof. Franz Leberl, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 16, 8010 Graz.

E-Mail: leberl@icg.tugraz.at

Dr. Michael Gruber, Microsoft Corp. – UltraCam Business Unit, Anzengrubergergasse 8, 8010 Graz.

E-Mail: michgrub@microsoft.com