

Erhalt der spektralen Charakteristika bei der Bildfusion durch FFT basierte Filterung

MANFRED EHLERS, Osnabrück & SASCHA KLONUS, Vechta

Keywords: image transformation, intensity-hue-saturation (IHS), adaptive filter, spectral filter, pan sharpening, SPOT, Landsat

Zusammenfassung: Bildfusionen mittels *Intensity-Hue-Saturation* (IHS) oder *Principal Component* (PC) Transformation sind gängige Verfahren, um hoch auflösende panchromatische Aufnahmen in niedrig auflösende multispektrale Bilddaten zu integrieren. Diese Verfahren garantieren multispektrale Bilder mit hoher räumlicher Auflösung, können allerdings die spektralen Charakteristiken der Originaldaten verändern. In diesem Artikel wird ein neues Verfahren präsentiert, welches auf der IHS Transformation basiert, die allerdings auf gefilterten Bilddaten beruht. Zur genauen Anpassung an die vorhandene Bildinformation wird diese Filterung im Frequenzraum durchgeführt. Dadurch wird garantiert, dass die hoch auflösende panchromatische Aufnahme keine Veränderungen der spektralen Charakteristiken im Multispektralbild erzeugt. Die neu entwickelte Methode wird für die Fusion von SPOT und ETM Bilddaten exemplarisch vorgeführt und es wird ihre Überlegenheit gegenüber gebräuchlichen Verfahren wie PC, Brovey Transformation oder der multiplikativen Integration nachgewiesen. Obwohl die verwendete IHS Transformation nur für drei Spektralbereiche entwickelt wurde, kann sie nach dieser Methode auf beliebig viele Kanäle ausgedehnt werden und steht somit auch zur Verbesserung der räumlichen Auflösung von Hyperspektralbildern zur Verfügung.

Summary: *FFT based filtering for spectral characteristics preserving image fusion.* Image transforms such as the Intensity-Hue-Saturation (IHS) or Principal Component (PC) transform are widely used to fuse panchromatic images of high spatial resolution with multispectral images of lower resolution. These techniques create multispectral images of higher spatial resolution but usually at the cost that these transforms do not preserve the original color or spectral characteristics of the input image data. In this study, a new method for image fusion is presented that is based on filtering in the Fourier domain. This method preserves the spectral characteristics of the lower resolution multispectral images. In this study, SPOT panchromatic images are fused with Landsat ETM multispectral data. Comparison with existing fusion techniques such as PC, Brovey or multiplicative transform prove the superiority of the new method. While in principle based on the IHS transform (which usually only works for three bands), the method is extended to any arbitrary number of spectral bands. Using this approach, this method can be applied to sharpen hyperspectral images without changing their spectral behavior.

1 Einführung

1.1 Fusion hoch auflösender Fernerkundungsdaten

Eine Vielzahl von satelliten- und flugzeuggestützten Fernerkundungssystemen ist gegenwärtig operationell verfügbar. Die

meistgenutzten Satellitensysteme stellen derzeit die elektro-optischen Abtaster vom Typ Landsat (USA), SPOT (Frankreich) oder IRS (Indien) mit Bodenauflösungen von 5 bis 30 m dar. Jedoch liefern aktuelle hoch auflösende Satellitensysteme wie Ikonos oder QuickBird, deren Entwicklung auf die Spionagesatelliten der letzten Genera-

tion zurückgehen, Bodenaufösungen bis zu 0,60 m (schwarzweiß) und 2,50 m (multispektral) und ermöglichen damit erstmals Anwendungen in urbanen Regionen (EHLERS 2004a). Höchst auflösende Flugzeugsensoren mit Bodenpixelgrößen im cm-Bereich fordern das klassische Luftbild heraus (SCHIEWE & EHLERS 2004). Allen diesen Sensoren ist allerdings gemein, dass die höchste räumliche Auflösung nur im panchromatischen Modus erzeugt werden kann. Das Verhältnis zwischen der hoch auflösenden panchromatischen und der niedriger auflösenden multispektralen Aufnahme liegt dabei zwischen 1:2 und 1:8. Um hoch auflösende Multispektralbilder zu erzeugen, werden üblicherweise Methoden der Bildfusion eingesetzt.

Fusionstechniken in der Fernerkundung werden generell in drei Klassen eingeteilt: Pixelbasiert (ikonisch), Feature basiert (symbolisch) und wissensbasiert (POHL und VAN GENDEREN 1998). Von größter Bedeutung für die Fernerkundung ist die ikonische Bildfusion, für die viele verschiedene Methoden entwickelt wurden (siehe z. B. CLICHE et al. 1985, PRICE 1987, WELCH & EHLERS 1988, WALD et al. 1997, ZHANG 1997). Es erweist sich allerdings, dass die existierenden Methoden nicht ausreichen, um die hoch auflösenden Bildinformationen verlustfrei in die multispektralen Bilddaten zu integrieren. Dabei stellen Farbveränderungen des integrierten Bildes gegenüber dem Originalmultispektralbild das größte Problem dar (ZHANG 2002). Diese Probleme werden noch verstärkt, wenn multisensorale Bilddaten fusioniert werden sollen (EHLERS 2004b).

1.2 Ikonische Bildfusion

Ikonische Bildfusionstechniken lassen sich in drei Gruppen einteilen: (1) Farb-Transformationen, (2) statistische Methoden und (3) numerische Methoden. Die erste Gruppe transformiert ein Bild aus dem „normalen“ RGB-Raum in einen anderen Farbraum. Dazu gehören die Intensity-Hue-Saturation (IHS) oder die Hue-Saturation-Value (HSV) Transformationen. Die IHS-Transforma-

tion generiert aus den RGB-Farbkanälen eine neue Darstellung als Intensität, Farbwert und Sättigungswert. Die Intensitätskomponente wird durch das hoch auflösende panchromatische Bild ersetzt, das fusionierte IHS-Bild danach in den Originalfarbraum zurück transformiert (WELCH & EHLERS 1987). Die IHS-Transformation zum Verbessern der Bildschärfe ist eine der gebräuchlichsten in der Fernerkundung (siehe zum Beispiel CARPER et al. 1990, EHLERS 1991, SMARA et al. 1996 oder YILDIMI et al. 1996). Ähnliche Ergebnisse lassen sich auch mit der HSV-Transformation erreichen.

Statistische Techniken erweitern die Anzahl gleichzeitig zu bearbeitender Kanäle. Die häufigste Methode ist die Hauptkomponententransformation (*principal component transform-PC*). Diese Transformation erzeugt einen Merkmalsraum, in dem die Farbkanäle keine Korrelation mehr aufweisen (RICHARDS & JIA 1999). Die neuen Kanäle werden in absteigender Reihenfolge ihrer Eigenvektoren organisiert, sodass der Informationsgehalt der ersten Hauptkomponenten am größten ist. Die erste Hauptkomponente wird dann – analog zur IHS-Fusion – durch das hoch auflösende panchromatische Bild ersetzt, danach überführt eine inverse Hauptkomponenten-Transformation das fusionierte Bild zurück in den Originalbildraum (RICHARDS 1984, SINGH & HARRISON 1985, FUNG & LEDREW 1987, CHAVEZ et al. 1991, SHETTIGARA 1992).

Die dritte Gruppe der Fusionstechniken sind numerische Verfahren. Dabei werden die panchromatischen Bilddaten zu den multispektralen addiert bzw. mit ihnen multipliziert (CLICHE et al. 1985, WELCH & EHLERS 1987). Dabei können zusätzlich Wichtungs- und Skalierungsfaktoren eingesetzt werden (CARPER et al. 1990, EHLERS 1991, MUNECHIKA et al. 1993, PELLEMANS et al. 1993). Die vielfach angewendete *Brovey Transform* (HALLADA & COX 1983) verwendet eine Kombination von Divisions-, Normierungs- und Multiplikationsverfahren zur Verbesserung der Bildschärfe (EYERS et al. 1998, JURIO & VAN ZUIDAM 1998). Die Nutzung von Wavelets (MALLAT 1989) zur Dekomposition von Bilddaten und auflö-

sungsangepasster Bildfusion wird von RAN-CHIN & WALD (1993), LI et al. (1995), ZHOU et al. (1998) sowie SHI et al. (2003) vorgeschlagen.

2 Spektralwert erhaltende Bildfusion

2.1 Methodengrundlagen

Die Grundidee zur Spektralwert erhaltenen Bildfusion ist, dass das hoch auflösende panchromatische Bild zwar das Farbbild schärfen soll, dabei aber keine zusätzliche spektrale Information liefern darf. Als Fusionsmethode findet die IHS Transformation Anwendung, da sie die Farbwerte in der Transformation isoliert (*hue value*). Vor dem eigentlichen Fusionsprozess werden Verfahren zur Bildfilterung verwendet. Diese Verfahren erlauben Entwurf und Einsatz angepasster Filter zur Verhinderung von Farbverschiebungen. Eine ideale Fusion würde nur die hochfrequenten Anteile des hoch auflösenden Bildes (Kanten, kleinskalige Objektänderungen etc.) berücksichtigen, aber nicht seine tatsächlichen Grauwerte. Dieses kann durch eine bildangepasste Hochpassfilterung erreicht werden. Dazu ist die Kenntnis der Verteilung der Bildinformation über die Ortsfrequenzen notwendig. Zur Bestimmung dieser Verteilung werden zweidimensionale Fouriertransformationen eingesetzt, die die Bilddaten aus dem Ortsraum in den Frequenzraum (Intensitäts- und Phasenspektrum) überführen (GONZALES & WOODS 2001). Das Intensitätsspektrum liefert die Verteilung der Bildinformation in Abhängigkeit von den Ortsfrequenzen und erlaubt somit den Entwurf bildangepasster Filter (EHLERS et al. 1984).

2.2 FFT basierte IHS Fusion

2.2.1 Bilddaten

Die für die Methodenentwicklung verwendeten Bilddaten bestehen aus einer panchromatischen SPOT Aufnahme vom 16. März 2003 mit 5 m Pixelgröße und einer multispektralen Landsat ETM Aufnahme (Kanä-

le 1–5 und 7) vom 26. Juni 2001 mit 30 m Auflösung. Ein 512×512 Pixel großer auf Gauß-Krüger Koordinaten entzerrter Ausschnitt des SPOT Bildes zeigt den Norden von Aachen (Abb. 1). Die Landsat ETM Aufnahme (Abb. 2 und 3) wurden direkt auf das georeferenzierte SPOT Bild entzerrt und dabei ebenfalls auf 5 m Pixelgröße reformatiert. Das Resampling wurde mittels bikubischer Faltung durchgeführt, eine Methode,



Abb. 1: Panchromatische SPOT Aufnahme vom 16. März 2003 mit 5 m Pixelgröße.

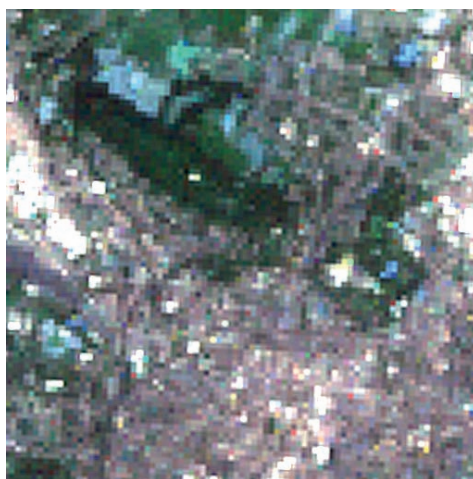


Abb. 2: Landsat ETM Bild (Echtfarbendarstellung) vom 26. Juni 2001, entzerrt auf die SPOT-Aufnahme und auf 5 m Pixelgröße formatiert.

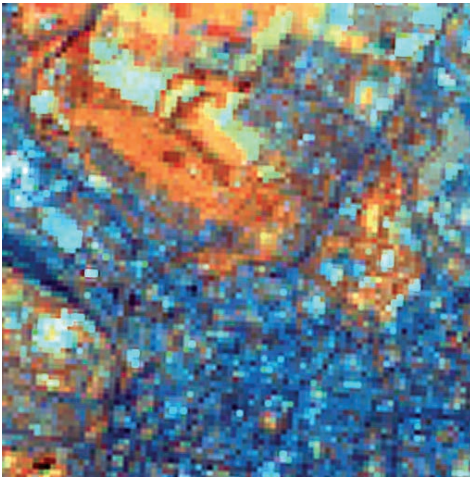


Abb. 3: Landsat ETM Aufnahme, Falschfarbendarstellung mit den Kanälen 4 (rot), 5 (grün), 7 (blau).

die die besten Ergebnisse bei der nachfolgenden Bildfusion garantiert (EHLERS 1991). Die Entzerrungsgenauigkeit (*Root-Mean-Square Error*) lag bei $\pm 7.5\text{m}$.

2.2.2 Methodenbeschreibung

Eine Übersicht über die entwickelte Methode geben die Abb. 4a und 4b. Der erste Schritt besteht in der Transformation der multispektralen Aufnahme in den IHS Raum. Dazu werden jeweils drei Kanäle der Multispektralaufnahme selektiert und IHS transformiert. Bei der Landsat ETM Aufnahme werden in zwei getrennten Transformationen die Kanäle 1, 2 und 3 sowie die Kanäle 4, 5 und 7 in den IHS Raum überführt. Abb. 5 zeigt die Intensitätskomponente für die ETM Transformation mit den Kanälen 1, 2 und 3.

Im nächsten Schritt gilt es, den Grauwertbereich des SPOT-Bildes an den der Intensitäts-Komponente anzupassen. Im vorliegenden Beispiel liegt die Intensität im Wertebereich $[0,1]$ vor. Daher reicht es, die 8-bit kodierten panchromatischen SPOT-Grauwerte durch 255 zu dividieren. Die normierten Bilddaten werden durch eine zweidimensionale *Fast Fourier Transform* (FFT) in den

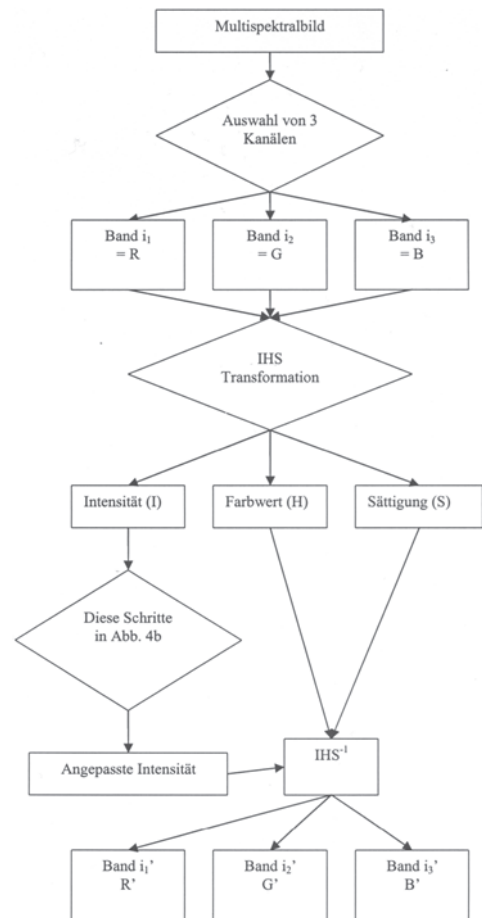


Abb. 4a: FFT basierte Filterung zur Bildfusion mit 3 multispektralen Kanälen i_1, i_2, i_3 (Teil 1).

Frequenzraum überführt. Die Analyse des Powerspektrums dient zum Entwurf der isotropen Hoch- bzw. Tiefpassfilter. Dabei wird die hochfrequente Information aus dem panchromatischen SPOT Bild und die niederfrequente Information aus dem ETM-Bild herausgefiltert.

Zum Filterentwurf für die Intensitätskomponente des multispektralen Bildes kann zunächst davon ausgegangen werden, dass alle Informationen in den Frequenzbändern oberhalb einer gewissen Grenzfrequenz nur künstlich erzeugt wurden. Das Reformatieren auf die Pixelgröße des panchromatischen Bildes erzeugt eine artifi-

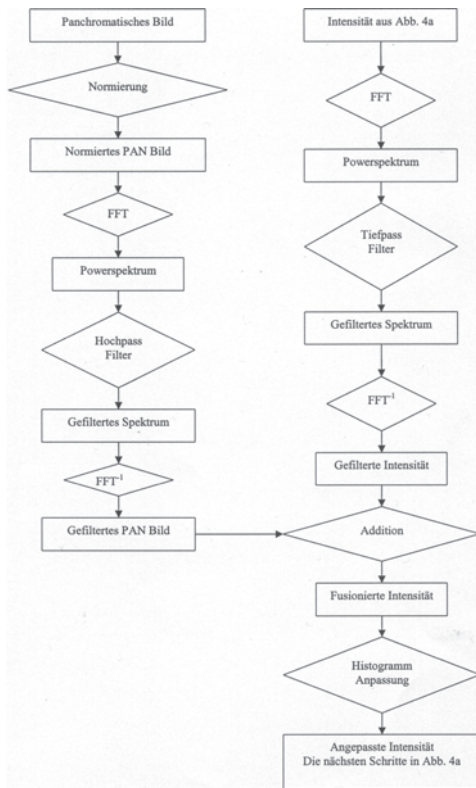


Abb. 4b: FFT basierte Filterung zur Bildfusion (Teil 2).

zielle Erhöhung der räumlichen Auflösung, die keine echte Informationsverdichtung darstellt. Diese Frequenz lässt sich anhand des Verhältnisses der Bodenauflösung beider Bilder bestimmen. Im vorliegenden Fall wird ein Landsat TM Pixel von 30 m auf 5 m formatiert, das Verhältnis beträgt demnach 1:6. Damit besitzen alle Frequenzen oberhalb von $n = 85$ keine echten Informationen und können herausgefiltert werden.

Zur optimalen Filterbandselektion müssen Tests mit variablen Filterbreiten vorgenommen werden. Idealerweise wirken die Filter genau entgegengesetzt, d. h. der Tiefpassfilter für die multispektrale Komponente filtert genau die Frequenzen heraus, die beim Hochpassfilter des panchromatischen Bildes durchgelassen werden. Die Filterung wird im Frequenzraum durch Multiplikation mit den isotropen Filtern durchgeführt. Um das Problem des Gibb'schen Phänomens (Oszillationen im Ortsbereich bei Rechteckfilterung) zu vermeiden, werden die Filter durch ein Hanning Fenster geglättet und es wird ein geringer Überlappungsbereich akzeptiert. Optimale Ergebnisse werden im vorliegenden Beispiel durch eine Hochpassfilterung ab der Ortsfrequenz $n = 16$ und einer entsprechenden Tiefpass-

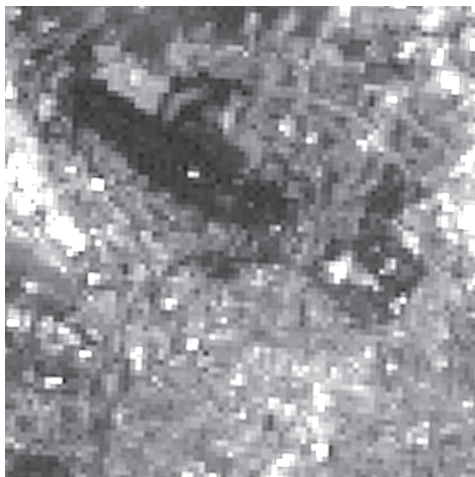


Abb. 5: Intensitätskomponente des Landsat ETM Bildes (IHS transformiert mit den Kanälen 1, 2 und 3).

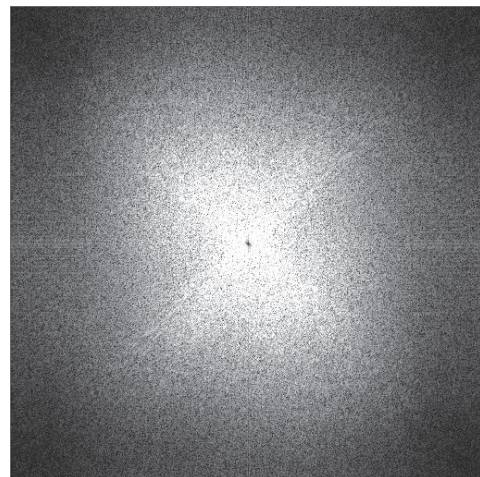


Abb. 6: SPOT Intensitätsspektrum nach Hochpass Filterung im Frequenzraum. (Hanning Filter mit einer *cut-off* Frequenz von $n = 16$).

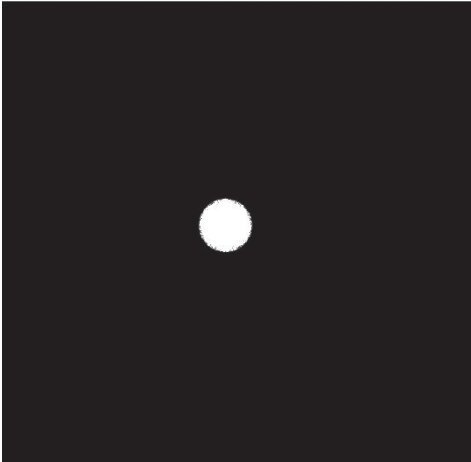


Abb. 7: Tiefpass gefiltertes Spektrum der Intensitätskomponente des Landsat ETM Bildes (Hanning Filter mit einer *cut-off* Frequenz von $n = 32$).

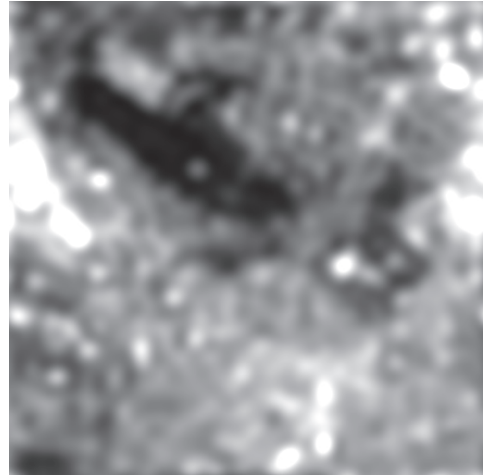


Abb. 9: Tiefpass gefilterte Intensitätskomponente des Landsat ETM Bildes nach der inversen FFT.



Abb. 8: Hochpass gefiltertes SPOT Bild nach der inversen FFT.



Abb. 10: Fusionierte SPOT/ETM Intensitätskomponente nach der Histogramm Anpassung.

filterung bis zur Ortsfrequenz $n = 32$ erzielt. Abb. 6 zeigt das gefilterte Spektrum des panchromatischen SPOT Bildes, Abb. 7 das der gefilterten Intensitätskomponente des ETM Bildes.

Nach der Filterung im Frequenzraum werden die Bilddaten durch eine inverse FFT in den Ortsraum zurücktransformiert (Abb. 8 und 9). Danach werden die gefilterten Bilder addiert, sodass der hochfrequente

Anteil des hoch auflösenden Bildes in den niederfrequenten Anteil der niedrig auflösenden Aufnahme integriert wird. Am Schluss erfolgt eine Histogrammanpassung der fusionierte Komponente an die ursprüngliche Intensitätskomponente des Multispektralbildes, um eine optimale Grauwertanpassung zu gewährleisten (Abb. 10).

Aus der fusionierten Intensitätskomponente und den ursprünglichen Farbwert-



Abb. 11: SPOT/ETM IHS Bildfusion nach FFT basierter Filterung: Ergebnisse für die Kanäle 1, 2, 3 (Echtfarben Bild).

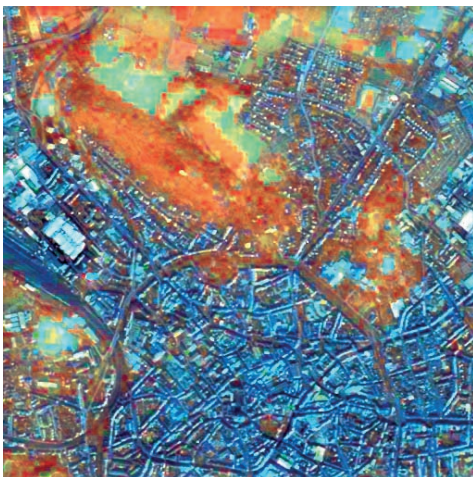


Abb. 12: SPOT/ETM IHS Bildfusion nach FFT basierter Filterung: Ergebnisse für die Kanäle 4, 5, 7 (Infrarot Bild).

und Sättigungswert-Komponenten des Multispektralbildes wird ein neues IHS Bild erzeugt. Dieses wird dann über eine inverse IHS Transformation zurück in ein RGB Bild umgewandelt, welches nun die hohe Auflösung des panchromatischen Bildes und die spektralen Charakteristika des multispektralen Bildes enthält.

Sofern mehr als drei Kanäle im Multispektralbild vorhanden sind, werden sukzessive jeweils drei der Kanäle ausgewählt und wie oben beschrieben mit den panchromatischen Daten fusioniert. Anschließend werden alle Kanäle zu einem vollständigen neuen multispektralen Bild zusammengefügt, welches wieder alle ursprünglichen Kanäle (mit entsprechender Verbesserung der räumlichen Auflösung) enthält. Es wird daher möglich sein, auf diese Weise auch Hyperspektraldaten durch Integration mit hoch auflösenden Aufnahme zu „schärfen“, ohne dass die spektrale Information verändert wird. Abb. 11 und 12 zeigen die Ergebnisse der IHS Fusion von SPOT und ETM Daten nach der FFT basierten Bildfilterung. Deutlich ist bereits bei der visuellen Analyse zu erkennen, dass die Farbinformation aus dem Landsat Bild (siehe Abb. 2 und 3) unverändert aussieht, das Bild aber durch die Integration der gefilterten SPOT Daten eine entsprechend verbesserte räumliche Auflösung erhalten hat.

Für weitere Analysen der Ergebnisse wird die neue Methode mit Standard Fusions-Algorithmen verglichen.

2.2.3 Vergleich mit Standardverfahren der Bildverarbeitung

Alle vorgestellten Analysen wurden mit der Software ERDAS Imagine durchgeführt. Daher werden ebenfalls die Datenfusionsmethoden von ERDAS für den Vergleich mit der neu entwickelten Methode herangezogen. ERDAS bietet hierzu das Modul „Resolution Merge“ an, welches drei verschiedene Methoden enthält:

- *Principal Component (PC)*
- *Multiplicative*
- *Brovey Transform*

Diese drei Standardmethoden werden mit den gleichen Datensätzen benutzt, die für die vorgestellte Methode verwendet wurden. Die Ergebnisse werden in den Abb. 13 bis 18 präsentiert. Es ist leicht zu erkennen, dass die PC Methode im Ergebnis die spektralen Informationen stark verändert, was besonders in der Kombination der Kanäle 4, 5 und



Abb. 13: Bildfusion durch *Principal Component* (PC): Kanäle 1, 2, 3 (Echtfarben Bild).



Abb. 15: Bildfusion durch Brovey Transformation: Kanäle 1, 2, 3 (Echtfarben Bild).

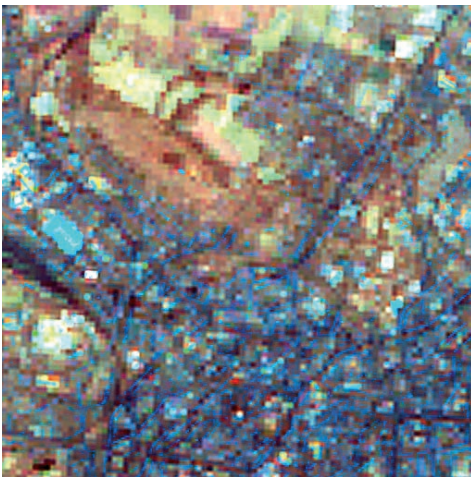


Abb. 14: Bildfusion durch PC: Kanäle 4, 5, 7 (Infrarot Bild).



Abb. 16: Bildfusion durch Brovey Transformation: Kanäle 4, 5, 7 (Infrarot Bild).

7 evident wird (Abb. 14). Erstaunlicherweise ist auch von einer Verbesserung der räumlichen Auflösung in dieser Farbkombination kaum etwas zu merken. Der Grund dürfte in der rein statistisch wirkenden Transformation liegen, die im Gegensatz zur IHS Transformation keine Trennung von spektraler und räumlicher Information erlaubt.

Für alle Standardverfahren gilt, dass die Farbwerte nach der Fusion z.T. erhebliche

Abweichungen von den Originalfarbwerten aufweisen. Dies wird z. B. an den Feldern nördlich des Waldgebietes deutlich. Auch die räumliche Auflösung stellt sich nach der FFT basierten Filterung besser dar. Dieses kann man z. B. an den Gebäuden im Osten, nördlich des Stadions, sehr gut erkennen. Sie wirken auf Abb. 11 durch die Farbintegration sogar besser aufgelöst als im panchromatischen SPOT Bild. Einzig die Brovey Transformation erreicht eine ähnlich hohe



Abb. 17: Bildfusion durch *Multiplicative Merge*: Kanäle 1, 2, 3 (Echtfarben Bild).

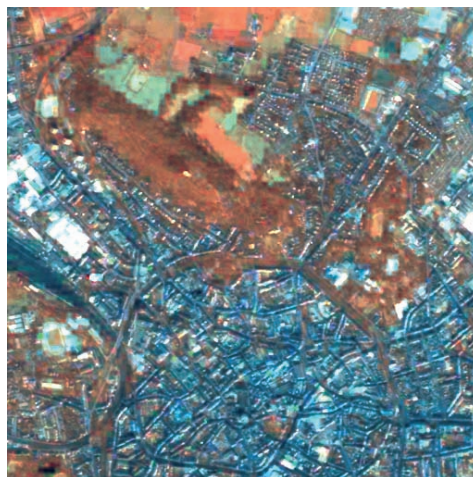


Abb. 18: Bildfusion durch *Multiplicative Merge*: Kanäle 4, 5, 7 (Infrarot Bild).

räumliche Auflösung. Die Farbwerte werden allerdings auch hier verändert, wie insbesondere bei den Infrarotkanälen (4, 5, 7) ersichtlich wird (Abb. 16). Dass die multiplikative Fusion deutlich schlechtere Farbkontraste erzeugt, ist zu erwarten, da durch die gleichartige Integration der panchromatischen Information in *jeden* Kanal die spektrale Korrelation zwischen den Kanälen erhöht wird und dadurch die Farben zwangsläufig „blasser“ werden müssen.

Zum weiteren Genauigkeitsvergleich betrachten wir die Statistiken vor und nach der Bildfusion, um die Qualität der Fusionsmethoden auch quantitativ abschätzen zu können. Dabei interessieren insbesondere die Werte für Mittel- und Medianwert innerhalb der Kanäle sowie die Standardabweichun-

gen der Grauwerte. Tab. 1 und 2 zeigen beispielhaft die statistischen Werte für die Kanäle 1 und 4 nach der jeweiligen SPOT/ETM Bildfusion.

Einzig die FFT Filter IHS Fusion liegt mit den erzielten Werten sehr nahe an den Originalwerten. Zwar sind leichte Abweichungen bei minimalen und maximalen Grauwerten vorhanden, aber Mittel- und Medianwert sind fast identisch zum Original. Auch die Standardabweichung weist nur kleine Abweichungen (< 2 Grauwerte) auf. Die nächstbesten Ergebnisse werden von der *Principal Component* Fusion erzielt, hier liegen die Abweichungen bei Mittel- und Medianwert allerdings bereits zwischen 10 und 20 Grauwerten. Völlig aus der Reihe liegt die multiplikative Fusion, was darauf

Tab. 1: Histogramm Werte, Kanal 1.

Bild	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung
Original	64	254	86,153	85	11,068
FFT Filter IHS Fusion	31,721	245,61	85,854	84,248	12,988
Brovey Transformation	5,3122	55,874	13,663	12,027	4,404
<i>Principal Component</i> Fusion	44	257	75,023	72,289	11,404
Multiplikative Fusion	2178	64770	6264,414	5356,5	2807,834

Tab. 2: Histogramm Werte, Kanal 4.

Bild	Minimum	Maximum	Mittelwert	Median	Standardabweichung
Original	18	168	69,510	66	22,818
FFT Filter IHS Fusion	0	218,58	68,936	65,743	21,644
Brovoy Transformation	3,04	60,428	10,074	9,5409	3,101
Principal Component Fusion	-59	222	87,110	86,988	19,777
Multiplikative Fusion	846	37740	4844,87	4593	1902,803

beruht, dass die Werte nicht in den ursprünglichen Grauwertbereich zurück transformiert werden. Aber auch nach Rücktransformation in den Bereich [0,255] weisen alle Werte dieser Fusionstechnik hohe Abweichungen von den Originalgrauwerten auf.

3 Ausblick

Die Spektralwert erhaltende Bildfusion soll an weiteren Beispielen intensiv untersucht und weiterentwickelt werden. Erste Untersuchungen zeigen, dass diese Technik auch bei der Fusion von hyperspektralen und höchstauflösenden Flugzeugsensoren gute Ergebnisse liefert (EHLERS et al. 2004). Als weitere Bildfusionstechnik soll die *wavelet* Transformation in die nächsten Analysen einbezogen werden (NA et al. 2004). Weitere quantitative Vergleiche mittels Bildprofilen sind ebenfalls in Arbeit. Der Filterentwurf soll möglichst automatisiert werden. Dazu sind umfangreiche Testreihen mit multispektralen und hyperspektralen Bilddaten vorgesehen. Ausgehend von den erzielten Ergebnissen soll eine *Flowchart* basierte Toolbox entwickelt werden, die es dem Gelegenheitsnutzer ermöglichen soll, Standardwerte abzurufen bzw. Änderungen interaktiv einzubringen. Erste Schritte als Integration in den ERDAS *Modeler* zeigen bereits ermutigende Ergebnisse.

4 Literatur

CARPER, W.J., LILLESAND, T.M. & KIEFER, R. W., 1990: The use of Intensity-Hue-Saturation

transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **56**: 459–467.

- CHAVEZ, P.S., SIDES, S.C. & ANDERSON, J.A., 1991: Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: TM & SPOT pan. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **57**: 295–303.
- CLICHE, G., BONN, F. & TEILLET, P., 1985: Integration of the SPOT Pan channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **51**: 311–316.
- EHLERS, M., 1991: Multisensor image fusion techniques in remote sensing. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **46**: 19–30.
- EHLERS, M., 2004a: Remote Sensing for GIS Applications: New Sensors and Analysis Methods. – In: EHLERS, M., KAUFMANN, H.J. & MICHEL, U. (Eds.): Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology III. – Proceedings of SPIE Vol. 5239, p. 1–13, Bellingham, WA.
- EHLERS, M., 2004b: Spectral Characteristics Preserving Image Fusion Based on Fourier Domain Filtering. – In: EHLERS, M., KAUFMANN, H.J. & MICHEL, U. (Eds.): Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IV. – Proceedings of SPIE, Bellingham, WA (accepted for publication).
- EHLERS, M., DENNERT-MÖLLER, E., KOLOUCH, D. & LOHMANN, P., 1984: Non-Recursive Filter Techniques in Digital Processing of Remote Sensing Data. – Proceedings of the XVth International Congress of ISPRS. Rio de Janeiro, Brazil, IAPRS XXV/A7, pp. 163–175.
- EHLERS, M., KLONUS, S., ADEN, C., BAST, H., BUCHHOLZ, T., KREUTZER, T. & LOESEWITZ, L., 2004: IHS Transform revisited: Spectral Characteristics Preserving Data fusion Based on Fourier Domain Filtering. – Proceedings, 1st

- Göttingen GIS and Remote Sensing Days "Environmental Studies", Göttingen (accepted for publication).
- EYERS, R., MOORE, J., HERVAS, I. & LIU, J.G., 1998: Integrated use of Landsat TM and SPOT panchromatic imagery for landslide mapping: case histories from Southeast Spain. – *Geohazards in Engineering Geology*, Geological Society Special Publication **15**: 133–140.
- FUNG, T. & LEDREW, E., 1987: Application of Principal Component Analysis to change detection. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **53**: 1649–1658.
- GONZALEZ, R.C. & WOODS, R.E., 2001: *Digital Image Processing*. – 793 pp., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- HALLADA, W.A. & COX, S., 1983: Image sharpening for mixed spatial and spectral resolution satellite systems. – *Proc. of the 17th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 9–13 May, pp. 1023–1032.
- JURIO, E.M. & VAN ZUIDAM, R.A., 1998: Remote sensing, synergism and geographical information system for desertification analysis: An example from northwest Patagonia, Argentina. – *ITC Journal* **3-4**: 209–217.
- LI, H., MANJUNATH, B.S. & MITRA, S.K., 1995: Multisensor image fusion using the wavelet transform. – *Graphical Models and Image Processing* **57** (3): 235–245.
- MALLAT, S.G., 1989: A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet model. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **11**: 674–693.
- MUNECHIKA, C.K., WARNICK, J.S., SALVAGGIO, C. & SCHOTT, J.R., 1993: Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **59**: 67–72.
- NA, Y., EHLERS, M. & YANG, W., 2004: Imaging Mechanism Based Remote Sensing Image Fusion with Multi-Wavelet Transform. – *Proceedings, International Conference on Signal Processing (ICSP'04)*: 2190–2194, Beijing.
- PELLEMANS, A.H.J.M., JORDANS, R.W.L. & ALLEWIJN, R., 1993: Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **59**: 81–87.
- POHL, C. & VAN GENDEREN, J.L., 1998: Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. – *Int. J. Remote Sensing* **19**: 823–854.
- RANCHIN, T. & WALD, L., 1993: The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images. – *International Journal of Remote Sensing* **14**: 615–619.
- RICHARDS, J.A., 1984: Thematic mapping from multitemporal image data using the principal component transformation. – *Remote Sensing of Environment* **16**: 35–46.
- RICHARDS, J.A. & JIA, X., 1999: *Remote Sensing Digital Image Analysis*. – 3rd edition, 363 pp., Springer Verlag Berlin Heidelberg New York.
- SCHIEWE, J. & EHLERS, M., 2004: Semantisches Potenzial digitaler flugzeuggestützter Fernerkundungssensoren. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2004** (6): 463–474 (dieses Heft).
- SHETTIGARA, V.K., 1992: A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **58**: 561–567.
- SHI, W.Z., ZHU, C.Q., ZHU, C.Y. & YANG, X.M., 2003: Multi-band wavelet for fusing SPOT panchromatic image and multi-spectral TM images. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **69** (5): 513–520.
- SINGH, A. & HARRISON, A., 1985: Standardized principal components. – *International Journal of Remote Sensing* **6**: 883–396.
- SMARA, Y., BELHADJ-AISSA, A. & SANSAL, B., 1996: Decorrelation and IHS color transforms applied for multisource satellite images integration. – *Fusion of Earth Data, Proceedings EARSeL Conference, Cannes, France, 6–8 February 1996* (Paris: European Space Agency), pp. 107–112.
- WALD, L., RANCHIN, T. & MAGOLINI, M., 1997: Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **63** (6): 691–699.
- WELCH, R. & EHLERS, M., 1987: Merging multi-resolution SPOT HRV and Landsat TM data. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **53**: 301–303.
- WELCH, R. & EHLERS, M., 1988: Cartographic feature extraction from integrated SIR-B and Landsat TM images. – *International Journal of Remote Sensing* **9**: 873–889.
- YILDIRIM, H., ALPARSTAN, E. & OZEL, M.E., 1996: Data fusion of sharpened difference image by IHS transform. – *Fusion of Earth Data Proceedings EARSeL Conference, Cannes, France, 6–8 February 1996* (Paris: European Space Agency), pp. 125–130.
- ZHANG, Y., 1997: Information system for monitoring urban environment based on satellite remote sensing: Shanghai as an example. – *Pro-*

- ceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'97), Singapore, 3–8 August 1997 (Piscataway, NJ: IEEE).
- ZHANG, Y., 2002: Automatic image fusion: A new sharpening technique for IKONOS multispectral images. – *GIM International* **16** (5): 54–57.
- ZHOU, J., CIVCO, D.L. & SILANDER, J.A., 1998: A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. – *Int. J. Remote Sensing* **19** (4): 743–757.
- Anschrift der Autoren:
Prof. Dr.-Ing. MANFRED EHLERS
Forschungszentrum Geoinformatik und Fernerkundung (FZG)
Universität Osnabrück
Postfach 15 53, Eichendorffweg 30
49364 Vechta
e-mail: mehlers@fzg.uni-vechta.de
cand. rer. nat. SASCHA KLONUS
Hochschule Vechta

Manuskript eingereicht: Juli 2004

Angenommen: August 2004