

# Bildqualität

KARSTEN JACOBSEN

*Zusammenfassung: Die effektive Bildqualität kann mittels Kantenanalyse bestimmt werden. Die Ergebnisse der Kantenanalyse können allerdings durch Bildschärfungsoperatoren beeinflusst werden. Durch Bildschärfung vergrößert sich allerdings auch das Bildrauschen, das Detailerkennungen negativ beeinflussen kann. Eine Kantenanalyse sollte deswegen durch die Bestimmung des Bildrauschens unterstützt werden. Eine manuelle Bestimmung des Bildrauschens durch Selektion kleiner Bildfenster ist von der objektiven Auswahl offensichtlich homogener Teilflächen abhängig und tendiert zu einer Überschätzung des Bildrauschens. Aus diesem Grund wurden die untersuchten Bilder in 5x5 Pixel Teilflächen unterteilt und das Rauschen aus der Häufigkeitsverteilung des für die Teilflächen ermittelten Rauschens abgeleitet. Das Rauschen ist von dem Betrag der Grauwerte abhängig, weswegen für fünf verschiedene Grauwertebereiche eine separate Bestimmung erfolgte. In 8bit-Bildern sind die Grauwerte im Bereich von etwa 255 nicht für die Rauschbestimmung geeignet da sie durch Sättigung beeinflusst sind.*

*Die effektive Bildqualität und das Rauschen sind nicht nur von der benutzten Kamera abhängig, sondern auch von den Umständen der Bildaufnahme. Bei den mit TDI ausgestatteten großformatigen digitalen Luftbildkameras dominiert bei niedrigerer Flughöhe der Einfluss der Helligkeit zum Zeitpunkt der Aufnahme, er kann besonders das Rauschen vergrößern. Mittelformatkameras sind dagegen in der Regel durch die Vorwärtsbewegung beeinflusst, die wiederum auch von der Helligkeit abhängig ist da die Bildhelligkeit mehr durch die Aufnahmezeit als durch die Blende geregelt wird. Die Blendenwahl ist meist recht eingeschränkt – große Blenden werden durch die Optik beschränkt und kleine Blenden durch die blendenbegrenzte Auflösung, die bei den heute verwendeten kleinen Pixel schnell kritisch sein kann.*

*Eine Reihe groß- und mittelformatiger digitaler Luftbilder und auch analoge, gescannte Luftbilder wurden untersucht und die Ergebnisse dargestellt.*

## 1 Einleitung

Bildqualität bezieht sich auf die Geometrie und die Radiometrie. Hier wird nur die radiometrische Bildqualität behandelt. Bei der Betrachtung photogrammetrischer Bilder entsteht ein subjektiver Eindruck über die Bildqualität. Dieser subjektive Eindruck kann durch Filteroperationen beeinträchtigt werden, die zwar auf den ersten Blick vorteilhaft erscheinen, aber nicht in jedem Fall die Erkennbarkeit von Objektdetails verbessern. Eine objektive Beurteilung der Bildqualität mittels Kantenanalyse ist ein wichtiges Kriterium, sie reicht aber nicht aus, da die Ergebnisse einer Kantenanalyse durch Bildschärfung bzw. Bildrestaurierung (BECKER et al. 2005) beeinflussbar sind, was nicht in jedem Fall von Vorteil ist, da dadurch auch das Bildrauschen vergrößert wird und die Erkennbarkeit von Details schwieriger werden kann. Eine Bestimmung des Bildrauschens mittels vermeintlich homogener Teilflächen kann zu einer Überschätzung führen, wenn diese Teilflächen eine Grauwertstreuung, zum Beispiel durch Verschmutzung, haben. Hier ist ein objektiveres Verfahren erforderlich.

Karsten Jacobsen, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover; E-Mail: [jacobsen@ipi.uni-hannover.de](mailto:jacobsen@ipi.uni-hannover.de)

## 2 Effektive Auflösung

Die nominelle Auflösung einer Aufnahme wird durch den Abstand der Pixelmittelpunkte im Objektraum (ground sampling distance) beschrieben. Der Abstand der Pixelmittelpunkte ist nicht mit der projizierten Pixelgröße identisch, bei der der Zwischenraum zwischen den Pixeln im Sensor zu einer Verkleinerung und der Einfluss der Optik, Atmosphäre und Bildbewegung zu einer Vergrößerung führt. In der Regel sind zumindest bei Luftbildaufnahmen die physikalischen Objektpixelausmaße größer als der Abstand der Pixelmittelpunkte. Dieses wirkt sich auf die effektive Bildauflösung aus, die nicht mit der nominellen Auflösung identisch sein muss.

Die effektive Auflösung kann durch Kantenanalyse bestimmt werden (Abb. 1) (JACOBSEN 2009). Aus der Differenzierung des Grauwertverlaufs an einer Kante im Bild ergibt sich die Punktbildfunktion (point spread function). Die halbe Breite der Punktbildfunktion (an der Wendetangente) ergibt den Faktor für die effektive Auflösung (Abb. 1 rechts) – ein Faktor mit dem die nominelle Auflösung multipliziert werden muss um die tatsächliche Bildauflösung zu erhalten.

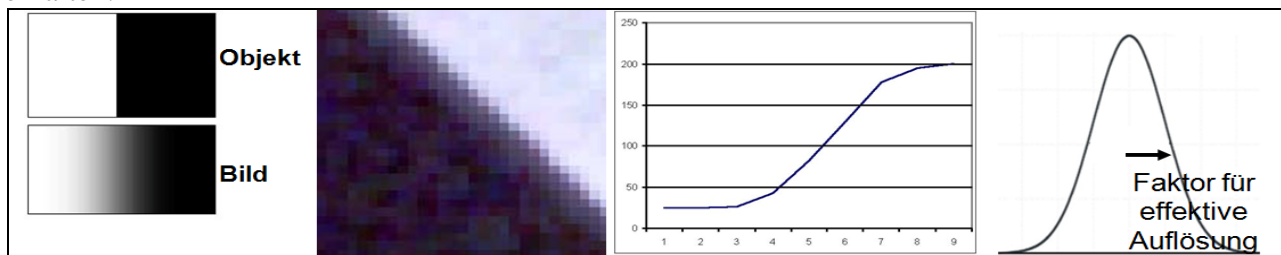


Abb. 1: von links nach rechts: Kante im Objekt und Bildraum, Beispiel einer Kante im Bild, Grauwertprofil einer Kante, Punktbildfunktion (point spread function)

Theoretisch sollte der Faktor für die effektive Bildauflösung größer oder gleich 1,0 sein. Empirische Untersuchungen ergeben aber auch Faktoren unter 1,0, was auf Bildverbesserungsoperationen zurückzuführen ist. Die Abbildungen 2 bis 9 zeigen den Einfluss von Kantenverstärkungen auf die Bildqualität.

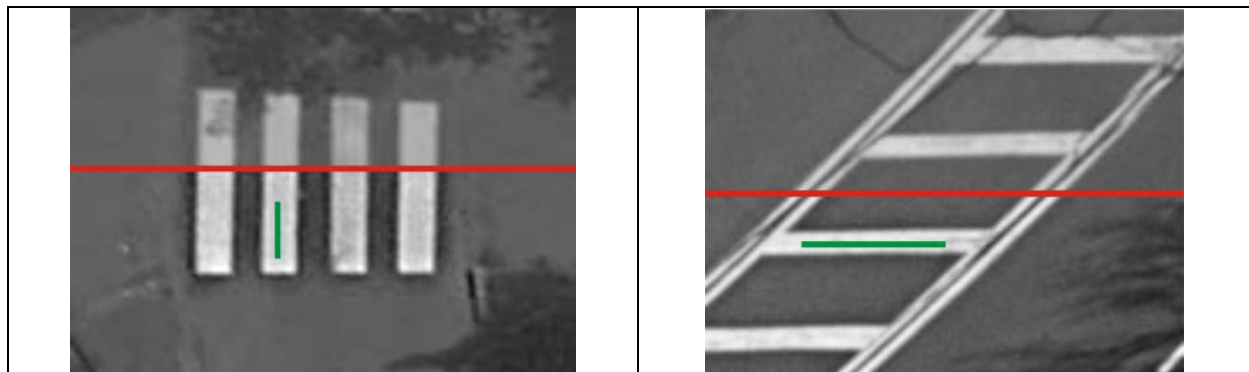


Abb. 2: Ausschnitt aus Phase1-Bild

Abb. 3: Ausschnitt aus UC Eagle-Bild  
in unterer Hälfte kantenverstärkt

Die Grauwertprofile in Abb. 5-8 sind die gemittelten Profile rechtwinklig zu den grünen Linien in Abb. 2 und 3.

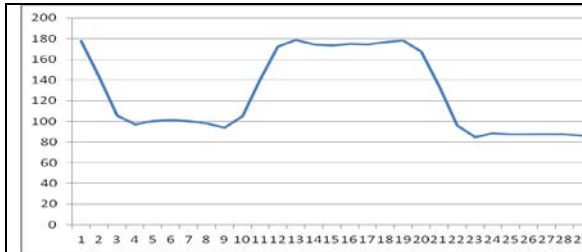


Abb. 4: Grauwertprofil durch originales PhaseOne-Bild

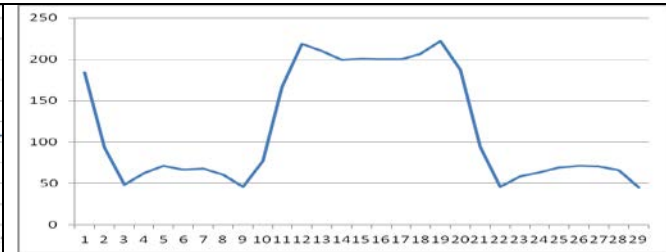


Abb. 5: Grauwertprofil durch kantenerstärktes Bild

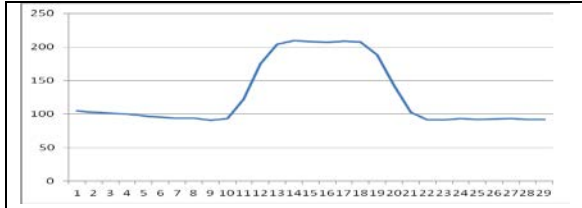


Abb. 6: Grauwertprofil durch originales Eagle-Bild

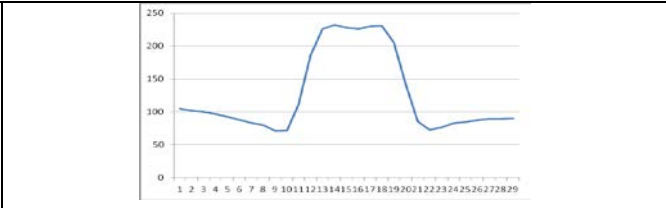


Abb. 7: Grauwertprofil durch kantenerstärktes Eagle-Bild

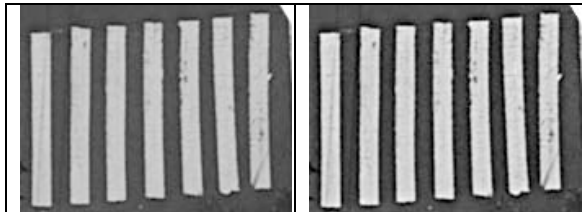


Abb. 8: Zebrastrifen in DMC I-Bild  
Links vor, rechts nach Kantenerstärkung

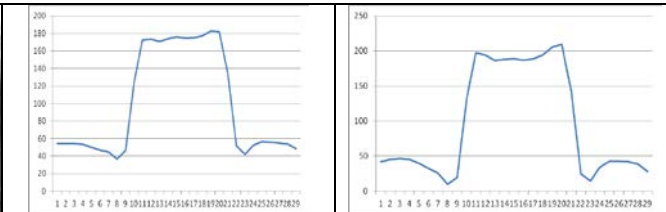


Abb. 9: gemitteltes Grauwertprofil durch DMC I-Zebrastrifen  
Links vor, rechts nach Kantenerstärkung

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen im oberen Teil Ausschnitte der Originalbilder mit Straßenmarkierungen und im unteren Teil den Einfluss von Kantenerstärkungen – in Abb. 8 entsprechend links vor und rechts nach Bildoperation. Die Grauwertprofile in Abb. 4 – 7 und 9 verdeutlichen das Ergebnis. Die Grauwertprofile durch die Straßenmarkierungen sollten im dunklen Bereich einen konstant niedrigen Grauwert und nach dem Anstieg zum hellen Bereich einen konstant hohen Grauwert haben. Dieses ist nur bei dem UltraCam Eagle-Profil (Abb. 6) einigermaßen gegeben. Bei dem Phase One-Profil (Abb. 4) und bei dem DMC I-Profil (Abb. 9 links) sinkt der Grauwert vor dem Anstieg und sind im hellen Bereich anfangs erhöht – dieses ist eine typische Situation für Bilder, die bereits kantenerstärkt sind. Durch die durchgeführte Kantenerstärkung vergrößert sich dieser Effekt (Abb. 5, 7, 9 rechts). Die Kantenerstärkung erhöht den Kontrast und große Objekte sind besser zu erkennen (Abb. 2, 3, 8), sie erhöht aber auch das Bildrauschen, wodurch kleine, nicht so kontrastreiche Objekte schwerer zu erkennen sind.

Tabelle 1 zeigt das deutlich angestiegene Rauschen (Standardabweichung der Grauwerte in einem Objektteil mit konstanter Rückstrahlung) in den gezeigten Ausschnitten. Andererseits wird der Faktor für die effektive Bildqualität deutlich verkleinert. Nur im Falle der DMC I verbessert sich dieser Faktor nicht da durch die bereits vorher durchgeführte Kantenerstärkung offensichtlich das Optimum erreicht war. Das hier manuell ermittelte Rauschen ist größer als das automatisch ermittelte, von Bedeutung ist aber die Veränderung durch Kantenerstärkung.

	Rauschen im Originalbild		Rauschen nach Kantenverstärkung		Faktor für effektive Bildqualität	
	Hell in Abb. 2/3/8	Dunkel in Abb. 2/3/8	Hell in Abb. 2/3/8	Dunkel in Abb. 2/3/8	Original	Kantenverstärkt
Phase1	+/-2,2	+/-2,0	+/-5,6	+/-5,1	0,99	0,84
Eagle	+/-4,8	+/-2,9	+/-4,8	+/-6,8	1,11	1,03
DMC I	+/-1,4	+/-1,5	+/-4,9	+/-3,2	0,76	0,76

Tab. 1: Rauschen und Faktor für effektive Bildqualität im Originalbild und nach Kantenverstärkung

### 3 Bildrauschen

Unter Bildrauschen wird eine zufällige Variation der Bildhelligkeit verstanden, die meist auf elektronisches Rauschen zurückzuführen ist. Bei gescannten Bildern kommt das Bildkorn als erheblicher Einfluss hinzu. Die Stärke des Bildrauschens ist vom Sensor und den Aufnahmebedingungen abhängig, wobei die Beleuchtungsverhältnisse einen starken Einfluss haben. Das Bildrauschen ist eine Verschlechterung des Bildsignals, hervorgerufen durch den Abbildungsvorgang, den Einfluss der Atmosphäre, das Filmkorn, elektronisches Rauschen und die Quantifizierung. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen ein deutliches Rauschen, das besonders in den dunkleren Bildteilen störend auffällt.

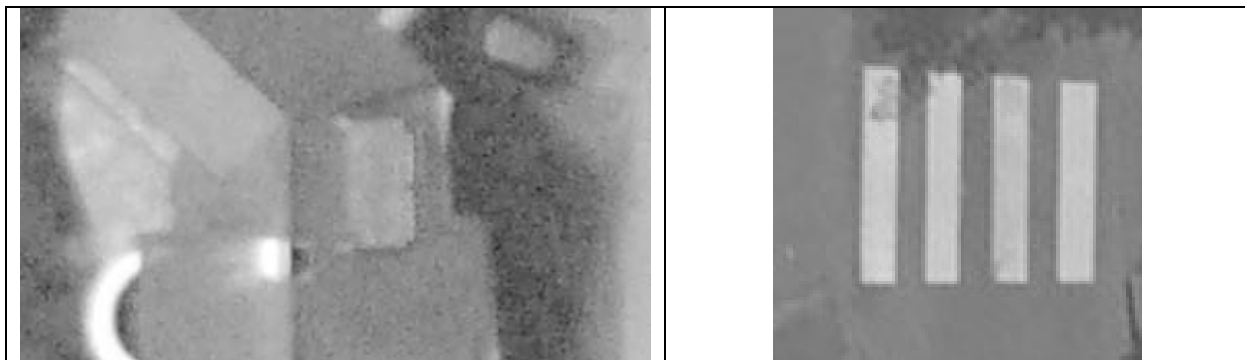


Abb. 10: Bildrauschen eines UAS-Bildes

Abb. 11: Zebrastrifen in Phase1-Bild

Das Bildrauschen kann manuell, z.B. in Photoshop mittels der Histogrammfunktion als Standardabweichung vom Mittelwert für Bildteile, die im Objektraum die gleiche Rückstrahlung haben, bestimmt werden. Diese manuelle Bestimmung muss jedoch sehr sorgfältig durchgeführt werden und hat eine Tendenz zur Überbewertung des Rauschens. So können Fahrbahnbereiche, die scheinbar die gleiche Objekthelligkeit haben, verschmutzt sein, oder Dächer durch die Form der Dachpfannen leicht variierende Helligkeiten aufweisen, was zu einem fehlerhaft erhöhten Rauschwert führt. Aus diesem Grund wurde das Rauschen der folgend aufgeführten Bilder durch automatische Analyse der ganzen Bilder bestimmt. Die untersuchten Bilder lagen entweder direkt als 8bit-Bilder vor oder wurden auf 8bit optimal transformiert. Sie werden in 5 x 5 Pixel große Bildteile aufgeteilt, für die die Grauwertstreuung berechnet wird. Das Rauschen kann aus der Form der Häufigkeitshistogramme der berechneten Standardabweichungen in Bezug auf den Mittelwert der 5 x 5 Pixel-Teilfläche ermittelt werden (Grün et al. 1997). Nur die Standardabweichungen bis +/-12 Grauwerte werden berücksichtigt. Ist ein deutliches Maximum im Bereich der niedrigeren Standardabweichungen vorhanden, so entspricht das dem Rauschen.

Im Falle eines langsam ansteigenden Histogramms, ohne deutlich ausgeprägtes Maximum, sind Korrekturwerte für die Lage des Wertes, der dem Rauschen entspricht, erforderlich. Das Rauschen wird für 5 gleichmäßig verteilte Grauwertbereiche separat berechnet, da das Rauschen nicht über den gesamten Grauwertbereich gleich sein muss. Speziell die Gruppe mit Grauwerten von 203 bis 255 ist durch Sättigung beeinflusst und führt zu kleinen Rauschwerten. Das Verfahren zur automatischen Ermittlung des Rauschens wurde mit umfangreichem Testmaterial überprüft und angepasst, so dass es zu zuverlässigen Ergebnissen führt.

Untersuchungen mit Teilflächen von 3x3 Pixeln, 7x7 Pixeln und mehr, führten zu Ergebnissen, die nicht so gut mit den unabhängigen Referenzmessungen übereinstimmen.

## 4 Empirische Untersuchungen

Eine repräsentative Auswahl von Bildern groß- und mittelformatiger digitaler Kameras, sowie einer Handykamera, eingesetzt auf einem UAS, sowie gescannte Analogbilder wurden untersucht. Das Bildrauschen, aber auch in geringerem Maß der Faktor für die effektive Auflösung, sind von den Aufnahmebedingungen, speziell den Lichtverhältnissen, abhängig, weswegen bei Aufnahmen unter niedriger Sonnenhöhe im Januar nicht mit der gleichen Bildqualität wie zu anderen Jahreszeiten gerechnet werden muss. Von Bedeutung ist die Bildpixelgröße – je größer sie ist, desto mehr freie Elektronen werden generiert, wodurch sich das Rauschen verkleinert. Durch elektronische oder manuelle Vorwärtsbewegungskompensation kann die Belichtungszeit verlängert werden, was ebenfalls das Bildrauschen verkleinert. Alle DMC- und UltraCam-Aufnahmen haben mit dem transfer, delay und integration (TDI) eine elektronische Vorwärtsbewegungskompensation, während die anderen verwendeten digitalen Kameras nicht darüber verfügen. Bei Kameras mit Bayer-Pattern, die mit Ausnahme der großformatigen Kameras dominieren, ist nur eine mechanische Vorwärtsbewegungskompensation möglich, die bei den untersuchten Kameras allerdings nicht vorhanden ist.

$d = 115'' / D$  [mm]      Formel 1: Beugungsbegrenzte Auflösung für  $\lambda = 0.55\mu\text{m}$  (grünes Licht)

Blende	$\lambda=0.45\mu\text{m}$ (blau)	$\lambda=0.55\mu\text{m}$ (grün)	$\lambda=0.65\mu\text{m}$ (rot)	$\lambda=0.75\mu\text{m}$ (nahes IR)
5,6	2,5 $\mu\text{m}$	3,1 $\mu\text{m}$	3,7 $\mu\text{m}$	4,2 $\mu\text{m}$
8	3,7 $\mu\text{m}$	4,5 $\mu\text{m}$	5,3 $\mu\text{m}$	6,1 $\mu\text{m}$
11	5,0 $\mu\text{m}$	6,1 $\mu\text{m}$	7,2 $\mu\text{m}$	8,3 $\mu\text{m}$
16	7,3 $\mu\text{m}$	8,9 $\mu\text{m}$	10,5 $\mu\text{m}$	12,1 $\mu\text{m}$

Tabelle 2: beugungsbegrenzte Auflösung – Durchmesser des Airy

Durch Beugungsbegrenzung wird eine Punktlichtquelle mit dem in Tabelle 2 angegebenen Durchmesser des Airy (Beugungsscheibe) abgebildet. Überschreitet die Größe des Airy die Pixelgröße, führt dieses auf jeden Fall zu einer Verschlechterung der effektiven Auflösungsvermögens. Deswegen muss bei Handykameras mit 1,86 $\mu\text{m}$  Pixelgröße mit einem größeren Faktor für die effektive Auflösung gerechnet werden, wie es Tabelle 3 auch zeigt. Aber bereits wenn der Durchmesser des Airy in die Nähe der Pixelgröße kommt, kann es zu einer reduzierten Auflösung kommen. Bei Bildaufnahme mit einem Bayer-Pattern (nur ein CCD für alle drei Farben zusammen) werden 50% der Pixel für den grünen Kanal und jeweils 25% der

Pixel für den roten und den blauen Kanal verwendet. Aus dieser reduzierten Anzahl der Pixel werden die RGB-Farben mit der nominellen Pixelgröße berechnet. Unter optimalen Bedingungen führt das kaum zu einem Auflösungsverlust. Dagegen wirkt sich bei den benutzten Mittelformatkameras die fehlende Vorwärtsbewegungskompensation besonders bei niedrigeren Flughöhen aus, was auch die Faktoren für die effektive Bildauflösung in Tabelle 2 mit Werten von 1,05 bis 1,18 zeigen. Die großformatigen Kameras DMC und UltraCam zeigten nur bei der UltraCam-X höhere Werte für die effektive Auflösung. Die Aufnahmen unter den schlechteren Lichtverhältnissen im Januar mit der DMC I, DMC II-140 und der UltraCam-Eagle führten nur zu vernachlässigbaren Verlusten der effektiven Aufnahmen. Bei der DMC I, DMC II 230 und DMC II 250 ist der Faktor für die effektive Auflösung mit 0,88 bis 0,98 unter dem theoretischen Grenzwert von 1,0, was durch die in den Bildern deutlich erkennbare Kantenverbesserung erklärt werden kann. Dieses führt aber nicht zu spürbar erhöhtem Rauschen.

Kamera	Pixelgröße	Bemerkung	blau	grün	rot
DMC I	12µm	Aufnahme: Januar	0,94	0,95	0,88
DMCII 140	7,2µm	Aufnahme: Januar	1,01	1,02	1,02
DMCII 230	5,6µm		0,98	0,97	0,98
DMCII 250	5,6µm		0,87	0,88	0,84
UltraCam-X	7,2µm		1,34	1,24	1,22
UltraCam Eagle	5,2µm	Aufnahme: Januar	1,01	1,02	1,03
PhaseOne iXA180	5,2µm		1,14	1,18	1,08
Trimble AIC	7,2µm		1,05	1,15	1,14
UAS-Kamera	1,86µm		1,73	1,61	1,51
RC30 Farbe 14µm Pixel	-		1,31	1,22	1,28

Tab. 3: Faktor für effektive Auflösung bestimmt durch Kantenanalyse – pan-geschärfte RGB-Bilder, 8bit

Kamera \ Farbkanal	blau	grün	rot	blau	grün	rot
	Mittel von 4 Gruppen			Gewogenes Mittel		
DMC I	1,85	1,95	1,95	1,22	1,52	1,52
DMCII 140	1,30	1,06	1,20	0,61	0,61	0,61
DMCII 230	1,80	1,40	1,80	0,83	0,61	0,61
DMCII 250	1,80	1,80	1,95	1,04	0,67	0,67
UltraCam-X	1,50	1,35	1,30	1,32	1,14	1,02
UltraCam Eagle	2,72	2,48	2,48	3,00	2,54	2,30
PhaseOne iXA180	0,87	0,84	0,86	0,90	0,81	0,84
Trimble AIC	1,38	1,18	1,08	1,34	1,19	1,18
UAS-Kamera, Pixelgröße 1.86µm	3,00	3,55	3,50	3,00	2,98	3,20
RC30 Farbe 14µm Pixel	5,20	3,75	2,90	5,75	4,01	3,30

Tab. 4: Standardabweichung des Bildrauschens – lineares Mittel von 4 Grauwertgruppen und Mittel gewogen nach der Häufigkeit der Grauwerte im Bild

Tabelle 4 zeigt die Mittelwerte des Bildrauschens für die untersuchten Bilder. Hier fällt das niedrige Rauschen der DMC II und der Phase One Aufnahmen auf. Selbstverständlich kann durch Bildoperationen das Rauschen verringert werden, dieses führt aber auch zur Verschlechterung der Erkennbarkeit kleiner Bilddetails. In den untersuchten Aufnahmen waren keine entsprechenden Verschlechterungen erkennbar. Die in den Abbildungen 2 und 6 offensichtliche Kantenverbesserungen der DMC I und der Phase One haben nicht zu erhöhtem Rauschen geführt. Das leicht erhöhte Rauschen der DMC I und das stärkere Rauschen der UltraCam Eagle können durch die Aufnahme im Januar zumindest teilweise erklärt werden. Bei der DMC II 140 zeigt sich dieses trotz der Aufnahme im Januar nicht.

Das starke Rauschen der Handykamera, eingesetzt in einem UAS, ist bei diesem Kameratyp mit 1,86µm Pixelgröße zu erwarten und üblich. Im Fall der gescannten RC30 Analogbilder ist das sehr starke Rauschen ebenfalls normal. Hier wirkt sich das Filmkorn direkt aus. Im Vergleich zu den großformatigen digitalen Kameras haben gescannte analoge Luftbilder sowohl einen deutlich schlechteren Faktor für die effektive Auflösung als auch ein erhebliches Rauschen. Der negative Einfluss auf die Detailerkennung ist bekannt (Jacobsen 2007).

Für die Bildqualität ist das Bildrauschen nicht direkt ausschlaggebend, das Signal-Rausch-Verhältnis ist wichtiger. Wegen der geringeren Signalstärke wirkt sich das Bildrauschen besonders im dunkleren Bereich stark auf das Signal-Rausch-Verhältnis aus. In Abb. 10 zeigt sich das deutlich, im Hausschatten sind keine Objektdetails erkennbar, wohl aber auf dem helleren Dach. Allerdings ist in dem Bild der in einem UAS eingesetzten Kamera mit einer Pixelgröße von nur 1,86µm das Rauschen in dem Grauwertbereich 0-51 mit +/-5,5 Grauwerten deutlich größer als in den helleren Bereichen.

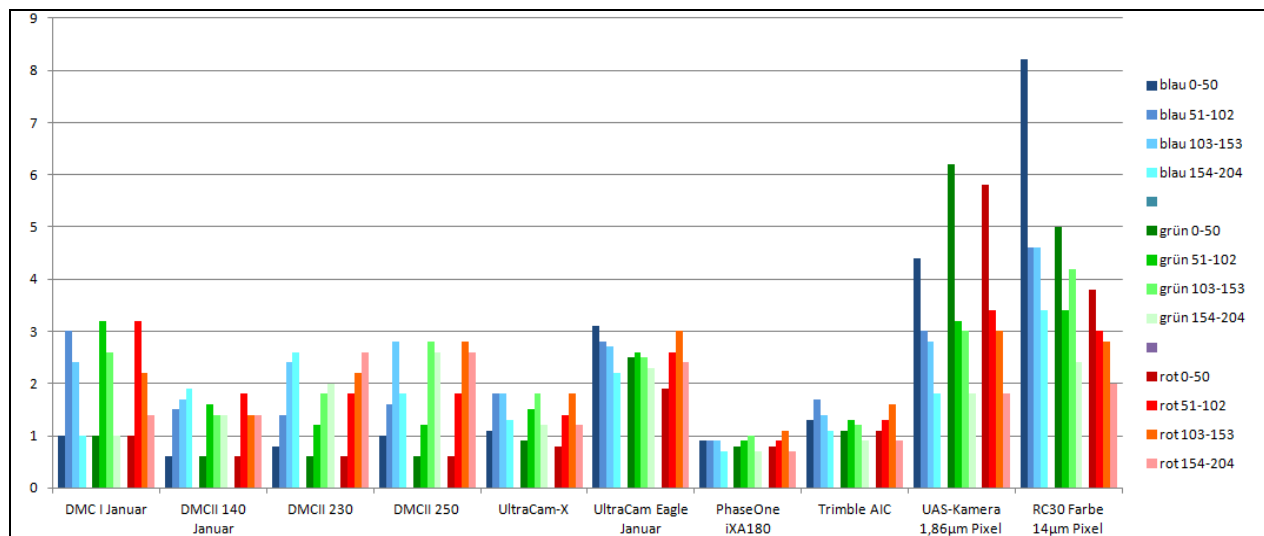


Abb. 12: Bildrauschen separat für die ersten 4 Grauwertgruppen und blau, grün, rot

Nur bei der Handykamera, eingesetzt auf einem UAS, und den gescannten RC30-Analogbildern zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des Rauschens von den Grauwertgruppen (Abb. 12). Für die Bilder der anderen untersuchten Kameras ist kein klarer Trend erkennbar. Die Ergebnisse der letzten Grauwertgruppe (Grauwerte 205 – 255) werden nicht gezeigt, da in diesem Bereich das Rauschen durch Sättigungseffekte nicht aussagekräftig ist, es liegt in der Regel unter +/-1,0 und

die Anzahl der 5x5 Pixel-Teilflächen in dieser Grauwertgruppe mit Standardabweichungen unter +/-12 ist begrenzt.

## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die radiometrische Bildqualität kann für praktische Anwendungen ausreichend mit dem Faktor für die effektive Auflösung und dem Bildrauschen beschrieben werden. Der Faktor für die effektive Auflösung korrigiert die nominelle Auflösung. Dieser Faktor kann durch Kantenschärfung verändert oder auch manipuliert werden, was sich jedoch normalerweise negativ auf das Bildrauschen auswirkt. Durch höheres Bildrauschen können Objekte, die mit geringerem Rauschen identifizierbar sind, speziell in dunklen Bereichen – wie im Schatten – schwer oder nicht erkennbar sein. Durch Filterung, wie mit Median, kann das Rauschen zwar reduziert werden und die Bilder sehen ansprechender aus, dadurch wird aber auch keine Objektinformation gewonnen.

Es wurde eine repräsentative Gruppe von Bildern, aufgenommen mit verschiedenen Kameras untersucht. Die Bildqualität ist nicht nur von den Kameras, sondern auch von den Aufnahmebedingungen abhängig. Bei Aufnahmen im Januar muss wegen des niedrigen Sonnenstandes mit einem erhöhten Rauschen gerechnet werden, was sich auch stärker auswirkt, da die Schatten sehr viel größer sind. Jedoch nicht in jedem Fall machte sich das bemerkbar. Mittel- und Kleinformatkameras sind durch Vorwärtsbewegungen beeinträchtigt, was sich auf die effektive Auflösung auswirkt und wegen meist kürzerer Belichtungszeit auch das Rauschen erhöhen kann. Diese Auswirkungen sollten bei der Wahl der Objektpixelgröße für einen Bildflug berücksichtigt werden – unter Umständen kann eine kleinere Objektpixelgröße erforderlich werden, was die Aufnahme- und Auswertungskosten erhöht.

## 6 Literaturverzeichnis

- BECKER, S., HAALA, N., REULKE, R., 2005: Determination and improvement of spatial resolution for digital aerial images, ISPRS Hannover Workshop 2005
- GRÜN, A., BALTSAVIAS, E., HENRICSON, O., 1997: Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (II), Birkhäuser Verlag, ISBN 3-7643-5788-6 (Basel 1997)
- JACOBSEN, K., 2007: Potential großformatiger digitaler Luftbildkameras, DGPF Jahrestagung Mutenz 2007
- JACOBSEN, K., 2009: Effective resolution of digital frame images, ISPRS Hannover Workshop 2009, IntArchPhRS. Vol XXXVIII-1-4-7/W5

<http://de.wikipedia.org/wiki/Bildrauschen>, Januar 2014