

# Abschätzung des effektiven Dynamikbereichs von digitalen Aufnahmen am Beispiel des Testflugs Vaihingen/Enz

OTTO KÖBL<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Entsprechend Kalibrierungsangaben weisen digitale Luftbildkameras einen sehr hohen Dynamikbereich von etwa 1:1000 und mehr auf; mit Filmkameras wird bei Farbaufnahmen dagegen nur ein Dynamikbereich von etwa 1:100 erreicht. Analysiert man dagegen digitale Luftbilder so zeigen sich viel engere Grenzen, so dass etwa in Schatten nur teilweise noch Details erkennbar sind. Begrenzend wirkt sich vor allem das Luftlicht aus dieser Effekt wird noch verstärkt da im Allgemeinen bei den digitalen Pan-Bildern kein Gelbfilter verwendet wird. Eine weitere Begrenzung ergibt sich durch das Rauschen insbesondere bei der Zeilenkamera ADS bei großmaßstäblichen Aufnahmen. Für die Bildaufzeichnung werden im allgemeinen 12 bis 16bit verwendet; demgegenüber nimmt das Auge viel weniger Graustufen wahr. Durch eine geeignete Bildumsetzung mit einer starken Kontrastverstärkung im Dunkelbereich kann aber nahezu der gesamte Informationsgehalt dem Betrachter zugänglich gemacht werden, wobei die 8-bit Tiefe für die einzelnen Farbkanäle voll ausreicht. Analysiert wurden in diesem Zusammenhang Bildaufzeichnungen mit der ADS-4 von Leica Geosystems, der DMC von Z/I Imaging, der Digicam von IGI und der UltraCan von Vexcel.*

## 1 Einleitung

Prinzipiell wird digitalen Aufnahmesystemen ein hoher Dynamikbereich attestiert, jedenfalls höher als für Filmaufnahmen. Betrachtet man dagegen praktische Aufnahmen, dann ergibt sich der Eindruck, dass die höhere Kapazität der Aufnahmen kaum genutzt wird. Vielfach lassen Schattenpartien nur sehr begrenzt einsehen, andererseits weisen helle Bildpartien sehr oft Sättigung bzw. Überstrahlung auf. Ein sehr umfangreiches Testmaterial wurde im Rahmen des Testfluges Vaihingen von 2008, unter der Leitung des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart erstellt. Ziel des groß angelegten Tests war es, die verschiedenen Aufnahmesysteme vergleichend zu analysieren. Der Versuch konnte inzwischen mit einer sehr umfangreichen Dokumentation abgeschlossen werden (CRAMER u.a.). Nur am Rande wurde dabei auch die Frage des Dynamikbereichs der neuen Kamerasysteme im Vergleich zu den Filmkameras behandelt. Für den Anwender und Benutzer der Aufnahmen ist der Dynamikbereich durchaus von Bedeutung. Gerade bei großmaßstäblichen Bildern ergibt sich ein großer Kontrastumfang, da man versucht Schattenpartien einzusehen und auch helle Partien noch wiederzugeben. Ergibt sich mit den digitalen Kamerasystemen die Möglichkeit diese Aufgabe besser zu lösen als mit Filmaufnahmen, bei denen vor allem die Einsehbarkeit in Schattenpartien recht begrenzt wird.

1) Otto Kölbl, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit (ENAC), Chemin de l'Eglise 17, CH-1066 Epalinges, Schweiz;  
E-Mail: [otto.koebbl@epfl.ch](mailto:otto.koebbl@epfl.ch)

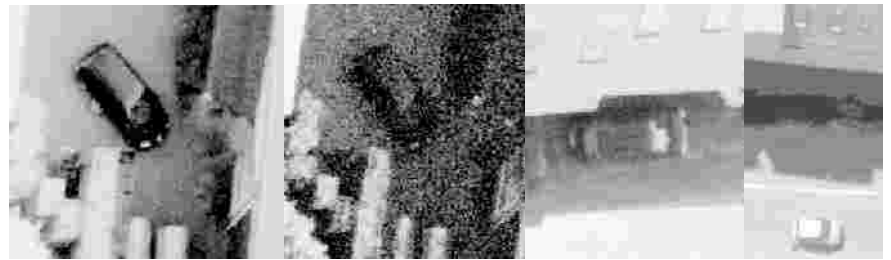
Im Folgenden wird versucht zunächst den Dynamikbereich an Hand der Leuchtdichte im Raum abzuschätzen und daraus den effektiven Dynamikbereich von digitalen Aufnahmen schätzen.

Ausgegangen wurde dabei von der sensitometrischen Kontrolle vom Vergleichsflug mit aufnahmen. Neben dem Dynamikbereich sind aber auch das Rauschen bei der Bildregistri und das Auflösungsvermögen des Aufnahmesystems von Bedeutung. Die Untersuchung folgten für die ADS-40 (Leica Geosystems), die DMC (Z/I Imaging), die Digicam (IGI, I blad) und die UltraCam-X (Vexcel). Die Vergleichsaufnahmen auf Film erfolgten mit der Top (Z/I Imaging).

Die hier aufgezeigten Ergebnisse beziehen sich zwangsläufig auf die Aufnahmesystem beim Testflug Vaihingen zum Einsatz gelangten. Die ADS-40 wurde inzwischen durch die 80 abgelöst, die UltraCam-X durch die UltraCam-Xp und Z/I Imaging hat ein völlig neues System auf den Markt gebracht. Zudem kann es auch sein, dass das eine oder andere System nicht optimal eingesetzt wurde. Die ausgewiesenen Zahlenwerte sind daher nur begrenzt repräsentativ für ein System. Die Arbeit zeigt aber Grenzen der digitalen Systeme auf, welche bei der Flugvergabe in Betracht gezogen werden sollten oder zu überprüfen sind und zum Teil durch die Wahl der Befliegungsparameter verbessert werden können.

## 2. Illustration der Grenzen des Dynamikbereichs von Bildregistrierungen

Der Dynamikbereich von Luftbildaufnahmen wird sowohl im Dunkelbereich als auch im hellen Bereich limitiert. Im Dunkelbereich ist es zum Teil das Luftlicht, aber auch das Rauschen, das die Detailerkennbarkeit begrenzt; dies zeigt sich vor allem in Schattenpartien. Bei hochauflösenden Aufnahmen sollen Trottoir Ränder im Schatten, Schächte oder Bodenmarkierungen noch erkennbar sein. Zur Illustration dieser Limitierung eignen sich recht gut solche Autos, die im Schattenbereich noch einwandfrei erkennbar sein sollten und nicht mit dem Rauschen verschwimmen sollten.



DMC ( $\pm 1.1\%$ )      RMK-Top ( $\pm 7.5\%$ )      ADS-40 ohne Komp. ( $\pm 3\%$ )      ADS-40 mit Komp. ( $\pm 3\%$ )  
 Abb. 1: Autos im Schatten mit Angaben zum Rauschen in Prozent der DN-Werte im Schattenbereich aufgenommen mit verschiedenen Kamerasystemen. Das rechte Bild, aufgenommen mit der ADS-40, zeigt bei der Zeilenauslese jpeg-komprimiert. Ein Rauschen ist nicht mehr zu erkennen, allerdings sind die Objekte im Schatten nicht mehr zu erkennen.

Abbildung 1 macht deutlich, dass auch das Rauschen die Detaillierbarkeit empfindlich trächtigen kann. Dies ist bei Filmaufnahmen besonders deutlich. Demgegenüber kann das Rauschen bei entsprechend längerer Belichtung sehr stark reduziert werden, was allerdings eine Kompensation der Bewegungsunschärfe voraussetzt. Diese Kompensation der Bewegungsunschärfe ist allerdings bei der Zeilenkamera ADS-40 nicht möglich, was bei geringen Fluggeschwindigkeiten zu einer Beeinträchtigung der Bildqualität in Schattenpartien führen kann. In der Abbildung ganz rechts, ist dieser Effekt nicht erkennbar, da das Bild jpeg-komprimiert wurde. Demgegenüber liegen zwei Streifen ohne dieser Komprimierung vor, für welche das Rauschen abgeblendet werden konnte. Ganz allgemein sollte wohl bei Überlegungen zum Dynamikbereich auch das Rauschen einbezogen werden.

Neben der Berechnung des Rauschens ist es nützlich auch das Auflösungsvermögen zu berücksichtigen, insbesondere wenn auf die Anzahl der im Sensor gesammelten Photonen geschaut werden soll. Wie Abbildung 2 zeigt, weisen die zwei Siemenssterne, die auf einer der Testplatten abgebildet sind, eine recht unterschiedliche Verwaschung auf. Simuliert man nun die Verwaschung mit verschiedenen gespreizten Gauß Funktionen, kann man diese quantitativ abschätzen. Die Zahlen in der Abbildung weisen auf die Spreizung der Gauß Funktion ( $2\sigma$ ) hin und entsprechen in etwa dem Auflösungsvermögen in Linien pro Pixel (vgl. auch JACOBSEN). Im hellen Bereich wird der Dynamikbereich vor allem durch die Sättigung der Sensor begrenzt. Solange die Sättigung nicht bei bildrelevanten Details auftritt, ist dies kaum störend. Ausgesetzt dass keine Überstrahlung auftritt. Nur sollte beachtet werden, dass etwa Schockwellen oder Schneefelder eine hohe Reflexion aufweisen und durchaus von Bedeutung für die Bildanalyse sein können.

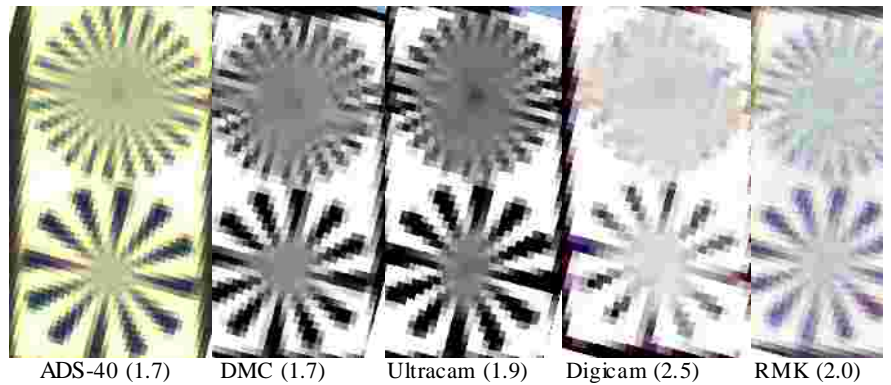


Abb. 2: Siemensstern mit 24 Strahlen oben und 12 Strahlen unten, abgebildet von den verschiedenen Aufnahmesystemen. Die Zahlen in Klammern weisen auf das Auflösungsvermögen in Linien pro Pixel hin und wurden aus einer Simulation mit verschiedenen gespreizten Verwaschungsfunktionen ermittelt.

### 3 Dynamikbereich der Aufnahmesysteme

#### 3.1 Dynamikbereich entsprechend der elektronischen Leistungsfähigkeit der Kamerasysteme

In der Elektronik wird der Dynamikbereich einer digitalen Kamera (DR) als das Verhältnis maximalen Ausgangssignals (Sättigungsgrenze eines Pixels) zu seiner minimalen Lichtempfindlichkeit definiert. Die minimale Lichtempfindlichkeit eines CCD wird durch das Rausch Dunkelstrom begrenzt. Die Angabe des Dynamikbereichs erfolgt in elektronischen Fachliteratur in logarithmischer Form also in Dezibel [dB] (vgl. u.a.: SANDAU); im weiteren Verlauf der Arbeit wird aber wegen der besseren Anschaulichkeit nur das Verhältnis oder die Verhältnisse verwendet (Inverse von FW/D).

$$DR = 20 * \log (FW/D) \quad (1) \quad \begin{array}{l} DR: \text{Dynamikbereich; FW Totale Ladungsmenge (Full} \\ D: \text{generierter Dunkelstrom} \end{array}$$

Geht man von dieser Definition aus, ergibt sich für das Kamerasystem DMC ein Wert von 1:1345 (3 zu 4095) entsprechend dem Kalibrierungsprotokoll und für die UltraCam ein Wert von 1:4000 (1.9 zu 7600), dies entsprechend einer internen Untersuchung (GRUBER). In anderen digitalen Kamerasystemen lagen keine Laborangaben vor. Demgegenüber lässt sich der Dynamikbereich für die RMK aus der Farbdichtefunktion des Films abschätzen und liegt bei etwa 1:100.

#### 3.2 Abschätzung der Leuchtdichte im Objektraum mittels Vergleichsaufnahmen der RMK-Filmkamera

Es wurde bereits aufgezeigt, dass bei den praktischen Aufnahmen im Dunkelbereich vor allem das Luftlicht begrenzend wirkt; zudem zeigte sich, dass auch bei den 16-bit Bildern die bzw. Farbwerte vielfach nicht proportional zur Leuchtdichte im Objektraum sind. Es ist irreführend, wenn man den Dynamikbereich der Aufnahmen unmittelbar aus dem minimalen maximalen DN-Werten der digitalen Bilder ermittelt. Vielmehr sind dafür unabhängige Messungen der Leuchtdichte erforderlich. Dies könnte am Boden erfolgen, wobei noch der Einfluss der Atmosphäre zu berücksichtigen wäre; einfacher ist es jedoch die Messungen direkt vom Objekt aus zu machen. Im vorliegenden Fall konnte auf die RMK-Bilder und die sensitive Kontrolle des Films zurückgegriffen werden (vgl. Abb. 3).

Üblicherweise werden auf die Filme zu Beginn und Ende eines Streifens Graukeile aufgetragen. Diese dienen zur Kontrolle des Entwicklungsprozesses, und erlauben eine Beziehung zwischen der Belichtung und der Filmdichte herzustellen. Werden diese Kontrollstreifen nun geschnitten erhält man auch den Bezug zwischen der ursprünglichen Belichtung (Exposure) und den Werten der digitalisierten Bilder.

Auf diese Weise kann nun die relative Leuchtdichte von Objekten zur Zeit der Bildaufnahme geschätzt werden. Da die DMC-Aufnahmen zeitgleich erfolgten, können diese Angaben unmittelbar auf diese Bilder übertragen werden und mit einigen Einschränkungen wegen der wechselnden atmosphärischen Bedingungen auch auf die übrigen Aufnahmen, die an anderen Orten erfolgten. Demgegenüber ließen sich die ausgelegten Testtafeln nicht zur Ermittlung

Farbdichtefunktion heranziehen; störend war insbesondere da die Tafeln auch im dunkelst reich noch zu viel Licht reflektieren und der Grenzbereich nicht erfassbar war.

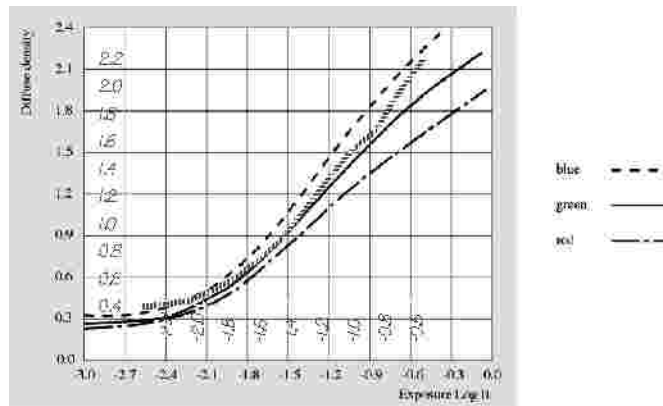


Abb. 3: Farbdichtefunktion des Agfa Negativfilms X100 PE 1, entsprechend den Firmenangaben, gemittelt mit den am Graukeil gemessenen Werten für den Grünkanal (kurz-strichliert und Werte in Itali

### 3.3 Farbdichtefunktionen der digitalen Aufnahmen

Zur Ermittlung der Farbdichtefunktion der digitalen Aufnahmen war es zunächst nötig ein Referenzpunkten aufzubauen, für welche die relative Leuchtdichte mit Hilfe der RM Aufnahmen abgeschätzt wurde. Die dunkelsten Objekte finden sich meist in Schatten meist handelt es sich dabei um Schattenpartien in Waldflächen. Allerdings ließen sich die Flächen nicht in den RMK-Top Aufnahmen eindeutig identifizieren und messen, sie wurde bei der Ermittlung des Dynamikbereichs als Minimalwerte eingeführt. Bei den dunkelsten Objekten, für welche die relative Leuchtdichte vergleichend mit den RMK Aufnahmen er wurden, handelt es sich um asphaltierte Flächen im Schatten (Bezeichnung: „Asphalt, d oder „Schatten“). Für diese Objekte wird in Tabelle 1 auch das Rauschen ausgewiesen, da Wert einen Hinweis liefert, ob in Schattenpartien noch Objekte wie Trottoir Ränder zu erl sind. Mit zunehmender Belichtung folgen dann die dunkelsten Partien der aufgenommenen tafeln, sonnenbeschienener Asphalt, Parkplätze, helle Pflastersteine, vorwiegend auf Ter und schließlich der helle Untergrund der Testtafeln. Zudem wird für den maximal mög DN-Wert auch noch die entsprechende relative Belichtung abgeschätzt; dieser Wert ist so Extremwert (FW) für die Berechnung des Dynamikbereichs.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Farbdichtefunktionen in einem doppelte rithmischen Maßstab wiedergeben, analog zur Farbdichtefunktion des Films (vgl. Abb. 3) Darstellung erlaubt eine recht gute Aufgliederung im dunklen Bereich; natürlich wird d der helle Bereich, im Vergleich zu den natürlichen DN-Werten, gestaucht. Im Wesentliche ressiert aber auch hier wie etwa die Kamera auf eine Verdoppelung der Leuchtdichte reagi weniger das Verhalten der Einzelwerte.

### 3.3.1 Die DMC von Z/I Imaging

Bei der DMC handelt es sich um eine Flächenkamera mit einem Vierfachkopf für die Registrierung des panchromatischen Kanals. Gesamthaft wird ein Bild von 13824x7680 Pixel erzeugt. Die einzelnen Sensormatrizen weisen eine Größe von 8000 x 4500 Pixel auf. Die Sensitivität hat ein Maximum bei 500 nm (blau-grün) und fällt dann beidseits ab. Bei 400 nm im dunklen Blaubereich, beträgt sie noch 30% im Vergleich zum Maximum wie auch im Infrarotbereich bei 820 nm. Zur Erzeugung eines Farbbilds werden neben den panchromatischen Registriertköpfen noch 4 weitere Kameras für die Registrierung der Blau-, Grün-, Rot- und Infrarotkanäle mit wesentlich geringerer Auflösung verwendet.

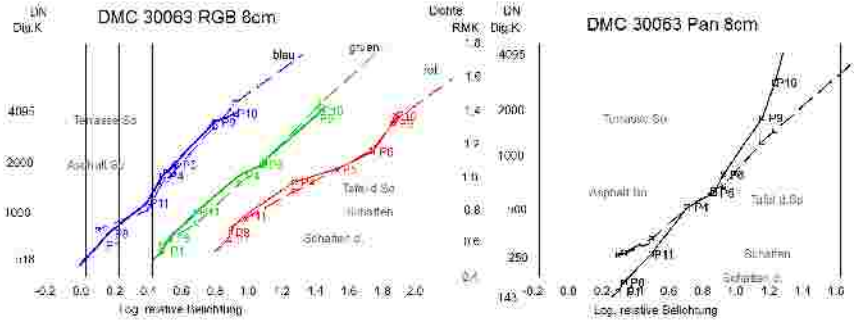


Abb. 4: Empirisch ermittelte Farbwertkurven für die DMC (durchgezogen) im Vergleich mit der RMK bzw. dem Agfa-Negativfilm (gestrichelte Linien). Links die Kurven für das Bild 63 RGB, rechts das Bild 63; die entsprechenden Grauwerte wurden für den Farbfilm durch Mittelung der 3 Kanäle bestimmt. Beim RGB-Bild links wurden die Kurven für die 3 Kanäle auseinander gezogen, um die Erkennbarkeit zu verbessern. Die Punktnummern P1 usw., teilweise mit Beschreibung, bezeichnen spezifische Objekte.

Vergleicht man die Farbwertkurven von RMK und DMC (Abb. 4) so ergibt sich eine seltsame Tonwiedergabe, allerdings ist der Dynamikbereich der DMC geringer als bei der RMK. Demgegenüber weist das Pan-Bild der DMC eine beträchtlich steilere Gradation auf, aber hier ist der Dynamikbereich nicht größer als beim RGB-Bild (vgl. auch Tabelle 1). Im dunklen Bereich konnten bei der DMC Objekte identifiziert werden, die eine etwas geringere Leuchtdichte aufweisen, als bei der RMK. Demgegenüber lassen sich bei der RMK im hellen Bereich Objekte ausmachen, die nahezu die doppelte Leuchtdichte aufweisen als bei der DMC.

### 3.3.2 Die UltraCam-X von Vexcel

Die UltraCam-X (UC) weist ebenfalls 4 verschiedene Kameraköpfe für die Registrierung des panchromatischen Kanals auf und 4 Kameraköpfe für die Farbkanäle. Die Aufnahmeachsen der Einzelkameras sind parallel. Die Kameraköpfe sind jeweils mit mehreren Matrixsensoren bestückt. Ein Aufnahmeobjektiv deckt also das gesamte Bildformat ab, schließlich 14'430 x 9'420 Pixel ab. Einer der panchromatischen Kameraköpfe ist mit 4 Matrixsensoren bestückt, 2 weitere mit 2 Sensoren und der letzte zentrale nur mit einem. Insgesamt wird das Bild aus 9 Flächen Sensoren zusammengesetzt.

Die UltraCam wurde nicht am gleichen Tag eingesetzt wie die RMK; das gleiche Problem tritt sich übrigens auch bei der Digicam und der ADS-40. Ferner weisen die großmaßstäblichen

der der UltraCam Wolkenschatten auf und konnten für die Analyse des Dynamikbereich verwendet werden, demgegenüber erfolgte der Hochflug bei sonnigen Wetter (Flughöhe 2500m über Grund). Die Homogenität der Beleuchtungsverhältnisse wurde an Asphalt überprüft. Die Farbbilder liegen nur in 8-bit vor und das Histogramm umspannt nicht den gesamten Dynamikbereich, sie konnten daher nicht verwendet werden; demgegenüber liegen Pan-Bilder in 16-bit vor und umfassen den gesamten Dynamikbereich.

Bei der Ermittlung des Dynamikbereichs wurde analog vorgegangen wie bei der DMC. Ein Pan-Bild ergibt sich bei der UltraCam ein Dynamikbereich von 27, falls als maximaler Grenzwert der Wert von 7600 DN eingesetzt wird oder von 38 für den effektiv gemessenen Wert von DN. Der minimale DN-Wert beträgt 411 für Bildelemente (tiefe Schatten unter Bäumen) und Maximalwert 12820. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um Spiegelreflexion und dies dürfte übersteuert sein. Die Grautonwiedergabe ist nicht streng linear zur Belichtung. Abb. 5 zeigt, was wohl auf den größeren Luftlichtanteil bei der Hochbefliegung zurückzuführen ist; der dunklere Teil des Bildes ist wesentlich flacher. Allerdings konnten noch sehr tiefe Stellen im Wald identifiziert und gemessen werden, ähnlich wie bei den großmaßstäblichen Aufnahmen der DMC.

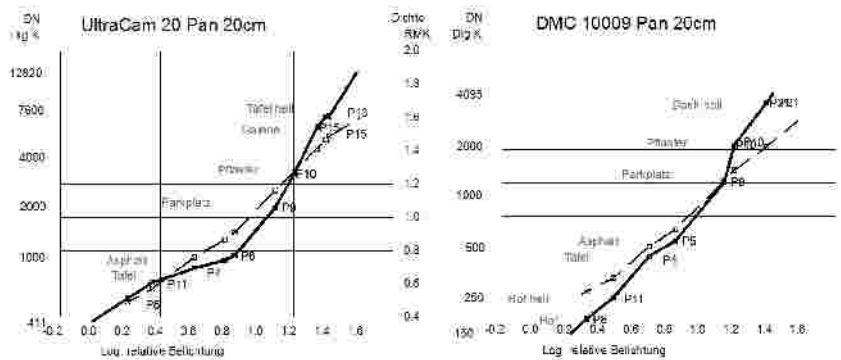


Abb. 5: Vergleichende Darstellung der Grauwertkurven für Hochbefliegungen mit der UltraCam und der DMC (rechts). Die Kurven für die spezifischen Kameras sind durchgezogen wohingegen die Gleichkurven der RMK-Top bzw. dem Agfa-Negativfilm gestrichelt sind. Diese stammen aus der Tiefbefliegung; verwendet wurde für die RMK-Top das Mittel aus den 3 Kanälen rot, grün und blau.

In Abb. 5 wird zum Vergleich auch die Grauwertkurve der Hochbefliegung für die DMC angegeben. Entsprechend der hier vorgenommenen Berechnung des Dynamikbereichs ergibt sich für die DMC ein Wert von 16, gegenüber 11 bei der Tiefbefliegung (vgl. auch Tab. 1). Dieser Wert ist um ca. 30% höher als bei den DMC-Bildern der Tiefbefliegung. Bei der Hochbefliegung wird der Kontrast abgeschwächt, daher die etwas höheren Zahlen, die auch in den nachfolgenden Digicam aufscheinen. Will man nun den Dynamikbereich der UltraCam mit den Bildern der Tiefbefliegung vergleichen, so sollte er wohl um etwa 30% reduziert werden.

### 3.3.3 Die Digicam von IGI

Bei dem in Vaihingen/Enz eingesetzten Aufnahmesystem Digicam handelt es sich um ein Kamerasystem. Insgesamt wurden vier divergierende Kameras auf einer Plattform montiert, liegen folglich keine Senkrechtaufnahmen vor sondern Schrägaufnahmen mit einem Nadir von ca. 15°, ähnlich wie bei der Pan-Kamera der DMC. Die Kamera wurde vom Hersteller für metrische Luftbildaufnahmen angepasst und basiert auf der digitalen Hasselblad. Die Aufnahmen entstehen mit Hilfe des Bayerfilters. Die Bilder liegen im 16-bit Format vor, die hellsten Bildtöne auf einen DN-Wert von 65'532 begrenzt sind, der durchaus erreicht wird. Bei den analogen Untersuchungen des Dynamikbereichs an der Digicam wurden Werte von 15 und 9 für die tiefgeflogenen Bilder erhalten und 22, 16 und 14 für den Hochflug. Die Wertkurven werden in Abb. 6 dargestellt. Auch hier wurde bei der Hochbefliegung die Kontrastwiedergabe in den dunklen Zonen deutlich abgeschwächt.

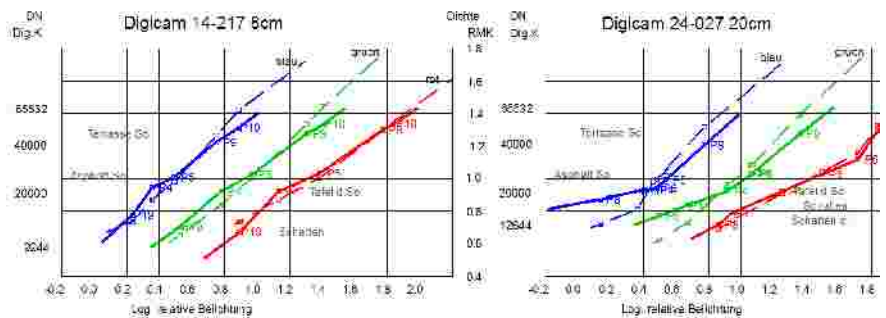


Abb. 6: Empirisch ermittelte Farbwertkurven für die Digicam (durchgezogen) im Vergleich zur RMK bzw. dem Agfa-Negativfilm (gestrichelte Linien), links die Tiefbefliegung, rechts die Hochbefliegung

### 3.3.4 Die Zeilenkamera ADS-40 von Leica Geosystems

Im Gegensatz zu den bisher analysierten Kamerasystemen ist die ADS-40 eine Zeilenkamera. Hinter einem einzigen Aufnahmeobjektiv wurden Zeilensensoren mit unterschiedlichen Empfindlichkeiten und Blickwinkeln angebracht. Zeilensensoren zeichnen sich durch einen großen Dynamikbereich aus, das heißt sie können im Allgemeinen eine wesentlich größere Lichtladungsmenge aufnehmen als die Elemente eines Flächensensors. Allerdings erlaubt die ADS-40 keine Kompensation der Bewegungsunschärfe.

Ermittelt man den Dynamikbereich im Vergleich zu den Aufnahmen der RMK so weist die ADS-40 überraschend große Werte auf (vgl. auch Abb. 7 und 8). Für die großmaßstäblichen Aufnahmen ergibt sich ein Wert von 90, 60 und 37 für die Kanäle rot, grün und blau und 115 für die Hochbefliegung (vgl. auch Tabelle 1). Für die RMK wurde ein Dynamikbereich von 23, 19 und 16 für die 3 Kanäle ausgewiesen; der Dynamikbereich der ADS-Aufnahmen demnach etwa 3-5-mal größer als bei den Filmaufnahmen und beträchtlich größer als bei Kameras mit Flächensensoren. Für die Auswertung standen nur orthorektifizierte Bilder zur Verfügung. Dies beeinträchtigt nicht den Dynamikbereich; allerdings wird durch den Resamplingprozess das Rauschen reduziert. Beim verwendeten bilinearen Resampling, re



sich das Rauschen etwa um 1/3; diese Reduktion wurde bei den ausgewiesenen Werten für Rauschen nicht berücksichtigt.

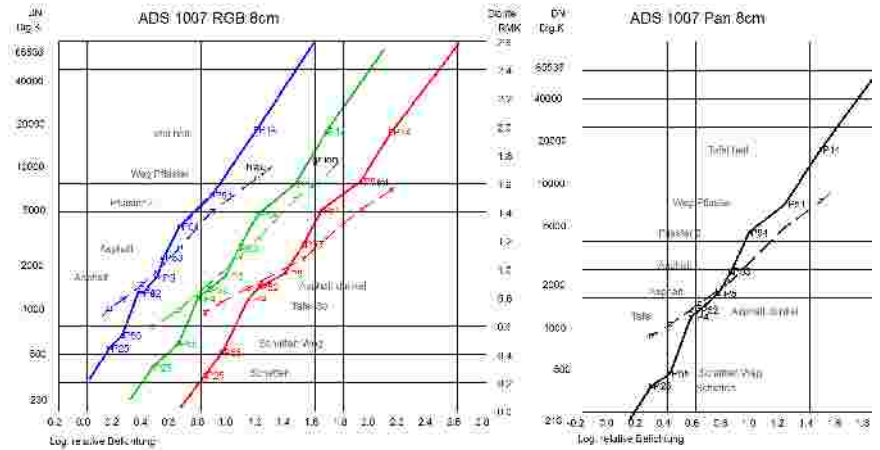


Abb. 7: Empirisch ermittelte Farbwertkurven für die Tiefbefliegung der ADS-40 (durchgezogen) im Vergleich zur RMK-Top bzw. dem Agfa-Negativfilm (gestrichelte Linien); links das RGB-Bild, rechts das Pan-Bild; diese Bilder wurden bei der Auslese jpeg-komprimiert.

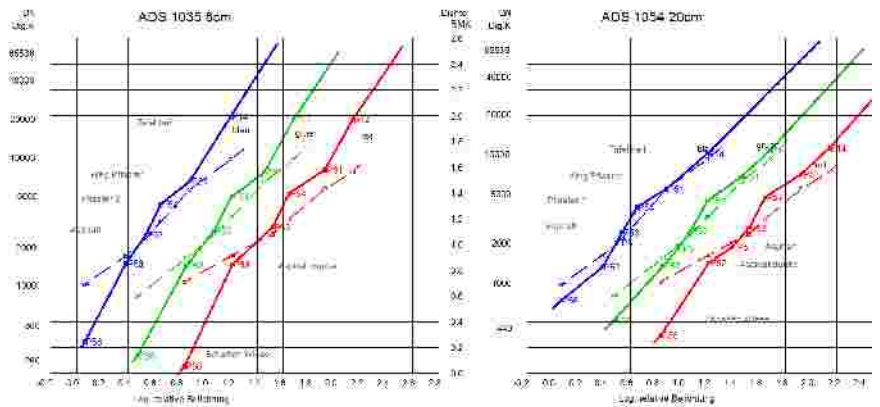


Abb. 8: Empirisch ermittelte Farbwertkurven für die Tief- und Hochbefliegung der ADS-40 (durchgezogen) im Vergleich zur RMK-Top bzw. dem Agfa-Negativfilm (gestrichelte Linien). Diese Bilder wurden bei der Auslese nicht komprimiert.

#### 4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die numerischen Ergebnisse der vorausgehenden Untersuchung wurden in Tabelle 1 zusammengefasst. Aufgeführt werden für eine Anzahl von Bildern der verschiedenen Aufnahmen:

der ermittelte Dynamikbereich (Kolonnen 4-6), ferner werden noch das Auflösungsvermögen (allerdings nur für die Tiefbefliegung), das ermittelte Rauschen (8) und das Gamma der Farbfunktion (7) aufgeführt. (Der Wert Gamma ist der Tangens der Steigung der Farbdichte  $\gamma$  im doppelten logarithmischen Maßstab). Der obere Teil der Tabelle betrifft den Tiefflug (Auflösung 8cm) wohingegen der untere Teil sich auf den Hochflug bezieht, mit Ausnahme des Auflösungsvermögens in Pixel.

Tab. 1: Zusammenfassung der Messwerte

Kamera	Boden- auf- lösung	Pixelauf- lösung für 8cm	Dynamik- bereich			Gamma	Rauschen in %
			rot	grün	blau		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
RMK-Top LT	8cm	2.0	22	21	16	0.9	$\pm 7.5$
DMC RGB	8cm	1.7	12	10	9	0.9	$\pm 1.1$
DMC pan	8cm	1.7		11		1.4	$\pm 1.1$
Digicam RGB	8cm	2.5	20	15	9	0.7	$\pm 1.2$
ADS-40 RGB (07)	8cm	1.7	90	60	37	1.4	$\pm 3.4$
ADS-40 pan (07)	8cm	1.7		74		1.3	$\pm 3.5$
ADS-40 RGB (35)	8cm	1.7	54	38	33	1.8	$\pm 2.7/3.5$
DMC RGB	20cm	1.7	19	11	9	1.0	$\pm 1.1$
DMC pan	20cm	1.7		16		1.2	$\pm 1.1$
UC pan	20cm	1.9		38 (27)		0.9	$\pm 1.1$
Digicam RGB	20cm	2.5	22	16	14	0.6	$\pm 1.2$
ADS-40 RGB (54)	20cm	1.7	119	98	115	1.2	$\pm 0.9$

Die ADS wurde mehrmals ausgewiesen; der Flugstreifen (07) weist eine Jpeg-Komprimierung bei der Zeilenauslese auf (vgl. auch Abb. 1, rechts), wohingegen die beiden Streifen (3) und (54) nicht komprimiert wurden. Bei den jpeg-komprimierten Streifen mussten Flächen, die sich verändernder Helligkeit zur Berechnung des Rauschens verwendet werden (vgl. Abb. 1, links). Für den Streifen (35) werden 2 Werte für das Rauschen ausgewiesen, der erste betrifft die Kanäle rot und grün, der 2. Wert bezieht sich auf den Blaukanal und ist betragsmäßig höher.

Generell erkennt man, dass der Dynamikbereich von DMC und Digicam recht begrenzt ist, kleiner als bei der RMK-Top Filmkamera, wohingegen bei der UltraCam der Dynamikbereich die RMK-Top heranreicht oder diesen sogar übersteigt. Allerdings konnte dieser Wert für die UltraCam wegen der zahlreichen Wolkenschatten beim Tiefflug nur für die Hochbefliegung berechnet werden. Ein ganz wesentlich größerer Dynamikbereich wurde für die ADS-40 ausgerechnet. Allerdings ergibt sich bei der Tiefbefliegung in den Schattenbereichen ein recht großes Rauschen, was die Detailerkennbarkeit doch empfindlich reduziert; dieser Effekt tritt bei der Hochbefliegung nicht mehr auf. Es scheint, dass die ADS-40 bei der Tiefbefliegung wegen der langen Belichtungszeit und dem Fehlen einer Kompensation der Bewegungsunschärfe im dunklen Bereich an eine Grenze stößt.

Wie bereits in Abb. 1 aufgezeigt, werden Schattenpartien bei der DMC wesentlich besser wiedergegeben, dies allerdings auf Kosten des Dynamikbereichs. Man kann sich nun fragen

Bilder der DMC nicht überbelichtet wurden. Würde man die Aufnahmen um einen Faktor 2 überbelichten, so nimmt das Rauschen zu, aber entsprechend der Binomialformel nur um den Faktor  $\sqrt{2}$ , was wohl für Schattenpartien vertretbar wäre. Der Dynamikbereich nimmt auch den Blaubereich hin ab, was andeuten könnte, dass dieser durch ein Dunst- bzw. Gelbfilter-Pan-Kanal erhöht werden könnte. Entsprechend Firmenangaben wird nur bei der ADS-40 im Pan-Kanal ein Gelbfilter verwendet.

Zur Charakterisierung des Rauschens wurden homogenen asphaltierten Flächen im Scanner verwendet; berechnet wurde der relative Wert (Pixel-Rauschen/DN-Wert mal 100). Diese ist damit unabhängig von der bit-Tiefe der DN-Werte. Analysiert man diese Werte im Scannerbereich, so ergibt sich der Eindruck, dass Zahlen um  $\pm 1\%$  oder vielleicht auch  $\pm 1.5\%$  normierbar sind, wohingegen die Bilder der Filmkamera mit einem Wert von  $\pm 7.5\%$  sicher rauscht sind (vgl. auch Abb.1, 2. Bild von links). Auch die Werte um  $\pm 3\%$  für die A scheinen zu hoch. Es entspricht weitgehend dem Photonenrauschen bei der Bildaufnahme. Natürlich könnte man argumentieren, dass dieses Rauschen bei der ADS-40 durch die Orthorektifizierung reduziert wurde. Genauso sollte die geringere Auflösung etwa der Digicam eine Reduktion des Rauschens bewirken. Allerdings würden entsprechende Korrekturen das Gesamtbild nicht substantiell verändern.

Der Dynamikbereich ist bei der Hochbefliegung im Allgemeinen um 30% höher als bei der Tiefbefliegung. Dies mag mit der Eichung der Referenzflächen zusammenhängen, denn die stammen von der Tiefbefliegung. Für die Hochbefliegung standen die originalen Filmnegative nicht zur Verfügung. Dieser Effekt ist vor allem bei der Beurteilung der UltraCam zu berücksichtigen, wenn der Dynamikbereich in Beziehung zur Filmkamera gesetzt wird.

#### 4.1 Bildreproduktion

Obgleich der Dynamikbereich der digitalen Aufnahmen, gemessen als Belichtung, kaum übersteigt, weisen die numerischen Werte der Bilder eine wesentlich größere Spannweite auf. Dabei stellt sich nun die Frage wie diese Bilder optimal in 8-bit Bilder umzuwandeln sind, wie diese visualisiert werden können. Dabei sollten 3 Aspekte berücksichtigt werden:

1. Die DN-Werte aller bisher untersuchten digitalen Aufnahmen reichen nicht bis zum Nullwert, sondern weisen einen Minimalwert auf, unterhalb dessen keine Information mehr weitergegeben wird. Dieser Bereich sollte abgeschnitten werden, da hierin keine Information erhalten ist (vgl. A, Abb. 9)
2. Der anschließende Schattenteil (vgl. B, Abb. 9) sollte möglichst stark gespreizt werden, um eine große Detailwiedergabe zu ermöglichen. Dies ist sinnvoll, da digitale Aufnahmen ein sehr geringes Rauschen aufweisen (vgl. auch Abb.1). Im Extremfall bei eben diesem Rauschen die mögliche Spreizung.
3. Im weiteren helleren Teil der Histogrammwerte sollte eine langsam abflachende Wertebekurve gewählt werden. Dies ist zulässig, da im hellen Bereich selten geringe Intensitätsunterschiede entscheidend sind; andererseits ist diese Beschränkung auch wegen des begrenzten Spielraums nötig.

Entsprechend diesem Prinzip konnte bei der Erstellung von Orthophotos für den Kanton Solothurn (2000km<sup>2</sup>) eine sehr zufriedenstellende Bildwiedergabe erreicht werden; dies traf auch auf die über das Internet verbreiteten Bilder zu. Das ist bemerkenswert als doch Internetbrowser

Allgemein nicht über eine Möglichkeit zur individuellen Farbtonkorrektur verfügen. In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, dass die Empfindlichkeit des menschlichen Auges keinesfalls den Bereich von 8-bit also 255 Grauwerte umfasst, sondern wesentlich geringer ist. Allerdings ist die Bildwahrnehmung nicht linear und erfolgt auf Grund eines komplexen psychologischen Prozesses.

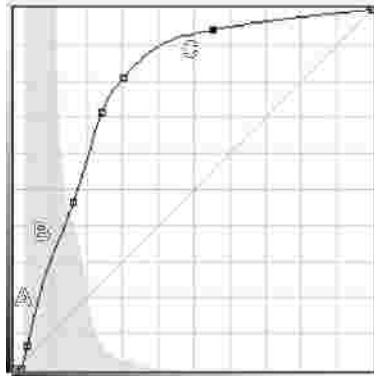


Abb. 9: Grauwertwiedergabekurve für die Umwandlung eines 16-bit Bildes in ein 8-bit Bild und Visualisierung, angewendet für die Erstellung von digitalen Orthophotos des Kantons St. Gallen. Die Aufnahmen erfolgten mit der UltraCam, Das Histogramm ist begrenzt auf Werte zwischen 0 und 12'000

#### 4.2 Danksagung

Vorliegende Untersuchung erfolgte erst nach dem weitgehenden Abschluss des Projekts und wurde als Ergänzung gedacht. Der Autor möchte sich bei der Projektleitung und vor allem bei Cramer für die sehr entgegenkommende Unterstützung bedanken. Sehr dankbar bin ich auch den Firmenvertretern, Herrn Dörstel (Z/I Imaging), Herrn Gruber (Vexcel), Herrn Kremer (DJI) und Herrn Beisl (Leica-Geosystems) für ihre entgegenkommende Beratung; sehr wertvolle Ergänzungen lieferte auch Herr Weyand (RWE). Die Firma RWE führte den Bildflug mit dem RMK-Top und der DMC aus. Die nachträgliche Bildabtastung wurde freundlicherweise vom Schweizer Bundesamt für Landestopographie ausgeführt, wofür ich mich bei den Herren St. Bovet und Röthlisberger bedanken möchte.

#### 4.3 Literaturangaben

- CRAMER, M., 2010: The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation – Overview and Design. PFG 2/2010, 73-82.
- JACOBSEN, K., 2008: Geometrisches Potential und Informationsgehalt von großformatigen Luftbildkameras. PFG 5/2008, 325-336.
- SANDAU, R., 2005: Digitale Luftbildkamera: Einführung und Grundlagen. 342 S., Wichmann, ISBN 3-87907-391-0.
- GRUBER, M., 2010: Neue Testaufnahmen und erste Auswertungen zur Radiometrie der UltraCam. 5 S, interne Publikation von Microsoft.