

# Überlegungen zum Dynamikbereich von digitalen, flächenbasierten Luftbildkamarasystemen vom Testflug Vaihingen/Enz

OTTO KÖLBL<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Entsprechend den Kalibrierungsangaben weisen digitale Luftbildkameras einen Dynamikbereich von etwa 1:1000 auf, mit Filmkameras wird bei Farbaufnahmen nur ein Dynamikbereich von etwa 1:100 erreicht. Analysiert man dagegen die Bildaufnahmen so ergibt sich für die digitalen Kameras ein Wert von 1:10 bis 1:20, wohingegen für die Filmaufnahmen mit Negativfilm eher ein höherer Wert erreicht wird; lediglich die Bilder der UltraCam reichen an den Dynamikbereich des Films heran oder übersteigen ihn. Im hellen Bereich wird der Dynamikbereich durchwegs durch den Sensor begrenzt wohingegen im dunklen Bereich, also Schattenpartien, anscheinend das Luftlicht der begrenzende Faktor ist. Allerdings sollte es möglich sein das Luftlicht durch eine geeignete Filterung in den Schattenpartien besser zu durchdringen. Wahrscheinlich ließe sich auch die Dynamik im hellen Bereich durch eine entsprechende Belichtung verbessern.*

## 1 Problemstellung

Beim Testflug Vaihingen von 2008, unter der Leitung des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, wurden die wichtigsten digitalen Aufnahmesysteme und die Filmkamera RMK-Top eingesetzt. Ziel des groß angelegten Tests war es, die verschiedenen Aufnahmesysteme vergleichend zu analysieren. Der Versuch konnte inzwischen mit einer sehr umfangreichen Publikation abgeschlossen werden (CRAMER u.a.). Nur am Rande wurde dabei auch die Frage nach dem Dynamikbereich 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 anstrebt Schattenpartien einzusehen und auch helle Partien noch wiederzugeben. Ergibt sich nun mit den digitalen Kamerasystemen die Möglichkeit diese Aufgabe besser zu lösen als mit den Filmaufnahmen, bei denen vor allem die Einsehbarkeit in Schattenpartien recht begrenzt war? Entsprechend den radiometrischen Angaben der Hersteller weisen digitale Kameras durchaus einen Dynamikbereich von 1:1000 oder 60 Dezibel auf, wohingegen dieser Wert bei Luftbildfilmen, vor allem bei Farbfilmen wesentlich kleiner ist.

Im Folgenden wird nun versucht den Dynamikbereich an Hand der Bilder des Testflugs abzuleiten. An sich wurden für derartige Analysen Testtafeln ausgelegt und zum Zeitpunkt des Überflugs verschieden radiometrische Messungen ausgeführt. Auswertungen dieser Messungen erfolgten etwa in Hinblick auf die automatische Objektklassifikation basierend auf der spektralen Bildwiedergabe (vgl. VON SCHÖNERMARKER). Mit der Linearität der Sensoren und dem Rauschen befasste sich auch HANUSCH ohne aber unmittelbar auf den eigentlichen Dynamikbereich der Aufnahmen einzugehen.

1) Otto Kölbl, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Chemin de l'Eglise 17, CH-1066 Epalinges, Schweiz; E-Mail: [otto.koelbl@epfl.ch](mailto:otto.koelbl@epfl.ch)

In der nachfolgenden Analyse wird im Wesentlichen der Dynamikbereich aus einem Vergleich der digitalen Aufnahmen mit den Filmaufnahmen abgeleitet. Diese Filmaufnahmen lassen sich an Hand von sensitometrischen Kontrollstreifen eichen. Damit lässt sich auf die Leuchtdichte an der Aufnahmekamera schließen. Da die digitale Kamera DMC und die Filmkamera RMK-Top simultan geflogen wurden, lassen sich die Werte unmittelbar auf diese digitale Kamera übertragen. Eine Übertragung auf die anderen Aufnahmesysteme ist an sich nur sehr begrenzt möglich, liefert aber trotzdem recht interessante Aufschlüsse.

Entsprechend dieser Analyse ist der Dynamikbereich von digitalen Bildaufnahmen keinesfalls größer als bei den vergleichenden Filmaufnahmen, abgesehen vielleicht von der UltraCam. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass bei sämtlichen digitalen Aufnahmen an hellen Objekten die Grenze der Leistungsfähigkeit erreicht wurde. Im dunklen Bereich wird der Dynamikbereich wohl durch das Luftlicht beschränkt. Die panchromatischen Sensoren, welche im Zuge des Pansharpenings für die Dynamik bestimmend sind, registrieren aber über den gesamten Spektralbereich einschließlich des Blaulichtes. Dadurch dürfte die Detailerkennbarkeit in Schattenpartien beträchtlich reduziert werden. Im Gegensatz dazu werden beim Film die 3 Farbkanäle unabhängig registriert. Trotzdem ist hierbei die Objekterkennbarkeit in den Schattenpartien gegenüber den digitalen Aufnahmen wegen des stärkeren Rauschens reduziert.

Diese Untersuchungen wurden aus technischen Gründen auf die flächenbasierten Aufnahmesysteme beschränkt. In die Untersuchungen wurden die Digicam von IGI, die DMC von Z/I-Imaging und die UltraCam von Microsoft, Voxel Imaging, einbezogen. Die Filmaufnahmen erfolgten mit dem Agfa Negativfilm X100 PE1 und der RMK\_Top von Zeiss Oberkochen, heute Z/I Imaging.

## 2 Dynamikbereich entsprechend Angaben der Hersteller

### 2.1 Definition des Dynamikbereichs der Kamera

Als Dynamikbereich (DR) wird das Verhältnis des maximalen Ausgangssignals (Sättigungsgrenze eines Pixels) zu seiner Lichtempfindlichkeit bezeichnet. Die Lichtempfindlichkeit eines CCD wird begrenzt durch das Dunkelstromrauschen. Die Angabe des Dynamikbereichs erfolgt in elektronischen Fachkreisen in logarithmischer Form also in Dezibel [dB] (vgl. u.a. : SANDAU).

$$DR = 20 * \log (FW/D)$$

DR: Dynamikbereich; FW Totale Ladungsmenge (Full Well)

D: generierter Dunkelstrom

Im Folgenden wird der Dynamikbereich vorwiegend mittels des einfachen Verhältnisses angegeben und nicht in der logarithmischen Form, dies wegen der größeren Anschaulichkeit. Dabei wird die höchste noch fassbare „Belichtung“ (Leuchtdichte mal Belichtungszeit) anstelle der totalen Ladungsmenge benutzt, da letztere nur indirekt ermittelt werden kann. Auch der Dunkelstrom ist im Allgemeinen nicht fassbar, denn dieser wird bei der Bildprozessierung meist korrigiert. Demgegenüber sind aber die dunkelsten Bildstellen nach dem Grau- oder Farbwert (DN: digital number) und dem Rauschen charakterisiert. Im Folgenden wurde der Dynamikbereich der Kameras aus dem Verhältnis zwischen Rauschen im Dunkelbereich (DN=0) und dem maximalen Farbwert (Pixelwert) berechnet. Für die analysierten Bilder wurde dagegen auf die

Belichtung zurückgegriffen und es wurde das Verhältnis zwischen minimal noch bildwirksamer Belichtung und maximaler Belichtung zur Berechnung des Dynamikbereichs verwendet.

## 2.2 Dynamikbereich der Kamera DMC abgeleitet aus dem Kalibrierungsprotokoll

Die Firma Z/I Imaging liefert ein sehr umfangreiches Kalibrierungsprotokoll zu jeder Kamera, in dem auch radiometrische Angaben gemacht werden. Unter anderem wird die spektrale Empfindlichkeit der Kameras, die Sensorempfindlichkeit (Sensor linearity) und das Rauschen in Abhängigkeit der Grauwert ausgewiesen.

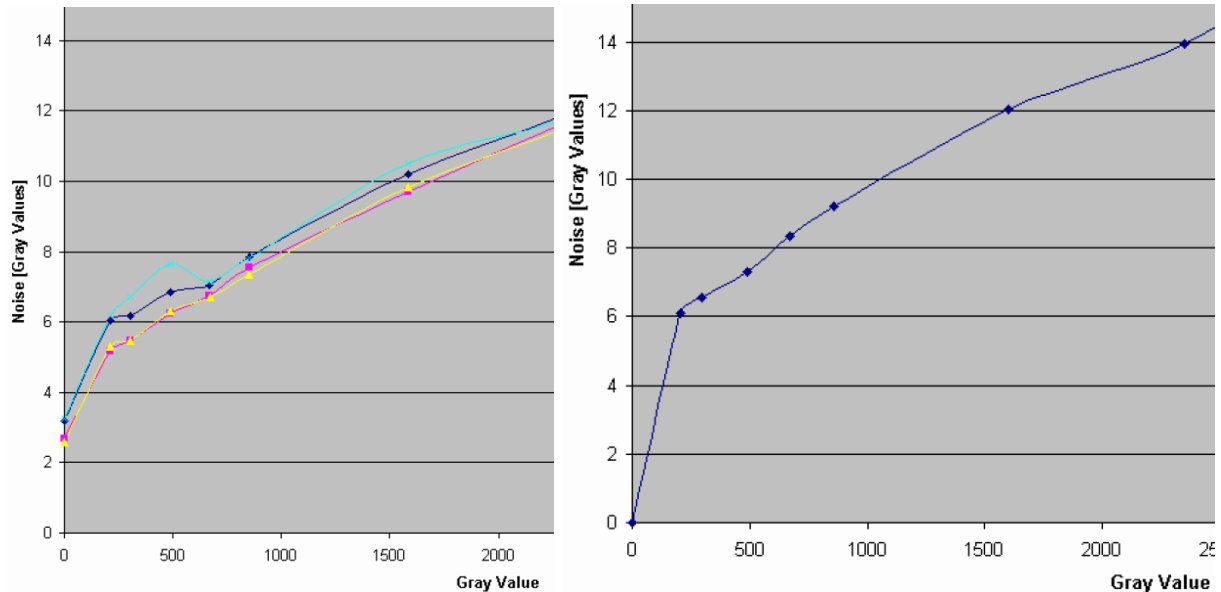


Abb. 1: Rauschen in Funktion der Grauwerte, links die Werte für die Pan Kamera, rechts für die blauempfindliche Kamera mit kleinerem Bildformat.

Eine explizite Angabe zum Dynamikbereich wird nicht gegeben. Will man diesen aus obigen Angaben berechnen, so ergibt sich der Dunkelstrom für die Pankamera aus dem Rauschen mit 3 und der maximale Grauwert mit 4095; es resultiert also eine Verhältniszahl von 1:1350 oder in Dezibel ein Wert von 63. Etwas geringer ist der Dynamikbereich bei den Farbkameras wegen des höheren Rauschens.

## 2.3 Dynamikbereich der UltraCam

In dem Kalibrierungsdokument der UltraCam werden keine Angaben zum Rauschen oder der Linearität der Sensoren gemacht; ausgewiesen wird lediglich ein Schwellwert für den Grauwert (Intensity Threshold), **dieser wird mit 7600 DN beziffert.**

Auf eine entsprechende Rückfrage bei der Herstellerfirmen Vexcel erhielt ich Bildbeispiele mit denen einerseits die Linearität zwischen der Belichtung und den Grauwerten nachgewiesen wird. Zudem wurde im Rahmen einer internen Studie der Dynamikbereich mit ca. 1:1000 abgeschätzt. (GRUBER). Das Rauschen wurde bei einem Grauwert von 4000 mit 22 beziffert. Für kleinere Grauwerte nimmt die Streuung entsprechend der Binomialformel ab. Für höhere Grauwerte, etwa ab 7000, nimmt die Streuung ebenfalls ab, was auf eine Übersteuerung zurückgeführt wird.

Diese Untersuchungen wurden mit der UltraCam Xp ausgeführt, wohingegen beim Bildflug Vaihingen/Enz die UltraCam X eingesetzt wurde. Trotzdem dürften diese Überlegungen in etwa übertragbar sein. Man muss aus dieser Untersuchung schließen, dass der Schwellwert von 7600 wohl eher an der oberen Limite liegt und vorwiegend der Bereich bis 4000 für die Abbildung verwendet werden sollte. Höhere Belichtungen als 7600 werden aber noch bildwirksam wiedergegeben, sind aber nur mit Einschränkungen numerisch nutzbar.

## 2.4 Dynamikbereich der RMK-Top Filmaufnahmen entsprechend der Leistungsfähigkeit des Films.

Bei photographischen Aufnahmen wird der Dynamikbereich im Wesentlichen durch den Film vorgegeben. Bei den Vergleichsaufnahmen wurde die RMK-Top, bestückt mit dem Agfa Negativfilms X100 PE1, eingesetzt. Diese Aufnahmen erfolgten simultan mit der DMC-Kamera. Die Farbdichtefunktion und Angaben zur Körnigkeit lassen sich den technischen Datenblättern des Filmherstellers entnehmen. In Abb. 2 wird die Farbdichtefunktion für eine Entwicklungszeit von 5 Minuten 20 Sekunden wiedergegeben.

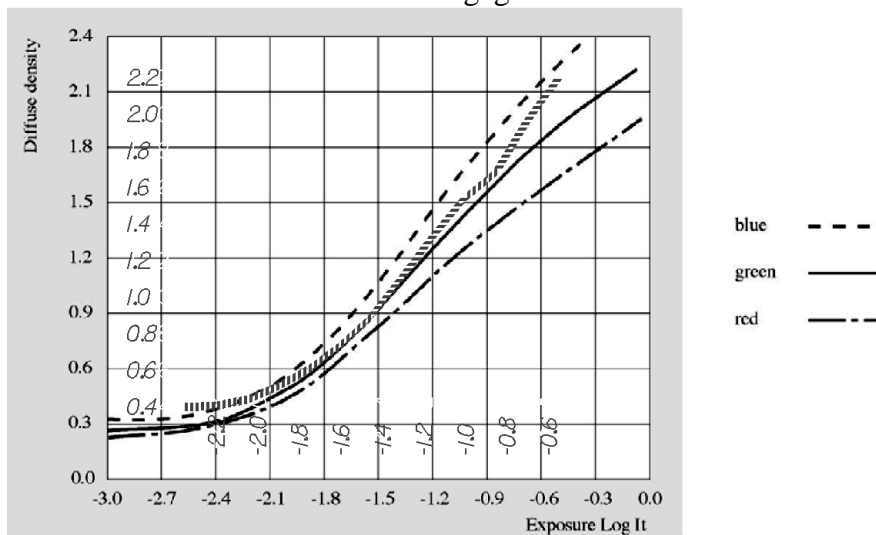


Abb. 2: Farbdichtefunktion des Agfa Negativfilms X100 PE1 überlagert mit den am Graukeil gemessenen Werten für den Grünkanal (kurz-strichliert und Werte in Italic).

Um die effektive Farbdichtefunktion zu überprüfen wird der Film im Allgemeinen sensitometrisch überprüft. Dazu wurden von der Flugfirma RWE Graukeile am Anfang und Ende der Flugstreifen aufbelichtet. Die Kontrollmessung dieser Graukeile an einem Densitometer liefert die kurzgestrichelte Kurve von Abb. 2; diese bezieht sich nur auf den Grünkanal. Entsprechend den Sensitometermessungen liegt der Schleier bei einer Dichte von 0.33 im Blau- und Rotbereich und bei 0.37 im Grünbereich.

Die größten Werte wurden am Graukeil mit 1.50, 1.80 und 1.55 D in den Kanälen rot grün und blau gemessen. Allerdings lassen sich in den Randbereichen des eigentlichen Graukeils Zonen ausmachen, die im Grünbereich bis zu einer Dichte von 2.2 D ansteigen. Aus diesem Grund wurde die gestrichelte Kurve in der Abb. 2 bis 2.2 verlängert, dafür liegen allerdings keine Abszissenwerte vor. Entsprechend der Agfa-Information würde hier die Dichtefunktion abflachen. Welche maximale Schwärzung effektiv möglich ist lässt sich nicht feststellen. Ganz grob

lässt sich damit der Dynamikbereich des Films mit 2.0 D (Belichtung von -2.35 D bis -0.35 D) oder 1:100 angeben. Dieser Wert ist um einen Faktor 10 geringer als für die digitalen Kameras.

### 3 Abschätzung des Dynamikbereichs der Luftbilder des Testflugs

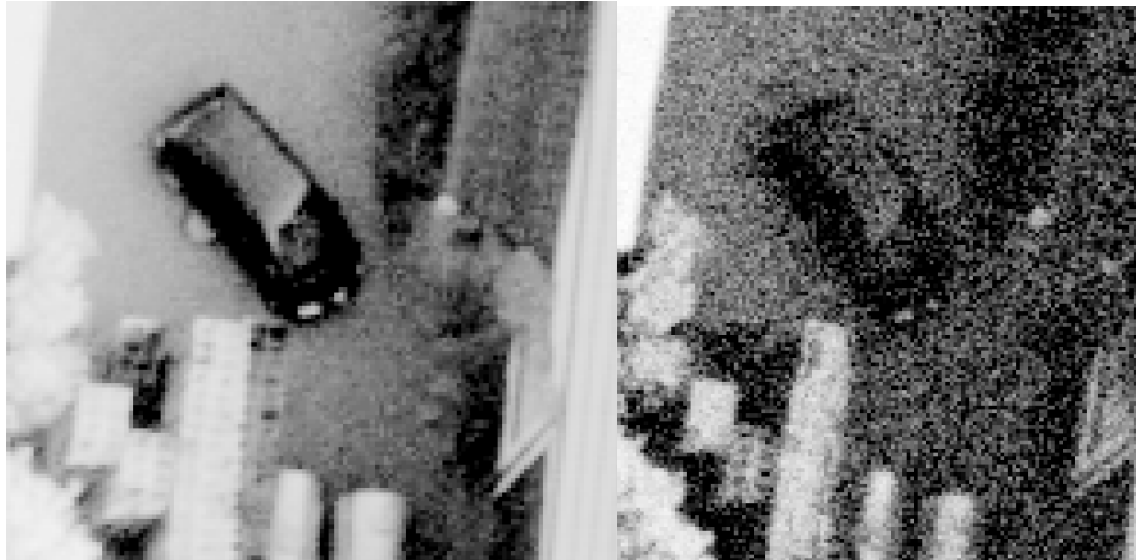


Abb. 3: Illustration des unterschiedlichen Rauschens an einem dunklen Objekt bei einer digitalen Kamera (DMC, links) und der Filmkamera RMK-Top (rechts); es handelt sich um ein schwarzes Auto im Schatten

Obgleich digitale Kameras einen höheren Dynamikbereich aufweisen als Filmkameras kommt dieser Effekt bei den praktischen Aufnahmen nicht zum Tragen, viel entscheidender ist dagegen ihr geringeres Rauschen (vgl. Abb. 3). Wahrscheinlich ließe sich das RMK-Bild noch durch Bildverarbeitung etwas verbessern, aber die Problematik, der verminderten Bildererkennung durch das Rauschen an Filmaufnahmen bleibt bestehen.

#### 3.1 Vergleichende Abschätzung des Dynamikbereichs von RMK-Top und DMC

Im Folgenden wird an Hand der Simultanaufnahmen von der RMK-Top und der DMC der Dynamikbereich abgeschätzt. Dabei kann man davon ausgehen, dass die Beleuchtungsverhältnisse praktisch ident sind. Als Referenz für die Abschätzung der Leuchtdichte im Objektraum konnten die RMK-Top Bilder zusammen mit den sensitometrischen Kontrollstreifen herangezogen werden. Zur Erzeugung dieser Kontrollstreifen wird ein standardisierter Graukeil mit einer logarithmischen Abstufung von 0.15 verwendet. Diese Kontrollstreifen wurden an einem Densitometer ausgemessen, ferner wurden sie an einem Scanner zusammen mit einigen Luftbildern erneut abgetastet. Dabei wurde darauf geachtet, dass der gesamte Dynamikbereich der Filmnegative innerhalb des Abtastbereichs des Scanners liegt. Die Abtastung erfolgte am PhotoScan von Z/I Imaging in 12 bit freundlicherweise durch das Schweizer Bundesamt für Landestopographie.

In der Folge wurde eine Serie von Objekten auf den beiden Aufnahmen identifiziert und deren Grauwerte gemessen (vgl. Tabelle 1). Die Messungen beschränkten sich nicht auf einzelne Pixel,

sondern es wurden Profile zwischen 10 und 200 Pixel gemessen und Mittelwert und Streuung ermittelt.

Tab. 1: Gegenüberstellung der Grautonwerte und der entsprechenden logarithmischen Werte von ausgewählten Objekten im RMK-Bild 027 und dem Bild 63 (Nr.10030063) der DMC

Nr.	Objekt- beschreibung	RMK	RMK-Top	RMK	RMK-Top	Belichtung	DMC 63	DMC 63	DMC 63	DMC 63
		Negativ Grauwert	Rauschen des Mittels	Positiv Dichte log.	Rauschen log. Wert	relativ log. Wert	Farbwert log. Wert	Rauschen log. Wert	Farbwert natürlicher Wert	Rauschen des Mittels
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
T1	Extrem DMC	--	--	--	--	0.407	2.714		518	
T2	Extrem RMK	1729	10.1	0.603	0.003	0.460	2.776	0.002	596	2.3
P1	Mauer Schatten	1729	10.1	0.603	0.003	0.460	2.776	0.002	584	2.3
P8	Hof Schatten	1642	13.3	0.627	0.004	0.500	2.802	0.004	694	5.3
P11	Hof Schatten hell	1326	11.4	0.726	0.005	0.666	2.990	0.001	1004	2.3
P4	Tafel dunkel	803	14.0	0.959	0.009	0.918	3.136	0.000	1645	
P5	Asphalt besonnt	619	6.3	1.080	0.005	1.058	3.295	0.001	1907	3.8
P6	Dach	607	5.4	1.089	0.006	1.068	3.301	0.001	2012	5.4
P9	Parkplatz besonnt	316	7.5	1.393	0.012	1.361	3.559	0.001	3635	4.4
P10	Pflaster besonnt	282	7.5	1.445	0.017	1.410	3.601	0.001	4023	3.2
T3	Extrem DMC					1.418	3.612		4095	3.2
P20	Hauswand	137		1.781		1.783	überstr.	überstr.	überstr.	
	<b>Differenz</b>			<b>RMK :</b>	<b>P20-T2</b>	<b>1.383</b>	<b>DMC :</b>	<b>T3-T1 (7)</b>	<b>1.012</b>	
	<b>Dynamikbereich</b>			<b>RMK :</b>	<b>P20-T2</b>	<b>21.0</b>	<b>DMC :</b>	<b>T3:-T1 (7)</b>	<b>10.3</b>	

Zur Veranschaulichung des Vorgehens wurden in Tabelle 1 die entsprechenden Messwerte für den Grünkanal zusammengefasst. Zunächst wurde der mittlere Grauton (DN) im RMK-Negativ ermittelt (Kolonne (3)). Dieser wurde durch Inversion ( $k/DN$ ) in den entsprechenden Grauwert des Positivs umgewandelt. Anschließend wurde der Logarithmus berechnet und eine Gammaanpassung vorgenommen (5). Diese Anpassung errechnete sich aus den Sensitometerstreifen und beträgt für den Grünkanal 1.070.  $k$  ist eine Konstante und wurde so gewählt, dass die resultierenden logarithmischen Werte im hellen Bereich (dunkel im Negativ) möglichst gut mit der ebenfalls logarithmisch ausgewiesenen Belichtung übereinstimmen. Dieser Wert ( $k$ ) erleichtert nur den Vergleich der Zahlen, ist aber an sich bedeutungslos. Die relative Belichtung (korrekter Leuchtdichte) selbst (7) wurde ebenfalls an Hand des Sensitometerstreifens bestimmt, wobei die Zuweisung nach einer Interpolation entsprechend dem gemessenen Densitometerwert und der relativen Belichtung erfolgte. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die einzelnen Felder des Sensitometerstreifens entsprechend dem  $\text{Log}(\sqrt{2})$  abgestuft sind. Bei der Grautonmessung wurde auch noch der mittlere Fehler des Mittels (4) ermittelt und der entsprechende logarithmische Wert (6) ausgewiesen. Die Differenz aus der relativen Belichtung für die Objekte T2 und P20 ergibt nun unmittelbar den Logarithmus des Dynamikbereichs des RMK-Bildes.

Die analogen Werte für das DMC-Bild wurden in den nachfolgenden Spalten ausgewiesen; der DN-Wert (Farbwert) findet sich in Kolonne (10) der entsprechende logarithmische Wert in Kolonne (8) und der Logarithmus des Dynamikbereichs errechnet sich aus der Differenz von T1 und T3 wieder von Kolonne (7) da die Leuchtdichte an den entsprechenden Objekten gleich ist.

Für die drei Kanäle des RMK-Bildes ergeben sich die Werte: 22; 21; 16 und für die DMC die Werte 13; 11; 9 (vgl. auch Tabelle 2). Der Dynamikbereich für die DMC ist kleiner, da die hellsten Objekte bei der DMC überstrahlt sind. Keine großen Unterschiede ergeben sich bei den dunklen Tönen obgleich im Wald bei der DMC noch Bildelemente (T1) mit dunkleren Tönen auszumachen sind als die dunkle Mauer (P1); offensichtlich dürfte das Luftlicht im dunklen Bereich den Dynamikbereich begrenzen (vgl. auch Abb. 4).

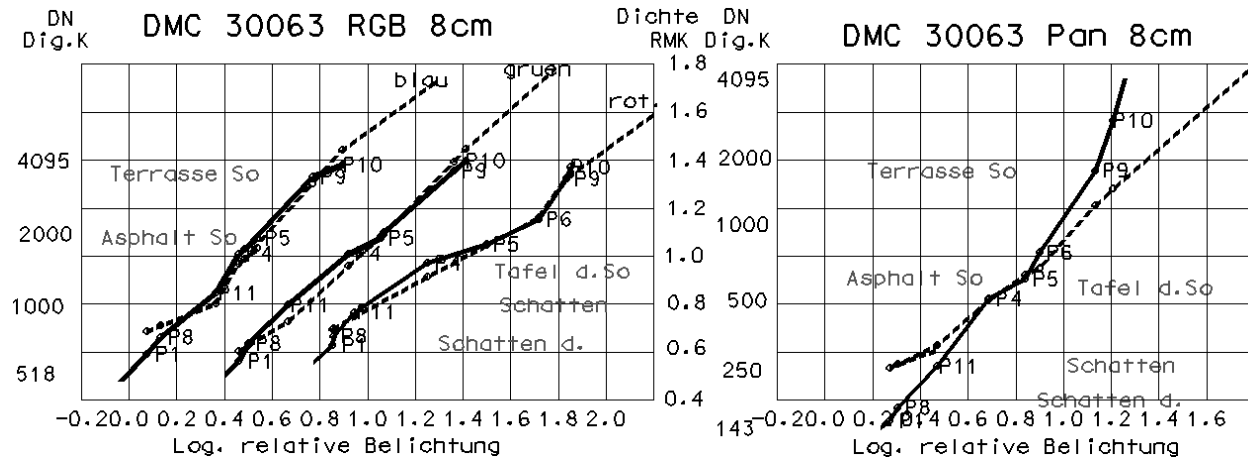


Abb. 4: Empirisch ermittelte Farbwertkurven für die DMC (durchgezogen) im Vergleich mit der RMK-Top bzw. dem Agfa-Negativfilm (gestrichelte Linien). Links die Kurven für das Bild 63 RGB, rechts das Pan Bild 63; die entsprechenden Grauwerte wurden für den Farbfilm durch Mittelung der 3 Kanäle berechnet. Beim RGB-Bild links wurden die Kurven für die 3 Kanäle auseinander gezogen, um die Erkennbarkeit zu verbessern. Die Punktnummern P1 usw. bezeichnen spezifische Objekte (vgl. auch Tabelle 1). Die Dichtewerte für die RMK gelten für beide Darstellungen

Die dunkelsten Objekte bei der RMK mit einem Grauwert von ca. 1700 oder einem logarithmischen Wert von 0.46 reichen noch nicht an den Schleier heran, dieser liegt bei 2800 bzw. bei 0.35 D. Genauso wenig wird der Dynamikbereich der DMC ausgeschöpft. Mit 500 DN im RGB-Bild oder 143 im Pan-Bild ist die Empfindlichkeit der DMC im Prinzip noch nicht ausgeschöpft. Wohl wurde aber bei den hellen Tönen eine Sättigung erreicht. Man kann sich daher fragen, ob die Bilder der DMC nicht um etwa einen Faktor 2 überbelichtet sind? Wahrscheinlich ließe sich der Dynamikbereich der DMC-Aufnahmen durch eine geringere Belichtung erhöhen.

Die Tonwiedergabe bei der RMK und dem DMC-RGB-Bild ist sehr ähnlich (vgl. Abb. 4); die logarithmischen Grauwerte weisen für alle Objekte eine nahezu konstante Differenz von 2.17 auf. Das bedeutet, dass in den dunklen Bereichen die Empfindlichkeit etwas abnimmt und kein streng linearer Zusammenhang zwischen der Belichtung und den Grauwerten besteht. Das zeigt sich auch, wenn man den Dynamikbereich an Hand der gemessenen Grauwerte ermitteln würde. Hierbei ergeben sich für die 3 Farbkanäle die Verhältniszahlen: 7; 8 und 8. Diese Werte sind kleiner als entsprechend der Belichtung.

Betrachtet man die Pan-Bilder der DMC so resultiert eine beträchtlich steilere Grauwertkurve als bei den RGB-Bildern (vgl. Abb. 4 rechts); das bedeutet, dass die Pan-Bilder eine größere Grada-

tion aufweisen als die Farbbilder; dies ist wohl auf unterschiedliche Look-up-Tables zurückzuführen; leider liegen darüber keine speziellen Angaben vor.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass der Dynamikbereich im Rotkanal bei den RMK-Bildern höher ist als im Blaukanal. An sich nicht überraschend, denn bei Schwarzweissaufnahmen wird doch im Allgemeinen mit einem Gelbfilter geflogen, um den Effekt des Luftlichtes zu reduzieren. Man kann sich nun fragen, ob es nicht sinnvoll wäre auch beim Pankanal der Digitalkameras ein Gelbfilter oder gar ein Orangefilter zu verwenden um das Luftlicht besser zu durchdringen. Jedenfalls scheint dieser Effekt zu bestätigen, dass die Tonwiedergabe im dunklen Bereich durch das Luftlicht begrenzt wird.

Leider konnten die Testtafeln nur sehr begrenzt zur Analyse der Gartonwiedergabe benutzt werden, da die dunkelsten Partien erst in den Schatten gefunden werden und hier keine Tafeln ausgelegt wurden. Bei einer globalen Beurteilung der Bilder ist es sicher wichtig auch die Detailwiedergabe in den Schattenpartien mit einzubeziehen.

### **3.2 Dynamikbereich der Bilder der UltraCam**

Die UltraCam (UC) wurde nicht am gleichen Tag eingesetzt wie die RMK; das gleiche Problem ergibt sich übrigens auch bei der Digicam. Ferner weisen die großmaßstäblichen Bilder der UltraCam Wolkenschatten auf. Das hat zwar den Vorteil, dass man Schattenzonen, die in den Bildern der DMC kaum einsehbar sind, nun einsehen kann. Für eine Analyse des Dynamikbereichs sind sie aber wegen der wechselnden Beleuchtungsverhältnisse kaum geeignet. Demgegenüber erfolgte der Hochflug bei sonnigen Wetter (Flughöhe ca. 2500m über Grund). Die Farbbilder liegen nur in 8-bit vor und das Histogramm umspannt den Bereich von 0 bis 255; demgegenüber liegen die Pan-Bilder in 16-bit vor und umfassen den gesamten Dynamikbereich. Um sicherzustellen, dass die Beleuchtungsverhältnisse homogen sind wurden die Grauwerte von Asphaltstraßen über das ganze Bild gemessen. Diese variieren bei vergleichbaren Straßen lediglich um 10%. Weiters wurde die Grauwertkurven vergleichend mit den DMC-Bildern kartiert (vgl. Abb. 5). Demnach sind die Abstände zwischen dunklen Objekten in der Sonne (P4 oder P5) und Schattenobjekten (P8 oder P11) in etwa proportional. Daraus wurde geschlossen, dass die Beleuchtungsverhältnisse bei den beiden Hochbefliegungen in etwa vergleichbar sind, jedenfalls innerhalb der hier angestrebten Genauigkeit von vielleicht 20%.

Bei der Ermittlung des Dynamikbereichs wurde analog vorgegangen wie bei der DMC. Für das Panbild ergibt sich ein Dynamikbereich von 27 aus der Belichtung und ein Wert von 18 falls die Grauwerte betrachtet werden. Der minimale DN-Wert beträgt 411 für Bildelemente (tiefe Schatten unter Bäumen) und der Maximalwert 7600, entsprechend dem vorgegebenen Schwellenwert. An sich können noch Bildelemente mit höheren DN-Werten gefunden werden, allerdings lassen sich diese nicht mehr eindeutig den RMK-Bildern zuordnen, da es sich wahrscheinlich um Spiegelreflexion handelt und sie dürften zudem übersteuert sein. Die Grauwertwiedergabe ist nicht streng linear zur Belichtung wie 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 Schatten im Wald identifiziert und gemessen werden, ähnlich wie bei den großmaßstäblichen Aufnahmen der DMC. An sich ergibt sich für die UltraCam nun ein höherer Dynamikbereich als für die DMC; dieser Wert erklärt sich wohl durch den höheren Schwellenwert von 7600 gegenüber 4095 für die DMC.



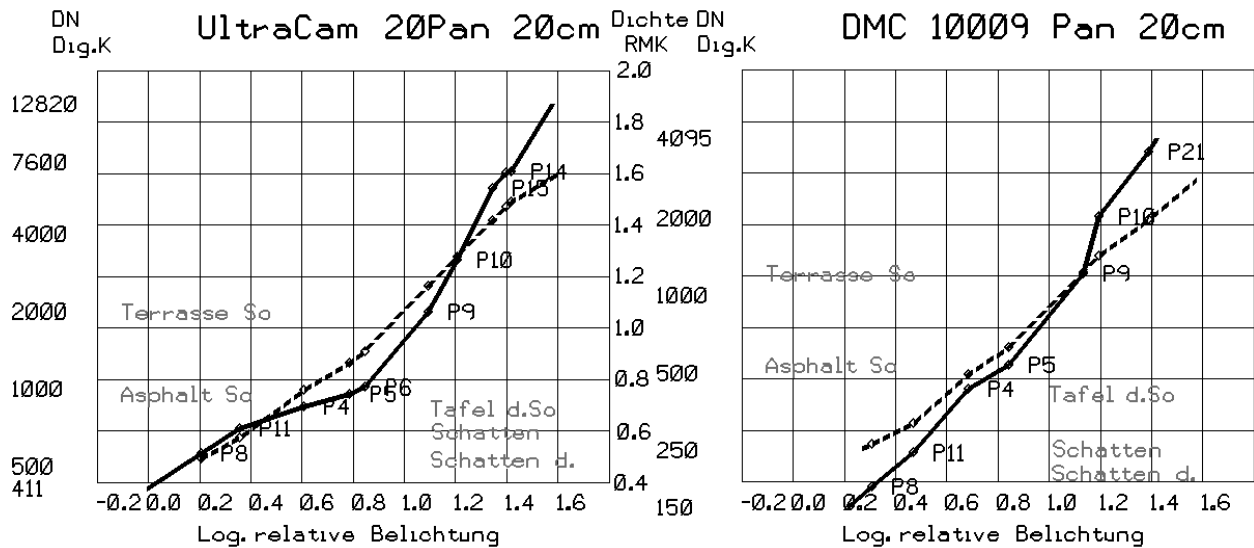


Abb. 5: Vergleichende Darstellung der Grauwertkurven für Hochbefliegungen mit der UltraCam (links) und der DMC (rechts). Die Kurven für die spezifischen Kameras sind durchgezogen wohingegen die Vergleichskurven der RMK-Top bzw. dem Agfa-Negativfilm gestrichelt sind. Diese stammen aus der Tiefbefliegung;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

In Abb. 5 wird zum Vergleich auch die Grauwertkurve der Hochbefliegung für die DMC wiedergegeben. Entsprechend der hier vorgenommenen Berechnung des Dynamikbereichs ergibt sich für die DMC ein Wert von 16, gegenüber 11 bei der Tiefbefliegung (vgl. auch Tabelle 2). Dieser Wert ist um ca. 30% höher als bei den DMC-Bildern der Tiefbefliegung. Bei der Hochbefliegung wird der Kontrast weiter abgeschwächt, daher die etwas höheren Zahlen, die auch bei der nachfolgenden Digicam aufscheinen. Will man nun den Dynamikbereich der Ultracam mit den Bildern der Tiefbefliegung vergleiche, so sollte er um etwa 30% reduziert werden, würde dann nicht mehr 27 sondern nur 18 betragen; das würde auch dem Verhältnis-zahlen der Grauwerte entsprechen. Diese Überlegung setzt voraus, dass die Grauwerte bei den Pan-Bildern der Ultracam proportional zur Belichtung sind. Damit wird ein Dynamikbereich wie etwa beim Farbfilm erreicht. Ein höherer Dynamikbereich ergibt sich für die UltraCam erst, wenn man in Betracht zieht, dass über den Schwellwert von 7600 hinaus noch Objekte bildwirksam wiedergegeben werden (vgl. auch Abb. 7).

### 3.3 Analyse der Aufnahmen der Digicam

Bei dem in Vaihingen/Enz eingesetzten Aufnahmesystem Digicam handelt es sich um ein Multikamerasystem. Insgesamt wurden vier divergierende Kameras auf eine Plattform montiert. Es liegen folglich keine Senkrechtaufnahmen vor sondern Schrägaufnahmen mit einem Nadirwinkel von ca. 15°. Die Kamera wurde vom Hersteller IGI für metrische Luftbildaufnahmen angepasst, basiert aber auf der digitalen Hasselblad. Die Farbaufnahmen entstehen mit Hilfe des Bayerfilters. Die Bilder liegen im 16-bit Format vor, wobei die hellsten Bildtöne auf einen DN-Wert von 65'532 begrenzt sind, der durchaus erreicht wurde.

Bei den analogen Untersuchungen des Dynamikbereichs an der Digicam wurden Werte von 20, 15 und 9 für die tiefgeflogenen Bilder festgestellt und 22, 16 und 14 für den Hochflug. Die Farbwertkurven werden in Abb. 6 dargestellt. Auch hier wurde bei der Hochbefliegung die

Kontrastwiedergaben in den dunklen Zonen deutlich abgeschwächt. Durch das Messverfahren ergibt sich aber ein scheinbar größerer Dynamikbereich, ein Effekt der bereits weiter oben diskutiert wurde.

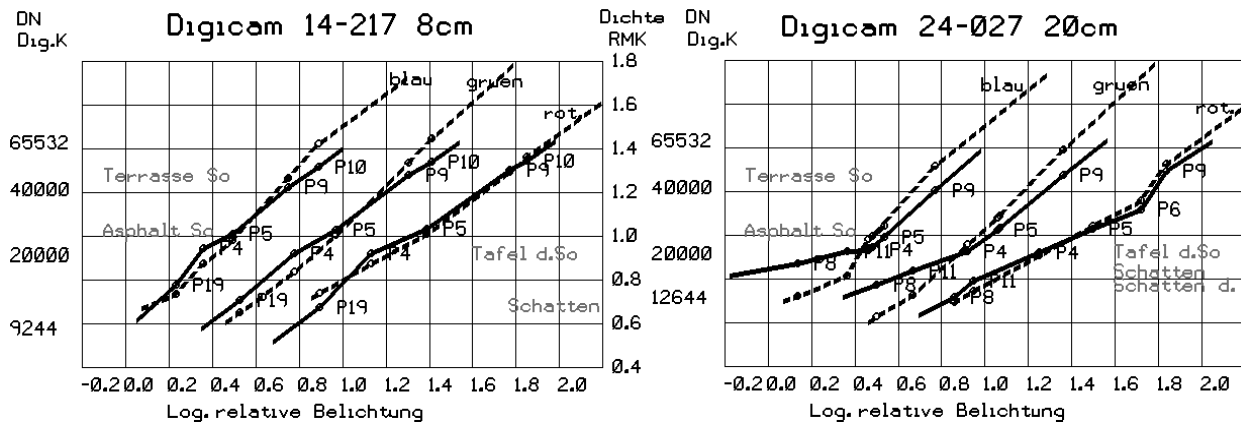


Abb. 6: Empirisch ermittelte Farbwertkurven für die Digicam (durchgezogen) im Vergleich zur RMK-Top bzw. dem Agfa-Negativfilm (gestrichelte Linien), links die Tiefbelichtung, rechts die Hochbelichtung.

### 3.4 Übersicht über die empirischen Analyse

In der nachfolgenden Tabelle 2 wird versucht die ermittelten Werte für den Dynamikbereich der analysierten Aufnahmen zusammenzustellen. Die Zahlen zeigen, dass für eine derartige Analyse unbedingt ein Maß für die relative Belichtung oder die Leuchtdichte am Ort der Kamera gefunden werden sollte. Dies gelang hier über die RMK, an sich aber nur für die Tiefbelichtung und für den Simultanflug mit der DMC. Bei der Hochbelichtung schwächt das Luftlicht den Kontrast weiter ab. Liegen derartige Aufnahmen nicht vor, könnte man sich mit verschiedenen Belichtung über dem gleichen Aufnahmegebiet behelfen.



RMK Dichte ca. 1.6      DMC DN=3445      UC DN ca. 9500      Digicam DN ca. 62'000

Abb. 7: Illustration des Dynamikbereichs an einem sehr hellen Objekt. Bei der RMK (Bild 51) ist der Aufbau des Wohnwagens noch erkennbar; bei der DMC (Bild 83) ist die Zone mit einem konstanten Wert von DN=3445 bereits überstrahlt; bei der UltraCam (Bild Pan 40) übersteigt der DN-Wert beträchtliche den Schwellwert von 7600, trotzdem ist der Aufbau gut erkennbar und auch bei der Digicam (Bild 17-219) bei einem DN-Wert um 62'000.

Mit der vorhergehenden Abbildung 7 wurde versucht den begrenzten Dynamikbereich bildlich darzustellen. Es handelt sich um ein Wohnmobil mit Aufsatz. Dieser ist bei allen Aufnahmen, noch erkennbar, allerdings kaum bei der DMC, obwohl der Grauwert des Dachs den Grenzwert von 4095 nicht überschreitet.

Tab. 2: Übersicht über die ermittelten Zahlen für den Dynamikbereich der verschiedenen Kameras; bei den panchromatischen Bildern DMC und UltraCam wurde versucht den stärkeren Anteil der Luftlichts bei den Hochbefliegungen zu berücksichtigen, Originalwerte in Klammer

Kamera	Bodenauflösung	Bildnummer	Dynamik nach Belichtung			Dynamik nach Farbwert			Farbwert	
			rot	grün	blau	rot	grün	blau	grün min	grün max
RMK LT	8cm	51/27	<b>22</b>	<b>21</b>	<b>16</b>	8	12	12	1729	137
RMK Stutt.	8cm			n. messbar					0	255
DMC RGB	8cm	10030063.tif	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	7	8	8	518	4095
DMC pan	8cm	10030063.tif		<b>11</b>					143	4095
DMC RGB	20cm	20010009.tif	<b>19</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	8	9	10	473	4095
DMC pan	20cm	20010009.tif		<b>11 (16)</b>					150	4095
UC RGB	8cm			n. messbar					0	255
UC RGB	20cm			n. verfügbar						
UC pan	20cm	PAN20020020.tif		<b>18 (27)</b>			18		411	7600
Digicam	8cm	14040217.tif	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	8	7	6	9244	65532
Digicam	20cm	24020027.tif	<b>(22)</b>	<b>(16)</b>	<b>(14)</b>	6	5	4	12644	65532

## 4 Schlussfolgerungen

### 4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der empirischen Analyse

Vorliegende Untersuchung zeigt, dass der Dynamikbereich von digitalen Luftbildern eher kleiner ist als bei Filmaufnahmen oder diesen am Beispiel der UltraCam nur erreicht oder geringfügig übersteigt je nach Betrachtungsweise. Dieser reduzierte Dynamikbereich steht im Widerspruch zu den potentiellen Möglichkeiten dieser Kamerasysteme, deren Dynamikbereich etwa 10-mal größer ist als von Farb-Luftbildfilmen. Dieser Widerspruch erklärt sich zum einen durch die strikte obere Begrenzung der Bildwiedergabe bei Sättigung des Sensors an hellen Bildelementen. Zum anderem wird in dunklen Bildpartien die Bildwiedergabe wohl weitgehend durch das Luftlicht begrenzt. Freilich stellt sich nun die Frage ob Belichtung und Filterung bei der Bildaufnahme optimal waren. Entsprechend dem großen Dynamikbereich der digitalen Kameras wäre es wohl möglich gewesen die Aufnahmen mit 1-2 Blenden dunkler zu belichten. Zudem sollte es durch entsprechende Filterung (Gelb- oder Orangefilter) möglich sein das Luftlicht besser zu durchdringen. Inwieweit bei einer geringeren Belichtung das Rauschen die Aufnahmequalität bereits wieder beeinträchtigt kann hier nicht beurteilt werden.

Wie Abb. 3 vor Augen führt stört bei Filmaufnahmen vor allem das starke Rauschen und dies ganz besonders in den dunklen Bereichen. Wahrscheinlich ließe sich das Rauschen in den Schattenpartien durch eine stärkere Belichtung der Filme reduzieren. Jedenfalls wurde der Dynamikbereich des Films keinesfalls ausgeschöpft. Trotzdem sind wohl Filmaufnahmen auf Grund ihres großen Rauschens im Nachteil im Vergleich zu digitalen Aufnahmesystemen.

Zweifellos können die hier angewendeten Untersuchungsmethoden kritisiert werden und weisen auch ihre Grenzen auf. Ewa bei der Digicam wurden Aufnahmen einer Kamera ausgemacht, die anscheinend stärker belichtet wurden und dementsprechend einen geringeren Dynamikbereich aufweisen als die übrigen Aufnahmen. Sicher sollten auch noch mehr Aufnahmen ausgewertet werden, obgleich natürlich bei den Untersuchungen mehr Bilder verwendet wurden, als hier aufgezeigt. Die wohl stärkste Einschränkung ergibt sich bei der Übertragung der Belichtung der RMK-Bilder auf Bildflüge, welche nicht simultan erfolgten. Bedauerlicher Weise wurden beim Testflug Vaihingen keine Bilder mit unterschiedlicher Belichtungen erstellt.

## **4.2 Empfehlungen für den praktischen Einsatz von digitalen Aufnahmesystemen**

Für den Praktiker ist es wichtig sich der begrenzten Dynamik der digitalen Kamerasysteme im praktischen Einsatz bewusst zu sein. Zum einen wird die Erkennbarkeit in den Schattenbereichen durch das Luftlicht begrenzt. Inwieweit diese Begrenzung durch eine entsprechende Filterung oder durch die Verwendung von Bildern anderer Kanäle reduziert werden kann, muss hier offen bleiben. Jedenfalls sollte der Praktiker bei der Bestellung eines Bildflugs fordern, dass etwa dunkle Autos in Schattenpartien noch erkennbar sein sollten. Damit wird wohl die Belichtung definiert, aber vor allem auch vermieden, dass bei zu starkem Dunst geflogen wird.

Im hellen Bereich, wird sich bei Spiegelreflexion wohl immer Überstrahlung ergeben. Es dürfte aber möglich sein die Bilder so dunkel zu belichten, so dass die meisten Objekte noch abgebildet werden.

## **4.3 Danksagung**

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

## **4.4 Literaturangaben**

CRAMER, M., 2010: The DGPF-Test on Digital Airborn Camera Evaluation – Overview and Test Design. PFG 2/2010, 1-10 in Vorbereitung.

von Schönermarker, M., 2010: Status Status Report on the Evaluation of the Radiometric Properties of Digital Photogrammetric Airborne Cameras. PFG 2/2010, 1-10 in Vorbereitung.

HANUSCH, T., UND BALTSAVIAS, E.: 2009: Radiometric Evaluation of DMC, ADS 40 and Ultracam X. 1-11, DGPF Tagungsband 18/2009

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.