

Qualitätsuntersuchungen zur ikonischen Fusion multispektraler WorldView-2-Daten

SABINE HORNBERG¹ & MANFRED EHLERS²

Zusammenfassung: In diesem Artikel werden Pansharpeningalgorithmen auf ihre Anwendbarkeit bei einem WorldView-2-Datensatz getestet. Das Untersuchungsgebiet umfasst mehrere Ausschnitte aus diesem Datensatz, welche unterschiedliche Oberflächenstrukturen repräsentieren. Um eine Aussage über die Anwendbarkeit der Algorithmen auf mehr als drei Kanälen zu treffen, werden alle Bildkanäle des Fusionsergebnisses sowohl visuell als auch quantitativ evaluiert. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen die Stärken und Schwächen der verschiedenen Algorithmen sowohl hinsichtlich der Oberflächenstruktur als auch in den einzelnen Kanälen. Es wird gezeigt, dass keine ideale Methode zur ikonischen Bildfusion existiert und dass die Güte der Fusionsmethode stark von den landschaftlichen Strukturen der Fernerkundungsdaten abhängt.

1 Einleitung

Bei der Aufnahme von Fernerkundungsdaten liegen technische Beschränkungen vor, aufgrund derer Daten im multispektralen Modus von geringerer Auflösung sind als im panchromatischen Modus. Für viele Anwendungen ist es jedoch von Vorteil, wenn sowohl eine hohe spektrale als auch eine hohe räumliche Auflösung vorliegen. Um diese Informationen zu kombinieren, werden Bildfusionstechniken angewendet (ZHANG, 2004).

Das Ziel einer Bildfusion ist die Informationen aus den Datensätzen zu kombinieren. Bei der ikonischen Bildfusion wird dabei pixelbasiert vorgegangen und aus den physikalisch gemessenen Parametern ein Fusionsergebnis berechnet (POHL & VAN GENDEREN, 1998). Dabei sollten die spektralen Eigenschaften trotz Bildschärfung soweit wie möglich erhalten bleiben (CHAVEZ ET AL., 1991). Bei der Verwendung eines panchromatischen Datensatzes zur Bildschärfung wird von Pansharpening gesprochen (ALPARONE ET AL., 2007).

In Publikationen werden verschiedene Fusionsalgorithmen auf Datensätzen mit drei oder vier Kanälen untersucht (AIAZZI ET AL., 2007; ALPARONE ET AL., 2007; CHOI ET AL., 2013; KHAN ET AL., 2009; KLONUS & EHLERS, 2007; RYAN ET AL., 2003; MASSIP ET AL., 2012; MEDINA ET AL., 2012; VIVONE ET AL., 2013; WITHARANA ET AL., 2013; WHITARANA ET AL., 2014; ZHIQIANG ET AL., 2012). Auch bei hyperspektralen Daten werden Fusionsalgorithmen eingesetzt (GARZELLI ET AL., 2010), wobei jedoch nur globale Messwerte verwendet werden, sodass eine Aussage zu der Fusionsgüte einzelner Kanäle nicht getroffen werden kann. Da mit dem multispektralen WorldView-2-Sensor acht Kanäle aufgenommen werden, stehen damit mehr zur Untersuchung zur Verfügung als nur die ‚üblichen‘ Rot, Grün, Blau und nahes Infrarot. Im

1 Sabine Hornberg, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück; E-Mail: shornber@uni-osnabrueck.de

2 Manfred Ehlers, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Barbarastr. 22b, 49076 Osnabrück; E-Mail: mehlers@igf.uni-osnabrueck.de

Gegensatz zu hyperspektralen Bilddaten können kanalweise Untersuchungen vorgenommen werden, um Ausreißer zu erkennen oder auszuschließen.

Um Aussagen über die Fusionsgüte zu treffen, werden aus dem WorldView-2-Datensatz verschiedene Ausschnitte mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen gewählt. Es werden drei Fusionsalgorithmen ausgewählt, die geeignet sind, um eine beliebige Anzahl von Kanälen zu fusionieren. Die Fusionsergebnisse werden zum einen visuell analysiert, zum anderen wird eine quantitative Evaluierung durchgeführt. Bei der Untersuchung werden alle Bildkanäle betrachtet, sodass eine Aussage über die Anwendbarkeit der Algorithmen auf mehr als drei Kanäle getroffen werden kann. Inwieweit wirken sich die landschaftlichen Strukturen auf das Fusionsergebnis aus? Werden alle Kanäle gleich gut fusioniert? Gibt es Unterschiede in der Fusionsgüte? Aus den Ergebnissen wird ein Fazit für die Fusion von WorldView-2-Daten gezogen.

2 Daten

Seit Oktober 2009 werden mit dem kommerziellen Satelliten WorldView-2 acht spektrale Kanäle im Bereich von 400 nm bis 1040 nm sowie ein panchromatischer Kanal im Bereich von 450 nm bis 800 nm aufgenommen (DIGITALGLOBE, 2013). Die verwendete Aufnahme zeigt eine Region im bayerischen Voralpenland vom 16. September 2011, die geprägt ist von landwirtschaftlichen Flächen sowie Wald- und Wasserflächen. Aus diesen Daten werden Ausschnitte erstellt, um die Fusionsalgorithmen auf verschiedenen Oberflächenstrukturen zu testen. Da der multispektrale Datensatz eine Auflösung von 2,00 m hat, wird dieser zunächst mittels Cubic Convolution auf die 0,50 m des panchromatischen Datensatzes resampled. Die ausgewählten Subsets mit einer Größe von jeweils 2048 x 2048 Pixel enthalten unterschiedliche Oberflächenstrukturen, wie landwirtschaftliche Flächen, Wald, Wasser und urbanen Raum. Der panchromatische und der multispektrale Datensatz sind gut aufeinander registriert, sodass eine geometrische Vorverarbeitung nicht mehr notwendig ist.

3 Fusionsverfahren

Für die Bildfusion von WorldView-2-Daten werden Verfahren benötigt, die geeignet sind für die Fusion von n Bildkanälen. Für einen Vergleich werden drei Verfahren ausgewählt: eine oft genutzte Methode, ein explizit für WorldView-2-Daten entwickelter Algorithmus sowie ein Verfahren, welches variable Parametereinstellungen ermöglicht.

3.1 Gram-Schmidt-Sharpening

Ein Verfahren, welches auf die Gram-Schmidt-Orthogonalisierung aufbaut, wurde 1998 von LABEN & BROWER (2000) entwickelt. Die Merkmale bei diesem Fusionsverfahren sind die Verwendung einer beliebigen Anzahl von Bildkanälen und die Erhaltung der spektralen Eigenschaften. Bei der Gram-Schmidt-Transformation wird als Kanal eins ein simulierter panchromatischer Kanal übergeben, folgend die multispektralen Kanäle. Nach der Transformation wird die Statistik des ursprünglichen panchromatischen Kanals an die der ersten Gram-Schmidt-Komponente angepasst. Das Ergebnisbild erfolgt nach der inversen Transformation.

3.2 Hyperspherical-Color-Sharpening (HCS)

Das von PADWICK ET AL. (2010) beschriebene Hyperspherical-Color-Sharpening (HCS) ist für die Fusionierung von WorldView-2-Daten entwickelt worden. Bei der Transformation in den hypersphärischen Farbraum wird die Intensität von der Farbinformation getrennt, sodass der Radialwert die räumliche Information enthält, während die Farbe über den Winkel definiert wird. Die Anpassung der Intensität erfolgt über die Verwendung der Intensitätskomponente und des panchromatischen Kanals sowohl im Original als auch tiefpassgefiltert. Durch die Rücktransformation wird das Fusionsergebnis erzeugt.

3.3 Ehlersfusion

Bei der von EHLERS & KLONUS 2004 vorgestellten Fusionsmethode wird die räumliche Information von der Farbinformation getrennt, um eine gute Farberhaltung im Endergebnis zu erzielen. Das multispektrale Bild wird in den IHS-Farbraum transformiert, sodass die räumlichen Informationen in der Intensitätskomponente vorliegen und Farbton und Sättigung zwischengespeichert werden. Es folgt eine Fast-Fourier-Transformation des normierten panchromatischen Kanals und der Intensitätskomponente. Im Frequenzraum erfolgen eine Tiefpassfilterung der Intensität sowie eine Hochpassfilterung des panchromatischen Bildes. Nach der inversen Fast-Fourier-Transformation beinhaltet die neue Intensitätskomponente die niederfrequenten Informationen der Intensität und die hochfrequenten Informationen des panchromatischen Kanals. Zum Schluss erfolgt die Rücktransformation in den RGB-Raum. Da die IHS-Transformation auf nur drei Kanäle beschränkt ist, wird dieses bei mehr als drei Kanälen entsprechend oft durchgeführt.

Da die Transformation in den hypersphärischen Farbraum ebenfalls wie die IHS-Transformation die Intensität von der Farbinformation trennt, wird die Ehlersfusion um diese erweitert. Bei dieser Erweiterung wird im Algorithmus die IHS-Transformation durch die HCS-Transformation ersetzt.

4 Evaluationsverfahren

Die Qualität des Fusionsergebnisses wird sowohl visuell als auch quantitativ untersucht. Es gibt zahlreiche Untersuchungen zur Evaluierung (THOMAS & WALD, 2005; THOMAS & WALD, 2007; THOMAS ET AL., 2005; KHAN ET AL., 2009; KLONUS & EHLERS, 2009; WALD ET AL., 1997), sodass hier auf empfohlene Werte zurückgegriffen werden kann.

4.1 Visuelle Analyse

Einen ersten Eindruck über das Fusionsergebnis soll die visuelle Überprüfung vermitteln. Um die spektralen Eigenschaften zu bewerten, werden sowohl die einzelnen Kanäle als auch die Kanalkombinationen betrachtet. Bei der Betrachtung der einzelnen Kanäle kann zudem untersucht werden, ob eine räumliche Verbesserung vorliegt. Die visuelle Analyse ist ein wichtiger Bestandteil der Evaluierung, jedoch ist diese abhängig von dem jeweiligen Betrachter und nicht objektiv (EHLERS ET AL., 2010).

4.2 Korrelationskoeffizient (KK)

Ein weitverbreiteter Messwert, welcher für die spektrale Evaluierung von Fusionsergebnissen genutzt wird, ist der Korrelationskoeffizient KK. Dieser Koeffizient wird zwischen den korrespondierenden Kanälen des Referenzbildes und des fusionierten Bildes berechnet. Der berechnete Wert liegt zwischen -1 und 1, wobei bei einer perfekten Übereinstimmung der Kanäle der Wert 1 beträgt (EHLERS ET AL., 2010; KLONUS & EHLERS, 2009; NUNEZ ET AL., 1999; OTAZU ET AL., 2005; PRADHAN ET AL., 2006; WALD ET AL., 1997).

4.3 Spectral-Angle-Mapper (SAM)

Der Spectral-Angle-Mapper (SAM) ist ein geeignetes Verfahren, um die spektrale Abweichung zwischen dem Fusionsergebnis und dem Referenzbild zu messen (THOMAS & WALD, 2007). Mit diesem Verfahren wird die spektrale Ähnlichkeit zwischen einem Test- und Referenzspektrum angezeigt. Hierzu wird der Winkel zwischen dem Vektor des Eingangsbildes und dem Vektor des Referenzbildes im n-dimensionalen Merkmalsraum ($n = \text{Anzahl der Bildkanäle}$) berechnet (KRUSE ET AL., 1993). Beträgt der Winkel zwischen den Vektoren 0, so liegt eine vollständige Farberhaltung vor. Je größer der Winkel wird, desto größer ist die Farbdifferenz (ALPARONE ET AL., 2007).

4.4 Modulationsübertragungsfunktion (MTF)

Ein Verfahren, welches von THOMAS & WALD (2007) zur Überprüfung der lokalen Bildschärfe empfohlen wird, ist die Modulationsübertragungsfunktion (MTF). Bei dieser Funktion wird der Intensitätsunterschied zwischen benachbarten Objekt- bzw. Bildteilen genutzt, indem das Verhältnis zwischen dem Bildkontrast und dem Objektkontrast berechnet wird (KRAUS, 2004). Zur Begutachtung der MTF werden Zeilenplots von ausgewählten Bildausschnitten erstellt. Diese Ausschnitte enthalten hohe Kontraste im panchromatischen Bild, sodass der Kurvenverlauf im Zeilenplot deutlich die Kanten aufzeigt. Dieser Kurvenverlauf wird kanalweise mit dem des multispektralen und des fusionierten Bildes verglichen.

5 Ergebnisse und Diskussion

Bei dem HCS-Verfahren kann auf allen Strukturen eine deutliche räumliche Verbesserung erkannt werden. Dieses wird durch den jeweiligen Zeilenplot bestätigt, da der Kurvenverlauf des fusionierten Kanals dem des panchromatischen Kanals gleicht und eine Unterscheidung nur in der Intensität vorliegt. Spektral sind jedoch Unterschiede zwischen den einzelnen Oberflächenstrukturen zu erkennen. Während für den urbanen Raum sowohl visuell als auch quantitativ eine gute Farberhaltung erreicht werden kann, so fallen die Ergebnisse für die Wald-, Wasser- und landwirtschaftlichen Flächen deutlich schlechter aus (Tab. 1). Besonders auffällig ist der hohe SAM für landwirtschaftlichen Strukturen; auch wurden hier sehr geringe Korrelationskoeffizienten berechnet. Bei der quantitativen Untersuchung der einzelnen Kanäle kann gezeigt werden, dass bei diesem Verfahren der Wellenlängenbereich von 400 - 510 nm deutlich schlechter, der Bereich von 705 - 1040 nm deutlich besser hinsichtlich der Farberhaltung fusioniert wird. Dieses zeigt sich auch bei der visuellen Betrachtung durch Farbstörungen bei (Nadel-)Wald- und Wasserflächen.

Tab. 1: HCS - SAM und KK

	Landwirtschaftliche Fläche	Urbaner Raum	Wald	Wasser
SAM	14,97°	3,11°	7,98°	6,36°
Band 1 (400 - 450 nm)	0,10	0,93	0,20	0,25
Band 2 (450 - 510 nm)	0,16	0,96	0,33	0,46
Band 3 (510 - 580 nm)	0,35	0,97	0,74	0,77
Band 4 (585 - 625 nm)	0,41	0,98	0,79	0,88
Band 5 (630 - 690 nm)	0,37	0,99	0,84	0,94
Band 6 (705 - 745 nm)	0,76	0,99	0,96	0,98
Band 7 (770 - 895 nm)	0,86	0,99	0,96	0,99
Band 8 (860 - 1040 nm)	0,83	0,99	0,96	0,99

Tab. 2: Gram-Schmidt - SAM und KK

	Landwirtschaftliche Fläche	Urbaner Raum	Wald	Wasser
SAM	4,61°	10,09°	3,29°	3,10°
Band 1 (400 - 450 nm)	1,00	0,98	0,98	1,00
Band 2 (450 - 510 nm)	1,00	0,97	0,99	1,00
Band 3 (510 - 580 nm)	0,98	0,94	0,98	0,98
Band 4 (585 - 625 nm)	1,00	0,98	0,98	0,99
Band 5 (630 - 690 nm)	1,00	0,98	0,99	1,00
Band 6 (705 - 745 nm)	0,95	0,83	0,97	0,97
Band 7 (770 - 895 nm)	0,95	0,86	0,97	0,97
Band 8 (860 - 1040 nm)	0,95	0,86	0,97	0,97

Mit dem Gram-Schmidt-Verfahren konnten in Bezug auf die Farberhaltung gute Ergebnisse für die nicht urbanen Oberflächenstrukturen erzielt werden. Die Korrelationskoeffizienten sind für diese Strukturen sehr hoch und auch der ermittelte SAM weist auf eine gute spektrale Erhaltung hin (Tab. 2). Farbveränderungen werden jedoch im urbanen Raum sowohl visuell als auch

quantitativ festgestellt. Es wird ein hoher SAM ermittelt und die Wellenlängenbereiche von 705 - 1040 nm korrelieren weniger gut mit dem multispektralen Eingabedatensatz. Dieser Wellenlängenbereich fällt auch bei der visuellen Betrachtung hinsichtlich Farbveränderungen bei Gebäuden oder Straßen auf. Dieses lässt sich durch die gute Übernahme der räumlichen Informationen erklären, da jenes für diesen Bereich durchgehend gut gelungen ist. Die Wellenlängenbereiche von 400 - 510 nm sowie 630 - 690 nm weisen hingegen kaum eine Verbesserung der räumlichen Information auf. In Abbildung 1 werden die Unterschiede bei der Abbildungsqualität an einem im Bild vorhandenen Balkenmuster demonstriert.

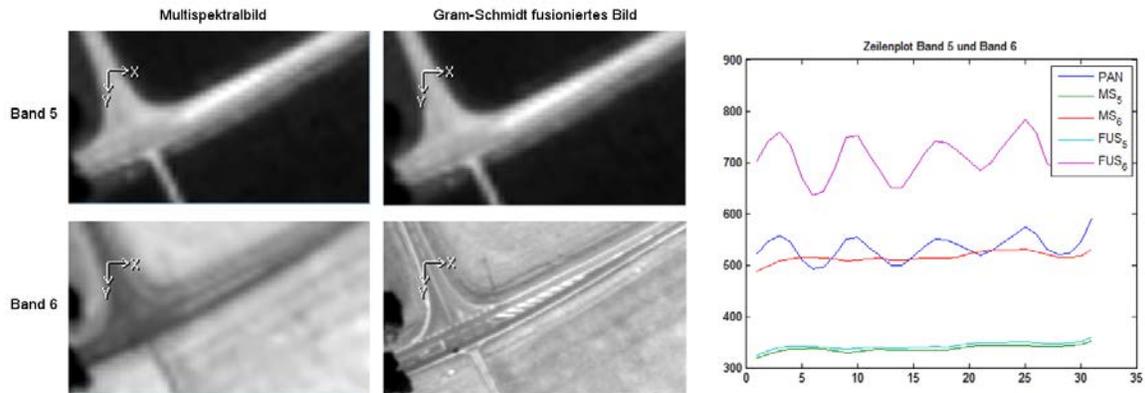


Abb. 1: Gram-Schmidt - Vergleich Band 5 und Band 6

Tab. 3: Ehlersfusion - SAM und KK

	Landwirtschaftliche Fläche	Urbaner Raum	Wald	Wasser
SAM	2,95°	3,48°	3,29°	3,10°
Band 1 (400 - 450 nm)	0,89	0,94	0,94	0,89
Band 2 (450 - 510 nm)	0,95	0,98	0,95	0,96
Band 3 (510 - 580 nm)	0,98	0,98	0,99	0,99
Band 4 (585 - 625 nm)	0,97	0,98	0,96	0,98
Band 5 (630 - 690 nm)	0,99	0,99	0,96	0,99
Band 6 (705 - 745 nm)	0,99	0,99	0,99	0,99
Band 7 (770 - 895 nm)	0,98	0,99	0,99	0,99
Band 8 (860 - 1040 nm)	0,98	0,99	0,99	0,99

Mit der Ehlersfusion können gute Ergebnisse hinsichtlich der Farberhaltung für alle Oberflächenstrukturen erzeugt werden. Dieses wird durch die hohen KK und kleinen SAM-Werte bestätigt (Tab. 3). Der Wellenlängenbereich von 400 - 450 nm fällt jedoch durch einen geringeren KK auf, durch die variablen Filtereinstellungen der Ehlersfusion lässt sich jedoch auch hier eine gute Farberhaltung erzielen. Obwohl eine räumliche Verbesserung erreicht wird,

sind besonders an Gebäuden Artefakte in einzelnen Bändern sichtbar. Visuell sind die artifiziiellen Störungen in den Wellenlängenbereichen von 400 - 580 nm und 770 - 1040 nm erkennbar, was auch in den Zeilenplots ersichtlich wird. Dieser Kurvenverlauf kann durch die variable Parametereinstellung angepasst werden, jedoch führt eine weitere Verbesserung der räumlichen Information zu Farbveränderungen. Visuell werden die Artefakte jedoch immer noch wahrgenommen und können nur bei einer hohen Farberhaltung und geringen räumlichen Verbesserung minimiert werden. Diese artifiziiellen Beobachtungen werden bei der Verwendung der Ehlersfusion mit der hypersphärischen Farbraumtransformation reduziert (Abb. 2). Dieser Ansatz eignet sich wie das HCS für Siedlungsbereiche, jedoch treten bei Wald-, Wasser- und Schattenflächen Farbstörungen auf.

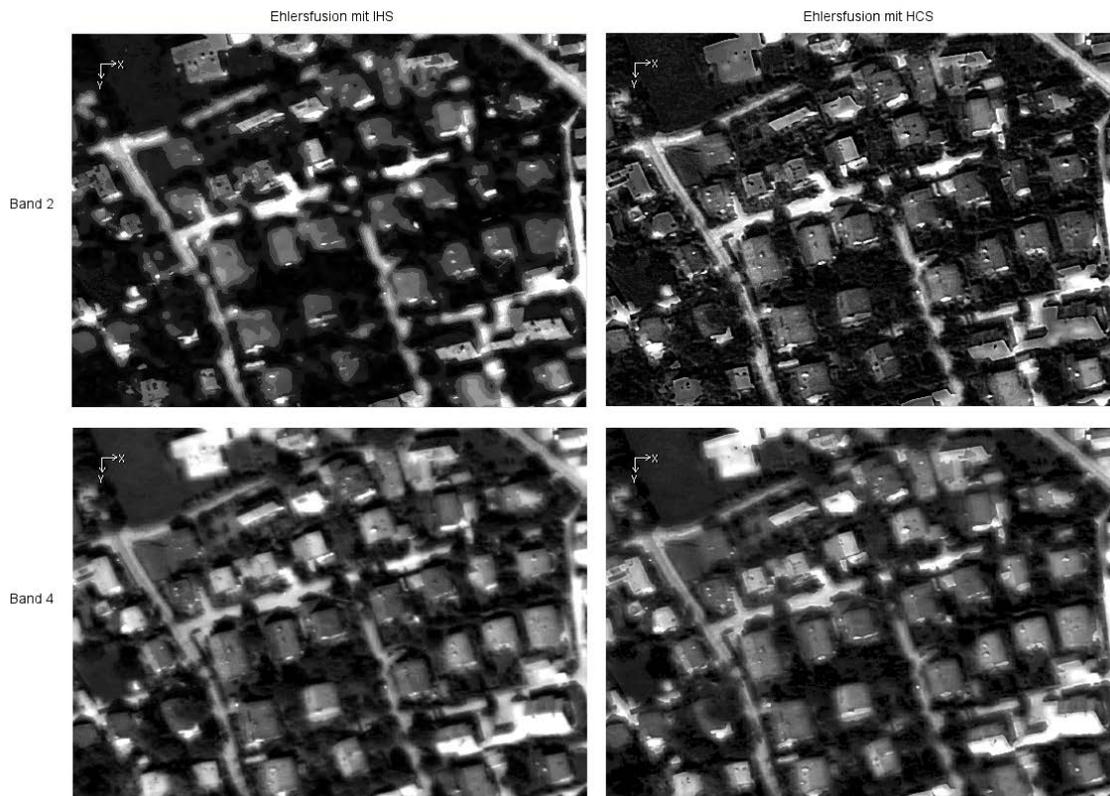


Abb. 2: Ehlersfusion - Gegenüberstellung der beiden Varianten

6 Fazit

Die Qualitätsuntersuchungen zeigen, dass die Oberflächenstruktur einen erheblichen Einfluss auf das Fusionsergebnis hat. Vorteil des HCS ist die Verbesserung der räumlichen Informationen, jedoch ist die Farberhaltung sehr von der landschaftlichen Struktur abhängig. Mit Gram-Schmidt werden ebenfalls gute Ergebnisse hinsichtlich der Farberhaltung erzeugt, jedoch ist zu bemerken, dass die langwelligen Kanäle weniger gut fusioniert werden. Dieser Effekt wird im urbanen Raum besonders deutlich. Auch wird die räumliche Qualität in einzelnen Kanälen kaum

verbessert. Die Ehlersfusion ermöglicht eine sehr gute Farberhaltung in allen Kanälen, nachteilig sind jedoch Artefakte, die bei der visuellen Betrachtung in einzelnen Kanälen erkennbar sind. Bei diesem Verfahren zeigen sich deutlich die Vorteile einer variablen Parametereinstellung, um das Fusionsergebnis den Anforderungen anzupassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass offensichtlich keine optimale Methode zur ikonischen Bildfusion von Fernerkundungsdaten mit mehr als drei oder vier Kanälen existiert. Neben der Oberflächenstruktur des WorldView-2-Datensatzes ist auch der Verwendungszweck des Fusionsergebnisses für die Wahl des Fusionsverfahrens ausschlaggebend.

7 Literaturverzeichnis

- AIAZZI, B.; BARONTI, S.; SELVA, M.; ALPARONE, L. (2007): MS + Pan image fusion by an enhanced Gram-Schmidt spectral sharpening. In: Zbigniew Bochenek (Hg.): New developments and challenges in remote sensing. Proceedings of the 26th EARSeL, Warsaw, Poland, 2006. Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, EARSeL. Rotterdam: Millpress, S. 113–120.
- ALPARONE, LUCIANO; WALD, LUCIEN; CHANUSSOT, JOCELYN; THOMAS, CLAIRE; GAMBA, PAOLO; BRUCE, LORI MANN (2007): Comparison of Pansharpening Algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S Data-Fusion Contest. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 (10), S. 3012–3021.
- CHAVEZ, PAT S.; JR.; STUART, C.; ANDERSON, JEFFREY A. (1991): Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57 (3), S. 295–303.
- CHOI, JAEWAN; YEOM, JUNHO; CHANG, ANJIN; BYUN, YOUNGGI; KIM, YONGIL (2013): Hybrid Pansharpening Algorithm for High Spatial Resolution Satellite Imagery to Improve Spatial Quality. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 10 (3), S. 490–494.
- DIGITALGLOBE (2013): WorldView-2 Spacecraft Data Sheet. Online verfügbar unter <http://www.digitalglobe.com/resources/satellite-information>, zuletzt geprüft am 21.01.2014.
- EHLERS, MANFRED; KLONUS, SASCHA (2004): Erhalt der spektralen Charakteristika bei der Bildfusion durch FFT basierte Filterung. In: *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation* (6), S. 495–506.
- EHLERS, MANFRED; KLONUS, SASCHA; JOHAN ÅSTRAND, PÄR; ROSSO, PABLO (2010): Multi-sensor image fusion for pansharpening in remote sensing. In: *International Journal of Image and Data Fusion* 1 (1), S. 25–45.
- GARZELLI, A.; CAPOBIANCO, L.; ALPARONE, L.; AIAZZI, B.; BARONTI, S.; SELVA, M. (2010): Hyperspectral pansharpening based on modulation of pixel spectra. In: 2010 2nd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Reykjavik, Iceland, S. 1–4.
- KHAN, M.M; ALPARONE, L.; CHANUSSOT, J. (2009): Pansharpening Quality Assessment Using the Modulation Transfer Functions of Instruments. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47 (11), S. 3880–3891.
- KLONUS, SASCHA; EHLERS, MANFRED (2007): Image Fusion Using the Ehlers Spectral Characteristics Preservation Algorithm. In: *GIScience & Remote Sensing* 44 (2), S. 93–116.

- KLONUS, SASCHA; EHLERS, MANFRED (2009): Performance of evaluation methods in image fusion. In: 12th International Conference on Information Fusion, Seattle, WA, USA, July 6-9, 2009, S. 1409–1416.
- KRAUS, KARL (2004): Photogrammetrie. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. Aufl. Berlin: Walter de Gruyter.
- KRUSE, F.A.; LEFKOFF, A.B.; BOARDMAN, J.W.; HEIDEBRECHT, K.B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P.J.; GOETZ, A.F.H (1993): The spectral image processing system (SIPS)- interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. In: *Remote Sensing of Environment* 44 (2-3), S. 145–163.
- LABEN, CRAIG A.; BROWER, BERNARD V. (2000): Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. Angemeldet durch Eastman Kodak Company, Rochester NY. Veröffentlichungsnr: US 6011875.
- MASSIP, PIERRE; BLANC, PHILIPPE; WALD, LUCIEN (2012): A Method to Better Account for Modulation Transfer Functions in ARSIS-Based Pansharpening Methods. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50 (3), S. 800–808.
- MEDINA, A.; MARCELLO, J.; RODRIGUEZ, D.; EUGENIO, F.; MARTIN, J. (2012): Quality evaluation of pansharpening techniques on different land cover types. In: IGARSS 2012 - 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany, S. 5442–5445.
- NUNEZ, J.; OTAZU, X.; FORS, O.; PRADES, A.; PALA, V.; ARBIOL, R. (1999): Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37 (3), S. 1204–1211.
- OTAZU, XAVIER; GONZALEZ-AUDICANA, MARIA; FORS, OCTAVI; NUNEZ, JORGE (2005): Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43 (10), S. 2376–2385.
- PADWICK, CHRIS; DESKEVICH, MICHAEL; PACIFIC, FABIO; SMALLWOOD, SCOTT (2010): WorldView-2 Pan-Sharpener. ASPRS 2010 Annual Conference. San Diego, California, 26.04.2010. Online verfügbar unter http://www.digitalglobe.com/downloads/WorldView-2_Pan-Sharpener.pdf, zuletzt geprüft am 21.01.2014.
- POHL, C.; VAN GENDEREN, J. L. (1998): Review article Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications. In: *International Journal of Remote Sensing* 19 (5), S. 823–854.
- PRADHAN, PUSHKAR S.; KING, ROGER L.; YOUNAN, NICOLAS H.; HOLCOMB, DERROLD W. (2006): Estimation of the Number of Decomposition Levels for a Wavelet-Based Multiresolution Multisensor Image Fusion. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44 (12), S. 3674–3686.
- RYAN, ROBERT; BALDRIDGE, BRAXTON; SCHOWENGERDT, ROBERT A.; CHOI, TAEYOUNG; HELDER, DENNIS L.; BLONSKI, SLAWOMIR (2003): IKONOS spatial resolution and image interpretability characterization. In: *Remote Sensing of Environment* 88 (1-2), S. 37–52.
- THOMAS, C.; LANERI, J.-C.; RANCHIN, T.; WALD, L. (2005): A modular platform for fusion of images. In: PSIP 2005 ; Fourth International Conference on Physics in Signal & Image Processing ; Toulouse, 31 January - 2 February 2005 ; proceedings ; Jan. 31 - Feb. 02, 2005, ENSEEIHT, Toulouse, France. International Conference on Physics in Signal & Image Processing; PSIP 2005. Elektronische Ressource. Toulouse. Online verfügbar unter http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/06/81/52/PDF/Final_psisip_laneri_thomas.pdf.

- THOMAS, C.; WALD, L. (2007): Comparing distances for quality assesment of fused images. In: Zbigniew Bochenek (Hg.): New developments and challenges in remote sensing. Proceedings of the 26th EARSeL, Warsaw, Poland, 2006. Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, EARSeL. Rotterdam: Millpress, S. 101–111.
- THOMAS, C.; WALD, LUCIEN (2005): Assessment of the quality of fused products. In: Oluić (Hg.): Proceedings of the 24th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories. New strategies for European remote sensing. Dubrovnik, Croatia, May 25 - 27 2004. Rotterdam: Millpress, S. 317–325.
- VIVONE, GEMINE; RESTAINO, ROCCO; DALLA MURA, MAURO; LICCIARDI, GIORGIO; CHANUSSOT, JOCELYN (2013): Contrast and Error-Based Fusion Schemes for Multispectral Image Pansharpening. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, S. 930–934.
- WALD, LUCIEN; RANCHIN, THIERRY; MANGOLINI, MARC (1997): Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 63 (6), S. 691–699.
- WITHARANA, CHANDI; CIVCO, DANIEL L.; MEYER, THOMAS H. (2013): Evaluation of pansharpening algorithms in support of earth observation based rapid-mapping workflows. In: *Applied Geography* 37, S. 63–87.
- WITHARANA, CHANDI; CIVCO, DANIEL L.; MEYER, THOMAS H. (2014): Evaluation of data fusion and image segmentation in earth observation based rapid mapping workflows. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 87, S. 1–18.
- ZHANG, YUN (2004): Understanding Image Fusion. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70 (6), S. 657–661.
- ZHIQIANG ZHOU; SILONG PENG; BO WANG; ZHIHUI HAO; SHAOLIN CHEN (2012): An Optimized Approach for Pansharpening Very High Resolution Multispectral Images. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 9 (4), S. 735–739.