

EINSATZ UND FUSION VON MULTISENSORALEN SATELLITENDATEN ZUR KARTIERUNG DER WALDTYPEN

Ali A. Darvishsefat

University of Tehran, Faculty of Natural Resources, Karaj, IRAN
Phone: +41 261 222045 / Fax: +41 21 9007988

Commission VII, Working Group 3

KEY WORDS: Fusion, Forest-Classification, Landsat, SPOT, Multi-Sensor, Potential

KURZFASSUNG:

Das Ziel besteht darin, in einem topographisch anspruchsvollen Gebiet in der Zentralschweiz vertiefte Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Grenzen der Erfassung von Waldtypen mit Hilfe von Satellitendaten (TM und SPOT) zu gewinnen.

Die fast gleichzeitig aufgenommenen Satellitenbilddaten wurden zuerst einer Qualitätsanalyse unterzogen. Bei TM-Daten wurden mehrere Arten von geometrischen Fehlern festgestellt und zum Teil korrigiert.

Bei der Geocodierung der Satellitenbilddaten wurde die höhenbedingte Lageversetzung der Bildelemente durch das Einbeziehen des Höhenmodells mittels der Passpunkt-Methode korrigiert. Die Standardfehler (RMS) lagen dabei deutlich unter einem halben Pixel.

Zur Optimierung der Informationsextraktion wurden in die multispektralen TM- und XS-Daten der hochauflösende SPOT Pan-Kanal fusioniert und daraus neue Hybridkanäle hergestellt.

Die Unterscheidung der Waldfläche von der Restfläche erfolgte mit einem schrittweisen binär-hierarchischen Verfahren unter Einbezug des digitalen Höhenmodells. Die Bestandskartierung nach der zusammengefassten Klasse "Jungwuchs/Dickung/Blössen" und drei Mischungsklassen wurde mit dem binär-hierarchischen Verfahren und Maximum-Likelihood-Klassifikator durchgeführt.

Zum Potentialvergleich der einzelnen Sensoren, sowie die Eignung der mit Pan integrierten und synthetische Kanäle wurden sämtliche Kanäle in den fünf Datenblöcken (Sensorkombinationen) verwendet.

1. Einleitung

Die zeit- und kostenintensiven Wald- und Waldbestandskartierung mit konventionellen Luftbildern gaben schon immer Anlass, effizientere Methoden insbesondere für grosse Gebiete zu suchen. Seit einigen Jahren bieten sich digitale Satellitenbilddaten mit ihren grossen, flächendeckenden und auch regelmässig wiederkehrenden Aufnahmen für die Kartierung und Überwachung der Waldfläche an.

Es befinden sich mehrere Untersuchungen hinsichtlich der Eignung von Landsat TM- und SPOT HRV-Daten für die forstliche Kartierung (Itten, et al., 1992; Bodmer, 1993; Koch, et al., 1993). Weitaus weniger untersucht ist die Eignung von ihren multisensorelen Einsatz mit gleichzeitigen Aufnahmen für die genannten Zwecke. Solcher multisensoraler Einsatz bittet nicht nur gemeinsame Verwendung der Landsat TM- und SPOT-Daten, sondern auch die Fusion der multispektralen TM- und XS-Kanäle mit hochauflösendem SPOT Pan-Kanal, welche für sein räumlichen Informationsgehalt bekannt ist.

Wegen einer eher spärlichen Anzahl von Untersuchungen zum Einsatz und zur Fusion von multisensorelen Satellitendaten für die forstlichen Fragestellungen wurde deshalb im Rahmen meiner Dissertation das Informationspotential der genannten Sensoren und Eignung der Fusionsverfahren für die Wald- und Waldbestandskartierung in einer stark gemischten Waldfläche untersucht.

2. Datengrundlagen

2.1. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Zentralschweiz im Kanton Zug. Die Fläche des Untersuchungsgebietes beträgt 3744 Hektaren und setzt sich aus 17% Gewässer, 50% landwirtschaftliche Fläche und bebaute Gebiete sowie 33% Wald zusammen. Die Waldfläche reicht vom Seeufer (420 m) bis auf 1039 m.ü.M. und wird als gleichförmiger Hochwald bezeichnet. Fichte und Buche sind die vorherrschenden Baumarten. Weiter treten Tanne, Ahorn und Eiche auf. Der Waldgürtel kann in zwei topographisch unterschiedliche Gebiete untergliedert werden. Ein Abhang mit allgemeiner Exposition West und eine Hochebene, die mit Feuchtgebieten durchsetzt ist. Während auf dem Westhang die Buche dominiert und reine Laubbestände bildet, herrscht auf der Hochebene die Fichte vor. Die Topographie des Testgebietes erfordert reliefsspezifische radiometrische und geometrische Korrekturen der verwendeten Satellitenbilddaten.

2.2. Satellitendaten

Im Rahmen der Untersuchungen zur Erfassung der Landnutzung der Schweiz mit Hilfe von Satellitendaten am Geographischen Institut der Universität Zürich wurden fast gleichzeitig aufgenommene Landsat TM- und SPOT-Daten beschafft. Diese Datensätze standen für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung. Die TM- und SPOT-Daten sind im Juni respektive Juli 1991 im Abstand von nur 11 Tagen aufgenommen worden. Bei den beiden Aufnahmezeitpunkten herrschten gute Wetterverhältnisse über dem Aufnahmegebiet. Die TM-Daten sind systemkorrigiert und SPOT-Daten in Stufe 1b prozessiert. Bei den SPOT-Daten handelt es sich um eine simultane Aufnahme in beiden Modi (XS und Pan) mit einem Blickwinkel von 5°, respektive 4.6°.

2.2. Digitales Höhenmodell

Dieser Untersuchung stand ein DHM mit einer Maschenweite von 25 m in X- und Y-Achse (DHM25) zur Verfügung. Dessen Höhendaten (Z-Achse) liegen in einer Auflösung von 1 dm vor. Das DHM25 wurde vom Bundesamt für Landestopographie basierend auf den

gescannten Höhenkurven der Landeskarten 1:25'000 mit einer Äquidistanz von 10 m hergestellt. Die Höheninformation wurde auf die Rasterweite von 10x10, 20x20 und 30x30.6 m bilinear interpoliert und damit an die Grösse der Pan, XS, und TM-Bildelemente angepasst. Das DHM kam in den folgenden Fällen zum Einsatz:

- Entzerrung der reliefbedingten Lageversetzung
- Radiometrische Korrekturen
- Als Zusatzinformation zur Optimierung der Klassifikation

2.3. 'Groundtruth'

Um die im Satellitenbild klassierte Waldfläche und Waldbestände Pixel-zu-Pixel verifizieren zu können, wird eine digitale Groundtruth benötigt. Hierfür stand eine aktuelle Bestandeskarte (im ARC/Info) zur Verfügung, welche basierend auf einem neuen Verfahren mit Hilfe der Infrarot-Farbluftbildern (von 1991) im Massstab 1:9'000 hergestellt wurde. Bei der Interpretation der Luftbilder wurden für alle abgegrenzten Bestände drei Kriterien, nämlich Entwicklungsstufe, Mischungs- und Schlussgrad, angesprochen. Als Waldmaske kann wiederum die Bestandeskarte verwendet werden. Da sie aber nicht die gesamte Waldfläche im Untersuchungsgebiet abdeckt, wurde sie mit dem Grünauszug (Waldfläche) der Landestopographie im ARC/Info ergänzt. Weiter wurden die von der Landestopographie in Waldgebieten aufgezeichneten Strassen in der übernommenen Waldfläche zu Wald modifiziert (wie es bei der Bestandeskarte bereits der Fall ist).

3. Datenvorverarbeitung

Die Satellitenbilddaten wurden zuerst einer Qualitätsanalyse unterzogen. Die Überprüfung der TM-Daten ergab, dass die systemkorrigierte Szene mit den mehreren inneren geometrischen Bildfehlern, wie verdoppelten Zeilen und Kolonnen und Zeilensegmentversatz (Nicht-Übereinstimmung zwischen zwei benachbarten 'sweeps') behaftet ist. Die verdoppelten Zeilen und Kolonnen sind während der Vorverarbeitung bei ESA/ESRIN als verdoppelte Bildelemente hinzugefügt worden und liefern daher keine ortsbezogene Information. Es beträgt bei der verwendeten Szene 3.4% der TM-Pixel (Darvishsefat, 1994). Der sensorbedingte radiometrische Fehler 'striping' konnte zum Teil korrigiert werden. Hingegen traten bei SPOT-Daten keine inneren geometrischen Fehler auf. Dafür konnte eine ungenügende relative Kalibrierung ('striping' in Kolonnenrichtung) nur anhand von Texturparametern nachgewiesen werden (Ehrler, 1993).

Ferner wurde die reliefspezifische unterschiedliche Beleuchtung der Objekte mit Hilfe eines hochauflösenden digitalen Geländemodells korrigiert. Bei der Geocodierung der Satellitenbilddaten wurde ein Polynom 1. Grades verwendet und die höhenbedingte Lageversetzung der Bildelemente durch das Einbeziehen des Höhenmodells korrigiert. Die Standardfehler (RMS) lagen dabei deutlich unter einem halben Pixel. TM- und XS-Bilddaten wurden auf eine einheitliche räumliche Auflösung (10 m) umgerechnet. Die Grauwertzuordnung erfolgte mit der 'nearest-neighbour'-Methode.

Als bidabhängige Zusatzkanäle wurden Texturkanäle, nämlich Standardabweichung und absolute Differenz (Cohen und Spies, 1992) und vegetationsrelevante 'Ratios' (Koch et al., 1993) extrahiert.

4. Fusion

Ziel bei der Fusion der multisensorelen Daten ist, die Vorzüge der jeweiligen Sensoren in einem neuen Produkt zusammenzufassen, z.B. das hohe räumliche Auflösungsvermögen von einem und die feine spektrale Auflösung des anderen. Das erwähnte Ziel erfordert die Fusion komplementärer Kanäle. Für den Benutzer von Fernerkundungsdaten ist es von Vorteil, die Information verschiedener Sensoren und Kanäle in einen kleineren Merkmalsraum zusammenzuziehen, was den Verarbeitungsaufwand reduziert (Chavez et al., 1988). Landsat-TM und SPOT-XS liefern Daten, die im Vergleich mit Pan eine feinere spektrale Auflösung besitzen. Dafür weisen sie aber ein geringeres räumliches Auflösungsvermögen auf. Daher drängt es sich auf, künstlich ein neues Produkt herzustellen, welches sowohl die spektrale Information von TM bzw. von XS als auch die hohe räumliche Erkennbarkeit von Pan nachweist.

Zur Fusion der multispektralen Sensoren mit Pan sind bisher verschiedene 'merging'-Methoden entwickelt worden. Viele davon sind nur für Display. Das Ziel aber bei der vorliegenden Arbeit ist, neue Hybridkanäle unter besonderer Berücksichtigung der Radiometrie zur Optimierung der Extraktion von forstlicher Information zu erzeugen. Folgende Fusionsverfahren wurden implementiert und analysiert:

- Farbraumtransformation (Pellemans et al., 1993)
- Hauptkomponentenverfahren (Chavez et al., 1991)
- Price's Verfahren, 3 Varianten (Munehika, 1990)
- Pellemans' radiometrisches Verfahren (Pellemans et al., 1993)
- Pellemans' statistisches Verfahren (Pellemans et al., 1993)
- Warnicks' radiometrisches Verfahren (Munehika, 1990)

Die erzeugten Hybridkanäle wurden visuell zur Erkennung von verfahrensbedingten Artefakten betrachtet. Ferner wurde ein Vergleich zwischen den Original- und Hybridkanälen bezüglich dem Schwerpunkt der Integration – Beibehalten der radiometrischen Information der multispektralen Kanäle – durchgeführt. Diese geschah durch Berechnung des sogenannten radiometrischen 'RMS Error' ('root mean square'). Der radiometrische 'RMS Error' gibt Auskunft über die DN-Änderungen zwischen den Hybrid- und Originalkanälen.

Das Warnicks' radiometrische Verfahren hat die besten Resultate geliefert. Dieses Verfahren basiert auf der *spektralen Empfindlichkeit*. Jeder Kanal eines Sensors ist in einer bestimmten Wellenlänge empfindlich. Einzelne Kanäle verschiedener Sensoren können einen gemeinsamen Empfindlichkeitsbereich besitzen. Ein grosser Anteil an gemeinsamer Bandbreite und die Übereinstimmung der relativen Empfindlichkeiten, führt zu einer hohen Korrelation. Basierend auf dieser Tatsache haben Warnick et al. dieses Verfahren entwickelt, welches von Munehika (1990) verwendet wurde. Die Integration erfolgt folgendermassen:

$$HYB_i = M_i \times \frac{PAN}{SYN_{M-PAN}} \quad (1)$$

SYN_{M-PAN} ist ein synthetischer Kanal, welcher die spektrale Eigenschaft von Pan vertreten kann und für alle zu kombinierenden Kanäle eines Sensors gilt. Zum Erstellen dieses synthetischen Kanals werden alle Kanäle nach ihrem Überlappungsgrad mit PAN gewichtet und aufsummiert. Der Gewichtungsfaktor (W'_i) ist definiert als

das Verhältnis zwischen Überlappungsfläche der Empfindlichkeitskurven der multispektralen Kanäle (M_i) mit Pan und der Totalfläche unter der Empfindlichkeitskurve von M_i . Da der Gewichtungsfaktor für mehrere Kanäle bestimmt wird, kann er normalisiert werden:

$$W_i = \frac{W'_i}{\sum_{i=1}^n W'_i} \quad (2)$$

Nun kann der synthetische Kanal folgendermassen berechnet werden:

$$SYN_{M-PAN} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot M_i \quad (3)$$

Bei der vorliegenden Arbeit wurde das Warnicks' Verfahren für die TM-Kanäle 1, 2, 3 und 4 sowie XS-Kanäle verwendet.

5. Klassifikation

Die Trennung des Waldes gegenüber den restlichen Flächen bildet den ersten Schritt der digitalen Bestandeskartierung. Es werden mit Hilfe von Landsat TM oft die Kanäle TM2 und TM5 in einem hierarchischen Verfahren angewendet. Bei SPOT kommen entsprechend die Kanäle XS1 und XS3 zum Einsatz. Bei der vorliegenden Arbeit wurde zuerst die Wasserfläche und anschliessend die Waldfläche von der Restfläche abgegrenzt. Dabei wurde die aus dem DHM25 abgeleitete Hangneigung als Zusatzinformation in den Klassifikationsprozess miteinbezogen, um Fehlklassierungen durch Wolkenschatten auf dem See zu vermeiden. Die klassierte Waldfläche wurde mit dem Wald-'groundtruth' Pixel-zu-Pixel verglichen. Die Gesamtgenauigkeit ('overall accuracy') der Klassifikation von Wald/Nichtwald beträgt 93.83%.

Die benötigten Trainingsgebiete für die Bestandeskartierung wurde anhand der Bestandeskarte ('groundtruth'), welche in einem GIS (ARC/Info) eingebunden war, definiert. Dadurch konnten nach beliebigen Kriterien Polygone für die Musterklasse ausgeschieden werden.

Aus den angeführten Signaturanalysen kann man schliessen, dass in diesem Untersuchungsgebiet eine Bestandesklassifikation nach Entwicklungsstufen (Alter) kaum möglich ist. Hingegen können die Mischungsklassen als geeignete Klassen für die Bestandeskartierung betrachtet werden.

Die Unterscheidung der Waldbestände wurde mit zwei verschiedenen Methoden, dem hierarchischen und dem 'Maximum-Likelihood'-Verfahren (ML) durchgeführt. Anschliessend wurden die Klassifikationsresultate mit einem Modusfilter (mit 5 x 5 Fenster) nachbearbeitet, um isolierte Pixel zu eliminieren.

Aus dem Pixel-zu-Pixel-Vergleich mit dem 'groundtruth' ergibt sich die Klassifikationsfehlermatrix. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Klassifikation mit dem ML-Verfahren. Dabei sind neben der 'overall accuracy' und dem Kappakoeffizienten als Gesamtgenauigkeit, die 'user'- und 'producer-accuracy' jeder Klasse angeführt.

Das Resultat der Klassifikation mit dem ML-Klassifikator ergab eine höhere Gesamtgenauigkeit als das mit dem hierarchischen Verfahren (um 5.3% overall accuracy und 3.7% Kappa.). Aus dem visuellen Vergleich des Klassifikationsresultates mit dem 'groundtruth' (siehe Abb. 1) wird ersichtlich, dass der rechte Teil des Untersuchungsgebietes sehr gut klassifiziert worden ist. In diesem Teilgebiet treten wegen der höheren Lage wenig Bestände mit vorwiegend Laubbaum und überhaupt kein reiner Laubwald auf. Ausserdem weist dessen flaches Gelände eine unterschiedliche Beleuchtung zum restlichen Untersuchungsgebiet (Westhang) auf.

Klasse	J/D/B	Reiner Nadelwald	Reiner Laubwald	Mischwald
'user accuracy'	59.0%	73.9%	60.3%	65.1%
'producer accuracy'	50.2%	57.0%	32.2%	83.9%
'overall accuracy' = 65.4%		Kappakoeffizient = 39.7%		

Tab. 1: Genauigkeit der Waldbestandesklassifikation nach Mischungsgraden mit dem 'Maximum-Likelihood'-Klassifikator

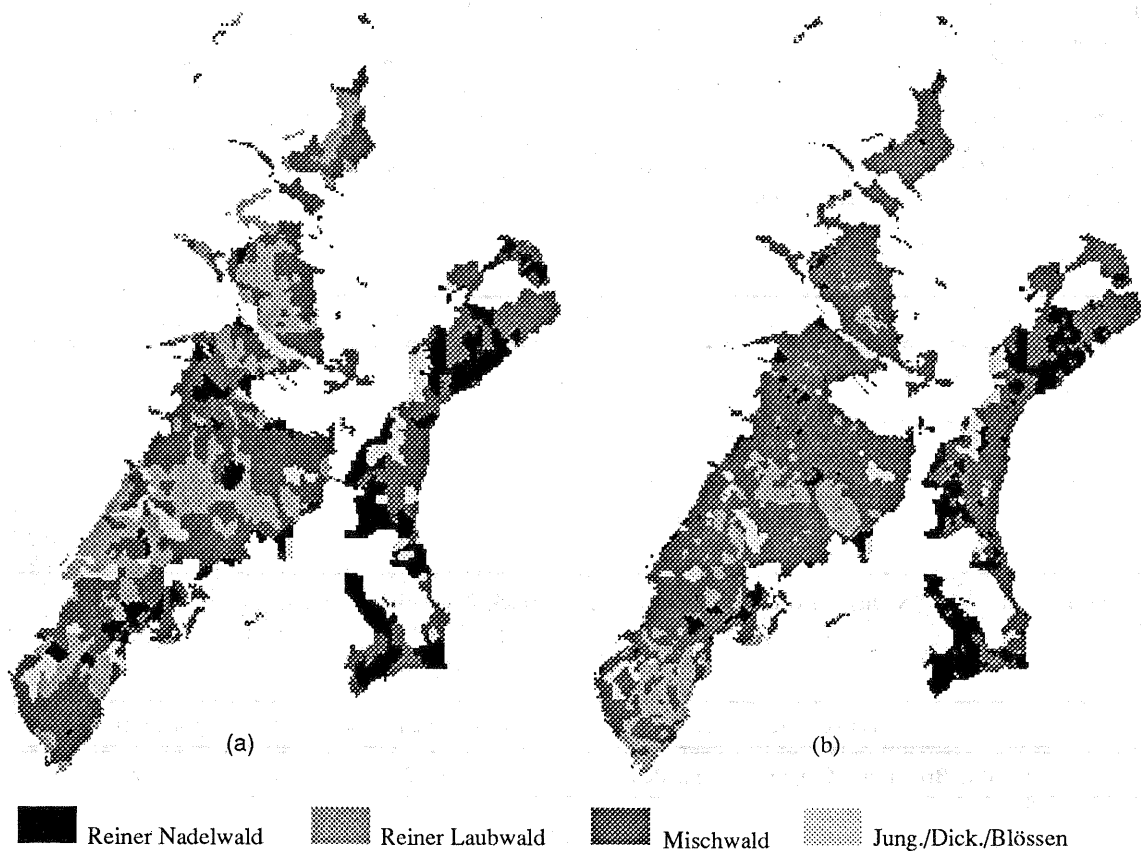


Abb. 1: 'Groundtruth' (a) und Bestandesklassifikationsergebnis klassiert mit dem 'Maximum-Likelihood'-Verfahren (b)

6. Informationspotential von TM-, SPOT- und deren Hybriddaten

Es ist von grossem Interesse zu wissen, welche operationellen Satellitesaufnahmesysteme sich für forstliche Fragestellungen eignen (Sader, 1989). In mehreren Untersuchungen wurde das Informationspotential von einzelnen Fernerkundungssystemen erforscht. Aber selten wurde SPOT und TM gemeinsam verwendet, bzw. miteinander verglichen.

Mit dem Ziel, das Potential der einzelnen verwendeten Sensoren, sowie die Eignung der mit Pan integrierten Kanäle in Bezug auf Waldkartierungen beurteilen zu können, wurden sämtliche TM- und SPOT-Originalkanäle, die mit Pan integrierten Kanäle, ihre relevanten synthetischen Kanäle, sowie Texturkanäle in den fünf Datenblöcken (Sensorkombinationen) wie folgt verwendet:

TM:	TM-Originalkanäle sowie daraus hergeleitete synthetische Kanäle
TM-Pan:	TM-Datenblock, Pan, Pan-Texturkanäle und mit Pan integrierte TM-Kanäle
XS:	XS-Originalkanäle sowie daraus hergeleitete synthetische und Texturkanäle
XS-Pan:	XS-Datenblock, Pan, Pan-Texturkanäle und mit Pan integrierte XS-Kanäle
TM-XS-Pan:	Alle

Die Wald/Nichtwald- und Bestandesklassifikationen wurden getrennt in den erwähnten Datenblöcken mit identischer Methode durchgeführt. Die Ergebnisse (siehe Tab. 2 und 3) werden in den nachstehenden Abschnitten diskutiert.

- Potentialvergleich anhand der Wald/Nichtwald-Klassifikation (W/NW): Von der Tab. 2 geht hervor, dass die W/NW-Klassifikationsresultate in allen fünf Datenblöcken ungefähr gleich gut sind. Deren Genauigkeiten unterscheiden sich nur minim und sind nicht signifikant verschieden. Ausserdem wird klar, dass sich die Originalkanäle dafür am besten eignen. Die Verarbeitungsschritte zur Herstellung der anderen Produkte (synthetische und 'merging'-Kanäle) erübrigen sich somit für eine W/NW-Klassifikation.
- Potentialvergleich anhand der Bestandesklassifikation: Von der Tab. 3 ist zu entnehmen, dass die XS-Daten 3.3% (Kappakoeffizient) bessere Ergebnisse als die TM-Daten liefern, obwohl TM über drei zusätzliche spektrale Kanäle verfügt. Von den drei zusätzlichen TM-Kanälen ist der Kanal TM1 (blau) allerdings oft so stark durch die Atmosphäre beeinflusst, dass er in der Praxis kaum verwendet werden kann. Die zwei übrigen Kanäle, nämlich TM 5 und TM7, liegen im mittleren Infrarot. Sie korrelieren in der Regel derart stark, dass bei einer Klassifikation häufig nur einer von ihnen in Einsatz kommt. Ferner wird durch die Ergebnisse in der Tab. 3 deutlich, dass bei dieser Arbeit das Miteinbeziehen von Pan keine Verbesserung der TM-Resultate bei der Bestandesklassifikation gebracht hat. Hingegen führt die gemeinsame Verwendung von XS- und Pan-Daten zu einer leichten Kartierungsverbesserung um 1.2%. Ausserdem lässt das Miteinbeziehen der TM-Kanäle in die SPOT-Daten wiederum nur eine minime Verbesserung (1%) zu. Auffallend ist der Nutzen der

synthetischen Kanäle, vor allem der 'Ratios' und der Texturkanäle bei der Klassifikation. Die Berechnung der 'merging'-Kanäle erübrigt sich für die Klassifikation hingegen, da sie bei der Bestandeskartierung zu keinen Verbesserungen geführt haben. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die Wald/Nichtwald- und Bestandeskartierungsergebnisse in den besprochenen Datenblöcken sehr minim und nicht

signifikant unterscheiden (vgl. Abb. 2). Die XS-Daten liefern leicht bessere Ergebnisse als die TM-Daten. Das Miteinbeziehen von Pan ergibt weder bei den XS-Daten noch bei den TM-Daten eine wesentliche Kartierungsverbesserung (höchstens 3% bei TM für die W/NW-Klassifikation). Ferner führen die in der Literatur erwähnten vielversprechenden Fusionsverfahren nur zu einem geringen Informationsgewinn.

Datenblock	Verwendete Kanäle	Gesamtgenauigkeit [%]	Kappakoeffizient [%]
XS	Hang., XS3, XS1	92.5	82.5
XS-Pan	Hang., XS3, XS1, Pan	93.2	82.8
TM	Hang., TM5, TM2	92.5	82.8
TM-Pan	Hang., TM5, TM2, Pan	93.7	85.8
TM-XS-Pan	"	"	"

Tab. 2: Ergebnisse der Wald/Nichtwald-Klassifikation nach Datenblock (Sensorkombination)

Datenblock	Verwendete Kanäle	Gesamtgenauigkeit	Kappakoeffizient
TM	TM4, Bright_tm, CD_tm, SS_tm, PC2	63.2%	34.2%
TM-Pan	"	"	"
XS	XS2, CD_xs, SS_xs, PC1, STD_xs1	63.9%	37.5%
XS-Pan	XS3, CD_xs, SDr_xs, Bright_xs, Pan	65.4%	38.7%
TM-XS-Pan	TM4, Bright_tm, SDr_xs, Pan, ABD_pan	65.4%	39.7%

Tab. 3: Die Ergebnisse der Bestandesklassifikation (mit dem ML-Verfahren) nach Datenblock (Sensorkombination). (PC = 'principal component', Bright = Brightness, CD = Complex Division [NIR/ (Rot+Grün)], SDr = Simple Division (NIR/Rot), SS = Simple Subtraction (NIR-Rot), ABD = Textur (absolute Differenz), SDT = Textur (Standardabweichung), tm = TM, xs = SPOT-XS)

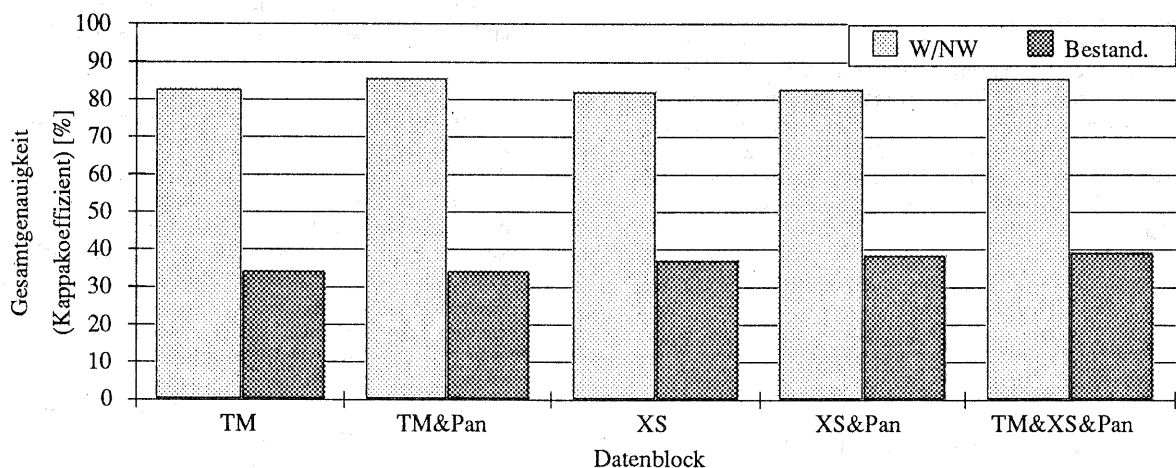


Abb. 2: Vergleich der Ergebnisse der Wald/Nichtwald- und Bestandesklassifikation in den fünf Datenblöcken

7. Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zu den SPOT-Daten verfügen die TM-Daten über eine instabilere innere Geometrie. Die TM- und SPOT-Daten lassen sich mit Polynomen 1. Grades und anhand sorgfältig bestimmter Passpunkte sowie dem Einbeziehen eines digitalen Höhenmodelles zur Entzerrung der reliefbedingten Lageversetzung präzise rektifizieren.

Das radiometrische Warnicks' Fusionsverfahren kann als das geeignetste zur Integration von multispektralen Kanälen, die innerhalb des Wellenlängenbereiches von Pan liegen, mit Pan bezeichnet werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die auf spektrale Empfindlichkeit basierenden Integrations-Gewichtungsfaktoren sensorabhängig und nicht objektabhängig sind. Dies ermöglicht eine leichte Nachvollziehbarkeit des Verfahrens. Obwohl die Hybridkanäle nur fallweise in die Klassifikationen einbezogen werden konnten, kann dennoch visuell festgestellt werden, dass eine derartige Bildvorverarbeitung für eine Kartierung im städtischen Raum – wo räumliche Information bevorzugt wird – gut verwendet werden kann. Die Fusion von schwach miteinander korrelierenden Kanälen sowie von Kanälen, deren spektrale Empfindlichkeiten sich minim oder gar nicht überlappen, ist problematisch und bedarf weiterer Untersuchungen.

Die Waldfläche konnte sehr gut gegenüber der Restfläche abgegrenzt werden ('overall accuracy' = 94%). Inhomogenitäten und die starke Strukturierung des Objektes Wald erschweren jedoch die Differenzierung der Klassen innerhalb der Waldes. Gemäss Signaturvergleich war hier eine Unterscheidung der Waldklassen nach Entwicklungsstufe kaum möglich. Die erreichten Bestandskartierungsergebnisse nach Mischungsgraden von 65% ('overall accuracy') müssen als unzufrieden stellend betrachtet werden und lassen keinen operationellen Einsatz zu.

Der Potentialvergleich hat gezeigt, dass XS-Daten leicht bessere Ergebnisse liefern als TM-Daten. Es deutet darauf hin, dass für die forstlichen Fragestellungen bei einem kleinparzellierten und stark strukturierten Wald die spektrale Information in einer hohen räumlichen Auflösung benötigt wird. Ferner lässt das Miteinbeziehen von Pan weder mit XS bzw. TM, noch mit der gemeinsamen Verwendung von XS und TM, nennenswerte Verbesserungen zu.

8. Danksagung

Diese Untersuchung ist unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Klaus I. Itten am Geographischen Institut der Universität Zürich entstanden. Ihm möchte ich ganz herzlich für die Unterstützung in allen Bereichen während meines Aufenthaltes in der Schweiz bedanken. Dankbar

bin ich auch allen Kolleginnen und Kollegen für ihre Gesprächsbereitschaft und nützlichen Ratschläge.

9. Literaturverzeichnis

- Bodmer H.C., 1993: Untersuchung zur forstlichen Bestandskartierung mit Hilfe von Satellitenbildern, Dissertation, ETH-Zürich.
- Chavez Pat S. und Bowell Jo A., 1988: Comparison of the Spectral Information Content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for Three Different Sites in the Phoenix, Arizona Region, PE&RS, Vol. 54, No. 12, pp. 1699-1708.
- Cohen W.B. and Spies T.A., 1992: Estimating Structural Attributes of Douglas-Fir/Western Hemlock Forest Stands from Landsat and SPOT Imagery, Remote Sensing of Environment, Vol. 41, No. 1, pp. 1-17.
- Darvishsefat A., 1994: Einsatz und Fusion von multisensoralen Satellitendaten zur Erfassung von Waldinventuren, Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Ehrler C., 1993: Einsatz von Satellitendaten für die Schweizerische Arealstatistik: Radiometrische und geometrische Grundlagen, Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich.
- Itten K.I., Meyer P., Kellenberger T., Leu R., Sandmeier St., Bitter P., and Seidel K., 1992: Correction of the impact of topography and atmosphere on Landsat-TM forest mapping of alpine region. Remote Sensing Series RSS, Vol. 18, Department of Geography, University of Zurich-Irchel
- Koch B., Förster B. und Münsterer M., 1993: Vergleichende Auswertung unterschiedlicher Bildverarbeitungsalgorithmen für eine Waldkartierung auf der Basis von multispektralen SPOT-1-Daten, ZPF, 4/1993, pp. 143-149, Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Munehika C.K., 1990: Merging Panchromatic and Multispectral Images for Enhanced Image Analysis, M. S. Thesis, Centre for Imaging Science College of Graphic Arts and Photography, Rochester Institute of Technology, Rochester, New York.
- Pellemans A.H.J.M., Jordans R.W.L. und Allewijn R., 1993: Merging Multispectral and Panchromatic SPOT Images with Respect to the Radiometric Properties of the Sensor, PE&RS, Vol. 59, No. 1, pp. 81-87.
- Sader S.A., 1989: Multispectral and Seasonal Characteristics of Northern Hardwood and Boreal Forest Types in Maine, Image Processing '89 Sparks, Nevada, 23 May 1989, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 109-116.