

## Semantisches Potenzial digitaler flugzeuggetragener Fernerkundungs-Sensoren

JOCHEN SCHIEWE & MANFRED EHLERS, Osnabrück

**Keywords:** digital airborne sensors, multisensor, application potential, information content, scene interpretation

**Zusammenfassung:** Dieser Überblicksbeitrag diskutiert das Potenzial moderner digitaler, flugzeuggestützter Fernerkundungssensoren für thematische Auswertungen. Nach einer Zusammenstellung der technischen Parameter der wichtigsten bildgebenden sowie multisensoralen Systeme werden die Anwendungsmöglichkeiten im Bereich topographischer Kartierungen skizziert, wozu eine Reihe von nutzerrelevanten Faktoren (z. B. geometrische und semantische Genauigkeit, Informationsgehalt, operationelle Eigenschaften) betrachtet wird. Zur Illustration werden Datensätze für ein und dasselbe Testgebiet von drei unterschiedlichen Systemen (DMC, ADS 40 und FALCON) verwendet. Abschließend werden Forderungen hinsichtlich künftiger Aufnahme- und Auswerteszenarios abgeleitet.

**Summary:** *Semantic potential of digital airborne remote sensing systems.* This survey discusses the potential of modern digital airborne remote sensing systems for thematic applications. Firstly a compilation of technical parameters of the most important imaging and multisensor systems is given. Based on this the possible applications in the area of topographical mapping are sketched, wherefore a couple of user relevant factors like geometrical and semantical accuracy, information content or operational characteristics are considered. For illustration purposes data sets of three systems (DMC, ADS 40 and FALCON) are used which are available for one and the same test area. Finally demands for future data acquisition and processing scenarios are derived.

### 1 Einführung

Mit großem Interesse und einer Reihe offener Fragen verfolgen derzeit die Nutzer hoch auflösender Fernerkundungsdaten den langsamen, aber bestimmten Übergang von konventionellen fotografischen Kameras hin zu digitalen Aufnahmesystemen. Mit der Verfügbarkeit von multispektralen Bilddaten mit einer hohen geometrischen Genauigkeit und einer verbesserten radiometrischen Auflösung gehen nun auch die Erwartungen einher, einen direkten und effizienten digitalen Datenfluss zu erhalten sowie die Palette möglicher Anwendungen zu erweitern.

Zusätzlich zu den spektralen Informationen erfassen die großformatigen, digitalen Kamerasysteme (wie DMC, ADS 40,

HRSC-AX oder Ultracam-D) auch stereoskopische Daten, aus denen durch automatische Matching-Algorithmen Digitale Oberflächen-Modelle abgeleitet werden können. Eine Alternative zur Akquirierung von Höhendaten stellen flugzeuggestützte Laserscanner dar, die in den letzten zehn Jahren aufgrund der gestiegenen Leistungsfähigkeit der GPS- und Inertialmesssysteme zur direkten Orientierung operationelle Reife erhalten haben. Mit der optionalen simultanen Erfassung von Laserscanning- sowie multispektralen Bilddaten (wie beim System FALCON oder den Systemkombinationen ALTM/DSS oder ALS 50/ADS 40) werden zum einen homogene Aufnahmebedingungen erzielt, zum anderen wird der Umfang ableitbarer Merkmale potenziell erhöht.

Für zukünftige Anwendungen stellt sich nun die grundsätzliche Frage nach der Auswahl geeigneter Sensoren und entsprechender Auswerteverfahren. Das erste Ziel dieses Überblicksbeitrages besteht daher in der Zusammenstellung der technischen Parameter der wichtigsten digitalen Systeme im Vergleich zu photographischen Kameras (Abschnitt 2). Hierauf aufbauend sollen die Anwendungsmöglichkeiten im Bereich topographischer Kartierungen diskutiert werden, wozu eine Reihe von nutzerrelevanten

Faktoren (z. B. geometrische und semantische Genauigkeit, Informationsgehalt, operationelle Eigenschaften) betrachtet wird (Abschnitt 3). Zur Illustration werden Datensätze von drei unterschiedlichen Systemen (DMC, ADS 40 und FALCON) verwendet, die für ein und dasselbe Testgebiet vorliegen. Aus dieser Betrachtung heraus ergeben sich einige Forderungen hinsichtlich künftiger Aufnahme- und Auswerteszenarios, die in Abschnitt 4 dargelegt werden.

**Tab. 1:** Ausgewählte digitale flugzeuggestützte Aufnahmesysteme (aktualisierte Fassung basierend auf SCHIEWE & EHLERS, 2004; Quellen: Webseiten der Firmen, geschätzte Kosten basierend auf www.emergedss.com).

Sensor	HRSC-AX	DSS		ADS 40	UltraCam-D	DMC
Firma	DLR	Applanix (Emerge)		Leica Geosystems	Vexcel Corp.	Z/I Imaging
URL	www.dlr.de/ HRSC-A	www.emergedss.com		www.gis.leica- geosystems.com/	www.vexcel. com	www.ziimaging. com
Sensortyp	Zeilen-CCD	Flächen-CCD		Zeilen-CCD	Flächen-CCD	Flächen-CCD
Einführung	2000	–		2000	2003	2002
Brennweite	151 mm	55 mm (Farbe & CIR) 35 mm (nur Farbe)		62.7 mm	100 mm (28 mm multi- spektral)	120 mm (25 mm multi- spektral)
Gesichtsfeld	29°	37° × 55.4°		64°	55° × 37°	74° × 44°
Anzahl CCD- Zeilen/-Kameras	9	1		7	9	8
CCDs quer Flugrichtung	12 172	4077		2 × 12 000 (pan) 12 000 (multi- spektral)	11 500 (pan) 4008 (multi- spektral)	13 824 (pan) 3 000 (multi- spektral)
CCDs in Flugrichtung	–	4092		–	7 500 (pan) 2 672 (ms)	7 680 (pan) 2 000 (ms)
Sensorgroße	6.5 µm	9 µm		6.5 µm	9 µm	12 µm
Radiometrische Auflösung	12 bit	12 bit		12 bit	> 12 bit	12 bit
Spektrale Auflösung (nm)	520–760 (pan) 450–510 (blau) 530–576 (grün) 642–682 (rot) 770–814 (NIR)	<b>RGB Modus</b> 400–500 (blau) 500–600 (grün) 600–680 (rot)	<b>CIR Modus</b> 510–600 (grün) 600–720 (nor/NIR) 720–920 (NIR)	465–680 (pan) 428–492 (blau) 533–587 (grün) 608–662 (rot) 703–757 (NIR) oder 833–887 (NIR opt.)	390–690 (pan) 390–470 (blau) 420–580 (grün) 620–690 (rot) 690–900 (NIR)	400–580 (pan) 400–580 (blau) 500–650 (grün) 590–675 (rot) 675–850 (NIR)
Auslesefrequenz	1640 Zeilen/s	0.25 Bilder/s		800 Zeilen/s	0.75 Bilder/s	0.5 Bilder/s
Stabilisierung	Zeiss T-AS Plattform	Eigene Plattformen		LH Plattformen	Zeiss T-AS Plattform	Zeiss T-AS Plattform
Datenaufzeichnung	Hochgeschw.- Rekorder	80 GB austauschbare Harddisk		MM40 Massen- speicher	RAID Disk System	RAID Disk System (840 GB)
Georeferenzierung	Applanix POS/DG	Applanix POS IMU		Applanix POS IMU	POS Z/I 510	optional (nicht näher spezifi- ziert)
Geschätzte Kosten (inkl. Positionierung)	–	425.000 \$		1.200.000 \$	700.000 \$	1.600.000 \$

## 2 Technische Parameter

### 2.1 Ausgewählte digitale Systeme

Tab. 1 gibt einen Überblick über ausgewählte, digitale, flugzeuggestützte und bildgebende Systeme. Die meisten hiervon gehören in die Kategorie der großformatigen Geräte, lediglich das Digital Sensor System (DSS) weist ein mittleres Format auf. Aufgrund der gestiegenen Leistungsfähigkeit von

GPS- und Inertialmess-Systemen zur direkten Orientierung haben Laserscanning-Systeme in den letzten zehn Jahren operationelle Reife erhalten. Eine detaillierte Produktübersicht gibt LEMMENS (2004). Mit der optionalen simultanen Erfassung von Laserscanning- sowie mittelformatigen, multispektralen Bild-Daten entstehen *Multisensorsysteme*, von denen Tab. 2 ausgewählte Konfigurationen darstellt, die insbesondere in Europa Anwendung finden.

**Tab. 2:** Ausgewählte Laserscanning-Systeme, die eine optionale Bilddatenerfassung ermöglichen (aktualisierte Fassung basierend auf SCHIEWE & EHLERS 2004; Quellen: Webseiten der Firmen).

System	FALCON	ALTM 3033, 3070		ALS 50
<b>Firma</b>	TopoSys	Optech		Leica Geosystems
<b>URL</b>	www.toposys.de	http://www.optech.on.ca/		http://www.gis.leica-geosystems.com/
<b>Aufnahmeprinzip</b>	Glasfaserzeile	rotierender Spiegel		rotierender Spiegel
<b>Mehrfachreflexionen</b>	bis zu 2 Echos	bis zu 4 Echos		bis zu 4 Echos
<b>Bilddatenerfassung (spektrale Auflösung in nm)</b>	Linienscanner (Pixelgröße 0.5 m)	DSS		ADS 40
	450–490 (blau) 500–580 (grün) 580–660 (rot) 770–890 (NIR)	<b>RGB Modus</b> 400–500 (blau) 500–600 (grün) 600–680 (rot)	<b>CIR Modus</b> 510–600 (grün) 600–720 (nor/NIR) 720–920 (NIR)	465–680 (pan) 428–492 (blau) 533–587 (grün) 608–662 (rot) 703–757 (NIR) oder 833–887 (NIR opt.)
<b>Erfassung Intensität</b>	ja	ja		ja
<b>Pulsrate</b>	83 kHz	bis zu 70 kHz		bis zu 83 kHz
<b>Scanfrequenz</b>	653 Hz	70 Hz		$412.33 \times FOV^{-0.6548}$ (max. 51°)
<b>Maximale Reichweite</b>	1600 m	3000 m		4000 m
<b>Scanwinkel (FOV)</b>	± 7°	± 0 ... 25°		± 10 ... 37.5°
<b>Streifenbreite (h = 1000 m)</b>	245 m	930 m		1530 m
<b>Messauflösung</b>	0.02 m	0.01 m		0.01 m
<b>Vertikale Genauigkeit</b>	± 0.15 m	± 0.15 m (h = 1200 m)		± 0.15 m ... ± 0.50 m
<b>Horizontale Genauigkeit</b>	–	± 0.50 m (h = 1000 m) ( < ± 1/2000 × h )		± 0.15 m ... ± 0.75 m

## 2.2 Datensätze für diesen Beitrag

Zur Illustration der folgenden Betrachtungen werden Datensätze von drei unterschiedlichen Systemen (DMC, ADS 40 und FALCON) verwendet, die im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) für ein und dasselbe Testgebiet – die Stadt Coswig (Siedlung Ratskiefen) in Sachsen-Anhalt – akquiriert worden sind. Tab. 3 fasst die wesentlichen Parameter der entsprechenden Bild- und Höhendaten-Aufnahmen zusammen.

## 2.3 Vergleich zu photographischen Systemen

Der bedeutendste technische Unterschied zwischen den digitalen Aufnahmesystemen und den filmbasierten Kameras betrifft die *spektrale Auflösung* bzw. die *spektrale Bandbreite*: Digitale Systeme besitzen die Fähigkeit zur Aufzeichnung multispektraler Daten, d. h. zur Messung absoluter Strahlungswerte in getrennten, schmalen Bändern im sichtbaren und nahen Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums. Anzahl und Breite der Bänder orientieren sich eng an denen der hoch auflösenden Satelliten-

systeme (z. B. Ikonos) und stellen gegenüber den klassischen dreikanaligen Farb- oder Falschfarbaufnahmen eine wertvolle Steigerung des Informationsumfanges dar. Aus technischer Sicht wird die spektrale Trennung durch verschiedene Kameras oder durch Mosaikfilter erzeugt, die über den aufzeichnenden CCD-Elementen platziert sind. Interferenzfilter (z. B. bei der ADS 40) erzeugen streng voneinander getrennte Bänder, während Absorptionsfilter (z. B. bei der DMC) zu überlappenden spektralen Bereichen führen. Eine interessante Alternative für die Zukunft stellen die dreilagigen Complementary Metal-Oxide Semiconductors (CMOS) dar, die das konventionelle Farbschichtenprinzip simulieren (BLANC 2001).

Bezüglich der Radiometrie ist nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Kennwerte – Sensitivität und Gradation bei Filmen bzw. *radiometrische Auflösung* bei digitalen Systemen – ein strenger quantitativer Vergleich nicht möglich. Die Anzahl notwendiger Graustufen in digitalen Bildern hängt vom Bereich der tatsächlichen Empfangssignale und dem Rauschverhalten ab, was beides von Szene zu Szene variiert (BALTSAVIAS 1999). Grundsätzlich bewirkt

Tab. 3: Spezifikation der verwendeten Testdatensätze.

System	ADS 40	DMC	FALCON
Hersteller	Leica Geosystems	Z/I Imaging	TopoSys
Aufnahmedatum	August 2003	August 2003	April / Mai 2003
Flughöhe	2.500 m	1.200 m	850 m
Streifenbreite	3.000 m	1.380 m	210 m
Bodenpixelgröße Bild	0.25 m	0.10 m	0.50 m
Lagegenauigkeit Bild	± 0.25 m	± 0.09 m	± 0.50 m
Bodenpixelgröße DOM	1.0 m	1 m	0.50 m
Lage-/Höhen-genauigkeit DOM	± 0.25 m/ ± 0.30 m	± 0.09 m/ ± 0.07 m	± 0.50 m/ ± 0.15 m
Bemerkungen		Genauigkeiten basieren auf 16 Passpunkten nach AT	Höhendaten = last echo

die elektro-optische Abtastung aufgrund der größeren Detektoranzahl und der längeren „Belichtungszeit“ mit linien- oder flächenhaften CCD-Sensoren ein deutlich geringeres Rauschen als mit optisch-mechanischen Abtastern. Mit konkreten radiometrischen Leistungsdaten erhält HOFMANN (1983) typische Werte des maximalen Signal-Rausch-Verhältnisses bzw. des Dynamikbereiches von 500 bis 2000, was zu Quantisierungs-Intervallen, die mindestens das Doppelte des Rauschanteils betragen sollten, von bis zu 10 bit führt. Dieser Wert, der mit aktuellen Aufnahmesystemen noch übertroffen werden kann, ist den geschätzten, maximalen 8 bit für filmbasierte Aufnahmen, der sich durch einen erhöhten Rauschanteil aufgrund der Filmgranularität ergibt, überlegen (LEBERL & GRUBER 2003).

Auch bezüglich der Angaben zur *geometrischen Auflösung*, d. h. zwischen dem optischen Auflösungsvermögen und der Detektorgröße, besteht kein strenger Zusammenhang. Legt man das idealisierte Abtasttheorem zugrunde, ergibt sich in der Praxis (vgl. KRAUS 2004) z. B. für eine Filmauflösung von 50 Linienpaaren/mm eine Bodenpixelgröße von 9 cm (unter der Annahme eines typischen Bildmaßstabes von 1:12.500). Für denselben Maßstab erhält man mit digitalen

Systemen vergleichbare Bodenpixelgrößen, z. B. bei Verwendung der DMC von 15 cm (Brennweite  $c = 120$  mm, Flughöhe  $h_G = 1500$  m) oder der ADS 40 von 8 cm ( $c = 62.5$  mm,  $h_G = 780$  m). Aufgrund des breiteren Öffnungswinkels bzw. der geringeren Flughöhe werden zwar die atmosphärischen Einflüsse geringer, dafür aber die Schatten- und Verdeckungseffekte (zumindest quer zur Flugrichtung) größer. Die Verwendung schmalwinkliger Systeme (z. B. DSS oder FALCON) bei vergleichbaren Flughöhen führt zu größeren Bodenpixelgrößen um 0.5 m. Bei einigen Systemen (siehe Tab. 1) ist zu beachten, dass die Brennweite und damit die tatsächliche Auflösung der multispektralen Kanäle um bis zu Faktor 5 geringer ist als die des panchromatischen Bandes. Hier erfolgt dann eine künstliche Verbesserung der Farbkanäle über eine Fusion der beiden Quellen („pan sharpening“), was Auswirkungen auf nachfolgende Klassifizierungen haben kann, die allerdings noch nicht im Detail untersucht worden sind.

Im Gegensatz zu Filmkameras weisen die digitalen Systeme in der Regel noch eine geringere *Streifenbreite* auf. Mit Konfigurationen für die DMC ( $c = 120$  mm,  $h_G = 1.500$  m) bzw. ADS 40 ( $c = 62.5$  mm,  $h_G = 1.440$  m), die jeweils eine Bodenpixelgröße von 0.15 m ergeben, erhält man eine seitliche



**Abb. 1:** Vergleich der Aufnahmegeometrien (mit überlagerten ALK-Daten, Ausschnitt ca.  $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ ): links (DMC): Zentralperspektive (starke radiale Verschiebungen), rechts (ADS 40): kombinierte Parallel- und Zentralperspektive des Linienscanners (leichte Verschiebungen quer zur Flugrichtung).

Abdeckung von 2.070 m bzw. 1.800 m. Mittelformatige Systeme wie FALCON (245 m bei einer Flughöhe  $h_G = 1000$  m) sind in einer noch tieferen Kategorie anzusiedeln.

Die Erfassung *stereoskopischer Daten* kann bei digitalen Systemen nach zwei Prinzipien erfolgen: Eine Möglichkeit besteht im Einsatz *flächenhafter* CCD-Elemente (z. B. bei der DMC; SPILLER 2000), was dem Prinzip der konventionellen Filmkameras ähnelt und stereoskopische Daten durch überlappende Szenen erzeugt. Die andere Variante besteht in der Verwendung von mehreren, in Flugrichtung unterschiedlich geneigten *Linien-CCDs* (z. B. bei der ADS 40; FRICKER et al. 2000). Abb. 1 veranschaulicht die resultierenden Verzerrungen der Aufnahmegeometrien: Die zentralperspektivische Aufnahme erweitert zwar die Interpretierbarkeit durch zusätzliche Seitenansichten, erschwert aber die (automatisierte) Delineation des Grundrisses durch Schatten- und Verdeckungseffekte, die aufgrund des relativ breiten Öffnungswinkels verstärkt werden. Detaillierte Untersuchungen zu den Auswirkungen dieser Aufnahmeprinzipien auf die Interpretierbarkeit sowie die Ableitung von Höhendaten stehen noch aus.

### 3 Anwendungspotenzial

#### 3.1 Parameter der Nutzerakzeptanz

Aus Sicht der Nutzer ist eine Reihe von Kriterien für die Eignung von Fernerkundungsdaten für eine spezifische Anwendung verantwortlich. Diese Parameter lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen – zum einen die technischen Faktoren (d. h. geometrische und semantische Genauigkeiten sowie Informationsgehalt), zum anderen die operationellen Aspekte (d. h. Gebietsabdeckung, Aktualität, Nachhaltigkeit und Kosten). In den folgenden Abschnitten werden für Daten digitaler flugzeuggestützter Sensoren sowohl die Erwartungen bezüglich dieser Parameter, als auch basierend auf dem in Abschnitt 2.2 beschriebenen Datensatz einige praktische Erfahrungen zusammengefasst.

#### 3.2 Geometrische Genauigkeiten

Da die Anforderungen für topographische und thematische Kartierungen bezüglich horizontaler und vertikaler Genauigkeiten stark anwendungsabhängig sind, werden oft exemplarisch die Werte für amtliche Karten herangezogen. So wird für die *horizontale Genauigkeit* eine Standardabweichung von 0.2 mm bis 0.3 mm multipliziert mit der Maßstabszahl gefordert (was z. B. eine Toleranz von 0.2 m bis 0.3 m für einen Maßstab 1:1.000 ergibt). Wenn man andererseits eine Punktmessgenauigkeit von 0.5 bis 1.0 Pixel aus photogrammetrischen Messungen ansetzt, können damit für typische Bodenpixelgrößen in der Größenordnung von 10 cm bis 30 cm (siehe Abschnitt 2.3) die Anforderungen der Maßstäbe 1:1.000 bis 1:500 erfüllt werden.

Empirische Untersuchungen von DÖRSTEL (2003) für das DMC-System ergaben eine Gesamtgenauigkeit, die diese Erwartungen bestätigt: Für signalisierte Punkte wurde nach einer Aerotriangulation eine Genauigkeit von  $4\ \mu\text{m}$  bis  $5\ \mu\text{m}$  (entsprechend 0.5 Pixel im Bild- bzw. 2.5 cm im Objektraum) erzielt. FRICKER & HUGHES (2003) berichten von Abweichungen von jeweils 0.5 Pixel in x- und y-Richtung in unabhängigen Kontrollpunkten nach einer Triangulation mit ADS 40-Daten (Bodenpixelgröße 20 cm).

Für die *vertikalen Genauigkeiten* sind die Nutzer-Anforderungen noch heterogener als bei den Lageabweichungen. Als ein Orientierungswert kann z. B. die Genauigkeit von 0.5 m für das DGM5-Höhenmodell der meisten Bundesländer dienen. Auf der anderen Seite erwartet man für standardmäßige Konfigurationen mit großformatigen Filmkameras Höhengenaugigkeiten von 0.1 ‰ multipliziert mit der Flughöhe ( $h_G$ ), z. B. also eine Abweichung von 15 cm für  $h_G = 1.500$  m. Bei der Verwendung digitaler Systeme liegen andere geometrische Bedingungen vor (insbesondere schlechtere Basis-zu-Höhen-Verhältnisse). Dennoch haben empirische Tests von DÖRSTEL (2003) bzw. FRICKER & HUGHES (2003) für DMC- bzw. ADS 40-Daten vertikale Genauigkeiten für signa-

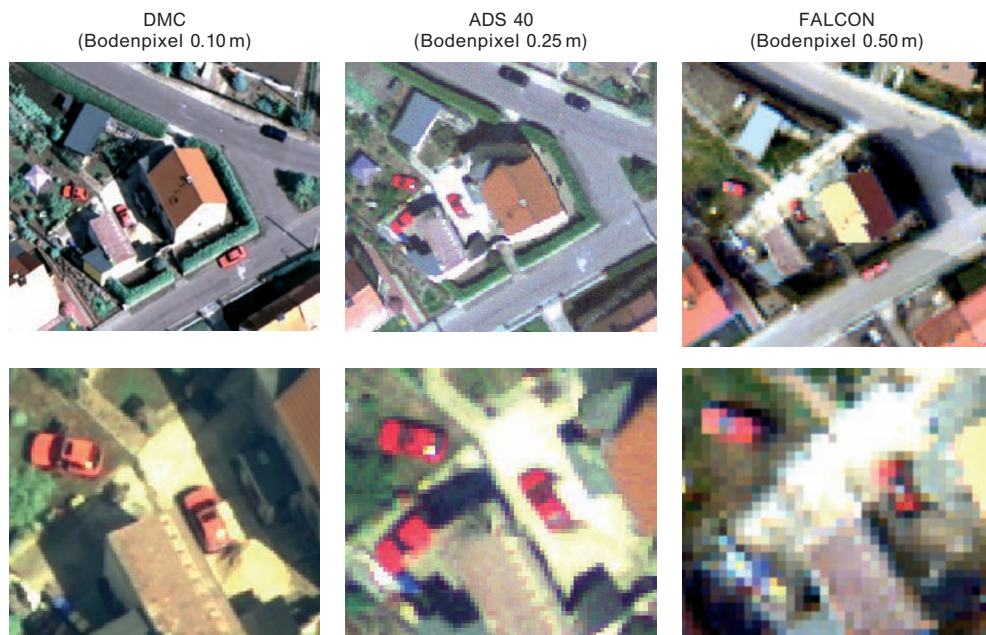
lisierte Punkte ergeben, die einem Wert von  $0.08\% \cdot h_G$  bzw. von  $0.07\% \cdot h_G$  entsprechen. Diese Werte sind auf die gute Bildqualität sowie die hohe geometrische Stabilität in den digitalen Daten zurückzuführen. Probleme bei automatisch korrelierten Höhenpunkten können jedoch hinsichtlich der Zuverlässigkeit (bzw. dem Auftreten von Ausreißern) insbesondere in homogenen Regionen wie Gewässern oder heterogenen Siedlungsflächen auftreten.

Im Gegensatz zu den stereoskopisch abgeleiteten Höhen können Laserscanner erfahrungsgemäß vertikale Genauigkeiten in der Größenordnung von 10 cm bis 20 cm für alle topographischen Objekte (d. h. nicht nur für signalisierte Punkte) bei einer größeren Zuverlässigkeit erzeugen (siehe z. B. MAAS 2003).

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die geometrischen Genauigkeiten digitaler Systeme – genau wie die ihrer analogen Pendanten – definitiv für die Fortführung und teilweise auch Ersterfassung von Kataster- und anderen GIS-Datenbanken geeignet sind.

### 3.3 Informationsgehalt

Das semantische Potenzial oder der Informationsgehalt beschreibt die Fähigkeit zur anwendungsabhängigen Erkennung und Extraktion von Objekten und Phänomenen auf Grundlage einer gegebenen Datenquelle. Es ist bekannt, dass neben anderem der Informationsgehalt wesentlich von der *geometrischen Auflösung* der Daten abhängig ist. Entsprechende Faustformeln für die *Erkennung* topographischer Objekte fordern eine Bodenpixelgröße von mindestens ca. einem Drittel der Objektausdehnung, während für die eigentliche *Interpretation* der Faktor 1/8 angenommen wird. Berücksichtigt man typische Konfigurationen digitaler Systeme (siehe oben), kann man die Erkennung bzw. Interpretation von Objekten mit Seitenlängen von mehr als ca. 0.5 m bzw. 1.5 m erwarten, was vergleichbar mit den Ergebnissen basierend auf Daten filmbasierter Kameras ist. Abb. 2 verdeutlicht die Detailerkennbarkeit als Funktion der unterschiedlichen Bodenpixelgrößen. Hierbei muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass



**Abb. 2:** Vergleich der Detailerkennbarkeit in den Bilddaten in Abhängigkeit von der Bodenpixelgröße (Ausschnittsgrößen: oben ca. 50 m × 50 m, unten ca. 20 m × 20 m).



**Abb. 3:** links: ADS 40-Bilddaten (Ausschnitt ca. 50 m × 50 m), mitte: abgeleiteter NDVI, rechts: Grobklassifizierung basierend auf NDVI-Schwellwerten.

die in der Abbildung dargestellten Bodenelementgrößen natürlich nicht sensorspezifisch sind, sondern jeweils variabel gestaltet werden können.

Weiterhin führen die verbesserten *radiometrischen Eigenschaften* der digitalen Systeme nicht nur zu einer sehr guten Messgenauigkeit (siehe Abschnitt 3.2), sondern auch zu einer besseren Trennbarkeit benachbarter Objekte innerhalb dunkler oder überbelichteter Problemregionen des Bildes.

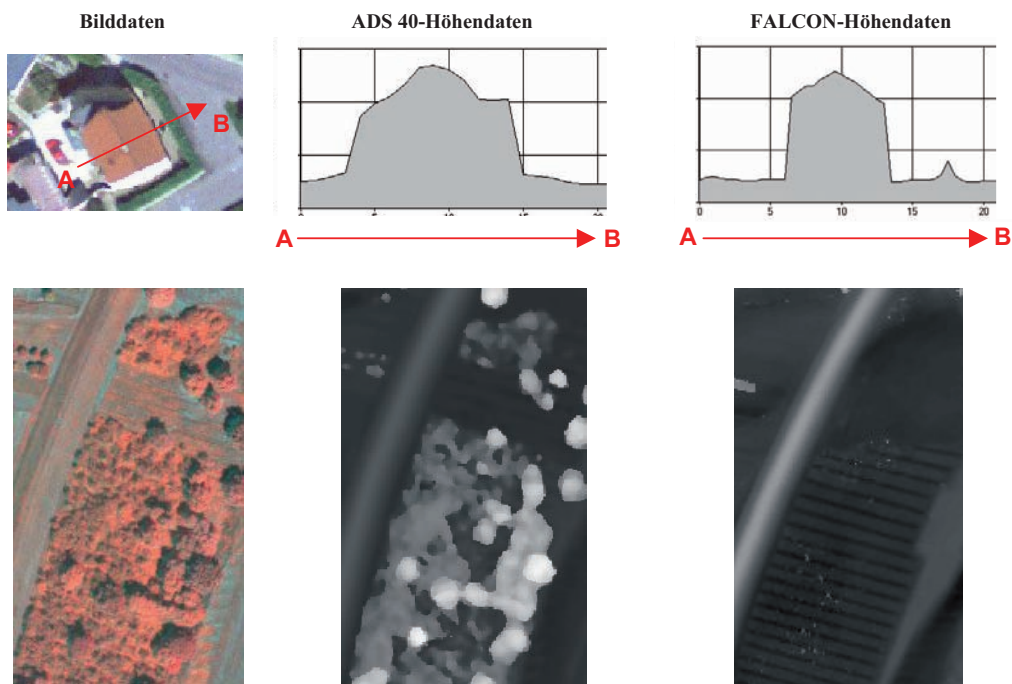
Der größte Fortschritt bezüglich des Informationsgehaltes gegenüber konventionellen Kameras kann durch die Verfügbarkeit *multispektraler Bilddaten* erwartet werden, womit der Umfang der Merkmale, die in den Klassifizierungsprozess einfließen, signifikant gesteigert werden kann. Hierzu gehören neben den reinen spektralen Informationen z. B. auch Indizes wie der Normalisierte Differenzen-Vegetations-Index (NDVI, siehe Abb. 3). Ein Anwendungsbeispiel, für welches das multispektrale Potenzial digitaler Systeme sehr gut eingesetzt werden kann, stellt das Biototypen-Monitoring dar (siehe z. B. die Arbeiten auf Basis von HRSC-AX-Daten von GÄHLER et al. 2004, in diesem Heft).

Mit *Multisensor-Systemen* wird die Anzahl ableitbarer Szenenmerkmale noch weiter erhöht, indem aus den zusätzlich zu den Bildern aufgenommenen Höhen- und Intensitätsdaten des Laserscanners Parameter wie Objekthöhen, Höhen- oder Intensitätstextur bestimmt werden können. Mit der *simultanen* Aufnahme werden das grundsätzliche Problem der variablen Objekteigenschaften

in Abhängigkeit vom Aufnahmezeitpunkt umgangen und somit eine zuverlässigere Orthobild-Generierung ermöglicht (siehe z. B. PFLUG et al. 2004) und Fehlklassifizierungen vermieden. Die größere Originalpunktdichte von Laserscanning-Höhen gegenüber stereokorrelierten Daten und den daraus resultierenden, schärfer konturierten Profilen wird in Abb. 4 (oben) deutlich. Abb. 4 (unten) zeigt ferner den erweiterten Merkmalsumfang, der sich durch die Aufzeichnung von Mehrfachreflexionen des Laserscanners ergibt und zur Extraktion von anthropogenen und natürlichen Strukturen herangezogen werden kann (siehe auch SCHIEWE 2004).

Die *Intensitätswerte* des reflektierten, im nahen Infrarot operierenden Laserstrahls stellen eine interessante, aber auch noch wenig untersuchte Datenquelle dar. Nach unseren Erfahrungen ergibt sich ein gewisser Mehrwert bei der Interpretation einiger Objektklassen (z. B. von Einzelbäumen; siehe SAUREN 2002). Andererseits muss aber auch festgehalten werden, dass die Intensitäten innerhalb einer Objektklasse stark variieren können, was z. B. auf Überlagerungs- und Multipath-Effekte der reflektierten Strahlen insbesondere in komplexen (z. B. urbanen) Regionen zurückzuführen ist (siehe hierzu auch KATZENBEIßER & KURZ 2004). Generell können die Intensitäten lediglich als komplementäre Datenquelle angesehen werden, die insbesondere dann einen Mehrwert für visuelle Interpretationen darstellen können, wenn neben den Laserscanning-Höhen keine oder nur minderwertige multispektrale Bilddaten vorhanden sind.





**Abb. 4:** Ableitung von Höhendaten (Bilddaten jeweils zum Vergleich): obere Reihe: Profile (bessere Kantenerhaltung durch FALCON-Laserscanning-Höhen), untere Reihe: Vergleich zwischen Objekt-oberflächen (ADS 40, d. h. inklusive Baum- und Gebäudenhöhen) und Bodenstrukturen (last echoes des FALCON; Ausschnitt ca. 225 m × 150 m).

Zusammenfassend kann für die Daten digitaler flugzeuggestützter Systeme aufgrund der spektralen und radiometrischen Fortschritte sowie der potenziellen Verfügbarkeit simultan aufgezeichneter und zuverlässiger Höhendaten ein erweitertes Anwendungspotenzial für Landschaftsmo- dellierungen erwartet werden. Entsprechende typische großmaßstäbliche Anwendungen sind z. B. Landnutzungs- bzw. Landbedeckungskartierungen, Abschätzungen von Anbauertrag und Ackerzustand oder Bestandsaufnahmen des Holzvorkommens. Im Gegensatz zu klassischen photogrammetrischen Auswertungen sind hierbei nicht unbedingt Aufnahmen mit höchster räumlicher Auflösung notwendig, sondern es können für großräumige Erfassungen – wie z. B. im Rahmen der EU-weiten Überwachung der Subventionszahlungen an Landwirte (siehe auch SPRUYT & KAY 2004) – auch Bodenelementgrößen um 0,5 m bis 1 m ausreichen.

### 3.4 Semantische Genauigkeit

Die semantische Genauigkeit, ein anwendungsabhängiges Maß für die *thematische* Klassifizierungsgüte, hängt von einer Reihe von Faktoren ab:

- Mit dem erweiterten Umfang an *Szenenmerkmalen* (siehe Abschnitt 3.3) kann erwartet werden, dass die gesamte Zuverlässigkeit des Klassifizierungsprozesses erhöht werden kann. Andererseits stellen jedoch die Selektion geeigneter Merkmale, der Einsatz standardmäßiger Verfahren zur Extraktion und zur nachvollziehbaren Gewichtung der Parameter sowie die Behandlung eventueller widersprüchlicher Merkmalsausprägungen noch ungelöste Probleme im Gesamtprozess dar.
- Ferner ist ein geeignetes *Objektmodell* zu erstellen, das die (topographischen) Objekte, ihre Merkmale sowie Beziehungen untereinander beschreibt. Mit der Verfüg-

barkeit wesentlich detaillierterer Daten hinsichtlich räumlicher und spektraler Eigenschaften müssen auch die Objektmodelle stärker differenziert aufgebaut werden. Andererseits ist die (automatische) Generierung und Nutzung solcher Objektmodelle noch weit von operationeller Reife entfernt (HEIPKE 2003).

- Schließlich müssen Szenen- und Objektmerkmale über geeignete *Entscheidungskriterien* verglichen und bewertet werden, um eine Objektzuweisung zu ermöglichen. An dieser Stelle gibt es eine Reihe bekannter Verfahren (z. B. basierend auf Wahrscheinlichkeits- oder Fuzzy Logic-Theorie sowie neuronalen Netzen).

Aufgrund der angerissenen Probleme muss zusammengefasst festgehalten werden, dass eine zuverlässige und übertragbare semantische Genauigkeit mit derzeitigen automatisierten oder automatischen Interpretationsverfahren noch nicht möglich ist – dies ist sicherlich als der größte Hinderungsgrund hinsichtlich der Akzeptanz und der tatsächlichen Verwendung neuer digitaler Daten anzusehen.

### 3.5 Operationelle Aspekte

Hinsichtlich der *Gebietsabdeckung* muss festgehalten werden, dass die digitalen Systeme generell noch Nachteile gegenüber konventionellen Filmkameras aufweisen (vgl. Abschnitt 2.3). Es ist aber zu erwarten, dass dieser gewichtige Nachteil durch die Entwicklung größerer CCD- oder CMOS-Elemente in der näheren Zukunft aufgehoben werden kann.

Die *Aktualität* der Daten hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Einerseits wird die Zeitspanne zwischen Aufnahme und Abgabe der prozessierten digitalen Daten an den Nutzer reduziert, weil die Schritte der Filmentwicklung und möglicherweise des Scannens entfallen. Andererseits nimmt die Interpretation von Szenen aufgrund des beschriebenen, fehlenden Automatisierungsgrades (siehe Abschnitt 3.4) immer noch einen wesentlich längeren Zeitraum in Anspruch, was für einige Anwender nicht akzeptabel ist.

Hinsichtlich der *Nachhaltigkeit* der Aufnahmesysteme ist zu erwarten, dass die klassischen filmbasierten metrischen Kameras aufgrund ihrer exzellenten mechanischen und optischen Stabilität noch eine relativ lange Zeit auf dem Markt verbleiben werden. Dagegen muss den digitalen Systemen wohl eine kürzere Lebensdauer prognostiziert werden, die sich durch die rapiden und weiterhin ständig notwendigen technischen Entwicklungen und den daraus ergebenden Veränderungen ergeben werden.

Bezüglich der Kosten kann es aufgrund geringer Erfahrungswerte nur vage und nicht allgemeingültige Aussagen geben. Bei den *Aufnahmekosten* ist zu beachten, dass durch die Fähigkeit zur multispektralen Aufnahme gegenüber konventionellen Filmaufnahmen mehr Informationen mit einer einzigen Befliegung gewonnen werden können und der aufwändige Prozess der Filmentwicklung entfällt. Andererseits sind die absoluten Kosten insbesondere für Laser-scanning-Daten relativ hoch und stellen oft ein Ausschlusskriterium zur Nutzung dar. In entwickelten Ländern wird ferner die Anzahl der künftig verkauften digitalen Aufnahmesysteme davon abhängen, ob öffentliche Institutionen (wie die Landesvermessungsämter) künftig in ihren Ausschreibungen eine digitale statt einer konventionellen photographischen Aufnahme verlangen werden. Auf alle Fälle wird der Mehrfachnutzung von Daten angesichts knapper öffentlicher Kassen eine noch gesteigerte Bedeutung zukommen müssen.

Bezüglich der *Auswertekosten* stellen die effektive Archivierung und der schnellere Zugriff auf die digitalen Daten in einem Geographischen Informations-System einen Vorteil der digitalen Aufnahmen dar. Für eine rein geometrische Auswertung (Georeferenzierung, Aerotriangulation, Orthorektifizierung und Kontrolle) schätzen beispielsweise FRICKER & HUGHES (2003) den Preis auf 5.80 USD/km<sup>2</sup>, was in etwa dem halben Preis für denselben Prozess basierend auf analogen Luftbildern bzw. einem Sechstel basierend auf hoch auflösenden Satellitendaten entspricht. Allerdings berücksichtigen diese Zahlen nicht die Gerätekosten, die ge-

genüber den flugzeuggestützten analogen Pendants um Faktor zwei höher liegen und bei den gesamten Projektkosten aus Amortisierungsgründen sicherlich noch einbezogen werden müssen. Ferner muss das Argument, auch die thematische Auswertung sei aufgrund des kompletten digitalen Datenflusses schneller und damit kostengünstiger, stark bezweifelt werden: In der Praxis benötigt die Szeneninterpretation aufgrund der oben beschriebenen ungelösten Probleme immer noch mindestens den gleichen Zeitumfang wie bisher.

#### 4 Ausblick

Bei der vorangegangenen Diskussion des Potenzials für Daten digitaler flugzeuggestützter Systeme ist deutlich geworden, dass aufgrund der spektralen und radiometrischen Fortschritte sowie der Verfügbarkeit simultan aufgezeichneter Höhendaten eine Reihe neuer *Anwendungsgebiete* erschlossen werden kann. Diese betreffen hauptsächlich thematische Auswertungen wie Landnutzungs- bzw. Landbedeckungskartierungen, Abschätzungen von Anbauertrag und Ackerzustand oder Bestandsaufnahmen des Holzvorkommens. Entsprechend der Variabilität dieser Anwendungen sind in Zukunft auch flexible Aufnahme- und Auswerteszenarios zu entwickeln und einzusetzen.

Für *künftige Aufnahmeszenarien* lässt sich festhalten, dass es aufgrund der Bandbreite der o. g. thematischen Anwendungen sicherlich keine Standardlösung bezüglich Sensor-konfiguration und Auswerteverfahren gibt bzw. geben wird. Neben den üblichen Parametern, die die Auswahl der Sensorik hinsichtlich geometrischer, spektraler und radiometrischer Auflösung sowie des Aufnahmezeitpunktes bestimmen, sind u. a. folgende Faktoren in Betracht zu ziehen:

- Typ und Detaillierungsgrad der zu extrahierenden Objektarten (insbesondere die Frage, ob künstliche Objekte wie Bauwerke von Interesse sind),
- Reliefeenergie des zugrunde liegenden Geländes (je bewegter das Gelände, desto größer die Notwendigkeit für genaue Höhendaten),

- Größe des Auswertebereiches (je größer, desto wirtschaftlicher wird auch die Aufnahme von Laserscanning-Daten),
- Aufnahmebedingungen (je stärker die Bewölkungswahrscheinlichkeit, desto wichtiger die Nutzung von aktiven Sensoren wie Laserscannern),
- Verfügbarkeit entsprechender Hardware (Arbeits- und Plattenspeicher) sowie Auswertesoftware, die z. B. die Prozessierung von sehr fein aufgelösten und damit umfangreichen Höhendaten ermöglicht,
- potenzielle Mehrfachverwertung der Daten (zwecks Kostenumlage),
- die weitere Entwicklung bei der Verfügbarkeit amtlicher Geobasisdaten, speziell für Digitale Geländemodelle, die bei einigen Bundesländern teilweise schon mit Laserscanning-Methoden erfasst, aber noch nicht in der originären Punktdichte angeboten werden.

Da immer noch eine zu große Lücke zwischen Nutzererwartungen und Praxis bezüglich eines vollständigen digitalen Datenflusses bei der *Auswertung* und damit eine eingeschränkte Akzeptanz der Datenquellen existiert, sind insbesondere neue oder modifizierte Interpretationsalgorithmen zu entwickeln, die sich durch einen hohen Automatisierungsgrad, große Zuverlässigkeit und Übertragbarkeit auszeichnen. In diesem Kontext sind verschiedene methodische Richtungen voranzutreiben, z. B.:

- Vergleich und Einsatz alternativer Segmentierungsverfahren,
- Methoden zur Extraktion und Gruppierung zusätzlicher Szenenmerkmale,
- Fusionsverfahren – sowohl zur signalbasierten Fusion (vgl. EHLERS & KLONUS 2004, in diesem Heft), als auch insbesondere merkmals- oder entscheidungsbasierte Verfahren (vgl. GREIWE et al. 2004, in diesem Heft),
- multiskalige Prozessierung, sowie
- Objektmodell-Generierung.

#### 5 Danksagung

Die Autoren danken der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) für die Bereitstellung der verwendeten Datensätze.

## 6 Literatur

- BALTSAVIAS, E. P., 1999: On the performance of photogrammetric scanners. – In: FRITSCH, D. & SPILLER, R. (Eds.): *Photogrammetric Week '99*. – pp. 155–173, Wichmann.
- BLANC, N., 2001: CCD versus CMOS – has CCD imaging come to an end? – In: FRITSCH, D. & SPILLER, R. (Eds.): *Photogrammetric Week '01*. – pp. 131–137, Wichmann.
- DÖRSTEL, C., 2003: DMC – Practical Experiences and Photogrammetric System Performance. – In: FRITSCH, D. (Ed.): *Photogrammetric Week '03*. – pp. 59–66, Wichmann.
- EHLERS, M. & KLONUS, S., 2004: Erhalt der spektralen Charakteristika bei der Bildfusion durch FFT basierte Filterung. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2004** (6): 495–506 (dieses Heft).
- FRICKER, P. et al., 2000: ADS 40 – Why LH Systems Took the Three-line Road. – *GIM International*, July 2000: 45–47.
- FRICKER, P. & HUGHES, D.W., 2003: ADS40 data quality for earth observation. – *Proceedings Workshop on "Data Quality in Earth Observation Techniques"* at ITC, Enschede.
- GÄHLER, M., JANOWSKY, R. & SCHIEWE, J., 2004: Automatisierte Ableitung von Biotoptypen aus räumlich höchstauflösenden, multispektralen Bild- und Laserscanningdaten. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2004** (6): 475–484 (dieses Heft).
- GREIWE, A., BOCHOW, M. & EHLERS, M., 2004: Segmentbasierte Fusion geometrisch hochauflösender und hyperspektraler Daten zur Verbesserung der Klassifikationsgüte am Beispiel einer urbanen Szene. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2004** (6): 485–494 (dieses Heft).
- HEIPKE, C., 2003: *Photogrammetrie & Fernerkundung – vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung*. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2003** (3): 165–180.
- HOFMANN, O., 1983: Bildgüte aktiver und passiver Abtaster. – *Bildmessung u. Luftbildwesen* **51** (3): 103–117.
- KATZENBEIßER, R. & KURZ, S., 2004: Airborne Laser-Scanning, ein Vergleich mit terrestrischer Vermessung und Photogrammetrie. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2004** (3): 179–187.
- KRAUS, K., 2004: *Photogrammetrie*. Band 1. – 7. Aufl., Verlag de Gruyter.
- LEBERL, F. & GRUBER, M., 2003: Flying the New Large Format Digital Aerial Camera Ultracam. – In: FRITSCH, D. (Ed.): *Photogrammetric Week '03*. – pp. 67–76, Wichmann.
- LEMMENS, M., 2004: Product Survey on Airborne Laserscanners. – *GIM International* **5**: 45–47.
- MAAS, H.G., 2003: Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: User requirements and system performance. – In: FRITSCH, D. (Ed.): *Photogrammetric Week '03*. – pp. 117–125, Wichmann.
- PFLUG, M., RINDLE, P. & KATZENBEIßER, R., 2004: True-Ortho-Bilder mit Laser-Scanning und multispektralem Zeilenscanner. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2004** (3): 173–178.
- SAUREN, W., 2002: *Automatisierte Erfassung von Waldgebieten aus Laserscanningdaten*. – Diploma thesis at the University of Vechta, Research Center for Geoinformatics and Remote Sensing.
- SCHIEWE, J., 2004: Fusion multisensoraler Daten zur Extraktion von Oberflächenkanten. – In: SEYFERT (Hrsg.): *Vorträge 24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF (Halle/S.)*.
- SCHIEWE, J. & EHLERS, M., 2004: A novel method for generating 3D city models from high resolution and multi-sensoral remote sensing data. – *International Journal for Remote Sensing* (begutachtet, im Druck).
- SPILLER, R., 2000: DMC – Why Z/I Imaging Preferred the Matrix Approach. – *GIM International*, July 2000: 66–68.
- SPRUYT, P. & KAY, S., 2004: Quality Assessment Test with Leica Geosystems ADS40: Digital Airborne Orthoimagery. – *GIM International* **6**: 35–37.

Anschrift der Autoren:

PD Dr.-Ing. JOCHEN SCHIEWE  
 Prof. Dr.-Ing. MANFRED EHLERS  
 Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung an der Universität Osnabrück  
 Eichendorffweg 30, D-49377 Vechta  
 Tel.: 04441-15-423/-428  
 e-mail: jschiewe@fzg.uni-vechta.de  
 mehlers@fzg.uni-vechta.de

Manuskript eingereicht: Juli 2004

Angenommen: August 2004