

Band 13

**Institut für
Geoinformatik und
Fernerkundung**



Schlussbericht zum Projekt: Spektralwert erhaltende Bildfusion von TerraSAR-X und optischen Daten

Autoren: Manfred Ehlers, Sascha Klonus und Pablo Rosso

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Am 15. Juni 2007 wurde der erste deutsche Radarsatellit TerraSAR-X gestartet. TerraSAR-X kann mit unterschiedlichen Betriebsmodi die Erdoberfläche erfassen und operiert im X-Band. TerraSAR-X Produkte sind für privatwirtschaftliche und öffentliche Belange von Nutzen. Die Anwendungsmöglichkeiten liegen z.B. in der Umweltüberwachung und im Katastrophenschutz.

Der Satellit stellt Daten zur Verfügung, die für die wissenschaftliche Auswertung und Entwicklung innovativer Anwendungen und Verfahren sowie zur Erweiterung der Erkenntnisse über die Erde und Umweltprozesse dient. Dieses Projekt besitzt das Ziel der Nutzung von TerraSAR-X-Daten, um die räumliche Auflösung von multispektralen Daten verschiedener elektrooptischer Fernerkundungssensoren zu erhöhen. Dies soll mit Hilfe einer neuartigen Fusionsmethode, der Ehlers Fusion, erreicht werden, die bei der Integration multisensoraler elektrooptischer Bilddaten exzellente Ergebnisse bei gleichzeitiger Erhaltung der spektralen Charakteristiken erzielt und ihre Überlegenheit gegenüber Standardverfahren bewiesen hat. Die neue Methode soll für Radardaten modifiziert und auf die Fusion elektrooptischer und Radardaten angewandt werden. Außerdem soll evaluiert werden, ob durch die Fusion die Ergebnisse von automatisierten Auswerteverfahren, wie der Segmentierung und Klassifizierung, verbessert werden können.

Durch die erfolgreiche Fusion von hoch auflösenden Radardaten und optischen Daten unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte können nach Katastrophen wie Erdbeben oder Überflutung auch bei bewölktem Himmel aktuelle hoch auflösende Echtfarben-Bilder generiert und den Rettungskräften zur Verfügung gestellt werden. Diese können zur zügigen Planung von Maßnahmen (Evakuierung, Schadensabschätzung, Zugangsmöglichkeiten) genutzt werden.

Des Weiteren wird die Interpretation der Daten aufgrund der hohen Auflösung erleichtert, was besonders interessant für das Monitoring landwirtschaftlicher Flächen ist. So können Angaben der landwirtschaftlichen Betriebe besser und aktueller überprüft werden, was für die EU bei der Auszahlung von Subventionsgeldern eine große Rolle spielt.

Durch verbesserte Klassifikationsergebnisse aufgrund der fusionierten Daten sind weitere Einsatzmöglichkeiten denkbar wie etwa der Einsatz in der Flächennutzungsplanung, Raumplanung, Stadtplanung und der Umweltüberwachung. Speziell im Bereich der Umweltüberwachung werden sehr gute Einsatzmöglichkeiten für die Fusion von TerraSAR-X und elektrooptischen Multispektraldaten gesehen.

2. Voraussetzungen unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Die Basis für die Untersuchungen war der erfolgreiche Start des Satelliten TerraSAR-X am 15. Juni 2007. Eine weitere Voraussetzung war die Bereitstellung von Daten des Satelliten. Erste Bilder wurden bereits am 21. Juni 2007 empfangen. Da der Start des Satelliten ursprünglich für den 27. Februar 2007 geplant war verzögerte sich die Datenauslieferung an unser Institut. Daher wurden Untersuchungen vorgezogen, die sich mit der Methodik beschäftigten und an simulierten Daten getestet werden konnten. Erste Demodaten wurden Anfang Oktober an das Institut geliefert. Eine Szene (siehe unten) konnte daraufhin prozessiert werden, da entsprechende multispektrale Bilddaten zur Verfügung standen. Am 7. Januar startete dann der operationelle Betrieb des Satelliten und die notwendigen Daten konnten geordert werden.

Um die unten beschriebenen Aufgaben durchzuführen war es notwendig, eine/n wissenschaftliche/n Mitarbeiter/in einzustellen. Zu ihren/seinen Aufgaben gehörte die technische Durchführung des Forschungsprojektes, die Softwareentwicklung, die Mitarbeit bei Berichten und Publikationen, die Teilnahme am Projektmanagement und an wissenschaftlichen Konferenzen. Zu ihrer/seiner Unterstützung wurde für Datenverarbeitung, Literaturrecherchen und Programmierungsaufgaben eine wissenschaftliche Hilfskraft benötigt.

Zusätzlich musste die Software PCI Geomatica erworben werden, da nur sie ein geeignetes Prüfverfahren für die Qualität der Fusionsentwicklung besitzt (UNB Fusion). Um die Ehlers Fusion mit den am weitesten entwickelten Verfahren zu vergleichen, war der Erwerb dieser Software notwendig. Andere Softwarepakete wie ERDAS Imagine, ER-Mapper, ArcGIS oder eCognition waren bereits in ausreichender Anzahl mit Lizenzen im IGF vorhanden. Die Ehlers Fusion und das automatisierte Auswerteverfahren sollten in der Software MATLAB umgesetzt werden, daher sollte dieses Softwarepaket ebenfalls erworben werden.

Das wissenschaftlich-technische Risiko war dabei als sehr gering anzusehen, da die Mitglieder des Instituts für Geoinformatik und Fernerkundung (IGF) ein interdisziplinäres Forschungsteam mit Hintergrundwissen in Geoinformatik, Fernerkundung, Mathematik, Informatik, Geodäsie, Umweltwissenschaften, Geographie und Biologie darstellen. Sie betätigen sich in Grundlagenforschung und angewandter Forschung in allen Feldern der Geoinformatik, Fernerkundung und Bildverarbeitung und haben national wie international ein hohes Ansehen. Die Ehlers Fusion ist zudem bereits in ein kommerzielles Softwarepaket integriert und wird mit großem Erfolg in der Praxis verwendet.

3. Planung und Ablauf des Projektes

Im Antrag wurden folgende Arbeitspakete zur Durchführung des Projektes angegeben: Zur Erreichung des Projektzieles ist eine Anzahl von Arbeitsschritten notwendig. Zunächst gilt es, Testgebiete auszuwählen und die dazugehörigen Datensätze zu akquirieren bzw. aufzubereiten. Die Modifizierung der Ehlers Fusion für Radardaten und speziell in diesem Projekt die Daten des TerraSAR-X werden parallel dazu in Angriff genommen. Das Austesten der Fusion erfolgt mit den TerraSAR-X-Daten und den vorhandenen Multispektraldaten der ausgewählten Testgebiete. Für die vorgestellten Testgebiete sind diese Daten bereits vorhanden, sie müssen allerdings ggf. für die Integration mit den SAR-Daten aufbereitet werden. Die Modifizierung der Fusion wird anhand der Tests überprüft und schrittweise verfeinert. Zum Schluss werden Tests zur automatischen Auswertung der fusionierten Daten (Segmentierung, Klassifizierung, Änderungsdetektion) Aussagen zur Wertigkeit der entwickelten Fusionsmethode bringen. Infolgedessen wird das Projekt in folgende Arbeitsbereiche (WP - Workpackage) unterteilt. Die zeitliche Abfolge erkennt man in Anhang A.

WP 100: Projektkoordination

Dieses WP umfasst die Projektleitung und Koordination. Es beinhaltet ebenfalls Aktivitäten zur Dokumentation, Publikationen und Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen.

WP 200: Datenauswahl und Vorverarbeitung

In diesem Arbeitsbereich werden die notwendigen Daten für das Forschungsprojekt ausgewählt. Die Testgebiete müssen bestimmt werden, verfügbare Fernerkundungsdaten identifiziert, analysiert und vorverarbeitet werden.

WP 300: Weiterentwicklung der Ehlers Fusion

Dieser Arbeitsbereich umfasst die Optimierung, die an der bestehenden Ehlers Fusion vorgenommen werden, um sie auf die Fusion mit TerraSAR-X Daten anzupassen.

WP 400: Untersuchungen zur Datenfusion

Die Weiterentwicklung aus WP 300 wird in WP 400 getestet. Multispektrale elektrooptische Bilddaten werden mit der optimierten Ehlers Fusion fusioniert. Ergebnisse werden mit anderen Referenzfusionsverfahren verglichen. Diese Vergleiche werden sowohl im Hinblick auf die Verbesserung der räumlichen Auflösung als auch auf die Erhaltung der spektralen Charakteristiken durchgeführt.

WP 500: Entwicklung der Evaluationsmethoden

Die Entwicklung aussagekräftiger Evaluierungsmethoden der fusionierten Bilder, die sowohl die spektralen als auch die räumlichen Aspekte beurteilen, ist Bestandteil

dieses Arbeitsbereiches. Hierbei werden Verfahren aus der Literatur sowie selbst entwickelte und ggf. zu modifizierende Methoden eingesetzt.

WP 600: Visuelle und quantitativ-statistische Evaluierung des optimierten Fusionsverfahrens

Die Techniken von WP 500 werden in diesem Arbeitsbereich angewandt. Die Ergebnisse gehen direkt in die Modifizierungen des WP 500 ein, sodass die beiden Arbeitspakete in großer Parallelität bearbeitet werden.

WP 700: Segmentierung, Klassifizierung und Änderungsdetektion

Automatische Bildverarbeitungsmethoden werden an den fusionierten und an den originalen multispektralen Bilddaten sowohl zur Klassifikation von Landnutzung/Landbedeckung als auch zur Analyse von Veränderungen eingesetzt. Standardverfahren zur Fehleranalyse werden verwendet, um die erzielten Genauigkeiten zu bestimmen und die Güte des Fusionsverfahrens auf die endgültigen Auswertungen einschätzen zu können. Moderne Auswerteverfahren wie Segmentierung und hierarchische Klassifikationsverfahren werden ebenso eingesetzt wie computergestützte Photointerpretation (CAPI).

WP 800: Softwareentwicklung

Ein Softwareprototyp wird für die Bildfusion entwickelt, der ein hohes Maß an Automatisierung bietet und es dem Benutzer gestattet, die Software ohne Hintergrundwissen zu bedienen. Diese Anstrengungen verlaufen parallel zur gesamten Methodenentwicklung.

WP 900: Performanz-Analyse

Dieser Arbeitsbereich umfasst die Analyse der Performanz der zu entwickelnden Software (Benutzerfreundlichkeit, Integration in existierende Softwaresysteme, Schnelligkeit, Speicherbedarf etc.).

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Eingesetzte Verfahren

Die optimierte Ehlers Fusion wird dazu verwendet, die zur Verfügung stehenden Daten zu fusionieren. Um die Qualität der Ergebnisse der Ehlers Fusion bestimmen zu können, ist es notwendig, sie mit anderen Fusionsverfahren zu vergleichen. Insgesamt wurden zehn unterschiedliche Verfahren auf die Eingangsdatensätze angewandt (Tab. 1).

Verfahren	Literatur
AWLP (Additive Wavelet Proportional)	Otazu et al., 2005
Brovey	Hallada & Cox, 1983
CN (Color Normalized) Spectral Sharpening	Vrabel et al., 2002a, 2002b
Ehlers	Klonus & Ehlers, 2007
Gram Schmidt	Laben et al., 2000
HPF (High Pass Filtering)	Gangkofner & Holcomb, 2008
Modifizierte IHS (Intensity Hue Saturation)	Siddiqui, 2003
Multiplikation	Crippen, 1987
Principal Component Transformation (PC)	Chavez et al., 1991
UNB (University of New Brunswick)	Zhang, 2004

Tab. 1 Verwendete Fusionsverfahren

Zur Evaluation der Fusionsverfahren werden visuelle und quantitative Methoden eingesetzt. Bei den quantitativen Methoden werden Evaluierungsverfahren genutzt, die sowohl die spektralen als auch die räumlichen Aspekte bewerten. Für die spektralen Evaluierungsmethoden wird speziell auf die Qualitätsverfahren von Wald (2002), Wang & Bovik (2002) und Wang et al. (2004) aufgebaut. Für die Anwendung dieser Qualitätsverfahren muss zunächst das fusionierte Bild wieder auf die Auflösung des Originalbildes formatiert werden. Als Ausgangsbilder für die Verfahren werden dann das originale multispektralen Bild und das reduzierte fusionierte Bild verwendet. Im Einzelnen sind die Verfahren:

- Berechnung der Korrelationskoeffizienten
- Berechnung der Abweichungen der Grauwerte pro Pixel durch Subtraktion des originalen multispektralen Bildes vom formatierten fusioniertem Bild
- Berechnung des Root Mean Square Errors (RMSE) nach Wald (2002). Dieser RMSE lässt sich aus dem Bias und dem Unterschied der Standardabweichung der Ausgangsbilder berechnen.

- SSIM (Structure Similarity Index): Das SSIM ist ein Verfahren, das die Helligkeit, den Kontrast und die Struktur des Bildes vergleicht. Es wird in einem lokalen 8 x 8 Pixel umfassenden Fenster angewendet. Dieses Fenster wird Pixel für Pixel über das gesamte Bild geschoben und bei jedem Schritt werden die lokalen Statistiken und der SSIM Index in diesem Fenster berechnet (Wang et al. 2004).

Zur Evaluierung der räumlichen Verbesserung werden die folgenden Verfahren verwendet:

- Das fusionierte und das Original-Radar-Bild (bzw. das Bild, das als hoch auflösende Komponente verwendet wird), werden mit einem Hochpassfilter gefiltert. Danach wird der Korrelationskoeffizient der beiden gefilterten Bilder berechnet (Zhou et al. 1998).

- Ein Kantendetektionsfilter (edge detection operator) wie Sobel oder Kirsch wird auf das fusionierte und das panchromatische Bild angewendet (Jensen 2005). Die Prozentangabe der erkannten Kanten in den fusionierten Bilddaten beschreibt die Güte der Verbesserung der räumlichen Auflösung.

Um die Güte der Fusion festzustellen wurden folgende Klassifikationsverfahren getestet:

- Discrete Bayes (Chow, 1957)
- Maximum Likelihood (Jensen, 2005)
- Nearest Neighbour (Devroye, 1981)
- Parzen (Parzen, 1962)
- Recursive Cluster Elimination (RCE)(Reilly & Cooper, 1995)
- Classification And Regression Trees (CART)(Breiman et al., 1993)
- Store Grabbag (Kraaijveld, 1998)

Um ein Rauschen, das durch pixelbasierte Klassifikationsverfahren entstehen kann, zu vermeiden, werden die pixelbasierten Verfahren mit einer Segmentierung kombiniert. Drei unterschiedliche Segmentierungsverfahren kamen dabei zum Einsatz:

- Segmentierungsverfahren über die Euklidische Distanz (Priddy & Keller, 2005)
- Wasserscheiden-Segmentierung (Bleau & Leon, 2000)
- Segmentierung über Kantendetektion (Gonzalez & Woods 2002)

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Folgende Partner traten als Datenlieferanten auf:

- 1) Joint Research Center der Europäischen Kommission in Ispra / Italien, IPSC,
Unit Agrifish
Ansprechpartner: Dr. Åstrand
- 2) Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein
Westfalen
Ansprechpartner: Herr Wilking
- 3) OHB-System AG in Bremen
Ansprechpartner: Prof. Fuchs
- 4) Stadt Osnabrück, Abteilung Geodaten
Ansprechpartner: Herr Koch

Zudem fand ein wissenschaftlicher Austausch mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Rahmen des 3. TerraSAR-X Science Treffen statt, das vom 26. – 28. November durchgeführt wurde. Des Weiteren gab es einen kontinuierlichen Austausch mit dem Institut für Methodik der Fernerkundung des DLR, speziell mit der Abteilung Photogrammetrie und Bildanalyse unter Leitung von Dr.-Ing. Peter Reinartz.

II. Ausführliche Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der Ziele

Im Folgenden werden die in diesem Projekt erreichten Ergebnisse dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse den einzelnen Arbeitspaketen (WP) zugeordnet und im entsprechenden Kapitel beschrieben. WP 100 (Projektkoordination) beschäftigt sich mit der Projektkoordination, daher wurden unter diesem Arbeitspaket keine wissenschaftlichen Erkenntnisse erzielt. Für alle anderen Arbeitspakete folgt die Beschreibung der Ergebnisse in den nächsten Kapiteln.

WP 200: Datenauswahl und Vorverarbeitung

Datenauswahl

In diesem Bericht werden die Ergebnisse exemplarisch an drei unterschiedlichen Untersuchungsgebieten dargestellt. Untersuchungsgebiet 1 liegt in Ägypten, bei den Pyramiden von Gizeh. Für das zweite Untersuchungsgebiet wurde eine Szene von Osnabrück ausgewählt und das dritte Untersuchungsgebiet enthält eine ländliche Region, rund um das Dorf Santo Domingo de la Calzada.

Das erste Testgebiet liegt in Ägypten in der Nähe von Kairo und zeigt die Pyramiden von Gizeh. Dieses Gebiet war zunächst im Projektantrag nicht als Testgebiet vorgesehen. Da die ausgewählten Testgebiete zunächst noch nicht aufgenommen wurden aber eine Quickbirdaufnahme von Gizeh am IGF vorhanden war, wurde dieses Gebiet ausgewählt, um im Zeitplan zu bleiben. Bei diesen TerraSAR-X Daten handelte es sich um erste Testdaten des Satelliten. Die Daten wurden im „Highresolution Spotlight Mode“ am 2. Juli 2007 aufgenommen.

Die TerraSAR-X Szene des zweiten Untersuchungsgebietes (Abb. 1 links) zeigt die Stadt Osnabrück. Die Szene wurde im „Highresolution Spotlight Mode“ aufgenommen, das Aufnahmedatum war der 29. November 2007. Für das Untersuchungsgebiet lag ebenfalls eine Landsat Szene vom 26. Juni 2001 vor, die für die Bildfusion verwendet werden konnte (Abb. 1 rechts).

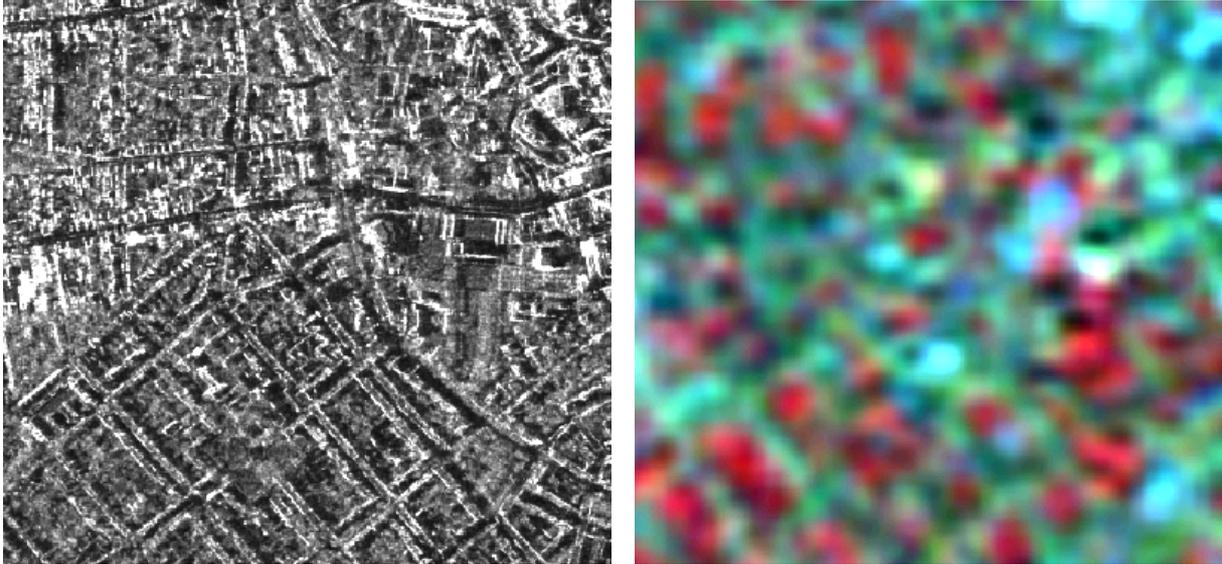


Abb. 1: Gefilterte TerraSAR-X Szene von Osnabrück (links), aufgenommen im hochauflösenden Spotlight Mode am 29. November 2007 ©DLR(2007) und multispektrale Landsat Szene (rechts) reformatiert auf die geometrische Auflösung der TerraSAR-X Szene, dargestellt in der Bandkombination 4 (NIR), 3 (rot), 2 (grün).

Das dritte Untersuchungsgebiet liegt in Nordspanien, südwestlich der Stadt Vitoria Gasteiz. Die Szene zeigt die Region rund um das Dorf Santo Domingo de la Calzada. Die TerraSAR-X Szene (Abb. 2 links) wurde im hochauflösenden Spotlight Mode mit 1 m Bodenauflösung am 3. Mai 2008 aufgenommen. Zur Bildfusion standen unterschiedliche Daten zur Verfügung (siehe WP 400). Die multispektrale SPOT 5 Szene, aufgenommen am 10. April 2005 (Abb. 2 rechts), wurde ausgewählt, da diese die erzielten Ergebnisse am Besten repräsentiert. Die SPOT 5 Szene liegt in einer geometrischen Auflösung von 10 m vor. Sie wurde auf die Auflösung der TerraSAR-X Szene unter Benutzung der kubischen Faltung formatiert. Der in Abbildung Abb. 2 (rechts) dargestellte Ausschnitt wurde ausgewählt, da er sowohl landwirtschaftliche Flächen enthält als auch Gebäude und Straßen enthält.

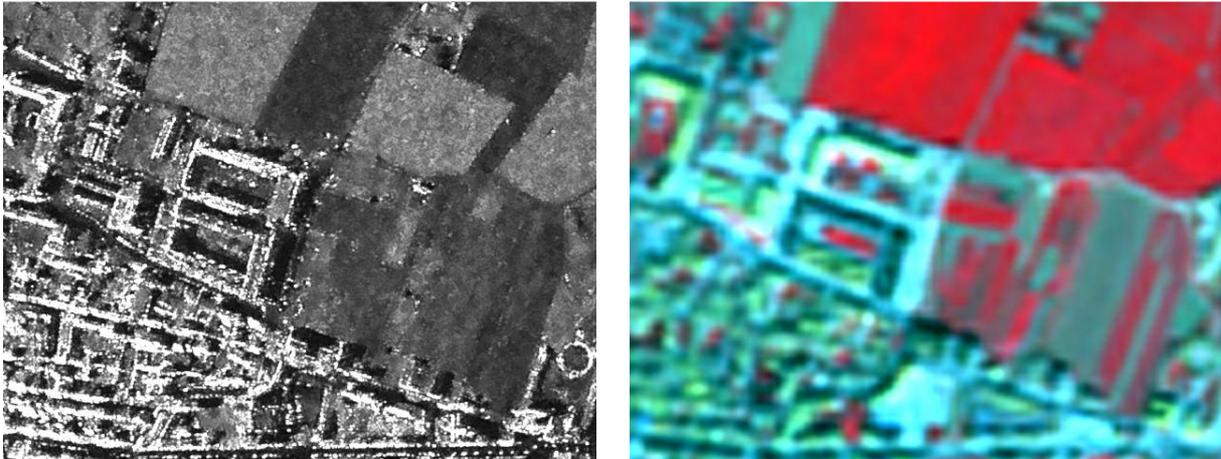


Abb. 2: Gefilterte TerraSAR-X Szene (links), aufgenommen im hochauflösenden SPOT Mode am 3. Mai 2008 ©DLR(2008) und multispektrale SPOT Szene (rechts) aufgenommen am 10. April 2005, dargestellt in der Bandkombination 3 (NIR), 2 (rot), 1 (grün).

Vorverarbeitung

Da für die weitere Verarbeitung der Daten, speziell im Bereich der Bildfusion, eine hochgenaue Georeferenzierung notwendig ist, wurden die Daten im nächsten Schritt korrigiert. Die Daten waren zwar bereits vorreferenziert, jedoch reicht diese Genauigkeit nicht für unsere Untersuchungen aus, da durch eine ungenaue Georeferenzierung Artefakte entstehen können, welche die spektralen Informationen verändern.

Zur Entzerrung wurde für das erste Testgebiet eine Quickbirdszene mit 0,6 m Auflösung ausgewählt. Für das zweite Testgebiet lagen Luftbilddaten der HRSC-A in einer Auflösung von 0,5 m vor. Für die 3. Szene lag ein Ikonos Bild in einer Auflösung von 1 m vor. Referenzpunkte wurden in diesen Daten ausgewählt, um die SAR-Daten zu georeferenzieren. Unterschiedliche Verfahren wurden dazu getestet:

- Polynomial (1., 2., 3. und 4. Ordnung)
- Projective Transform
- Rubber Sheeting

Beim Vergleich mit den Referenzdaten zeigte sich, dass nur das Rubber Sheeting eine ausreichende Qualität für weitere Untersuchungen erreichte. Für das erste Testgebiet konnte daher nur der folgende Ausschnitt ausgewählt werden (Abb. 3):

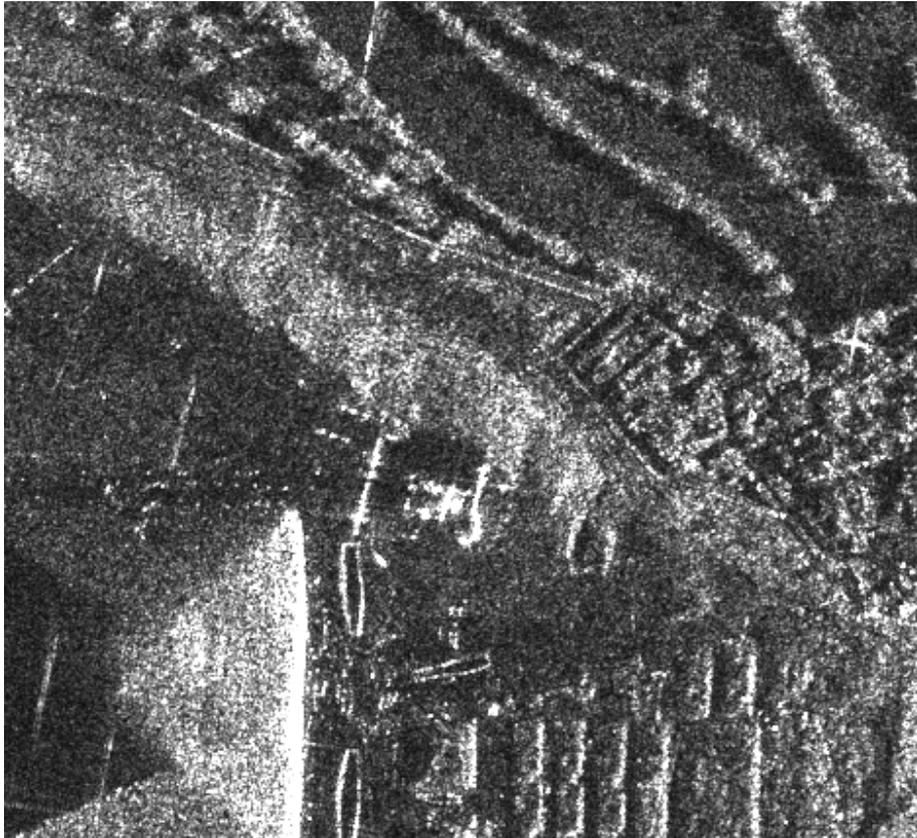


Abb. 3: TerraSAR-X Aufnahme von Gizeh aufgenommen im „High Resolution Spotlight“ Modus am 29 November 2007 ©DLR (2007)

Um das bei Radar-Daten auftretende Rauschen (Speckle) zu unterdrücken wurden unterschiedliche Filter auf ihre Wirksamkeit getestet. Folgende Filter wurden aus unterschiedlichen proprietären Bildverarbeitungspaketen ausgewählt:

- Median Filter (Pratt 2007) mit einer Filtergröße von 3x3, 5x5 und 7x7
- zwei unterschiedlichen Implementierungen des Frost Filters mit einer Größe von 3x3 und 7x7
- verbesserter Frost Filter (Lopes et al. 1990) (Filtergröße: 7x7)
- Lee Sigma Filter (Lee 1981, Lee 1983)
- einen Gamma Map Filter (Frost et al. 1982) (Filtergröße: 7x7)

Die gefilterten Bilder wurden dann zunächst visuell verglichen. Um allerdings die Ergebnisse auch quantitativ zu bewerten, wurden die folgenden vier Parameter zur Evaluierung berechnet (Mastriani, 2006):

- Noise Mean Value (NMV)
- Noise Variance (NV)

- Mean Square Difference (MSD)
- Equivalent Number of Looks (ENL)

Durch den Parameter NV lässt sich das Rauschen im Bild abschätzen. Eine niedrige Varianz zeigt ein „klareres“ Bild, da das Rauschen stärker reduziert wurde. Die Formeln zur Berechnung des NV und NMV sind:

$$NMV = \frac{\sum_{r,c} I_d(r,c)}{R * C}$$

$$NV = \frac{\sum_{r,c} (I_d(r,c) - NMV)^2}{R * C}$$

Wobei die Parameter R*C die Anzahl der Zeilen und Spalten repräsentieren, r die Zeile und c die Spalte des entrauschten Bildes (I_d) darstellen.

Der MSD zeigt die durchschnittliche Differenz der Pixel zwischen dem originalen Bild (I_s) und dem gefilterten Bild an. Ein geringerer MSD Wert bezeichnet also eine geringere Differenz zwischen dem originalen TerraSAR-X und der gefilterten Aufnahme. Der MSD berechnet sich folgendermaßen:

$$MSD = \frac{\sum_{r,c} (I_s(r,c) - I_d(r,c))^2}{R * C}$$

Der ENL ist das Verhältnis des quadrierten NMV und den NV Werten. Dieser Parameter wird über eine homogene Fläche des Bildes gemessen. Ein höherer ENL Wert korrespondiert gewöhnlich mit einer besseren Filter Performanz.

$$ENL = \frac{NMV^2}{NV}$$

Die Resultate der Berechnung dieser Parameter erkennt man in Tab. 2:

Filter und Filtergröße	Statistische Parameter			
	NMV	NV	MSD	ENL
Original	117.56	10064.10	-----	6.99
Median 3x3	115.03	8689.97	571.81	10.99
Median 5x5	111.91	7201.22	1527.93	19.57
Median 7x7	109.71	6222.05	2240.02	28.91
Frost 3x3 (Erdas)	116.42	9082.09	158.01	9.53
Frost 7x7 (Erdas)	117.01	8706.76	396.37	14.12
Lee Sigma 7x7	114.48	9122.16	139.25	9.15
GammaMAP7x7	115.56	6176.39	2040.99	27,38
Frost 7x7 (Envi)	115.40	6596.69	2057.34	29.04
Enhanced Frost 7x7	115.52	6444.88	1953.56	30.34

Tab. 2: Vergleich der unterschiedlichen Filter zur Unterdrückung des Rauschens (beste Resultate wurden **fett** markiert)

Aufgrund der Ergebnisse in Tab. 2 und der visuellen Untersuchung wurde die Aufnahme ausgewählt, die mit einem Median Filter in einer Größe von 7x7 Pixeln gefiltert wurde. Das gefilterte Bild zeigt Abb. 4.

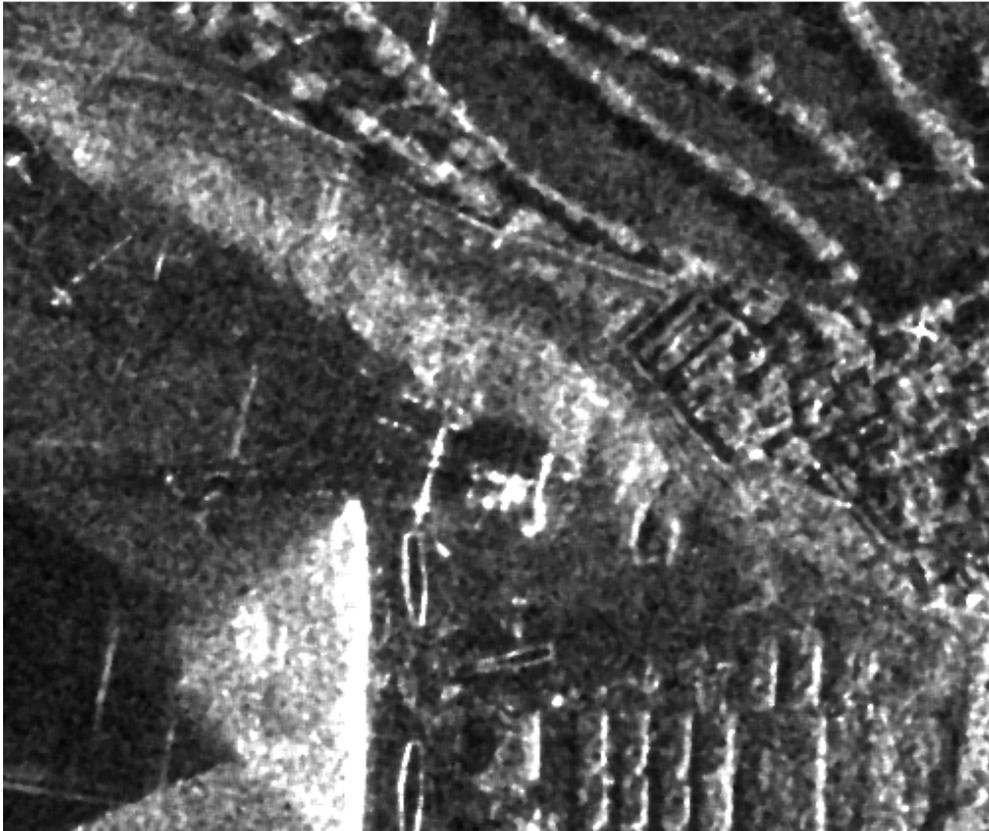


Abb. 4: TerraSAR-X Aufnahme nach Filterung des Rauschens ©DLR (2007)

Von der Universität Würzburg wurde die Szene des dritten Untersuchungsgebietes in Spanien mit einem weiteren Filter zur Unterdrückung des Rauschens prozessiert. Die Wirksamkeit dieses Verfahrens wurde nun in weiteren Analysen getestet. Dazu wurde das Verfahren der DLR/Universität Würzburg (im Folgenden: DLR Filter) mit dem 7x7 Median Filter verglichen, da dieser das bisher beste Ergebnis zeigte. Zudem wurde überprüft, ob durch weitere Iterationen das Ergebnis des Median Filters noch verbessert werden kann, wie in Leica-Geosystems (2005) vorgeschlagen wird.

Da von den bisher beschriebenen Evaluierungsverfahren für den Speckle keines die Erhaltung der Kanten beurteilt, wurde ein weiteres Verfahren mit einbezogen, dass auch diesen Parameter berücksichtigt (Sattar et al. 1997):

$$\rho = \frac{\Gamma(I_s - I_s^M, I_d - I_d^M)}{\sqrt{\Gamma(I_s - I_s^M, I_s - I_s^M) \Gamma(I_d - I_d^M, I_d - I_d^M)}}$$

Dabei stellt I_d das enträuschte Bild und I_s die originale Szene dar, I^M steht für den Mittelwert des jeweiligen Bildes und es gilt

$$\Gamma(s_1, s_2) = \sum_{(i,j) \in I} s_1(i, j) s_2(i, j)$$

Der Parameter Γ gibt an, wie stark das Rauschen unterdrückt wird. Ein hoher Γ -Wert bedeutet starke Rauschunterdrückung. Die Kantenerhaltung wird durch den Parameter α gemessen:

$$\alpha = \frac{\Gamma(\Delta I_s - \Delta I_s^M, \Delta I_d - \Delta I_d^M)}{\sqrt{\Gamma(\Delta I_s - \Delta I_s^M, \Delta I_s - \Delta I_s^M) \Gamma(\Delta I_d - \Delta I_d^M, \Delta I_d - \Delta I_d^M)}}$$

Ein hoher Wert für α bedeutet eine gute Kantenerhaltung. Δ ist das jeweilige hochpassgefilterte Bild, wobei als Filter ein 3x3 Laplace Kernel (Jensen 2005) verwendet wird.

Der visuelle Vergleich zeigt (Abb. 5 und Abb. 6), dass der DLR Filter (Abb. 6, rechts) die Kanten am Besten erhält, während durch den Median Filter (Abb. 5, rechts) die Kanten unschärfer werden, dies insbesondere nach weiteren Iterationen (Abb. 6, links). Allerdings zeigen alle Verfahren weniger Rauschen als die ursprüngliche Szene (Abb. 5, links).

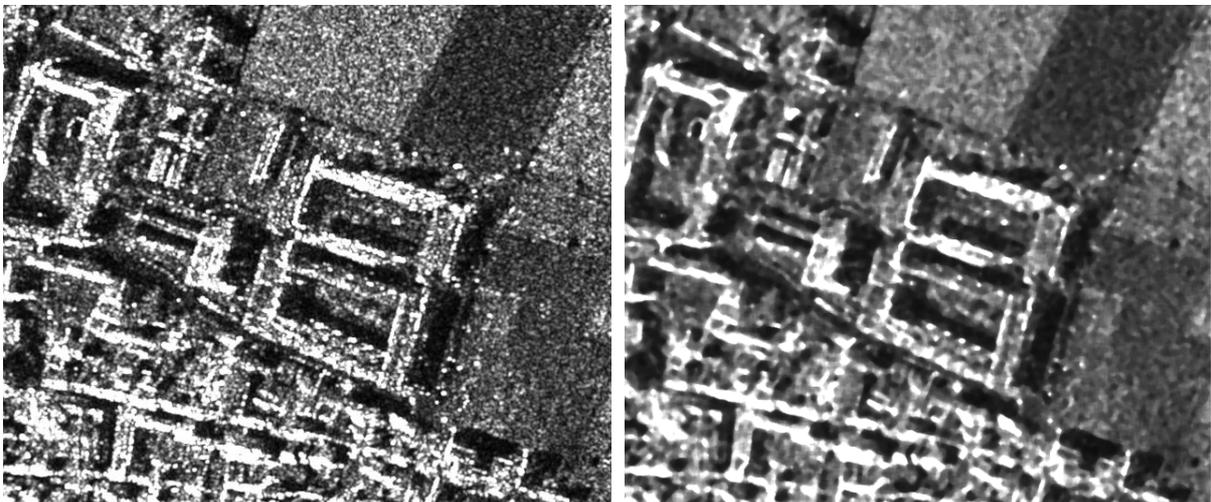


Abb. 5: Originale TerraSAR-X Szene (links), Gefilterte TerraSAR-X Szene mit einem 7x7 Median Filter (rechts).

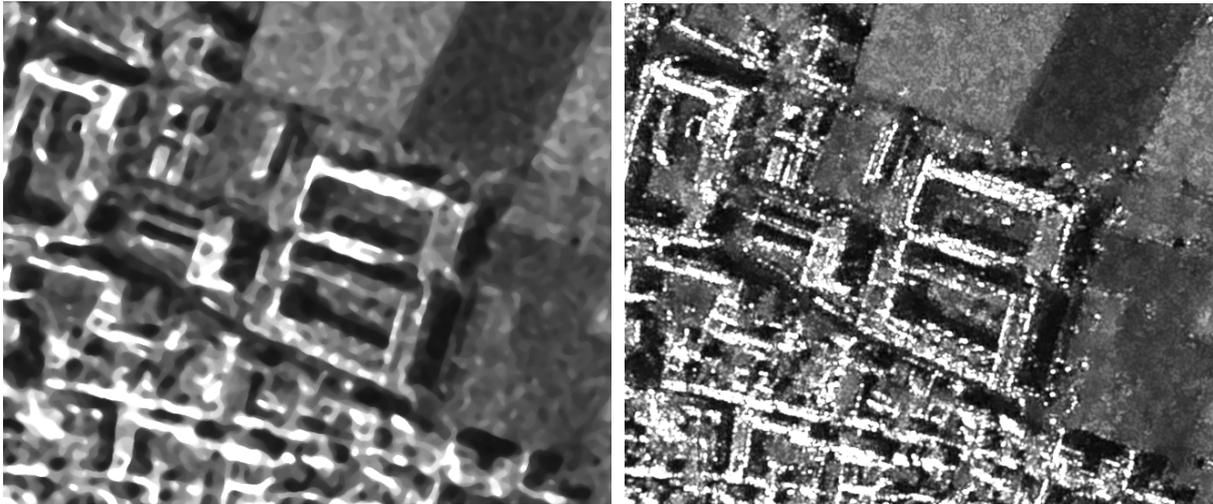


Abb. 6: Gefilterte TerraSAR-X Szene mit einem 7x7 Median Filter nach 3 Iterationen (links) und rechts die gefilterte Szene mit dem Algorithmus der Universität Würzburg.

Die statistische Auswertung (Tab. 3) zeigt, dass der Median Filter den Speckle besser unterdrücken kann, wenn die Anzahl der Iterationen steigt. Gleichzeitig sinkt aber die Erhaltung der Kanten. Der DLR Filter dagegen erhält die Kanten am Besten von allen Filtern, allerdings bleibt etwas mehr Speckle-Rauschen enthalten.

Filter	NMV	NV	MSD	ENL	Γ	α
Original image	100.88	9162.32	-	8.49	-	-
Erdas Median 7x7	95.74	3825.42	2712.85	28.42	0.8796	0.4250
Erdas Median 7x7, 1st iter	94.68	2908.45	3937.86	42.96	0.7953	0.3032
Erdas Median 7x7, 2nd iter	94.11	2544.19	4601.87	55.28	0.7549	0.2351
Erdas Median 7x7, 3rd iter	93.75	2334.82	5028.93	66.34	0.7219	0.1947
DLR Filter	96.35	2472.08	1313.64	48.28	0.9327	0.9082

Tab. 3: Speckle Evaluation (beste Resultate wurden **fett** markiert)

Dass die mit dem der DLR Filter prozessierte Szene mehr Speckle aufweist, soll die folgende Untersuchung zeigen. Über zwei landwirtschaftliche Flächen wurde eine Profillinie gezogen (Abb. 7, rechts). Entlang dieser Profillinie wurden die Intensitäten der Grauwerte gemessen und in eine Grafik übertragen (Abb. 7 - Abb. 9).

Im Vergleich mit dem Original (Abb. 7, links) erkennt man in allen Bildern einen reduzierten Speckle Anteil. Am wenigsten Speckle weist die Szene auf, die mit einem 7x7 Median Filter dreimal prozessiert wurde. Den höchsten Speckle Anteil der gefilterten Szenen weist der DLR Filter auf.

Da es in diesem Projekt darum geht, hochauflösende Daten mit niedriger aufgelösten multispektralen Daten zu vereinigen, wurde der DLR Filter für weitere Untersuchungen verwendet, da dieser die besten Werte für die Kantenerhaltung aufweist.

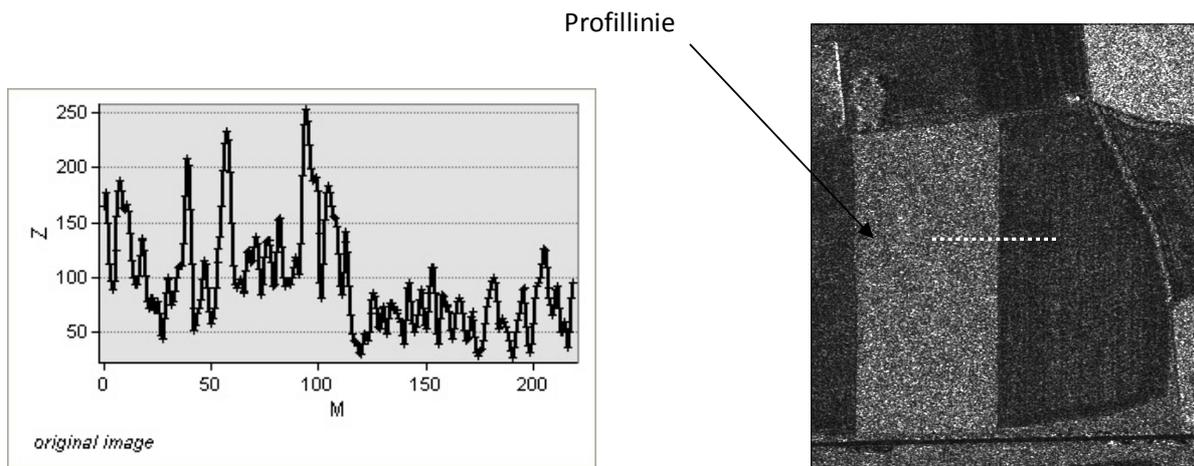


Abb. 7: Profil der originalen TerraSAR-X Szene (links), Abbildung der landwirtschaftlichen Flächen und der Position der Profillinie (rechts).

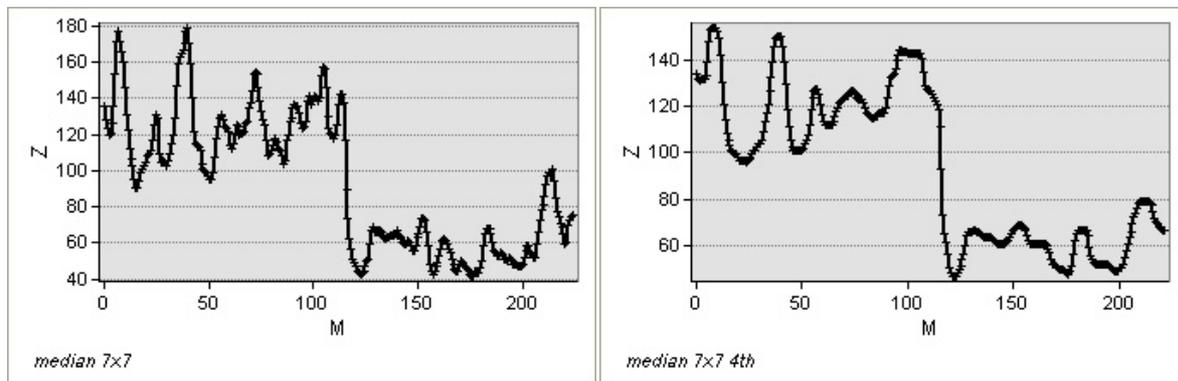


Abb. 8: Profil der TerraSAR-X Szene, nach einmaliger Filterung mit einem Median 7x7 (links) und nach dreimaliger Iteration mit einem 7x7 Medianfilter (rechts).

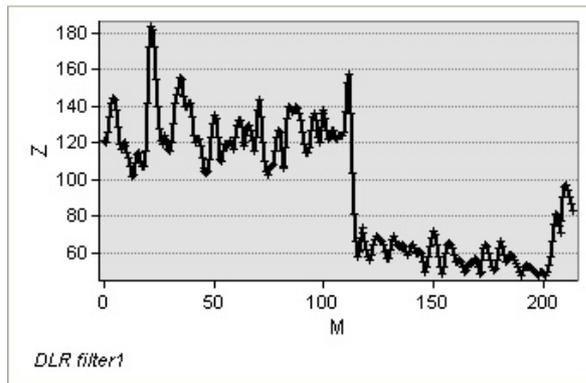


Abb. 9: Profil der TerraSAR-X Szene, die mit dem DLR Filter prozessiert wurde.

Interpretation

Die ersten Fusionsergebnisse von TerraSAR-X und elektro-optischen Daten zeigten, dass die multispektralen Daten nur unwesentlich in Bezug auf die Interpretation verbessert wurden. Dies führte zu Untersuchungen, wie elektro-optische Daten mit Radar Daten im Hinblick auf nachfolgende Interpretation zu vergleichen sind. Diese Untersuchungen sind notwendig, um herauszufinden ab welchem Verhältnis der räumlichen Auflösung von Radar- zu elektro-optischen Daten eine Fusion sinnvoll ist.

Radar und elektro-optische Daten sind schwer miteinander zu vergleichen, da zwei komplett unterschiedlich arbeitende Systeme, ein aktiver und ein passiver Sensor, bei dieser Art von Fusion verwendet werden. Während der optische Sensor die reflektierte Sonnenstrahlung im sichtbaren und nahen infraroten Bereich der elektromagnetischen Strahlung der Erdoberfläche bzw. der Geobjekte aufnimmt, sendet der Radar-Satellit kohärente elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich aus, nimmt dabei die von Objekten reflektierten Echos auf und wertet sie nach verschiedenen Kriterien aus. Beim Radar wird im Gegensatz zum optischen Sensor die Richtung und Entfernung zum Objekt bzw. auch die Relativbewegung gemessen.

Um diese Untersuchung durchzuführen, wurden Objekte unterschiedlicher Größe und Eigenschaften in der Szene in Spanien ausgewählt. Diese Objekte wurden in den Radar- und elektro-optischen Daten verglichen und auf ihre Sichtbarkeit und Erkennbarkeit hin untersucht. Zur Verbesserung der Objektivität wurden die Bilder in Quadranten eingeteilt. In diesen Quadranten wurde dann nach Objekten gesucht. Objekte wurden als erkennbar deklariert, wenn man das Objekt klar bestimmen und benennen konnte. Die Objekte wurden als sichtbar deklariert, wenn man diese vom Hintergrund abgrenzen konnte. Unterschiede, die auf zeitliche oder saisonale Veränderungen zurückzuführen sind, wie z. B. Ackerbewuchs, wurden von der Interpretation ausgeschlossen.

Für dieses Untersuchungsgebiet war ebenfalls eine panchromatische Ikonos- Szene verfügbar, die für den Vergleich verwendet werden konnte. Einige ausgewählte Objekte sind in Tab. 4 und Abb. 10 dargestellt.

Von allen Objekten, die in der Ikonos Szene sichtbar sind, können in der TerraSAR-X Szene nur Objekte erkannt werden, die größer als 7 Meter sind, wie z.B. die Hauptstraße oder der Einzelbaum. Sehr kleine Objekte wie die Stromleitung sind in der Radarszene nicht sichtbar. Beim Feldweg ist vermutlich der geringe Unterschied in der Oberflächenrauigkeit die Ursache dafür, dass der Feldweg nicht sichtbar ist.

Bei der Erkennbarkeit konnte nur die Hauptstraße eindeutig als solche identifiziert werden, da größere Straßen meist asphaltiert sind und damit eine geringere Oberflächenrauigkeit als die Umgebung besitzen. Das Hausdach in Abb. 10 kann auch nicht eindeutig identifiziert werden, da es in der Umgebung im Radarbild ebenso eine Baumgruppe hätte sein können. Denn nur ein Teil des Daches ist aufgrund des Winkels sichtbar und wird stark reflektiert, der andere Teil des Daches liegt im Schatten.

Im Gegensatz dazu, zeigte es sich, dass die Interpretation von optischen Daten deutlich einfacher als die der Radar-Daten ist. Denn Optische Bildinterpretation ist besser an die menschliche Wahrnehmung von Farben und Kontrasten angepasst.

Objekt	Breite in Pixel		Sichtbarkeit		Erkennbarkeit	
	I	T	I	T	I	T
Stromleitung	1-2	U	x	-	x	-
Feldweg	4	U	x	(-)	x	-
Pool	6	8	x	x	x	-
Teich	6	U	x	-	x	-
Hütte	6	10	x	x	x	-
Hauptstraße	7	12	x	x	x	x
Einzelbaum	8	U	x	x	x	-
Baumgruppe	13	14	x	(-)	x	-
Hausdach	18	13	x	x	x	-

Tab. 4: Vergleich der untersuchten Objekte, x = möglich, - = nicht möglich, (-) = teilweise möglich, I = Ikonos, T = TerraSAR-X, U= unbekante Anzahl an Pixeln.

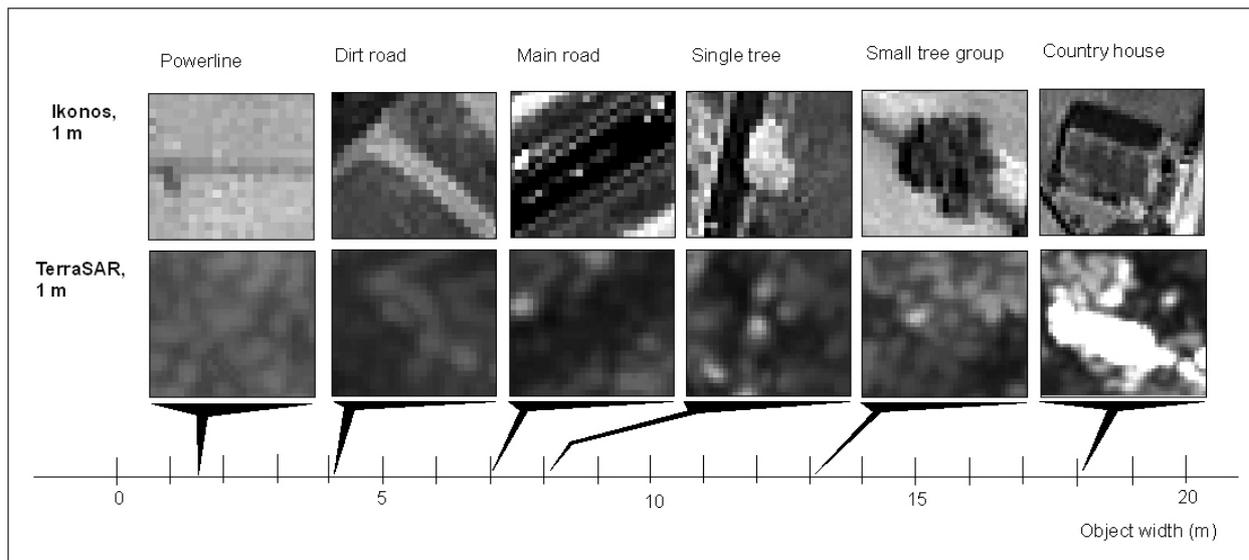


Abb. 10: Objekte im Vergleich in Ausschnitten der TerraSAR-X und der Ikonos Szene.

In einer panchromatischen Ikonos Szene mit 1 m Bodenauflösung können daher Objekte besser erkannt werden als in einer 1 m TerraSAR-X Szene. Um festzustellen, mit welcher räumlichen Auflösung eine hochauflösende TerraSAR-X Szene zu vergleichen ist, wurde die Ikonos-Szene auf unterschiedliche Auflösungen reduziert (4m und 10m) (Abb. 11/ Tab. 5). Während die Objekterkennung der 10 m Szene deutlich schlechter ist als bei der TerraSAR-X Szene, ist die 4 m Szene mit der TerraSAR-X Szene vergleichbar. Zum Beispiel sind die 6 m breiten Hausdächer (repetitive Structure) besser in der TerraSAR-X Szene zu erkennen. Der Grund dafür ist der geringe Kontrast in der Ikonos Szene. Anders ist dies bei den 4 m breiten Dachflächen (repetitive Structure 2). Ein weiteres Beispiel ist die Autobahn (freeway), welche aufgrund der unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften in der TerraSAR-X Szene klar vom Hintergrund abgegrenzt ist. In der 4 m Ikonos Szene ist die Autobahn allerdings, aufgrund von Linien und Objekten auf der Autobahn, nur schwer zu identifizieren. Das kleine Gebäude (small house) ist in der Ikonos 4 m Szene noch sichtbar, aber wegen der fehlenden Details, die in der 1 m Szene noch sichtbar waren, nicht mehr identifizierbar. Aber auch in der TerraSAR-X Szene ist dieses Gebäude nicht eindeutig zu identifizieren, aufgrund des hellen Spots der in der Abb. 11 eingekreist ist, kann auf einen kleinen Winkel des Objektes geschlossen werden.

In den 10 m Ikonos-Daten sind nur noch die Straßen eindeutig zu identifizieren. Auf Grundlage dieser Evaluation können wir darauf schließen, dass ein geometrisches Auflösungsverhältnis von 1:6 – 1:10 optimal für die Fusion von TerraSAR-X und optischen Daten eingesetzt werden kann.

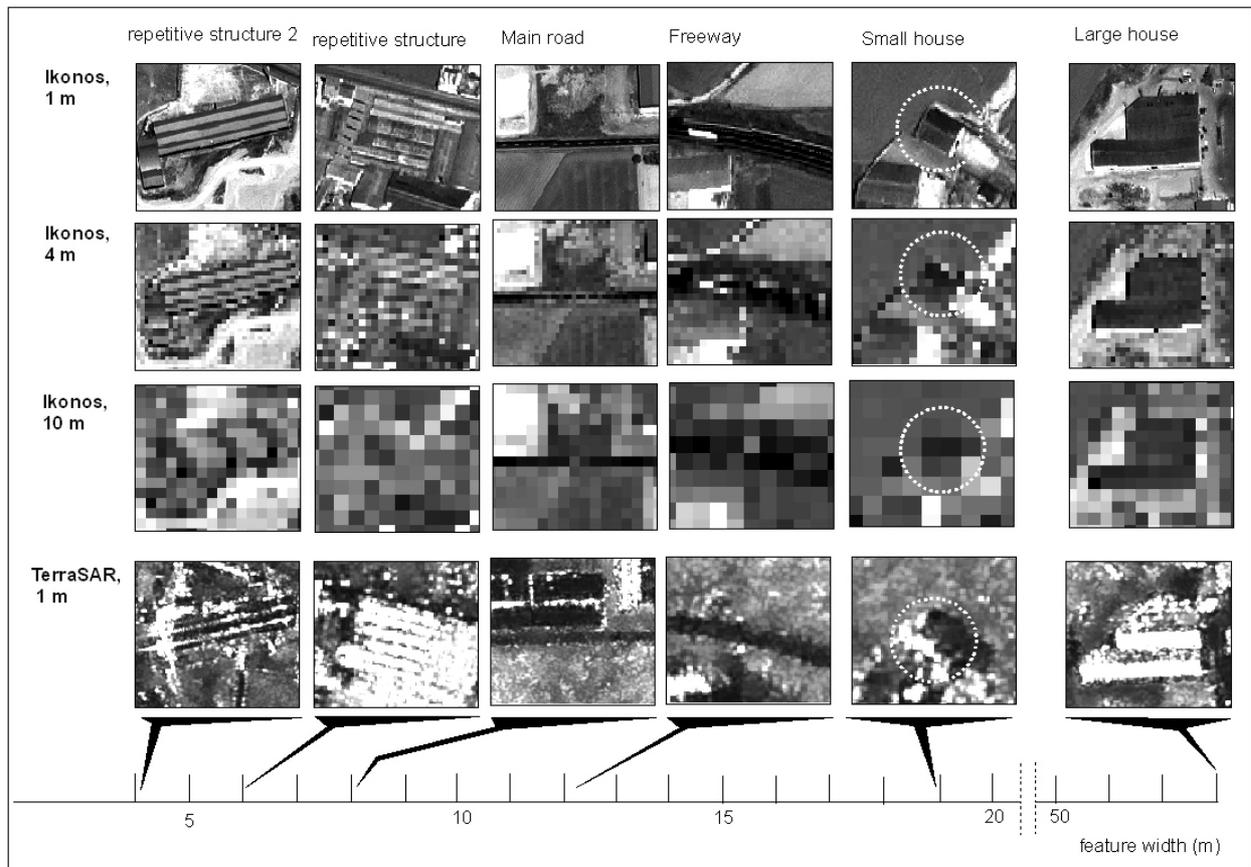


Abb. 11: Objekte im Vergleich in der TerraSAR-X und den formatierten Ikonos Szenen.

Objekt	Breite in Pixel		Sichtbarkeit		Erkennbarkeit	
	I	T	I	T	I	T
Repetitive structure 2	1-2	3-5	x	x	-	-
Repetitive structure	U	6	-	x	-	-
Main road	1-2	8	x	x	x	x
Freeway	7	12	x	x	x	x
Small house	6	18-20	x	-	-	-
Large house	15	53	x	x	-	-

Tab. 5: Vergleich der untersuchten Objekte, x = möglich, - = nicht möglich, I = Ikonos (4 m), T = TerraSAR-X, U= unbekannte Anzahl an Pixeln.

Die Fähigkeit von TerraSAR-X Objekte mit bestimmten strukturellen Eigenschaften aufzuzeigen kann von großem Wert sein, z.B. wenn nach einer Katastrophe

strukturelle Schäden entstehen. Man kann in den TerraSAR-X Daten eventuell nicht die genaue Art der Schäden erkennen, aber dennoch feststellen, wo Schäden oder ein Verlust von Objekten aufgetreten sind. Dieser Vorteil ist bedeutender als die räumliche Auflösung im Vergleich mit den optischen Daten.

WP 300: Weiterentwicklung der Ehlers Fusion

Die Ehlers Fusion wurde so modifiziert, dass sie für Radardaten einsetzbar ist. Dazu musste im Wesentlichen der Hochpassfilter modifiziert werden.

Farbveränderungen im Blauen Kanal

Es wurden zudem unterschiedliche Verfahren getestet, um den Grauwertanstieg, der teilweise beim fusionierten Bild, im blauen Kanal auftrat, zu verringern. So zeigte sich dieser Effekt z.B. bei 16-bit Daten, wie sie von den Satelliten Ikonos, Quickbird oder Orbview bereitgestellt werden, teilweise aber auch bei 8-bit Daten. Insbesondere trat dieses Phänomen bei Schattenflächen auf. Beim Vergleich der originalen multispektralen Aufnahme mit der höher aufgelösten panchromatischen Komponente konnte man erkennen, dass die lokalen Maxima im fusionierten Bild mit dem panchromatischen Kanal korrespondieren. Es werden also zu viele Informationen aus dem panchromatischen Bild in das fusionierte übernommen. Dies führt dann zu einer Überbetonung des 1. (blauen) Kanals. Diese Eigenschaften bestätigten sich auch für weitere Szenen. Veränderte Filtereinstellungen der Hoch- und Tiefpassfilter veränderten das Ergebnis nicht wesentlich, bzw. das fusionierte Bild wurde sehr unscharf. Die Ursache für diese Unschärfe ist die Anwendung der Filter auf die Intensitätskomponente nach einer erfolgten IHS Transformation, die immer auf 3 Kanäle gleichzeitig angewendet wird. Andere Verfahren mussten daher entwickelt werden, um diese Effekte zu vermeiden.

Anpassung an die Intensität

Eine weitere Möglichkeit den Grauwertanstieg zu verringern, ist eine verbesserte Anpassung der panchromatischen Komponente an die Intensitätskomponente des multispektralen Bildes. Die Intensitätskomponente der IHS Transformation weist einen Wertebereich zwischen 0 und 1 auf. Um die panchromatische Komponente auf diesen Wertebereich zu übertragen, wurden bisher alle Pixel der hochauflösenden Komponente durch ihr Maximum dividiert. Dies ist besonders dann problematisch, wenn die Grauwerte im Histogramm der panchromatischen bzw. TerraSAR-X Aufnahme nicht normalverteilt sind und starke Ausreißer aufweist. Um diesen Fehler auszugleichen, wurden unterschiedliche Varianten geprüft.

Bei der von uns entwickelten Maxmean Variante (MMV) wird versucht, durch Maximalwert und Mittelwert eine verbesserte Verteilung des Histogramms zu erreichen. Dazu wird zunächst der Mittelwert vom Maximum subtrahiert, anschließend wird dieses Ergebnis durch 2 dividiert, um dann den Mittelwert wieder zu addieren. Die panchromatische Komponente wird dann durch diesen Wert dividiert.

Bei der Histogrammanpassungs Variante (HAV) wird das Histogramm der panchromatischen Komponente an das Histogramm der Intensitätskomponente angepasst. Bei der Histogrammanpassung wird eine Look-Up-Table (LUT) berechnet, die das Histogramm eines Bildes so verändert, dass es dem Histogramm an das es angepasst wird ähnelt. Die Look-Up-Table bezeichnet dabei eine Datenstruktur, die komplizierte Laufzeitberechnungen durch einen einfachen indizierten Zugriff auf die Daten ersetzt.

Um eine bessere Verteilung der Histogrammwerte im panchromatischen Kanal zu erhalten, wird bei der StdStretch Variante (SSV) das Histogramm auf die doppelte Standardabweichung ausgedehnt, um so eine Verteilung zu erreichen, die der Normalverteilung ähnlicher ist.

Vergleicht man diese Varianten, so zeigt sich eine deutliche Verbesserung gegenüber der ursprünglichen Version. Gegenüber der MMV treten bei der HAV mehr Farbveränderungen auf. Die HAV zeigt aber im Gegensatz dazu eine bessere räumliche Struktur (Ecken, Kanten) im Bild. Zudem wurde festgestellt, dass bei der MMV nicht in allen Testgebieten eine Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen Verfahren erreicht werden konnte. Die Bilder wirken dann etwas undeutlich, da geringere Informationen des panchromatischen Kanals in das fusionierte Bild integriert werden. Dies konnte dann teilweise durch Veränderung der Filtereinstellungen korrigiert werden. Die HAV allerdings erreichte für alle getesteten Datensätze eine ähnlich gute Qualität. Die SSV produzierte dagegen Farbveränderungen, die noch stärker sind als bei der ursprünglichen Variante.

Zur Veranschaulichung werden die drei Varianten im Vergleich mit der ursprünglichen Version in Abb. 13 und Abb. 14 dargestellt. Da sich die Auswirkungen am besten an der folgenden Quickbirdszenen (Abb. 12) erkennen lassen, für die uns zum Zeitpunkt der Untersuchung noch keine TerraSAR-X Daten vorlagen, wurden diese mit panchromatischen Quickbird Daten fusioniert.



Abb. 12: Quickbird multispektrale Szene in der Kanalkombination 3 (Rot), 2 (Grün), 1 (Blau).



Abb. 13: Mit dem Ehlers Algorithmus fusioniertes Bild unter Nutzung der ursprünglichen (links) und der MM Variante (rechts).



Abb. 14: Mit dem Ehlers Algorithmus fusioniertes Bild unter Nutzung der SSV (links) und der HA Variante (rechts).

Vergleicht man die Varianten nicht nur rein visuell, sondern auch statistisch (Tab. 6), so erkennt man beim RMSE (Root Mean Square Error), dass die MMV und HAV ähnlich gute Ergebnisse produzieren. Die SSV zeigt aber einen deutlich schlechteren Wert. Der Grund für dieses schlechte Ergebnis ist vermutlich die Streckung des Histogramms des panchromatischen Kanals auf $\bar{x} \pm 2\sigma$, da die Aufnahme auch im

hohen Grauwertebereich (oberhalb eines Wertes von 350) noch überdurchschnittlich viele Pixel aufweist. Im 1. Kanal des multispektralen Bildes dagegen liegen in diesem Bereich nur einzelne Pixel. Dadurch werden bei dem Schritt der Addition in der Ehlers Fusion mehr panchromatische Informationen in das fusionierte Bild aufgenommen und es kommt zu Farbveränderungen.

	Mittelwert	Standardabweichung	RMSE
Original	210,093	55,688	
MMV	207,590	57,647	3,178473
SSV	209,880	66,103	10,41718
HAV	208,677	58,530	3,17522

Tab. 6: Statistischer Vergleich der unterschiedlichen Varianten

Filterung im Ortsraum

Darüber hinaus wurde auf der Basis der erzielten Ergebnisse analysiert, ob die Filterverfahren vereinfacht werden können, um die Performanz zu steigern. Die Transformation der Bilddaten in den Frequenzraum und die danach erfolgende Rücktransformation sind sehr komplex und rechenzeitaufwändig. Dies gilt insbesondere bei großen Aufnahmen und solchen mit Bildgrößen, die sich nicht als Potenz von 2 darstellen lassen. Daher wurde geprüft, ob eine Faltung im Ortsraum mit einer verkleinerten Filtermatrix diesen Prozess abkürzen und vereinfachen kann. Das Filterdesign wurde zunächst im Frequenzraum durchgeführt, die ausgewählte Filterübertragungsfunktion konnte dann mit Hilfe einer inversen Fouriertransformation in den Ortsraum überführt werden. Da die so erzeugten Filtermatrizen zunächst sehr groß waren, mussten diese verkleinert werden. Da das Ziel eine Zeitersparnis gegenüber der Filterung im Frequenzraum sein sollte, wurde zunächst die Zeit gemessen, um ein Bild in einer Größe von 2048 X 2048 Pixeln im Frequenzraum zu filtern, mit vorheriger FFT (Fast Fourier Transformation) und anschließender inverser FFT. Die Software benötigte 4,04 Sekunden, um die Filterung inklusive Transformation durchzuführen. Die dazu ausgewählte Filterübertragungsfunktion wurde dann mit Hilfe einer inversen Fouriertransformation in den Ortsraum überführt. Um die korrekte Transformation des Filters sicherzustellen wurde das Bild mit der Filtermatrix in der Größe 2048 X 2048 Pixel im Ortsraum gefiltert, wobei dieser Prozess 11149,46 Sekunden benötigte. Danach wurden die im Ortsraum und Frequenzraum gefilterten Bilder

verglichen: Sie waren identisch. Um eine Zeitersparnis zu erreichen, musste die Filtermatrix auf mindestens 17 x 17 Pixel reduziert werden, siehe dazu Tab. 7.

Filtergröße in Pixeln	Zeit (Sek.)
20 x 20	4,63
18 X 18	4,38
17 x 17	3,29
15 x 15	2,53
10 x 10	0,40

Tab. 7: Dauer der Filterung im Ortsraum in Abhängigkeit der Filtergröße der Matrix

Zum Vergleich wurde außerdem noch ein fusioniertes Bild erzeugt, das mit Standard Filtermatrizen ebenso im Ortsraum gefiltert wurde. Als Filtermatrix für den Hochpassfilter wurde ein Laplacian 3 x 3 Filterkernel (Jensen, 2005) verwendet:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Für den Tiefpassfilter wurde ebenso ein 3 x 3 Filterkernel (Jensen, 2005) verwendet:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Die Verfahren wurden auf das erste Testgebiet angewandt. Die TerraSAR-X Daten wurden mit einer Quickbird Szene fusioniert, die für dieses Gebiet zur Verfügung stand. Um die räumliche Verbesserung durch die SAR-Daten zu erkennen, wurde die geometrische Auflösung der Quickbird Szene zunächst um einen Faktor 3 auf 7,20 m reduziert. Die Ergebnisse für die drei unterschiedlichen Verfahren zur Filterung erkennt man in Abb. 15 (rechts) und Abb. 16 in der Bandkombination 4 (nahes Infrarot), 3 (Rot) und 2 (Grün). Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 15 (links) die originale multispektrale Quickbirdszenen.

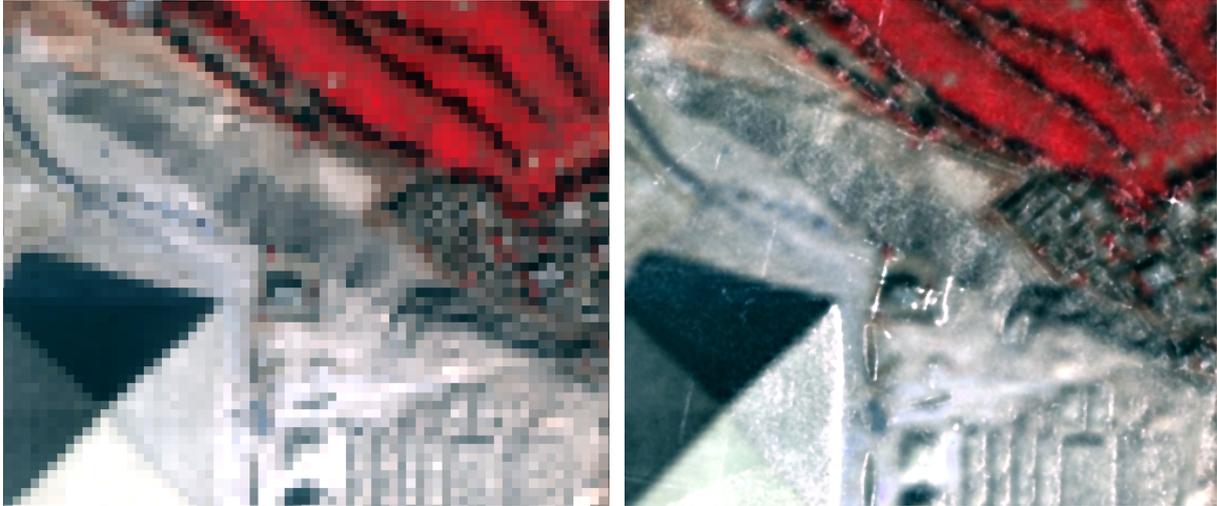


Abb. 15: Auf 7,20 m reduzierte Quickbirdszenen in der Bandkombination: nahes Infrarot, Rot, Grün (links) und fusionierte Quickbirdszenen mit Filterung im Frequenzraum (rechts).

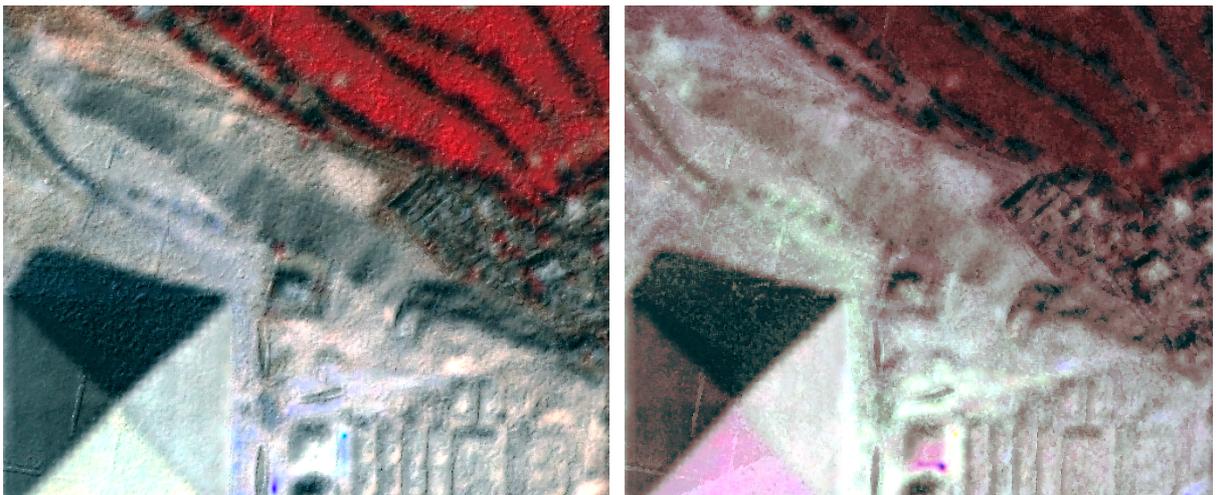


Abb. 16: Fusionierte Szenen mit Filterung im Ortsraum unter Nutzung der angepassten und verkleinerten Filter aus dem Frequenzraum (links) und fusionierte Szenen mit Filterung im Ortsraum unter Nutzung eines Standardfilters (rechts).

Wie man deutlich an den Abbildungen erkennt, wird das beste Ergebnis von dem Verfahren erzeugt, bei dem die Bilder im Frequenzraum gefiltert werden. Es treten kaum Farbveränderungen auf und auch die räumliche Auflösung wird deutlich verbessert. Wird der gleiche Filter in den Ortsraum transformiert und auf eine Größe von 17×17 Pixel reduziert und dann für die Fusion verwendet, zeigt das Ergebnis (Abb. 16, links), dass es zu leichten Farbveränderungen in der unteren Hälfte des Bildes östlich der Pyramide kommt. In der Falschfarbendarstellung zeigen sich diese Farbveränderungen durch Verfärbungen ins Blaue. Aber auch die Struktur in der Abb. 16 (links) ist nicht so deutlich wie die in Abb. 15 (rechts). Werden statt

der angepassten Filter Standardfilter verwendet (Abb. 16, rechts), kommt es zu starken Farbveränderungen. Das gesamte Bild erscheint in einem roten Farbton in der Falschfarbeninfrarotdarstellung. Die quantitativ-statistischen Untersuchungen bestätigen diese Ergebnisse. Unterschiedliche Evaluierungsverfahren wurden getestet (siehe dazu auch WP 500). An dieser Stelle werden nur die Werte des SSIM (Tab. 8) präsentiert, da sie repräsentativ für die anderen Ergebnisse sind. Auch bei den SSIM Werten zeigt die Filterung im Frequenzraum die besten Ergebnisse. Je näher die Werte an 1 liegen, desto besser ist das Resultat. Die Filterung im Ortsraum mit den angepassten Filtern zeigt die zweitbesten Ergebnisse. Wie man auch an der Abb. 16 (rechts) erkennt, zeigt die Filterung im Ortsraum mit den Standardfiltern die schlechtesten Resultate, besonders im nahen infraroten Kanal (Band 4). Bei der Fusion von optischen multispektralen Daten mit optischen panchromatischen Daten dagegen zeigten die Ergebnisse der Filterung im Ortsraum mit Standardfiltern teilweise ähnlich gute Ergebnisse wie die Filterung im Frequenzraum.

	Filterung im Frequenzraum	Filterung im Ortsraum mit angepassten Filtern	Filterung im Ortsraum mit Standardfiltern
Band 1	0,9635	0,9158	0,8167
Band 2	0,9659	0,9333	0,8298
Band 3	0,9700	0,9372	0,8005
Band 4	0,9794	0,9663	0,7448
Mittelwert	0,9697	0,9382	0,7980

Tab. 8: Vergleich des SSIM der unterschiedlichen Verfahren

Modifikation nach Chen

In einem Artikel von Chen et al. (2008) wird eine Verbesserung der Ehlers Fusion vorgeschlagen. Chen et al. (2008) verbessern den Ehlers Algorithmus durch einen Gewichtungsfaktor bei der Addition der hochpassgefilterten panchromatischen Komponente und der tiefpassgefilterten Intensitätskomponente. Während die hochpassgefilterte Komponente unverändert bleibt, wird die Intensitätskomponente mit einem Gewichtungsfaktor verändert. Der Gewichtungsfaktor setzt sich zusammen aus einer tiefpassgefilterten panchromatischen Komponente und der Differenz der tiefpassgefilterten Intensitätskomponente und der tiefpassgefilterten panchromatischen Komponente.

Nach Anwendung dieser Fusion erhält man ein Bild, das starke Farbabweichungen enthält. Diese starken Farbveränderungen lassen sich vor allem dadurch erklären, dass mehr Informationen vom panchromatischen Bild, durch die Nutzung der Tiefpass gefilterten panchromatischen Komponente einfließt. Dies bestätigen auch

die quantitativ statistischen Untersuchungen. So zeigt die spektrale Werterhaltung bei der Methode von Chen et al. (2008) nur sehr geringe Werte. Der SSIM liegt um 0,3 und die Korrelation um 0,25 niedriger wie bei der Ehlers Fusion. Die Veränderung der Werte, die die räumliche Auflösung messen, ändert sich dagegen kaum (<1%).

WP 400: Untersuchungen zur Datenfusion

Untersuchungen im Bereich Datenfusion wurden für die Untersuchungsgebiete zwei und drei durchgeführt. Im Untersuchungsgebiet zwei wurden die TerraSAR-X Daten wie bereits unter WP 200 beschrieben mit der Landsat Szene fusioniert. Im Untersuchungsgebiet drei wurde die TerraSAR-X Szene mit folgenden Daten fusioniert:

- einer Formosat 2 Szene vom 12. August 2005 (8m),
- einer SPOT 4 Szene vom 24. April 2004 (20 m),
- einer weiteren SPOT 4 Szene vom 15. Mai 2004 (20 m),
- sowie einer SPOT 5 Szene vom 10. April 2005 (10 m).

Diese Daten wurden ausgewählt, um einerseits die Auswirkungen der Datenfusion auf unterschiedliche räumliche Auflösungen (8m, 10m, 20m) und unterschiedliche Sensoren (Formosat, SPOT, Landsat) zu überprüfen, aber auch, um anschließend eine Veränderungsanalyse durchzuführen. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse der Szene vom 10. April 2005 ausführlich dargestellt, da diese Szene für alle weiteren Untersuchungen repräsentativ ist.

Zur Überprüfung der Qualität der Fusionsverfahren wurden diese miteinander verglichen. Insgesamt wurden zehn unterschiedliche Verfahren auf die Eingangsdatensätze angewandt (Tab. 9). Dabei wurden sowohl Standardverfahren zur Fusion (Multiplikation, PCA und Brovey) als auch neuere Verfahren wie AWLP oder UNB verwendet.

Diese Verfahren wurden ausgewählt, da sie in kommerzieller Software (Erdas Imagine, Envi, PCI Geomatica) zur Verfügung stehen bzw. ihre Algorithmen publiziert worden sind. Insbesondere das Verfahren von Zhang (2004) wird als Null-Eichung verwendet, da es bei etlichen Fernerkundungsunternehmen und -projekten als Standardverfahren zur Bildfusion genutzt wird. Die Verfahren, die nicht in einem der Produkte implementiert sind, deren Algorithmus aber veröffentlicht ist, wurden in der Software Matlab umgesetzt.

Verfahren	Literatur
AWLP (Additive Wavelet Proportional)	Otazu et al., 2005
Brovey	Hallada & Cox, 1983
CN (Color Normalized) Spectral Sharpening	Vrabel et al., 2002a, 2002b
Ehlers	Klonus & Ehlers, 2007
Gram Schmidt	Laben et al., 2000
HPF (High Pass Filtering)	Gangkofner & Holcomb, 2008
Modifizierte IHS (Intensity Hue Saturation)	Siddiqui, 2003
Multiplikation	Crippen, 1987
Principal Component Transformation (PC)	Chavez et al., 1991
UNB (University of New Brunswick)	Zhang, 2004

Tab. 9: Verwendete Fusionsverfahren

Die Ergebnisse der Fusion zeigen die Abb. 17 – Abb. 21. Bei der visuellen Auswertung wurden zunächst die einzelnen fusionierten Kanäle mit der originalen SPOT-Szene verglichen und danach die Falschfarbeninfrarot-Bandkombination (Band 3, Band 2, Band 1) betrachtet. Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der verschiedenen Fusionsverfahren. Alle präsentierten Abbildungen werden in der Bandkombination 3,2,1 (NIR, rot, grün) dargestellt.

Das mit der AWLP fusionierte Bild (Abb. 17 links) verändert die spektralen Werte nur leicht, die Struktur des Bildes wird verbessert, allerdings entstehen insbesondere an den Ecken und Kanten Artefakte, die das Bild unscharf aussehen lassen.

Die räumliche Verbesserung ist beim Brovey Verfahren (Abb. 17 rechts) sehr gut zu erkennen. Die Farbveränderungen sind allerdings klar sichtbar und in einigen Teilen des Bildes erscheinen Farben, die unnatürlich in einer Falschfarbeninfrarot-Darstellung sind.

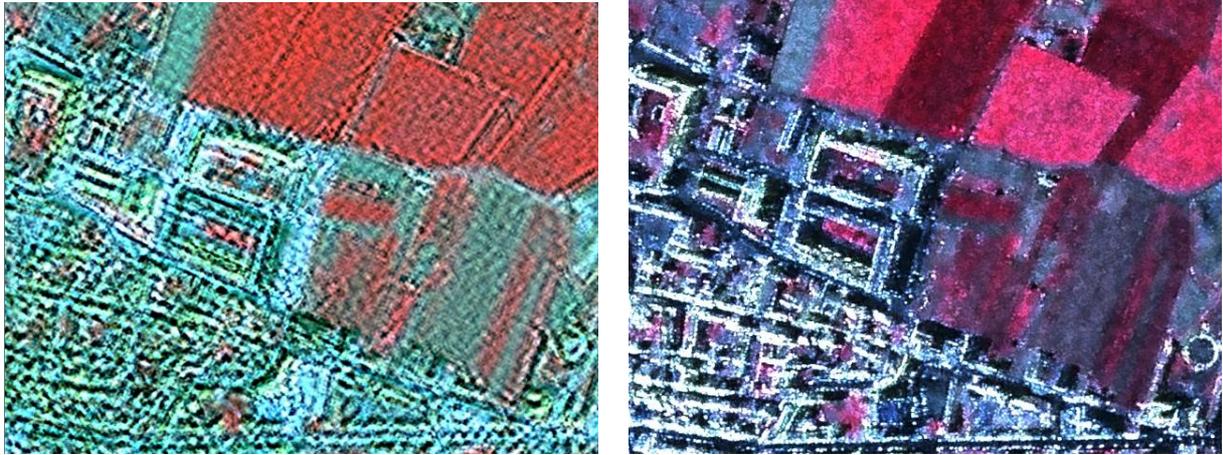


Abb. 17: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung des AWLP Verfahrens (links) und der Brovey Methode (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.

Das CN Spectral Sharpening (Abb. 18 links) wurde so verändert, dass auch Radar-Daten als hochauflösender Eingangsdatensatz verwendet werden konnten. Dazu wurde im Header des Radar-Eingangsdatensatzes der Wellenlängenbereich verändert, so dass dieser nun im Wellenlängenbereich des SPOT 5 Datensatzes liegt. Es werden bei diesem Verfahren nur die Kanäle geschärft, die im Wellenlängenbereich des hochauflösenden Bildes liegen. Diese Inkompatibilität war eventuell der Grund für die enorm veränderten spektralen Werte im fusionierten Bild. Dies trifft besonders für Regionen wie Kanten von Gebäuden zu, in denen die TerraSAR-X Szene extrem hohe Grauwerte aufweist. Hier sind Werte zu finden, die zufällig scheinen. Auch die räumliche Verbesserung wird durch diese Farbveränderungen stark beeinträchtigt.

Die Ehlers Fusion (Abb. 18 rechts) zeigt dagegen eine sehr gute Farberhaltung; im Vergleich mit dem Original sind kaum Farbveränderungen sichtbar. Die räumliche Verbesserung ist gut sichtbar und die Qualität der Farberhaltung lässt verbesserte Interpretationen zu.

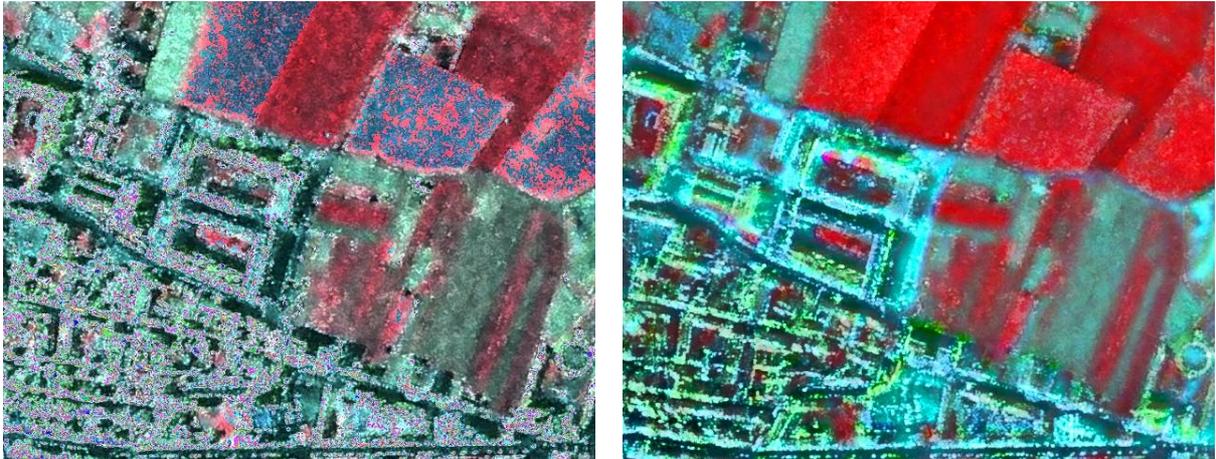


Abb. 18: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung des CN Verfahrens (links) und der Ehlers Fusion (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.

Die Ähnlichkeit der spektralen Werte im Gram-Schmidt fusionierten Bild (Abb. 19 links) mit dem originalen SPOT Bild ist sehr gering. Die verbesserten Strukturen an den Ecken und Kanten sind sichtbar, aber schlechter als bei der Ehlers Fusion. Im dritten Kanal (nahes Infrarot) werden hohe Grauwerte des originalen multispektralen Bildes durch niedrige Grauwerte repräsentiert. Das führt zu Farbveränderungen im Bild, insbesondere in diesem Kanal.

Der Kontrast des mit der HPF fusionierten Bildes (Abb. 19 rechts) ist sehr stark. Die Farben sind nur leicht verändert, allerdings zeigen die Kanten von Gebäuden oder Feldgrenzen mittlere bis starke Farbveränderungen. Die räumliche Verbesserung zeigt allgemein akzeptable Ergebnisse.

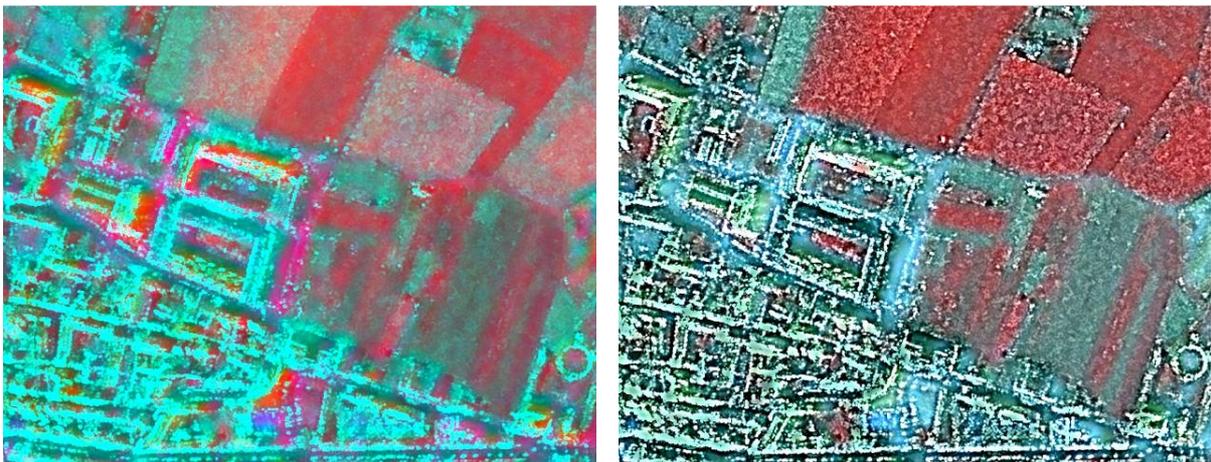


Abb. 19: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung des Gram Schmidt Verfahrens (links) und des HPF (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.

Die modifizierte IHS Fusion (Abb. 20 links) zeigt eine ähnliche Farberhaltung wie die HPF. Die Struktur im fusionierten Bild kann zwar besser erkannt werden als im originalen multispektralen Bild, ist allerdings verschwommen.

Das durch Multiplikation der beiden Datensätze fusionierte Bild (Abb. 20 rechts) weist stärkere Farbveränderungen auf. Kanten werden durch hohe Grauwerte repräsentiert, die in der Farbe weiß dargestellt werden. Dadurch können Ecken und Kanten klar identifiziert werden.

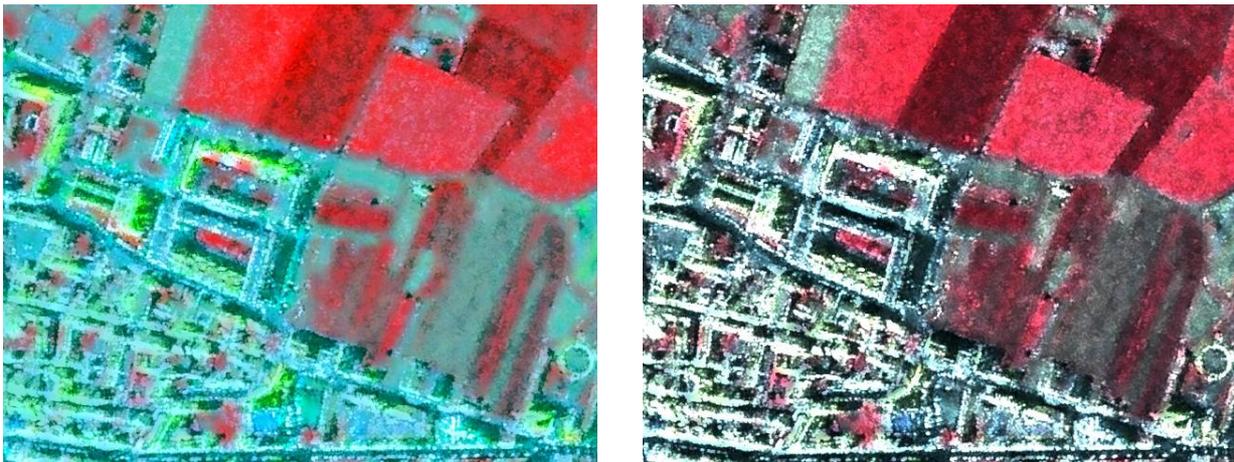


Abb. 20: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung der modifizierten IHS (links) und der Multiplikation (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.

Die PC Fusion (Abb. 21 links) zeigt sehr starke Farbveränderungen. Insbesondere im nahen infraroten Kanal werden ähnlich wie bei der Gram-Schmidt Transformation Gebäude durch niedrige Grauwerte repräsentiert. Daher besteht nur eine geringe Ähnlichkeit mit dem Original. Die räumliche Auflösung ist besser als im ursprünglichen multispektralen Bild, dennoch wirkt das Bild verschwommen.

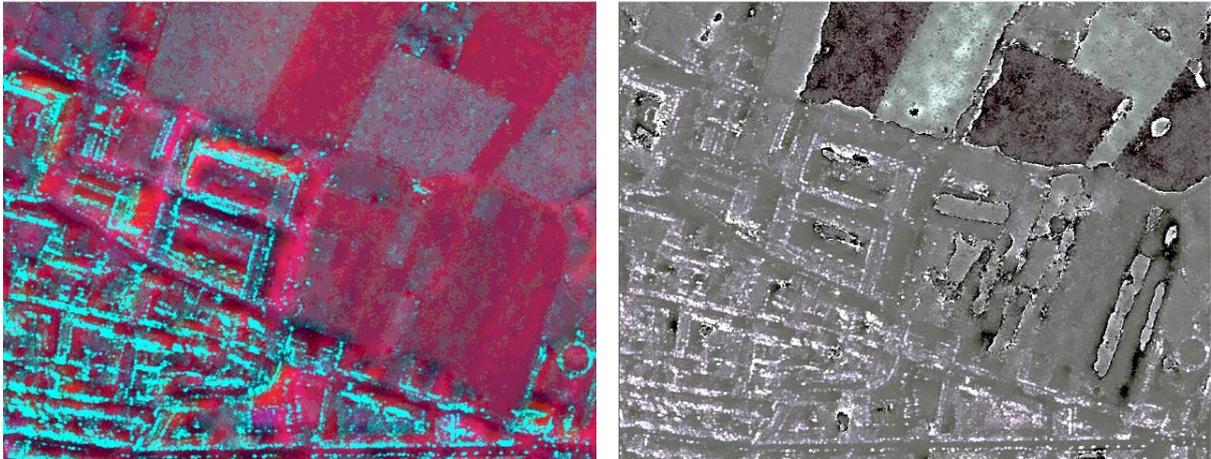


Abb. 21: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung der PCA (links) und des UNB Verfahrens (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.

Das schlechteste Fusionsergebnis zeigt die UNB Fusion (Abb. 21 rechts). Die Farben sind komplett verändert. Die Kanten und Ecken sind deformiert und eine hohe Anzahl an Artefakten erscheint im Bild. Die Struktur zeigt insgesamt nur geringe Verbesserungen gegenüber dem Original. Diese Methode wurde allerdings auch für die Fusion von optischen Satellitendaten entwickelt, die vom gleichen Sensor im panchromatischen und multispektralen Modus aufgenommen wurden.

Da die Resultate für das Untersuchungsgebiet in Osnabrück weitestgehend ähnlich waren, wird an dieser Stelle nur gezeigt, dass die Fusion mit dem Verfahren von Ehlers ebenfalls erfolgreich war (Abb. 22).

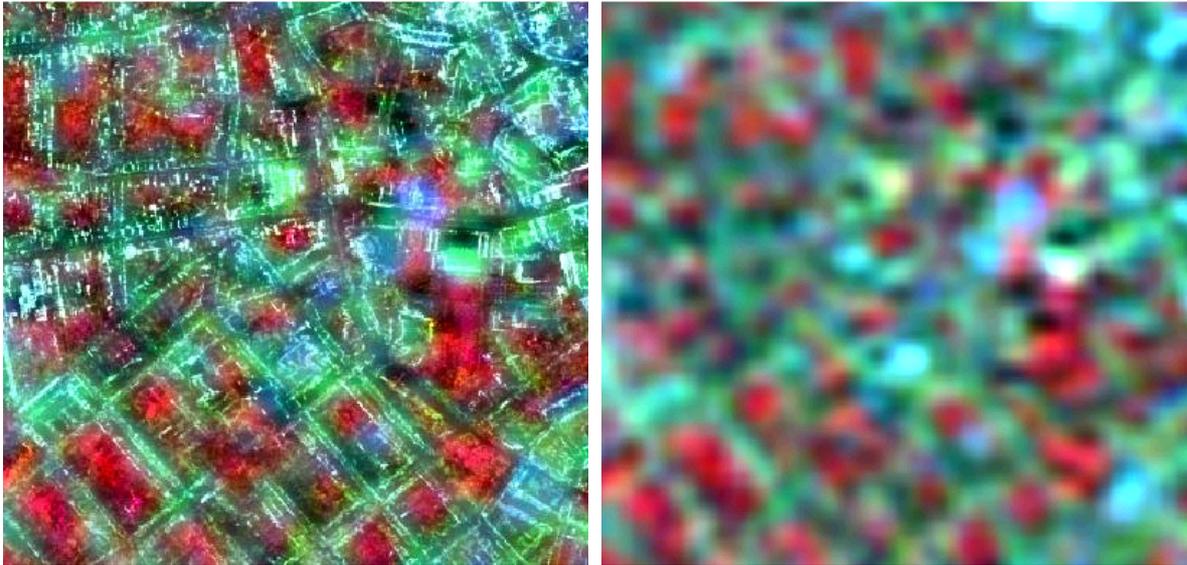


Abb. 22: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen Landsat Szene von Osnabrück unter Nutzung der Ehlers Fusion (links) und multispektrale Landsat Szene (rechts) reformatiert auf die geometrische Auflösung der TerraSAR-X Szene, dargestellt in der Bandkombination 4 (NIR), 3 (rot), 2 (grün).

WP 500: Entwicklung der Evaluationsmethoden

Zur Evaluation der Fusionsverfahren kommen visuelle und quantitative Methoden zum Einsatz. Für den visuellen Vergleich wurde zunächst jedes multispektrale Band des fusionierten Bildes mit dem entsprechenden der originalen Aufnahme verglichen. Danach wurden die Bilder in den gebräuchlichsten Farbkombinationen, wie Echtfarbenbild und Falschfarbeninfrarotdarstellung, verglichen. Da die Falschfarbeninfrarotdarstellung repräsentativ war, wurde diese ausgewählt, um die Ergebnisse zu präsentieren.

Bei den quantitativen Methoden werden Evaluierungsverfahren genutzt, welche sowohl die spektralen als auch die räumlichen Aspekte bewerten:

- Die Korrelationskoeffizienten wurden zwischen den originalen multispektralen und den entsprechenden fusionierten Kanälen berechnet. Die höchste Korrespondenz zwischen fusionierten und originalen Bilddaten wird durch den Wert 1 repräsentiert.
- Für die Grauwertabweichung pro Pixel (Wald 2002, S. 147-160) ist es nötig, die fusionierten Szenen auf die räumliche Auflösung der originalen multispektralen Szene zu reformatieren. Im Anschluss wird diese reformatierte Szene dann von der multispektralen Szene subtrahiert und der Absolutwert extrahiert. In einem letzten Schritt wird dann die

durchschnittliche Abweichung pro Pixel ermittelt. Die geringste Abweichung zum Original hat ein Bild mit dem Wert 0.

- Der SSIM wurde von Wang et al. (2004) entwickelt. Der SSIM ist ein Verfahren, das die Helligkeit, den Kontrast und die Struktur des Bildes vergleicht. Er wird für ein lokales 8 x 8 Pixel umfassendes Fenster berechnet. Dieses Fenster wird Pixel für Pixel über das gesamte Bild geschoben und bei jedem Schritt werden die lokalen Statistiken und der SSIM Index in diesem Fenster berechnet. Der Wert variiert in einem Bereich von 0 und 1. Die höchste Korrespondenz mit dem Original zeigen Werte von 1.

In den meisten anderen Analysen wird der Schwerpunkt auf die spektrale Evaluierung gelegt. Allerdings ist es auch notwendig, die Effektivität der Pansharpening-Algorithmen im Hinblick auf die räumliche Verbesserung zu überprüfen. Ansonsten würde das multispektrale Originalbild die besten Resultate erzielen, ohne dass eine räumliche Verbesserung stattgefunden hätte. Das Ziel muss daher sein, ein fusioniertes Bild zu finden, das die optimale Kombination an Farberhaltung und räumlicher Verbesserung enthält. Zur Überprüfung der räumlichen Verbesserung wurden zwei unterschiedliche Verfahren angewandt, Hochpassfilterung und Kantendetektion.

- Zur Messung des Hochpass-Korrelationskoeffizienten werden das Radarbild und das fusionierte Bild mit einem Hochpassfilter gefiltert. Dieses Verfahren wurde von Zhou et al. (1998) vorgeschlagen. Der Hochpassfilter wird dabei auf jeden Kanal des fusionierten Bildes angewendet. Die Korrelationskoeffizienten werden dann für jeden Kanal mit dem Radarbild berechnet.
- Bei der Kantendetektion wird zunächst ein Sobel-Filter auf das Radarbild und auf jeden Kanal des fusionierten Bildes angewendet. Anschließend wird ermittelt, wie viele der im hochauflösenden Bild erkannten Ecken auch im fusionierten Bild noch entdeckt werden. Die Werte werden in Prozent angegeben und variieren zwischen 0 und 100. 100 bedeutet, dass sämtliche Kanten des Radarbildes auch im fusionierten Bild zu finden sind.

WP 600: Visuelle und quantitativ-statistische Evaluierungen des optimierten Fusionsverfahrens

Auch an dieser Stelle werden erneut nur die Ergebnisse des Untersuchungsgebietes in Spanien dargestellt, da sie repräsentativ für die anderen Untersuchungsgebiete waren. Tab. 10 - Tab. 14 zeigen die Ergebnisse der quantitativen statistischen Untersuchung für das Untersuchungsgebiet in Spanien. Der beste Wert in der Tabelle wurde jeweils rot der schlechteste blau markiert. Die Fusionsverfahren sind in alphabetischer Ordnung aufgeführt.

Die Ehlers Fusion zeigt die höchsten Korrelationskoeffizienten (Tab. 10). Aber auch AWLP und HPF zeigen noch akzeptable Werte. Die Werte der IHS sind etwas niedriger. Alle anderen Verfahren weisen nur geringe Korrelationen auf. Eine Ausnahme ist die Gram Schmidt Fusion, die akzeptable Werte im nahen Infraroten zeigt. Auch visuell zeigt dieser Kanal bei der Gram Schmidt Fusion die höchste Farberhaltung im Vergleich zum Original. Die geringsten Korrelationskoeffizienten weisen die UNB- und PC-Verfahren auf. Dies war zu erwarten, da sie auch visuell die geringste Ähnlichkeit mit dem Original besaßen.

	AWLP	Brovvey	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
Band 1	0.9364	0.5600	0.5697	0.9903	0.4719	0.9116	0.8199	0.7447	0.3450	0.2098
Band 2	0.9244	0.5444	0.6976	0.9899	0.4513	0.9113	0.9164	0.7958	0.2991	0.1388
Band 3	0.9230	0.3240	0.5032	0.9896	0.9447	0.9130	0.8337	0.3753	0.4359	0.3026
Band 4	0.9261	0.3647	0.4487	0.9915	0.5820	0.9167	0.7600	0.6492	0.4470	0.3237
Mean	0.9275	0.4483	0.5548	0.9903	0.6125	0.9132	0.8325	0.6413	0.3818	0.2437

Tab. 10: Korrelationskoeffizienten zwischen fusioniertem und originalems Multispektralbild

Die Abweichung pro Pixel (Tab. 11) ist ebenfalls bei der Ehlers Fusion am geringsten. Damit zeigt dieses Verfahren erneut die besten Ergebnisse. AWLP, HPF und die modifizierte IHS besitzen noch akzeptable Werte. CN, Gram Schmidt, PC und UNB weisen höhere Abweichungen auf. Interessant ist, dass die Brovvey Fusion im ersten Kanal einen Wert aufweist, der wesentlich niedriger ist als in den anderen drei Kanälen

Die Ergebnisse des SSIM (Tab. 12) sind ähnlich denen der Korrelationskoeffizienten. Im Mittel zeigt die Ehlers Fusion deutlich die besten Resultate. AWLP, HPF und IHS weisen noch akzeptable Werte auf, liegen aber um mehr als 0.2 unter der Ehlers Fusion. Alle anderen Methoden, mit Ausnahme der Gram Schmidt Fusion im dritten Kanal, besitzen Werte, die wesentlich geringer als 0.5 sind.

	AWLP	Brovvey	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
Band 1	3.03	17.11	9.98	1.05	9.60	5.09	5.39	39.12	73.92	10.81
Band 2	5.65	75.64	13.71	1.78	16.10	8.44	5.49	53.62	92.00	18.18
Band 3	4.13	95.10	14.89	1.30	3.57	5.31	6.35	49.19	47.78	11.42
Band 4	3.22	82.70	11.92	1.01	7.74	4.60	5.82	46.38	91.31	9.73
Mean	4.01	67.64	12.62	1.28	9.26	5.86	5.76	47.08	76.25	12.54

Tab. 11: Abweichung pro Pixel zwischen fusioniertem und originalems Multispektralbild

	AWLP	Brovey	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
Band 1	0.8214	0.4320	0.4123	0.9741	0.4948	0.8111	0.7181	0.5060	0.0481	0.3119
Band 2	0.7304	0.1596	0.4824	0.9639	0.3614	0.7505	0.7967	0.4551	0.0162	0.1659
Band 3	0.6970	0.1453	0.3148	0.9601	0.9150	0.7962	0.6803	0.3491	0.3633	0.3430
Band 4	0.7285	0.1455	0.2935	0.9680	0.5629	0.8148	0.6308	0.4355	0.0575	0.4252
Mean	0.7443	0.2206	0.3758	0.9665	0.5835	0.7932	0.7065	0.4364	0.1213	0.3115

Tab. 12: SSIM zwischen fusioniertem und originalem Multispektralbild

Während die Tab. 10 - Tab. 12 die statistischen Werte zur Überprüfung der spektralen Werterhaltung zeigten, präsentieren die nächsten beiden Tabellen die Resultate der Evaluierung der räumlichen Verbesserung. Bei der Kantendetektion (Tab. 13) weist die Brovey-Transformation die besten Resultate auf. Dies Verfahren zeigte bereits in der visuellen Analyse die besten Ergebnisse. Die Gram-Schmidt Transformation zeigt nur im ersten Kanal ein besseres Resultat. Auch die meisten anderen Verfahren besitzen gute Ergebnisse. Die geringsten Werte präsentiert mit nur 83 % der detektierten Kanten im Vergleich mit der TerraSAR-X Szene die AWLP.

	AWLP	Brovey	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
Band 1	83.10	94.03	92.35	90.29	94.74	90.80	89.85	92.58	93.89	90.09
Band 2	82.44	96.40	90.03	90.05	94.85	89.92	88.66	92.78	93.92	89.80
Band 3	80.73	95.47	88.68	89.97	91.19	89.59	85.42	92.15	93.61	89.43
Band 4	80.73	96.86	90.59	89.96	94.85	90.24	89.36	92.65	93.87	90.16
Mean	81.75	95.69	90.42	90.06	93.91	90.14	88.32	92.54	93.82	89.87

Tab. 13: Ergebnisse der Kantendetektion; Erkennungsrate zwischen fusionierter und originaler TerraSAR-X Szene (Angaben in Prozent)

Ein komplett anderes Resultat im Vergleich zur Kantendetektion zeigen die Korrelationskoeffizienten der hochpassgefilterten Radar- und Fusionsbilder. Die Brovey-Fusion zeigt erneut die höchsten Werte, die anderen Verfahren aber produzieren sehr unterschiedliche Resultate. Die HPF präsentiert Koeffizienten um 0.5, die etwas schlechter als die Ehlers Fusion mit Werten zwischen 0.4 und 0.6 und den Multiplikationsverfahren mit Werten zwischen 0.4 und 0.5 sind. Diese drei Verfahren zeigen noch akzeptable Ergebnisse, alle anderen besitzen nur noch Werte unter 0.5, die zumeist auch sehr streuen. IHS weist Werte zwischen 0.39 und 0.5 auf. PC zeigt mit Ausnahme des dritten Kanales noch akzeptable Werte, im dritten Kanal liegt eine negative Korrelation vor. Der Grund für diese niedrigen Werte sind vermutlich die Effekte, die bereits im visuellen Vergleich festgestellt wurden. Die Gebäude werden in dem fusionierten Bild durch zu geringe Grauwerte repräsentiert. Im Radarbild werden diese dagegen durch hohe Grauwerte repräsentiert. Diese Aussage trifft ebenso auf die Gram-Schmidt Transformation zu, wobei aber die anderen Kanäle bessere Ergebnisse zeigen als die PC. AWLP, CN und UNB zeigen Korrelationskoeffizienten, die nahe bei Null liegen. Dies war nach der visuellen Analyse zu erwarten.

	AWLP	Brovoy	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
Band 1	-0.0892	0.5063	0.1271	0.5257	0.9239	0.5103	0.4345	0.4888	0.6455	0.2453
Band 2	-0.0744	0.9888	0.0896	0.5311	0.7054	0.5047	0.3834	0.4807	0.6413	0.2693
Band 3	-0.0450	0.9656	0.0803	0.6185	-0.6725	0.5077	0.3491	0.5003	-0.0050	0.1864
Band 4	-0.0615	0.9740	0.1224	0.4336	0.9322	0.5069	0.4094	0.5009	0.6426	0.2232
Mean	-0.0675	0.8587	0.1049	0.5272	0.4723	0.5074	0.3941	0.4927	0.4811	0.2311

Tab. 14: Korrelationskoeffizienten der Hochpassfilterung zwischen fusionierter und originaler TerraSAR-X Szene

WP 700: Segmentierung, Klassifizierung und Änderungsdetektion

Die multispektrale Klassifikation ist ein angemessenes Verfahren, um die Güte der Fusion zu beurteilen (Saroglu et al., 2004; Wiemker et al., 1998). Das Arbeitspaket 700 dient dazu, herauszufinden, ob die fusionierten Daten die Ergebnisse einer Klassifikation oder Änderungsdetektion negativ beeinflussen. Da die Resultate aus WP 400 und WP 600 für alle Verfahren, bis auf die Ehlers Fusion, schlechter als erwartet waren, wurde nur dieses Verfahren für die folgenden Untersuchungen verwendet.

Für die nun folgenden Resultate wurden zwei Szenen aus Spanien ausgewählt: die SPOT 4 Szene vom 24. April 2004 und die SPOT 5 Szene vom 10. April 2005. Diese Szenen wurden ausgewählt, da diese in der gleichen Jahreszeit, um ein Jahr versetzt, aufgenommen wurden. So können später an ihnen die Ergebnisse der Veränderungsanalyse gezeigt werden.

Es wurden unterschiedliche Klassifikationsverfahren getestet, um eine Bevorzugung eines bestimmten Klassifikationsverfahrens zu vermeiden. Das Ziel war nicht eine möglichst genaue Klassifikation, sondern das Erreichen einer gewissen Objektivität. Um diese Objektivität zu gewährleisten, mussten größere Fehler bei der Klassifikation akzeptiert werden.

Folgende Klassifikationsverfahren wurden getestet:

- Discrete Bayes (Chow, 1957)
- Maximum Likelihood (Jensen, 2005)
- Nearest Neighbour (Devroye, 1981)
- Parzen (Parzen, 1962)
- Recursive Cluster Elimination (RCE)(Reilly & Cooper, 1995)
- Classification And Regression Trees (CART)(Breiman et al., 1993)
- Store Grabbag (Kraaijeveld, 1998)

Um das typische Rauschen, das durch pixelbasierte Klassifikationsverfahren entstehen kann, zu vermeiden, werden die pixelbasierten Verfahren mit einer Segmentierung kombiniert. Diese Kombination eines pixelbasierten Klassifikationsverfahrens mit einer Segmentierung ist nicht neu. Li & Xiao (2006) kombinieren z.B. eine Maximum Likelihood Klassifikation mit einem Watershed Segmentierungsalgorithmus.

Für die Kombination der Daten wird das Eingangsbild zunächst klassifiziert und segmentiert. Anschließend wird überprüft, welche Klasse in einem Segment am häufigsten vorkommt, diese Klasse wird dann diesem Segment komplett zugewiesen. Drei unterschiedliche Segmentierungsverfahren kamen dabei zum Einsatz:

- Segmentierungsverfahren über die Euklidische Distanz (Priddy & Keller, 2005)
- Wasserscheiden-Segmentierung (Bleau & Leon, 2000)
- Segmentierung über Kantendetektion (Gonzalez & Woods 2002)

Jede Szene wurde also siebenmal mit den oben genannten Klassifikationsverfahren prozessiert. Danach wurde jedes dieser Klassifikationsergebnisse noch einmal mit jedem der Segmentierungsverfahren kombiniert, so dass am Ende des Prozesses 28 klassifizierte Ergebnisse für jede Szene vorlagen.

Zur Beurteilung der Klassifikation wird ein Accuracy Assessment (Genauigkeitsanalyse) durchgeführt. Dazu ist es notwendig, eine Anzahl von Referenzpunkten zu bestimmen. Eine multinomiale Verteilung wird in dieser Untersuchung verwendet, um die erforderliche Anzahl an Referenzpunkten nach Congalton & Green (1999) zu ermitteln:

$$N = \frac{B \prod_i (1 - \Pi_i)}{b_i^2}$$

Dabei stellt Π die Verteilung der i-ten Klasse von k Klassen dar, die der Abdeckung von 50 % am nächsten liegt. b_i ist die gewünschte Genauigkeit für die Klasse. B ist das obere $(\alpha/k) \times 100$ stes Perzentil der Chi Quadrat Verteilung mit einem Freiheitsgrad und k die Anzahl der Klassen. Für die Verteilung der Referenzpunkte wurde das „Stratified Random Sampling“ (geschichtete zufällige Stichprobe) ausgewählt (Jensen, 2005). Dazu wird aus jeder Klasse zufällig eine bestimmte Anzahl an Referenzpunkten ausgewählt, nachdem die Klassifikation erstellt wurde. Das Verfahren hat den Vorteil, dass alle Klassen (Schichten), unabhängig von der Größe der Abdeckung in der gesamten Szene, berücksichtigt werden.

Im Folgenden wird die Auswirkung der Fusion auf die Klassifikation ermittelt. Um eine gewisse Objektivität zu erhalten, wurden die Referenzpunkte nicht nach der Klassifikation erzeugt, sondern bereits vorher auf Basis der Satellitendaten. Dazu wurden zunächst Zufallspunkte über das gesamte Bild erzeugt, diesen wurden dann manuell Klassen zugewiesen. Um eine Gleichverteilung der Klassen zu gewährleisten, wurden die Zufallspunkte der Klassen wieder gelöscht, deren Anzahl an Referenzpunkten bereits erreicht war. Für diese Punkte wurden neue Zufallspunkte erzeugt, bis allen Klassen die benötigte Anzahl an Referenzpunkten zugewiesen wurde.

Die bereits oben beschriebenen SPOT Szenen wurden für die Klassifikation verwendet. Für beide Szenen wurde ein Konfidenzintervall von 95 % und damit eine Genauigkeit von $\pm 5\%$ angenommen.

Für die Szene vom 10. April 2005 wurden 11 Klassen ($k=11$) ausgewählt:

Farbcode	Klassen
	1. Wasserflächen
	2. Gebäude 1 (Rotes Tondach)
	3. Gebäude 2 (Asphalt Dach)
	4. Gebäude 3 (Braunes Tondach)
	5. Grünflächen
	6. Ackerflächen 1 (Brache)
	7. Ackerflächen 2 (Getreide)
	8. Ackerflächen 3 (Mais)
	9. Ackerflächen 4 (Getreide Einsaat)
	10. Flussufer
	11. Straßen

Aus der o.a. Formel wurde bei einem Vertrauensintervall von 95 % errechnet, dass 650 Referenzpunkte zur Überprüfung der Klassifikation notwendig sind. Diese Anzahl an Punkten wurde durch die Anzahl der Klassen dividiert. Als Ergebnis erhält man die Anzahl der Kontrollpunkte für die Genauigkeitsanalyse. Die Anzahl der Kontrollpunkte wurde dann auf 60 Punkte pro Klasse aufgerundet, womit insgesamt 660 Punkte ausgewählt wurden.

Bei der Szene vom 24. April 2004 wurden die Punkte mit der gleichen Formel berechnet, allerdings trat die Klasse 9 (Ackerflächen 4) kein einziges Mal auf und wurde daher aus der Berechnung genommen. Für die Genauigkeitsanalyse waren 67 Punkte pro Klasse notwendig, womit sich eine Gesamtzahl von 670 Referenzpunkten für diese Szene ergab.

Für den 10. April 2005 und den 24. April 2004 wurden jeweils 3 Szenen klassifiziert und miteinander verglichen: Die originalen multispektralen SPOT Daten (Original), die fusionierten multispektralen Daten mit den TerraSAR-X Daten unter Nutzung der Ehlers Fusion (Ehlers) und die multispektralen Daten mit den TerraSAR-X Daten als „5. Kanal“ des multispektralen Bildes (Radar).

Nach der Klassifikation wurde die Genauigkeitsanalyse durchgeführt und anschließend wurden Herstellergenauigkeit, Nutzergenauigkeit und der Kappa Koeffizient berechnet. Die Herstellergenauigkeit berechnet sich aus der Anzahl der korrekt klassifizierten Pixel einer Klasse, dividiert durch die Anzahl der Referenzpixel einer Klasse. Die Nutzergenauigkeit berechnet sich aus der Anzahl der korrekt klassifizierten Pixel einer Klasse, dividiert durch die Anzahl der insgesamt klassifizierten Pixel in dieser Klasse.

Durch den Kappa-Koeffizient (κ) wird das Verhältnis zwischen der Verbesserung der beobachteten Gesamtgenauigkeit zu einer zufälligen Übereinstimmung und der theoretisch höchst möglichen Verbesserung zur zufälligen Übereinstimmung berechnet:

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})}$$

Dabei sind k die Anzahl der thematischen Klassen, x_{ij} die Anzahl der Beobachtungen in Zeile i und Spalte j, x_{i+} und x_{+i} die Summe der Punkte der Zeile i und Spalte i und N die Gesamtzahl der Beobachtungen.

Ergebnisse der Klassifikation der Szene vom 10. April 2005

Da der Kappa-Koeffizient der aussagekräftigste Wert ist, werden diese Ergebnisse im Folgenden dargestellt. Abb. 23 zeigt die Klassifikationsergebnisse für die Szene vom 10. April 2005 für den multispektralen Datensatz (Original), den fusionierten Datensatz (Ehlers) und den multispektralen Datensatz mit zusätzlichen Radarinformationen (Radar). Die Höhe des Balkens ist ein Mittelwert über alle 28 Klassifikationsergebnisse der entsprechenden Szene.

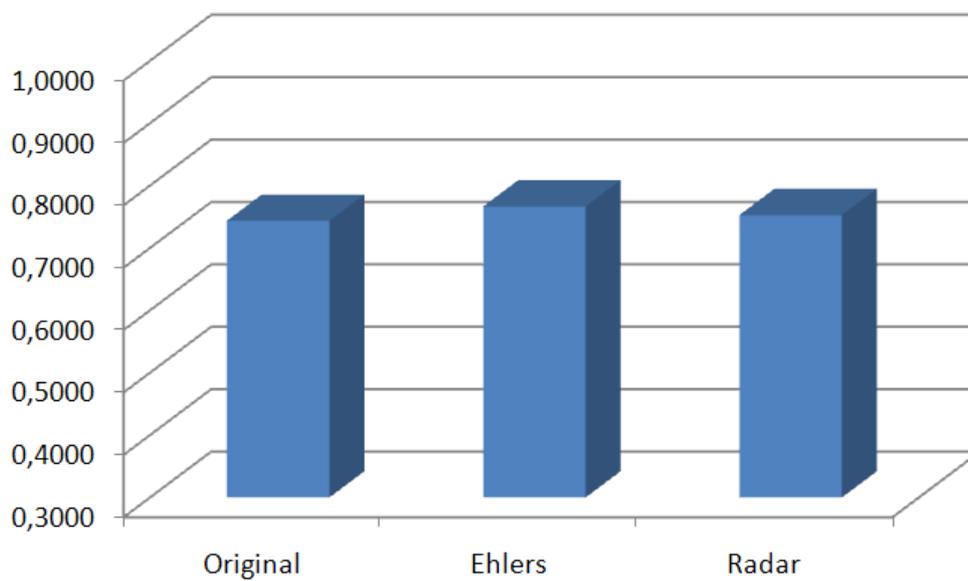


Abb. 23: Ergebnis der Klassifikation für die unterschiedlichen Szenen

Wenn man die y-Achse genauer betrachtet, so erkennt man, dass die Kappa-Werte der drei unterschiedlichen Szenen sehr nahe beieinander liegen und sich maximal nur um 0,025 unterscheiden. Die Güte der Klassifikation ist bei allen Szenen gleich. Allerdings beinhalten die fusionierte Szene und die Szene „Radar“ mehr Informationen als die multispektralen Daten alleine. Bei der Szene Ehlers liegt eine höhere räumliche Auflösung vor und in der Szene „Radar“ existieren fünf, anstatt nur vier Kanäle. Dennoch sind die Ergebnisse sich sehr ähnlich. Die Betrachtung der klassifizierten Daten (Abb. 24 - Abb. 26) liefert eine Erklärung dafür.

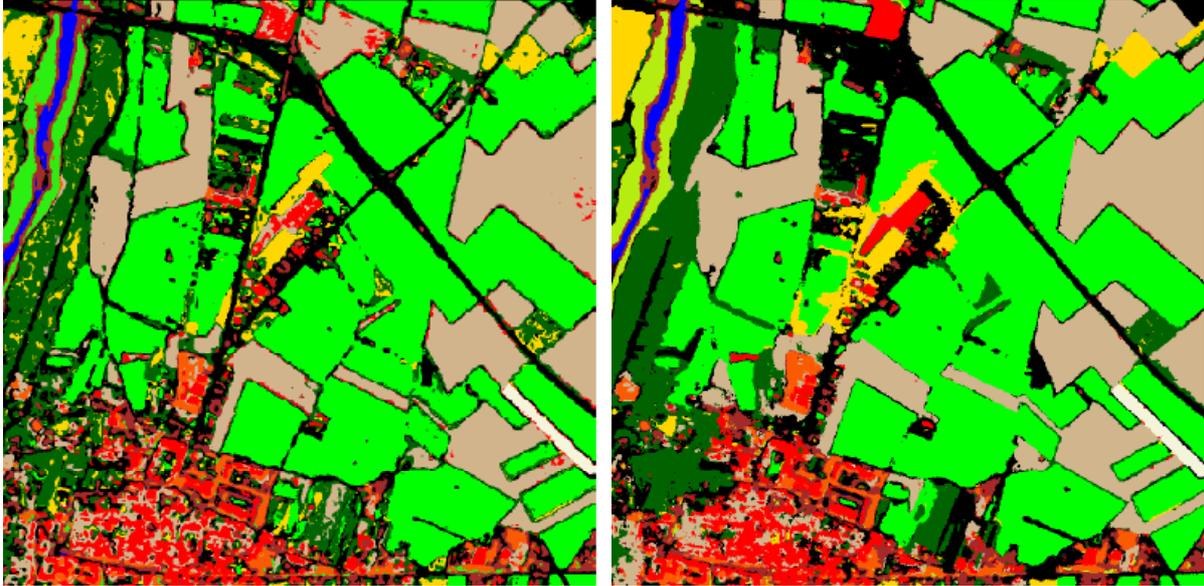


Abb. 24: Multispektrale Szene vom 10. April 2005 klassifiziert mit Maximum Likelihood (links) und rechts kombiniert mit der euklidischen Segmentierung

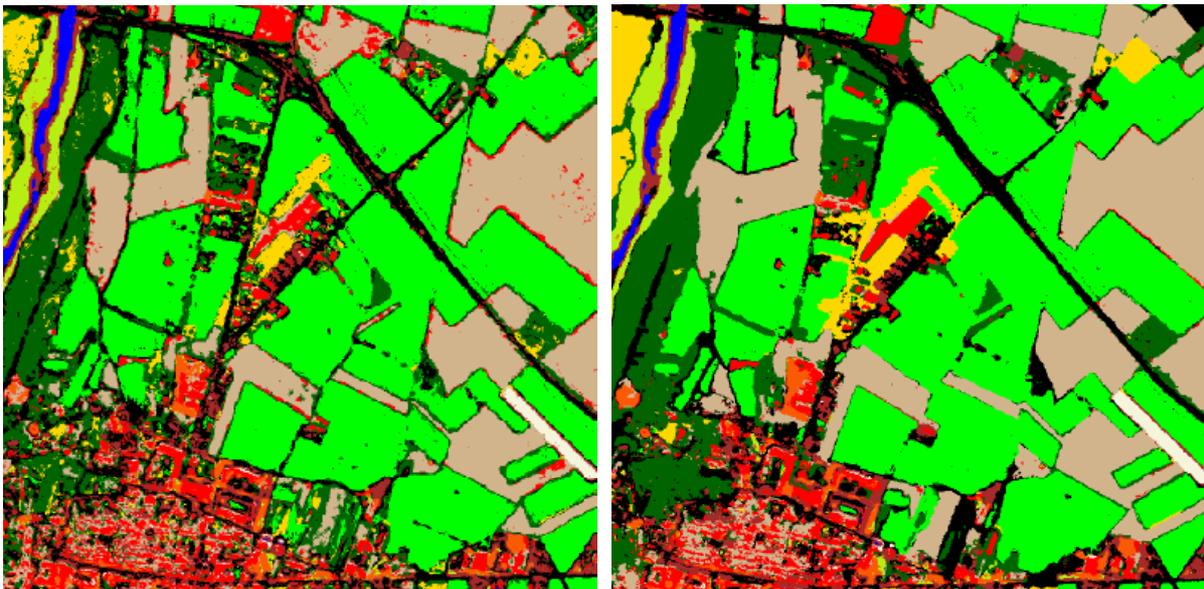


Abb. 25: Fusionierte Szene vom 10. April 2005 klassifiziert mit Maximum Likelihood (links) und rechts kombiniert mit der euklidischen Segmentierung

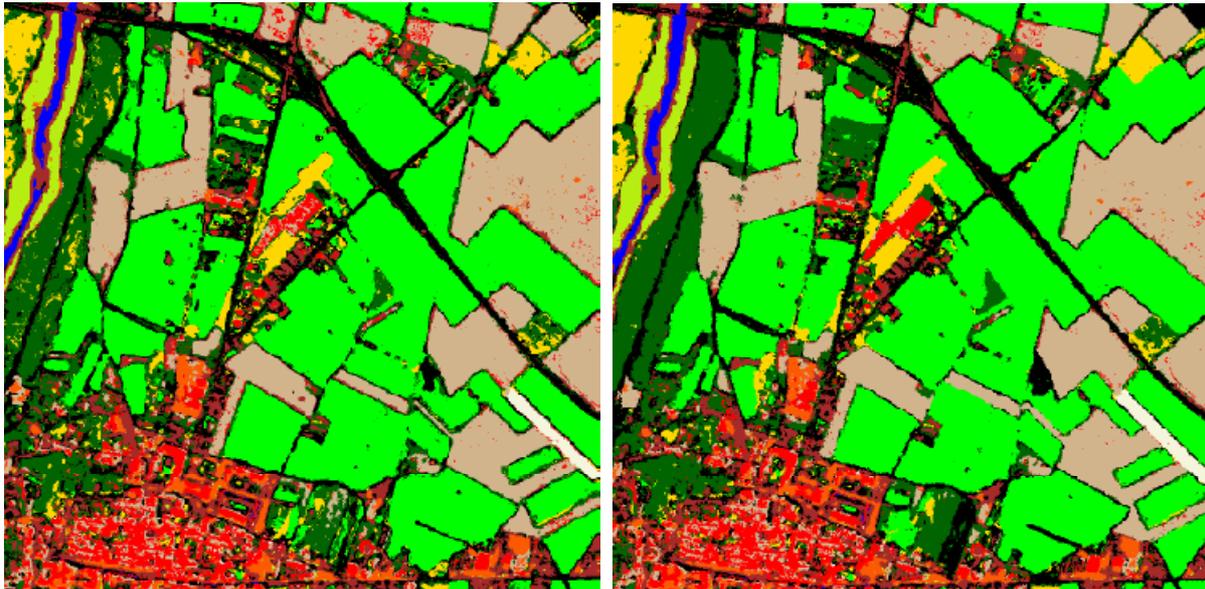


Abb. 26: Multispektrale Szene mit zusätzlichem Radarkanal vom 10. April 2005 klassifiziert mit Maximum Likelihood (links) und rechts kombiniert mit der euklidischen Segmentierung

Während in Abb. 24 die Details wie Straßen und Gebäude nur sehr grob erkannt werden können, sind in den anderen Abbildungen (Abb. 25 und Abb. 26) diese deutlicher sichtbar. Insbesondere kann dies an der Siedlung im Süden und der Autobahnausfahrt im Norden erkannt werden. Dadurch werden die Straßen in Abb. 24 breiter als in der Realität dargestellt. Wesentlich genauer wird die Klassifikation dadurch aber nicht, denn die größten Fehler treten an den Feldgrenzen auf. Durch die Formatierung der originalen multispektralen Szene auf die geometrische Auflösung des Radarbildes treten mehr Mischpixel auf, die schwerer zu klassifizieren sind. Weitere Fehlklassifikationen treten insbesondere in der Siedlung auf. Die Ergebnisse des fusionierten Bildes sind leicht besser, als die der „Radar“ Szene, da das Rauschen der Radardaten durch die Fusion reduziert werden konnte. Dies wird insbesondere an der großen Ackerfläche im Nordosten der Szene sichtbar.

Bei den Szenen, die zusätzlich Radarinformationen beinhalten, ist die Klassifikationsgenauigkeit auch deshalb nicht wesentlich höher, da Klassifikationsverfahren verwendet werden, welche hauptsächlich die spektralen Informationen verarbeiten. Spezielle Radarverfahren wurden in dieser Studie auch nicht angewandt, da aus dem Radarbild lediglich die Kanteninformationen verwendet werden sollen. Die „spektralen“ Informationen werden im Radarbild zu einem anderen Zeitpunkt aufgenommen und stimmen daher nicht mit dem multispektralen Bild überein.

Dieser Vergleich wurde anhand der Maximum Likelihood Klassifikation dargestellt, da diese insgesamt die besten Klassifikationsergebnisse zeigt (Abb. 27). Die

anderen Verfahren sind, bis auf CART und Parzen, nicht wesentlich schlechter als die Maximum Likelihood Klassifikation.

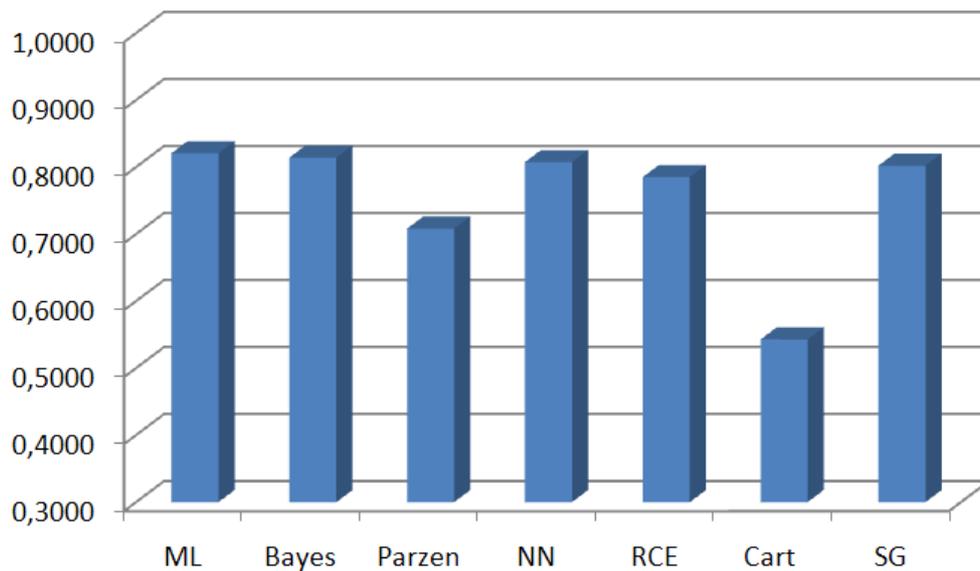


Abb. 27: Ergebnis der unterschiedlichen Klassifikationsverfahren

In Abb. 27 ist der Kappa-Koeffizient dargestellt, gemittelt über alle Szenen, die mit dem entsprechenden Klassifikationsverfahren prozessiert wurden. Werden diese Klassifikationsverfahren mit den Segmentierungsverfahren kombiniert, so zeigt sich (Abb. 28), dass es nur zu einer verbesserten Genauigkeit bei der euklidischen Segmentierung kommt, die beiden anderen Segmentierungsverfahren verschlechtern die Genauigkeit nur.

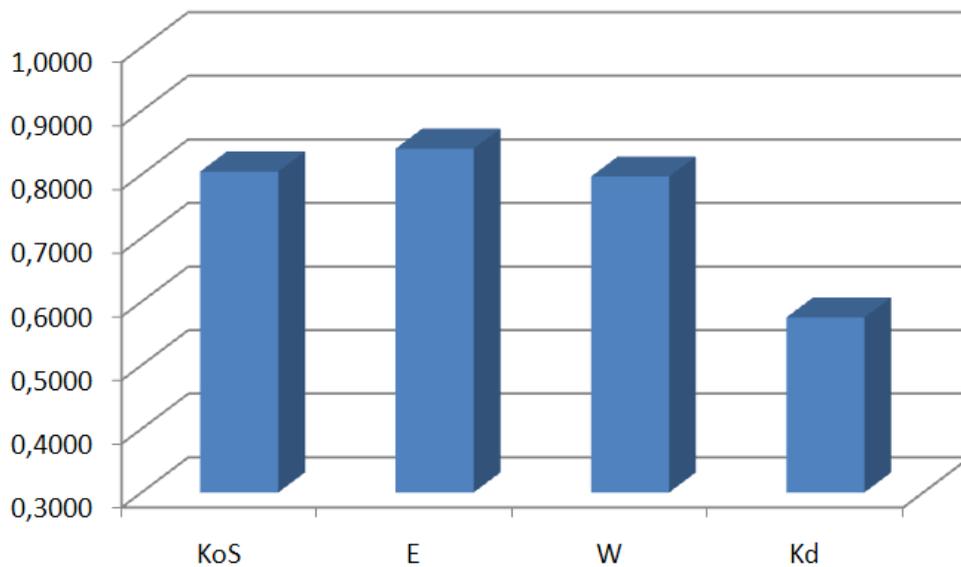


Abb. 28: Auswirkungen der unterschiedlichen Segmentierungsverfahren (KoS = Klassifikation ohne Segmentierung, E = Euklidisches Segmentierungsverfahren, W = Wasserscheiden Segmentierung und Kd = Segmentierung basierend auf Kantendetektion)

Der Kappa-Koeffizient in Abb. 28 ist ein gemittelter Wert über alle Szenen, die mit dem jeweiligen Segmentierungsverfahren prozessiert wurden. Wie man in den Abbildungen Abb. 24 bis Abb. 26 erkennt, wird durch die euklidische Segmentierung der Salz- und Pfeffer-Effekt reduziert. Auch an den Feldgrenzen kommt es zu weniger Fehlklassifikationen. Allerdings verschwinden durch die Segmentierung teilweise einige kleinere Wege, wie im Nordwesten östlich des Flusses. Dieser Effekt war noch deutlicher bei den anderen Segmentierungsverfahren, daher wurde dort die Klassifikationswahrscheinlichkeit auch geringer. Vergleicht man die Klassifikationsgenauigkeit für die unterschiedlichen Szenen (Original, Ehlers, Radar) dann zeigt sich (Abb. 29), dass bei dem Segmentierungsverfahren mit der Kantendetektion die originalen multispektralen Daten das schlechteste Resultat zeigen, während bei den anderen Verfahren die unterschiedlichen Szenen nahe beieinander liegen. Der Grund dafür ist, dass in den originalen multispektralen Daten im Gegensatz zu den fusionierten die räumlichen Informationen des Radarbildes fehlen.

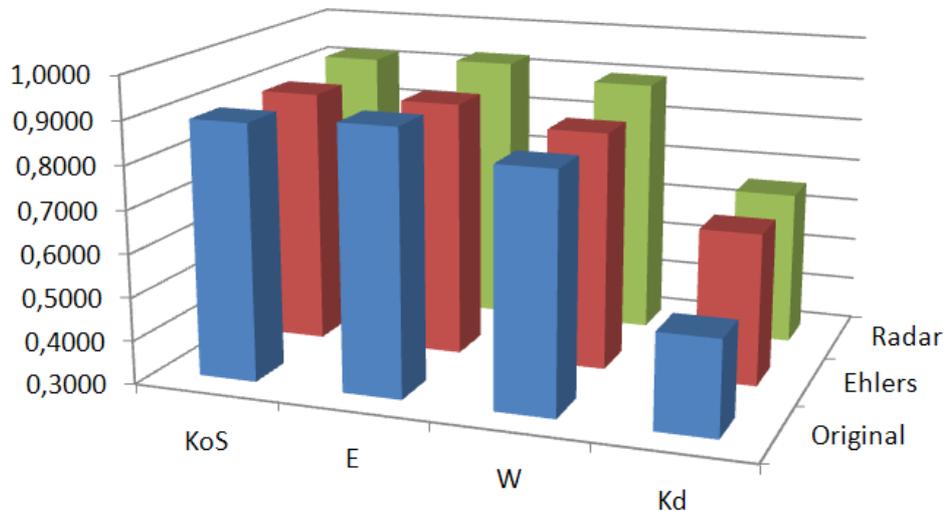


Abb. 29: Klassifikationsergebnis des Maximum Likelihood Verfahrens in Kombination mit unterschiedlichen Segmentierungsverfahren für die einzelnen Szenen (Original, Ehlers, Radar mit KoS = Klassifikation ohne Segmentierung, E = Euklidisches Segmentierungsverfahren, W = Wasserscheiden Segmentierung und Kd = Segmentierung basierend auf Kantendetektion)

Ergebnisse der Klassifikation der Szene vom 24. April 2004

Der Kappa-Koeffizient soll an dieser Stelle wieder verwendet werden, da er die Ergebnisse am Besten repräsentiert. Abb. 30 zeigt die Klassifikationsergebnisse für diese Szene vom 24. April 2004 für den multispektralen Datensatz (Original), den fusionierten Datensatz (Ehlers) und den multispektralen Datensatz mit zusätzlichen Radarinformationen (Radar). Der Balken stellt wiederum einen Mittelwert über alle 28 Klassifikationsergebnisse der entsprechenden Szene dar.

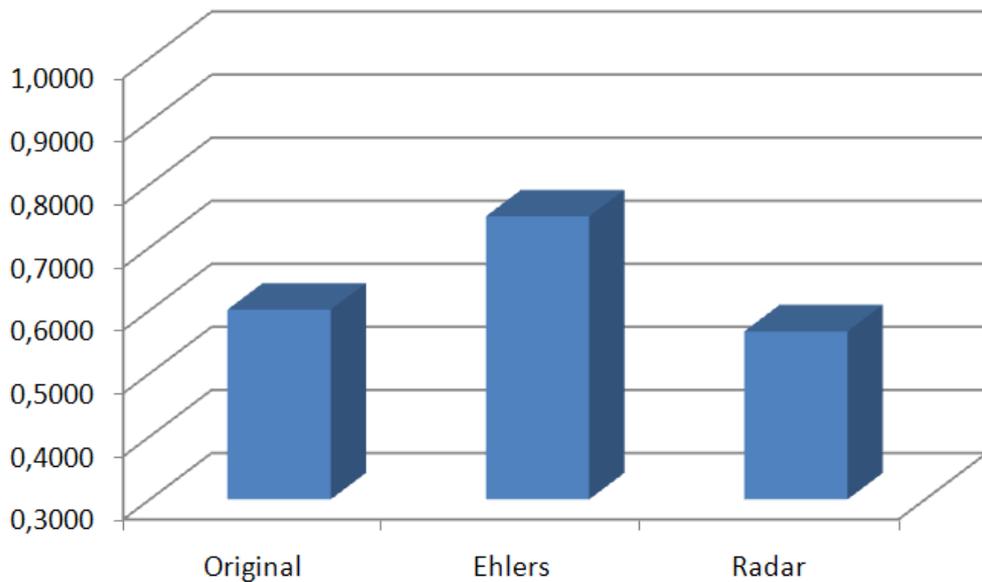


Abb. 30: Gemittelter Kappa Koeffizient der Klassifikation für die unterschiedlichen Szenen vom 24. April 2004

Im Gegensatz zur Szene vom 10. April 2005 zeigt die Ehlers Fusion hier deutlich das beste Ergebnis. Während die Werte der Ehlers Fusion über 70 % liegen, weisen das Originalbild und das Bild, das zusätzlich als Eingabe ein Radarbild hat, Werte deutlich unter 60 % auf. Gegenüber dem Original kann man die besseren Ergebnisse der Ehlers Fusion dadurch erklären, dass die Auflösung erhöht wurde. In diesem Bild ist das Verhältnis der hochauflösenden Komponente zu der niedriger aufgelösten multispektralen Datei sogar 1:20, da eine SPOT 4 Szene verwendet wurde. Die niedrigen Werte des „Radar“ Bildes gegenüber der Ehlers Fusion werden vermutlich durch den höheren Speckle Anteil in dem Radar Bild verursacht. Denn durch die Fusion wird dieser Anteil weiter reduziert. Ein anderer und noch bedeutenderen Grund für die niedrigen Werte, erkennt man in den folgenden Abbildungen (Abb. 31)

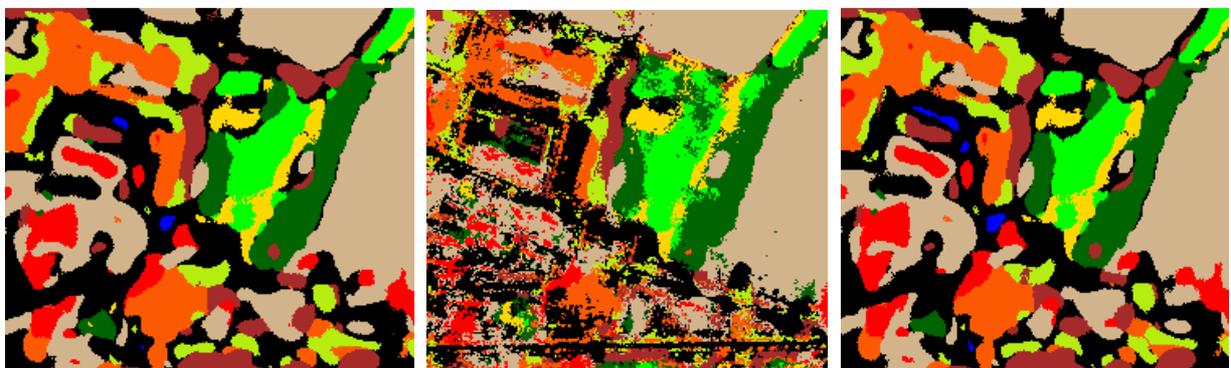


Abb. 31: Ausschnitt aus der multispektralen Szene (links), der fusionierten Szene mit dem Ehlers Verfahren (mitte) und der multispektralen Szene mit zusätzlichem Radarkanal (rechts) vom 24. April 2004 klassifiziert mit Maximum Likelihood

Während das mit der Ehlers Fusion (Abb. 31, mitte) prozessierte Bild, eine deutlich verbesserte Struktur in der Klassifikation erkennen lässt, zeigt das Bild mit dem zusätzlichen Radarkanal (Abb. 31, rechts) kaum strukturelle Verbesserungen gegenüber dem Original (Abb. 31, links). Der Grund für die geringere Auflösung ist die räumliche Verbesserung, die bei der Ehlers Fusion in jedem Kanal enthalten ist, während bei der „Radar“ Szene, nur der Radar Kanal eine höhere Auflösung enthält und daher einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis hat. Wenn man das Gewicht in der Klassifikation etwas anders verteilen würde, wäre das Ergebnis vermutlich etwas besser, dass ist aber noch zu untersuchen.

Der Vergleich der Klassifikationsverfahren (Abb. 32) zeigt keine wesentlichen Veränderungen gegenüber der Klassifikation der SPOT 5 Szene. CART zeigt erneut die geringste und Maximum Likelihood die höchste Genauigkeit. Die parametrischen Verfahren zeigen dabei eine höhere Genauigkeit als die nichtparametrischen Verfahren. Es ist erneut der Kappa-Koeffizient dargestellt, gemittelt über alle Szenen, die mit dem entsprechenden Klassifikationsverfahren prozessiert wurden.

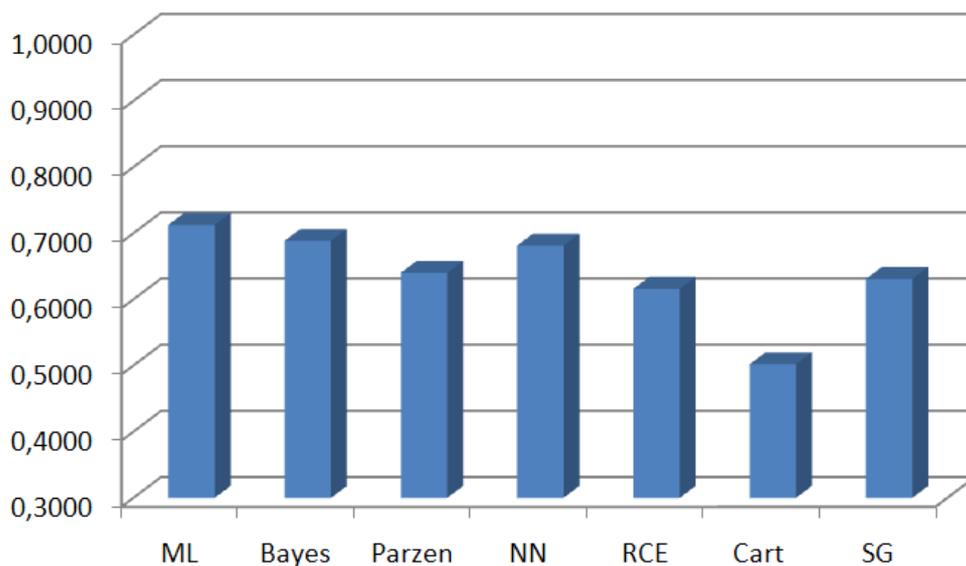


Abb. 32: Gemittelter Kappa Koeffizient der unterschiedlichen Klassifikationsverfahren für die Szene vom 24. April 2004

Vergleicht man die Segmentierungsverfahren mit der Klassifikation ohne Segmentierung (Abb. 33) erkennt man, dass es zu fast keiner verbesserten Genauigkeit bei den Segmentierungsverfahren kommt. Dies liegt vor allem daran, dass der „Salz und Pfeffer“ Effekt bei der 20 m Auflösung der SPOT 4 Szene nicht so

stark auftritt. Von den Segmentierungsverfahren zeigt das Verfahren der Kantendetektion wieder eindeutig die geringste Genauigkeit.

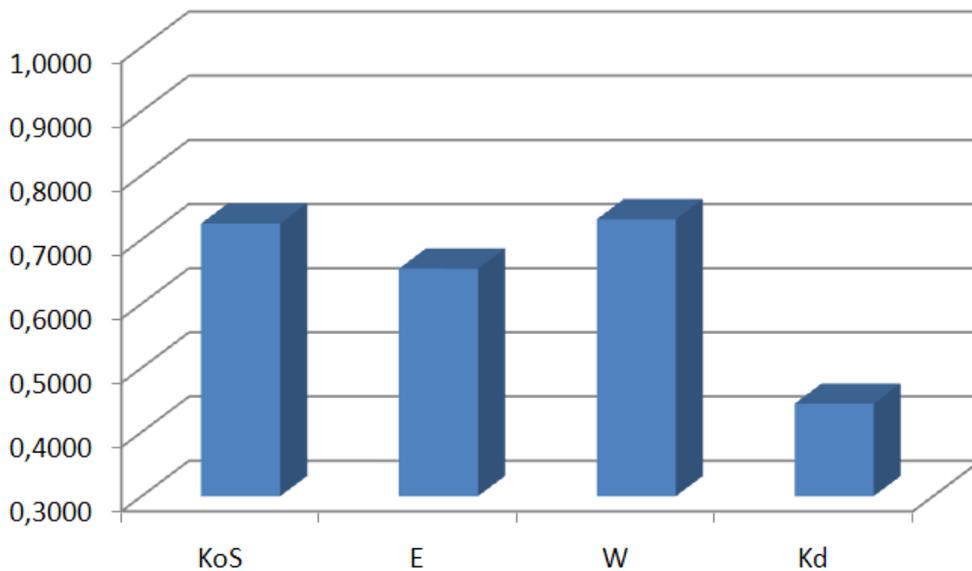


Abb. 33: Gemittelter Kappa Koeffizient der unterschiedlichen Segmentierungsverfahren für die Szene vom 24. April 2004 (KoS = Klassifikation ohne Segmentierung, E = Euklidisches Segmentierungsverfahren, W = Wasserscheiden Segmentierung und Kd = Segmentierung basierend auf Kantendetektion)

Vergleicht man die Klassifikationsgenauigkeit für die unterschiedlichen Szenen (Original, Ehlers, Radar) so zeigt sich (Abb. 34) erneut, dass die besten Ergebnisse vom fusionierten Bild erzeugt werden. Insbesondere bei der Segmentierung mit der Kantendetektion erzeugt dieses Bild die höchste Genauigkeit. Der Grund dafür ist die räumliche Auflösung, die in jedem Kanal verbessert wurde und daher auch bei der anschließenden Segmentierung stärker in das errechnete Grauwertbild einfließt.

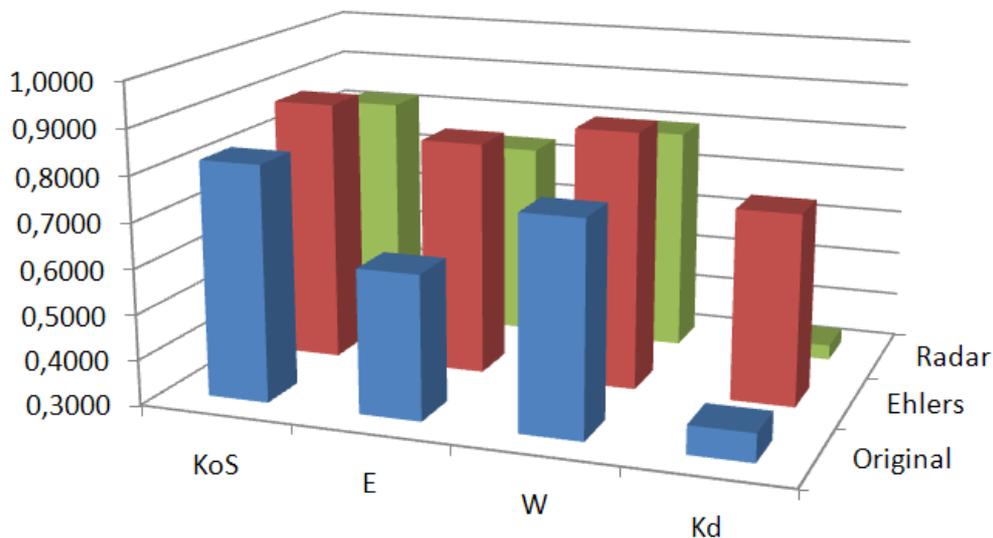


Abb. 34: Klassifikationsergebnis des Maximum Likelihood Verfahrens in Kombination mit unterschiedlichen Segmentierungsverfahren für die einzelnen Szenen (Original, Ehlers, Radar) vom 24. April 2004 (KoS = Klassifikation ohne Segmentierung, E = Euklidisches Segmentierungsverfahren, W = Wasserscheiden Segmentierung und Kd = Segmentierung basierend auf Kantendetektion).

Ergebnisse der Änderungsdetektion

Für die Änderungsdetektion wurden die zuvor klassifizierten Szenen verwendet. Da in der Szene vom 24. April 2004 zehn Klassen und in der Szene vom 10. April 2005 elf Klassen verwendet wurden, ergab sich eine Zahl von theoretisch 100 Klassen, die Veränderungen anzeigen. Wenn die Klassen sich nicht verändert haben, wurden sie der Klasse 0 zugeordnet. Damit ergaben sich insgesamt 101 Klassen. Aufgrund der hohen Anzahl von Klassen wurde bei dieser Analyse kein „Stratified Random Sampling“ eingesetzt, da nicht alle theoretischen Klassen auftraten und eine Analyse der tatsächlich auftretenden Klassen zu aufwendig war. Es wurde daher das „Systematic Sampling“ (systematische Verteilung) eingesetzt (Jensen 2005). Dieses Verfahren hat gegenüber der zufälligen Verteilung (Random Sampling) den Vorteil, das auch kleine Gebiete (Felder) berücksichtigt werden, die bei einer zufälligen Verteilung durch Zufall keinen Referenzpunkt erhalten.

Da nicht in allen Szenen die gleichen Veränderungsklassen auftraten, wurde die Genauigkeit der Veränderung nur in 2 Klassen gemessen:

- Klassen die keine Veränderungen anzeigen (Klasse 0)
- Klassen die eine korrekte Veränderung anzeigen

Klassen, die eine korrekte Veränderung anzeigen, sind Klassen deren Veränderung mit den Referenzpixeln übereinstimmt. Verändert sich z.B. die Klasse Wald in Wasser in der Referenz, aber im untersuchten Bild von Wald zu Acker, dann gehört dieses Pixel nicht zu der Klasse, die eine korrekte Veränderung anzeigt und wird als inkorrekt markiert. Dadurch war der Kappakoeffizient nicht mehr aussagekräftig und für die Präsentation in den folgenden Abbildungen wird ein Mittelwert aus Hersteller- und Nutzergenauigkeit dargestellt. Diese beiden Werte wichen zumeist nicht mehr als 1 % voneinander ab. Hätte man die Klasse, die Veränderungen anzeigt, so gewählt, dass alle Referenzpixel die Veränderungen zeigen, unabhängig welcher Art diese Veränderungen sind, so hätten alle klassifizierten Szenen einen Kappakoeffizienten von 0,99 gehabt, der wiederum nicht aussagekräftig gewesen wäre. Hingegen wäre die User und Producers Accuracy im Mittel um ca. 20 % gestiegen. Die folgende Abbildung Abb. 35 zeigt nun das Mittel der Hersteller- und Nutzergenauigkeit.

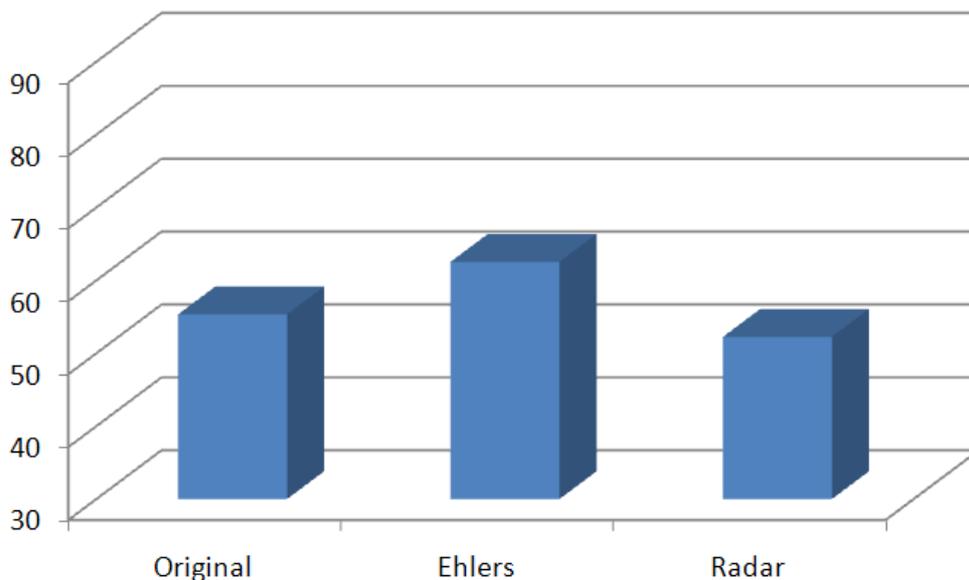


Abb. 35: Auswirkungen der Klassifikation für die unterschiedlichen Szenen auf die Veränderungsanalyse

Die Werte sind erneut gemittelt aus allen klassifizierten Szenen der originalen, der fusionierten und der „Radar“ Szene. Aufgrund der besseren Ergebnisse bei der Ehlers Fusion in der Klassifikation der Szene vom 24. April 2004 zeigt die Ehlers Fusion auch bei der Veränderungsanalyse die besten Ergebnisse. Aus dem gleichen Grund zeigen die Ergebnisse der „Radar“ Szene die niedrigsten Ergebnisse.

Die Genauigkeit der Klassifikationsverfahren (Abb. 36) ergibt sich somit ebenso aus den Klassifikationen der Szenen, die als Grundlage dienen. Die Veränderungsanalyse auf den mit Maximum Likelihood klassifizierten Daten zeigt die höchste Genauigkeit. Danach folgen, wie auch bei der Klassifikationsgenauigkeit

Bayes und k-Nearest-Neighbour. RCE zeigt zwar bei der Klassifikation der Szene vom 24. April 2004 eine geringere Genauigkeit als das Verfahren nach Parzen, da aber das Parzen Verfahren in der Szene vom 10. April 2005 erheblich niedrigere Werte zeigt, ist die RCE hier das bessere Verfahren. CART zeigt wiederum die geringste Genauigkeit von allen Verfahren.

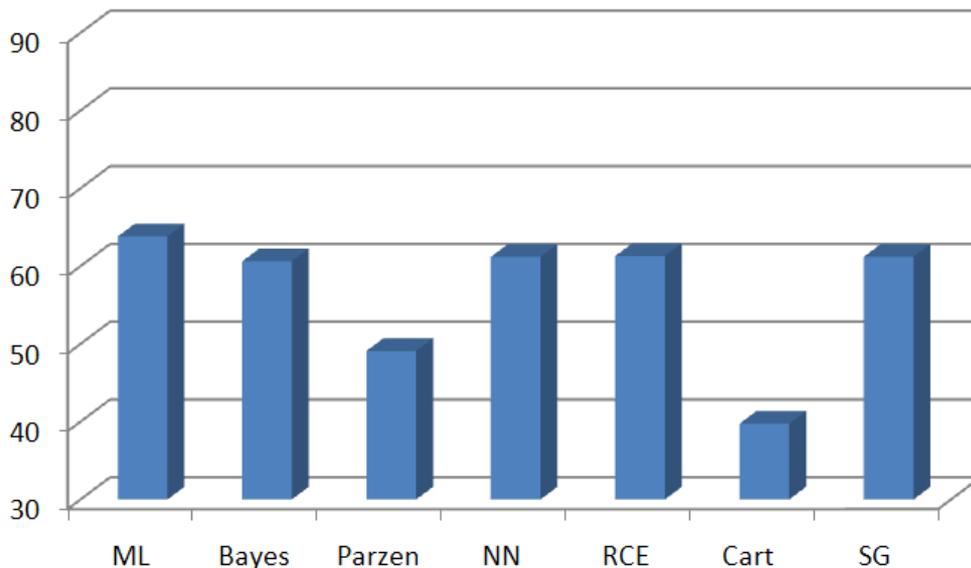


Abb. 36: Auswirkungen der unterschiedlichen Klassifikationsverfahren auf die Veränderungsanalyse

Die Auswirkungen von Segmentierungsverfahren auf die Klassifikation und damit auch auf die Veränderungsanalyse zeigt die Abb. 37. Das Euklidische Verfahren und die Watershed Segmentierung zeigen leicht bessere Ergebnisse als die Szenen, die keine Segmentierung verwenden. Beide Segmentierungsverfahren zeigen auch in einem der beiden klassifizierten Szenen ein besseres Ergebnis. Die Kantendetektion verschlechtert das Ergebnis dagegen sehr, die Genauigkeit liegt hier bei nur 47,7 %.

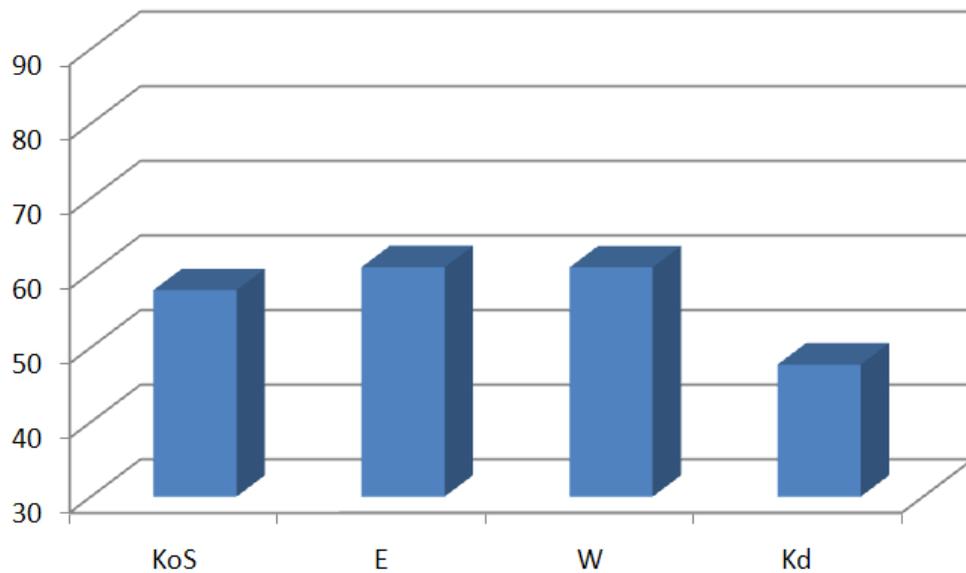


Abb. 37: Auswirkungen der unterschiedlichen Segmentierungsverfahren auf die Veränderungsanalyse (KoS = Klassifikation ohne Segmentierung, E = Euklidisches Segmentierungsverfahren, W = Wasserscheiden-Segmentierung und Kd = Segmentierung basierend auf Kantendetektion)

WP 800: Softwareentwicklung

Die Ehlers Fusion und die AWLP wurden mit Matlab umgesetzt, darüber hinaus wurden sämtliche in WP 500 beschriebenen Evaluationsmethoden in Matlab programmiert.

Für die Ehlers Fusion wurde zudem eine graphische Benutzeroberfläche (GUI) programmiert (Abb. 38). Die benutzerfreundliche Oberfläche soll es auch dem unerfahrenen Anwender ermöglichen die Fusion durchzuführen, nachdem er sich in der Anleitung informiert hat. Für die Erstellung der Software wurden im Wesentlichen eigene Entwicklungen eingesetzt.

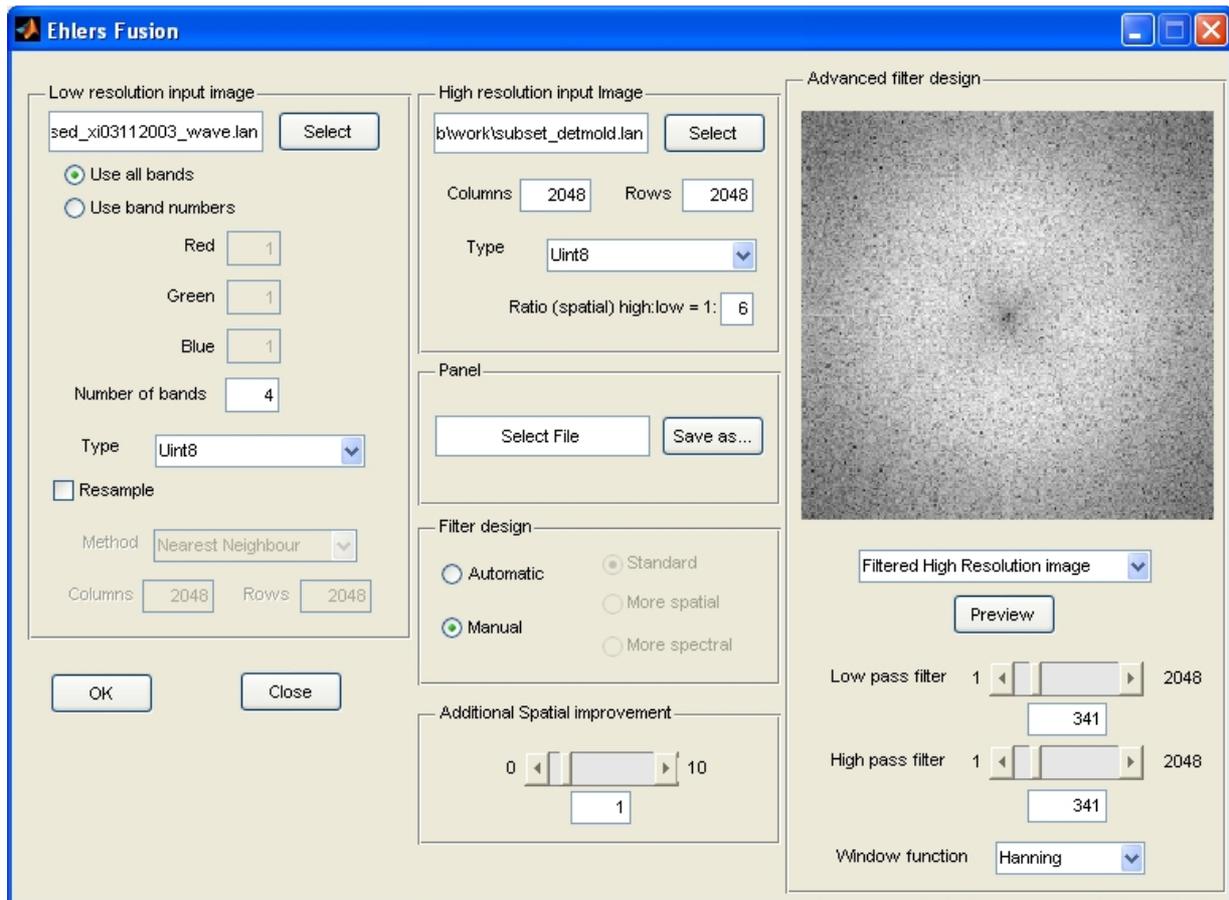


Abb. 38: Benutzeroberfläche der Ehlert Fusion

WP 900: Performanz-Analyse

Eine Performanz-Analyse wurde für das Softwarepaket ausgeführt. Mit unterschiedlichen Datensätzen wurde die Software unter Berücksichtigung folgender Punkte durchgeführt:

- Benutzerfreundlichkeit
- Leistungsanalyse

Das Produkt ist eine Standalone-Software und kann das Austauschformat GeoTiff lesen. Das Ergebnis kann dann in andere kommerzielle und offene Bildverarbeitungssysteme importiert werden.

2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die Kombination von hoch auflösenden Radardaten mit geringer aufgelösten multispektralen elektrooptischen Daten wird es möglich sein, unabhängig vom Wetter (Bewölkung) hochauflösende multispektrale Daten zu erzeugen. Die Ehlers Fusion ermöglicht es als einzige Bildfusionsmethode, Daten von unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten zu kombinieren, ohne die spektralen Eigenschaften der multispektralen Bilder nachhaltig zu verändern.

Durch die Wiederholrate, die hohe Auflösung und die flexiblen Aufnahmemöglichkeiten, unabhängig von Tag, Nacht oder Bewölkung, können TerraSAR-X Daten direkt nach Krisen und Katastrophen bereitgestellt werden. So kann das entwickelte Verfahren dazu eingesetzt werden, schnell Echtfarbener Bilder zu generieren. Die Praxis zeigt, dass gerade nach Krisen und speziell nach Naturkatastrophen optische Daten oft nicht verfügbar sind, entweder aufgrund der Bewölkung oder des Qualmes, der durch die Katastrophe ausgelöst wurde. Aufgrund der Wiederholrate von TerraSAR-X können schnell Bilder der betroffenen Region aufgenommen werden. Da die vor Ort agierenden Hilfskräfte in der Regel keine Erfahrung in der Interpretation von Radardaten besitzen, werden diese mit elektrooptischen multispektralen Archivdaten fusioniert. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung des TerraSAR-X Satelliten und der Verfügbarkeit von Archivdaten von elektrooptischen multispektral aufnehmenden Satelliten mit weltweiter Abdeckung ist es möglich, die TerraSAR-X Daten mit den aktuellen Informationen zu benutzen, um die multispektralen Daten zu schärfen und aktuelle Kanteninformationen zu integrieren. Dadurch wird den Hilfskräften vor Ort ermöglicht, die Lage besser einzuschätzen, um die Hilfe an den Ort zu senden, an dem diese am stärksten benötigt wird. So lassen sich z. B. auf dem fusionierten Bild die am stärksten zerstörten Objekte identifizieren.

Des Weiteren wird die Interpretation der Daten aufgrund der hohen Auflösung erleichtert, was besonders interessant für das Monitoring landwirtschaftlicher Flächen ist. So können Angaben der landwirtschaftlichen Betriebe besser und aktueller überprüft werden, was für die EU bei der Auszahlung von Subventionsgeldern eine große Rolle spielt.

Durch verbesserte Klassifikationsergebnisse aufgrund der fusionierten Daten sind weitere Einsatzmöglichkeiten denkbar wie etwa der Einsatz in der Flächennutzungsplanung, Raumplanung, Stadtplanung und der Umweltüberwachung. Speziell im Bereich der Umweltüberwachung sehen wir sehr gute Einsatzmöglichkeiten für die Fusion von TerraSAR-X- und elektrooptischen Multispektraldaten.

3. Voraussichtlicher Nutzen

Durch die erfolgreiche Fusion von hoch auflösenden Radardaten und optischen Daten unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte können nach Katastrophen wie Erdbeben oder Überflutung auch bei bewölktem Himmel aktuelle hoch auflösende Echtfarben-Bilder aus Archivdaten generiert und den Rettungskräften zur Verfügung gestellt werden. Diese können zur zügigen Planung von Maßnahmen (Evakuierung, Schadensabschätzung, Zugangsmöglichkeiten) genutzt werden. Erste Gespräche mit der Leitung des Verbundprojekts DESecure - satellitengestützte Kriseninformation für Deutschland fanden bereits statt.

Desweiteren können alle vorgestellten Anwendungen sofort nach Beendigung des Projektes in Angriff genommen werden, da im Laufe des Projektes alle Arbeitsschritte automatisiert wurden, angefangen bei der Fusion der Daten bis zur automatischen Klassifikation und der anschließenden Änderungsdetektion. Durch die Zusammenarbeit mit Partnern aus dem privaten und öffentlichen Bereich sehen wir sehr gute Möglichkeiten, die wirtschaftliche Bedeutung der Methodik abzuschätzen und potenzielle kommerzielle Nutzungen in Angriff zu nehmen. Die Tatsache, dass die Ehlers Fusion (als elektrooptisches Fusionsverfahren) bereits in einem kommerziellen Bildverarbeitungspaket verfügbar ist und erfolgreich verwendet wird, ist eine Grundlage für die kommerzielle Weiterverwertung einer ähnlich gelagerten Radarfusion. Des Weiteren wird die Interpretation der Daten aufgrund der hohen Auflösung, die durch die Ehlers Fusion erreicht wird, erleichtert, was besonders interessant für das Monitoring landwirtschaftlicher Flächen ist. Deshalb wird die Ehlers Fusion bei der Europäischen Kommission bereits im Projekt CwRS (Control with Remote Sensing) angewandt. Insbesondere der spanische Auftragnehmer Tragsatec setzt die Ehlers Fusion ein, um die Interpretation der Sommerszenen im Auftrag der EU zu erleichtern.

Die Ehlers Fusion hat darüber hinaus einen gravierenden Vorteil gegenüber anderen Konkurrenzlösungen, da sie das einzige Verfahren darstellt, das Daten von unterschiedlichsten Fernerkundungssensoren kombinieren kann, ohne Farbveränderungen zu verursachen.

Das IGF ist darüber hinaus Partner eines Transferzentrums (Steinbeis Transferzentrum für Angewandte Geoinformatik und Umweltforschung - STAGU), welches für eine kommerzielle Weiterverwertung ebenfalls verwendet werden soll. Das fertige Produkt soll auf der Internetseite des Transferzentrums (www.stagu.de) vermarktet werden.

4. Fortschritt im Wissensgebiet an anderen Stellen

Im Bereich Pansharpening mit Radardaten erschien ein weiterer Artikel, der auf der ISPRS Konferenz in Peking präsentiert wurde (Abdikan et al., 2008). Die getesteten Verfahren waren die PC, IHS, HPF und eine Wavelet Fusion, welche ebenfalls in unserer Untersuchung getestet wurden und im Vergleich mit der Ehlers Fusion eine geringere Farbwerterhaltung zeigten. Die Wavelet Fusion erzielte mit der HPF die besten Werte in dem Artikel von Abdikan et al. (2008). Die Wavelet Fusion zeigte aber in dem Artikel von Abdikan et al. (2008) kaum räumliche Verbesserungen und konnte visuell nicht überzeugen. Die statistischen Ergebnisse waren allerdings sehr gut, was daran lag, dass einzig die spektrale Farberhaltung bewertet wurde. Dies widerspricht allerdings dem Sinn der Fusion durch das Pansharpening eine räumliche Verbesserung zu erzielen und gleichzeitig die spektralen Werte der originalen multispektralen Daten zu erhalten. Die räumliche Verbesserung wurde in dem Artikel von der HPF Fusion erreicht, allerdings mit Farbveränderungen.

5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die Ergebnisse des Projektes wurden in Tagungsbänden veröffentlicht. Ein Artikel (Klonus et al. 2008) konnte bereits auf dem EARSeL Joint Workshop „Remote Sensing: New Challenges of High Resolution“ veröffentlicht werden. Er ist im Tagungsband erschienen und beschäftigt sich mit den Ergebnissen aus WP 300. Ein zweiter Artikel (Klonus 2008) wurde in den International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences veröffentlicht und behandelt im Wesentlichen die Ergebnisse der Arbeitspakete 300 – 600. Eine weitere Veröffentlichung zu diesem Thema wurde im DGPF Tagungsband in Jena publiziert (Klonus & Ehlers 2009a). Auch auf dem TerraSAR-X Science Meeting in Oberpfaffenhofen wurden die Ergebnisse unserer Untersuchungen bereits präsentiert (Klonus & Ehlers 2008).

Darüber hinaus sind die Ergebnisse von WP 700 auf dem Earsel Symposium 2009 auf Kreta präsentiert worden (Klonus & Ehlers 2009b). Ein weiterer Artikel, der alle wichtigen Ergebnisse des Projektes zusammenfasst wird demnächst im International Journal of Image and Data Fusion erscheinen.

Es folgt eine Auflistung der bisher veröffentlichten Publikationen:

Ehlers, M., S. Klonus, P. Åstrand und P. Rosso, 2010. Multi-Sensor Image Fusion for Pansharpening in Remote Sensing, *International Journal of Image and Data Fusion (in print)*

Klonus, S., 2008. Comparison of Pansharpening Algorithms for Combining Radar and Multispectral Data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVII, Part B6b, Beijing 2008.

Klonus, S. und M. Ehlers, 2009a, Vergleich von unterschiedlichen Verfahren zur Fusion von TerraSar-X und optischen Daten, In: *Tagungsband - Vorträge 29. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 24.-26. März, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Band 18.

Klonus, S. & M. Ehlers, 2009b, Additional Benefit of Image Fusion Method from combined High Resolution TerraSAR-X and Multispectral SPOT Data for Classification. *Proceedings of the 29th Earsel Symposium, Imagin(e)g Europe*, 15.-18. June 2009, Chania, Greece.

Klonus, S. & M. Ehlers, 2008, Pansharpening with TerraSAR-X and optical data. *Proceedings of the 3. TerraSAR-X Science Team Meeting*, 25. – 26. November 2008, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen

Klonus, S., P. Rosso & M. Ehlers, 2008, Image fusion of high resolution TerraSAR-X and multispectral electro-optical data for improved spatial resolution. Remote Sensing - New Challenges of High Resolution, *Proceedings of the EARSeL Joint Workshop*, Bochum, March 5 - 7, 2008.

Literatur

Abdikan S., F.B. Sanlia, F.B. Balcikb & C. Gokselb, 2008, Fusion of SAR images (PALSAR and RadarSAT-1) with multispectral SPOT image: A comparative analysis of resulting images, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVII, Part B7, Beijing 2008.

Bleau, A., & L. J. Leon, 2000, Watershed-based segmentation and region merging, *Computer Vision and Image Understanding*, 77, 3, 317-370.

Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen, & C. J. Stone, 1993, *Classification and regression trees*, Chapman & Hall, New York, NY.

Chavez, W.J., S.C. Sides, & J.A. Anderson, 1991, Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: TM & SPOT Pan, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(3), 295 – 303.

Chen, S., J. Luo, Z. Shen, & X. Hu, 2008, Difference-weight-based FFT-enhanced transform method for fusing multi-source remotely sensed images, *Information Fusion* (nicht veröffentlicht).

Chow, C. K., 1957, An optimum character recognition system using decision functions, *IRE Transactions*, 247–254.

Congalton, R.G. & K. Green, 1999, *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*, Boca Raton, FL: Lewis Publishers.

Crippen, R. E., 1987, A simple spatial filtering routine for the cosmetic removal of scan-line noise from LANDSAT TM P-Tape imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 55 (3), 327–331.

Devroye, L. P., 1981, On the inequality of Cover and Hart in nearest neighbor discrimination, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 3, 75–78.

Frost, V.S., J.A. Stiles, K.S. Shanmugan & J.C. Holtzman, 1982, A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4, 2, 157-166.

Gangkofner, U. & D. Holcomb, 2008, HP Resolution Merge. In: *ERDAS IMAGINE Help*, Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC.

Gonzales, R. C. & R. E. Woods, 2002, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2. Edition.

Jensen, J.R., 2005, *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*, Upper Saddle River, NY, Prentice Hall.

Hallada, W.A. & S. Cox, 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, pages 1023– 1032.

Klonus, S., 2008. Comparison of Pansharpening Algorithms for Combining Radar and Multispectral Data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVII, Part B6b, Beijing 2008.

189-194. Klonus, S. & M. Ehlers, 2007, Image fusion using the Ehlers spectral characteristics preserving algorithm, *GIScience and Remote Sensing*, 44, No. 2, 93–116.

Klonus, S. und M. Ehlers, 2009a, Vergleich von unterschiedlichen Verfahren zur Fusion von TerraSar-X und optischen Daten, In: *Tagungsband - Vorträge 29. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 24.-26. März, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Band 18.

Klonus, S. & M. Ehlers, 2009b, Additional Benefit of Image Fusion Method from combined High Resolution TerraSAR-X and Multispectral SPOT Data for Classification. *Proceedings of the 29th Earsel Symposium, Imagin(e)g Europe*, 15.-18. June 2009, Chania, Greece.

Klonus, S. & M. Ehlers, 2008, Pansharpening with TerraSAR-X and optical data. *Proceedings of the 3. TerraSAR-X Science Team Meeting*, 25. – 26. November 2008, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen

Klonus, S., P. Rosso & M. Ehlers, 2008, Image fusion of high resolution TerraSAR-X and multispectral electro-optical data for improved spatial resolution. *Remote Sensing - New Challenges of High Resolution, Proceedings of the EARSeL Joint Workshop*, Bochum, March 5 - 7, 2008.

Kraaijveld, M. A., 1998, An experimental comparison of non-parametric classifiers for time-constrained classification tasks, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Pattern Recognition*, 1, 428-435.

Laben, C.A., V. Bernard, & W. Brower, 2000, Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening, US Patent 6,011,875.

Lee J.S., 1981, Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture Radar images, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 17, 24-32.

Lee J.S., 1983, Digital image smoothing and the sigma filter. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 24, 255–269.

Leica-Geosystems Geospatial Imaging, 2005, *IMAGINE Radar Mapping Suite, User's Guide*, Atlanta.

Li, P. & X. Xiao, 2006, Multispectral image segmentation by a multichannel watershed-based approach, *International Journal of Remote Sensing*, 28, Issue 19-20, 4429–4452.

Lopes A., E. Nezry, R. Touzi & H. Laur, 1990, Maximum a posteriori speckle filtering and first order textural models in SAR images. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, College Park, Maryland, May 1990, 3:2409-2412.

Mastriani M, 2006, New wavelet-based superresolution algorithm for speckle reduction in SAR images, *International Journal of Computer Science*, 1(4): 291 – 298.

Otazu, X., M. González-Audícana, O. Fors, & J. Núñez, 2005, Introduction of sensor spectral response into image fusion methods, application to wavelet-based methods, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, no. 10.

Parzen, E., 1962, On estimation of a probability density function and mode, *Annals of Mathematical Statistics*, 33, 1065–1076.

Pratt W.K., 2007. *Digital image processing*, 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Priddy, K. L. & E. K. Keller, 2005, *Artificial Neural Networks – An Introduction*, Spie Press, Bellingham, Washington, USA.

Reilly, D. L. & L. N. Cooper, 1995, An overview of neural networks: Early models to real world systems. In S. F. Zornetzer, J. L. Davis, C. Lau, & T. McKenna, editors, *An Introduction to Neural and Electronic Networks*, Academic Press, New York, NY, 2nd edition, 1995, 229–250.

Sattar, F., L. Florey, G. Salomonsson, B. Löfström, 1997, Image enhancement based on a nonlinear multiscale method, *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(6), 888-895.

Saroglu, E., F. Bektas, N. Musaoglu, & C. Goksel, 2004, Fusion of multisensor remote sensing data: assessing the quality of resulting images, *Proceedings of XXth ISPRS Congress*, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey, Commission IV, WG IV/7, 575–579.

Siddiqui, Y., 2003, The modified IHS method for fusing satellite imagery, *ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings*, Anchorage, Alaska.

Vrabel, J., P. Doraiswamy, J. McMurtrey, & A. Stern, 2002a, Demonstration of the accuracy of improved resolution hyperspectral imagery, *SPIE Symposium Proceedings*, 4725, 556–567.

Vrabel, J., P. Doraiswamy, & A. Stern, 2002b, Application of hyperspectral imagery resolution improvement for site-specific farming, *ASPRS 2002 Conference Proceedings*.

Wald, L. & T. Ranchin, 2002, Liu smoothing filter-based intensity modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details', *International Journal of Remote Sensing*, 23, 3, 593–597.

Wang, Z. & A. C. Bovik, 2002, A universal image quality index, *IEEE Signal Processing Letters*, 9, 3, 81–84.

Wang, Z., A. C. Bovik, H. R. Sheikh, & E. P. Simoncelli, 2004, Image quality assessment: from error visibility to structural similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*, 13, 4, 600–612.

Wiemker, R., B. Prinz, G. Meister, R. Franck, & H. Spitzer, 1998, Accuracy assessment of vegetation monitoring with high spatial resolution satellite imagery, *Proceedings of the ISPRS Commission VII Symposium, ECO BP'98, WG 3, September 1-4, 1998, Budapest, International Symposium on Resource and Environmental Monitoring - Local, Regional, Global*, 285–292.

Zhang, Y., 2004, *System and method for image fusion*, United States Patent 20040141659.

Zhou, J., D.L. Civco, & J.A. Silander, 1998, A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data, *International Journal of Remote Sensing*, 19, no. 4, 743–757.

Anhang A

ID	Name	2007					2008							2009												
		Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	
WP 100	Projekt Koordination	■																								
WP 200	Datenauswahl und Vorverarbeitung	■																								
	Projektmeilenstein 1			◆																						
WP 300	Weiterentwicklung der Ehlers Fusion	■					■																			
	Projektmeilenstein 2													◆												
WP 400	Untersuchungen zur Datenfusion	■			■																					
WP 500	Entwicklung der Evaluationsmethoden				■																					
	Projektmeilenstein 3																			◆						
WP 600	Visuelle und quantitativ-statistische Evaluierung													■												
WP 700	Segmentierung, Klassifizierung und Änderungsdetektio													■												
WP 800	Softwareentwicklung				■																					
WP 900	Performanz-Analyse													■												
	Projektmeilenstein 4																									◆