

Untersuchungen zur Anwendbarkeit der linearen spektralen Entmischung beim Bestandsmonitoring von Waldflächen

MICHAEL PRIEMER ¹ & PETER LOHMANN ²

Abstract

Due to the spatial resolution of some satellite sensors like LANDSAT or SPOT the use of multispectral classification of tree species at sub-pixel level within forest areas sometimes is limited or difficult. The investigations within this paper make use of the method of linear unmixing, being implemented within ERDAS Imagine as Subpixel-Classifer-Module (SPC) of Applied Analysis Inc. (AAI) . It relies on the derivation of signatures from well defined training sets and permits the determination of surface materials or material part fractions. Therefore it could be an interesting new tool for the management of forest areas, like inventory, mapping of pest investment and storm losses.

This paper investigates the potential of SPC in an area south east of Hannover using recent LANDSAT 7 data in combination with reference data from two official organizations being responsible for forest areas, namely the chamber of agriculture in Hannover and the forestry planning department in Wolfenbüttel.

Aside fir and beech-trees which are regionally wide spread, the investigations cover also species like oak trees, alder, sycamore and ash trees. The signatures have been derived from pure stands as well as mixed ones and the results are compared to a traditional multispectral classification using the maximum-likelihood method.

First results show, that both methods yield comparable results once the training sets are homogeneous. The subpixel analysis furthermore allows conclusions on the density and purity of stands, which is difficult to achieve by traditional classifiers.

1 Theorie der linearen spektralen Entmischung

Die Lineare Spektrale Entmischung wird als Vorgang verstanden, die durch den Abbildungsvorgang entstandene spektrale Mischung in Pixeln zu invertieren. Mischpixel sind solche heterogenen Inhalts. Man spricht daher von der Subpixelanalyse.

1.1 Lineare Mischung

Im physikalischen Modell entsteht der gemischte Wert eines Pixels durch die Integration der reflektierten Strahlung über ein gemischtes, heterogenes momentanes Gesichtsfeld. Durch das Auftreten verschiedener Materialien und deren unterschiedlichen spektralen Eigenschaften innerhalb eines Pixels entsteht eine lineare Kombination der reinen auftretenden Komponentenspektren. Die vorkommenden Komponenten werden als Endmember bezeichnet.

¹ cand.-geod. Michael Priemer, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation (IPI), Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, miprie@web.de

² Dr.-Ing. Peter Lohmann, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation(IPI), Universität Hannover, Nienburger Str.1, 30167 Hannover, lohmann@ipi.uni-hannover.de

1.1.1 Mathematisches Modell

Die lineare Mischung eines heterogenen Pixels ist also aufzufassen als gewichtete Mittelbildung nach physikalischen Anteilen der Endmember auf der Pixelfläche (SCHOWENGERDT, 1997). Die folgende Abbildung beschreibt exemplarisch die Entstehung eines Mischpixelspektrums. Die auftretenden Endmember „Kentucky Blue Gras“ und „trockener roter Ton/Lehm“ seien im betrachteten Mischpixel zu jeweils 50 % enthalten. Dargestellt ist neben den Einzelspektren der beiden Endmember das entstandene Mischspektrum.

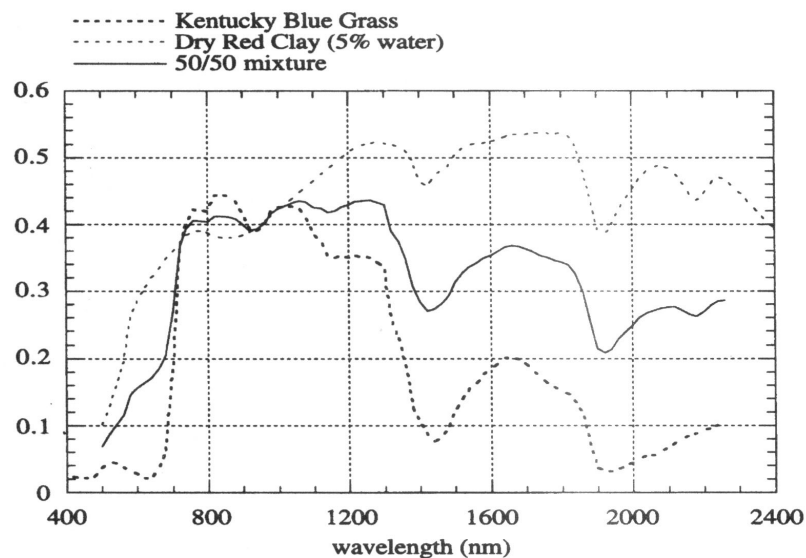


Abb.1 : Reflexionsspektrum eines Mischpixels und der beiden mischenden Endmember (SCHOWENGERDT, 1997)

Es bleibt anzumerken, dass einzig die Abundanzen (Flächenanteil eines Materials – Endmember – an der Gesamtfläche des Pixels) der Endmember sowie deren Reflexionsspektren für die lineare Mischung des heterogenen Pixels massgebend sind; deren geometrische Form, Lage oder Verteilung innerhalb des Pixels hat hierbei keine Wirkung.

1.2 Lineare spektrale Entmischung

Die Inversion der linearen Mischung führt auf die Abundanzen der Endmember. Voraussetzung für die Entmischung eines n-kanaligen gemischten Pixels ist die Kenntnis über alle vorkommenden Endmember sowie deren Referenzspektren.

Inversion : $\mathbf{A} * \mathbf{X} = \mathbf{B} \implies \mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} * \mathbf{B}$

\mathbf{A} : Mischungsbibliothek, enthält die Grauwerte aller Endmember

\mathbf{X} : Vektor der Abundanzen

\mathbf{B} : Reflexionsvektor des Mischpixelspektrums

In der Mischungsbibliothek \mathbf{A} müssen alle im Auswertungsgebiet auftretenden Endmember mit ihren Reflexionsspektren enthalten sein. Die Selektion der Endmember erfolgt aus Zusatzinformationen über die Testgebiete. Um zusätzliche Unsicherheiten bei der Entmischung zu vermeiden, sollten Endmember, deren Vorkommen im Analysegebiet ausgeschlossen werden kann, auch nicht in die Mischungsbibliothek aufgenommen werden.

Die benötigten Referenzspektren können aus Labormessungen, aus ground-truth-Beobachtungen (terrestrisch) oder aus vorhandenen Daten abgeleitet werden.

Für den Fall, dass die Anzahl der Endmember kleiner ist als die Anzahl der Spektralkanäle, ist die Gleichung $\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} * \mathbf{B}$ als überbestimmtes lineares Gleichungssystem zu betrachten.

Die Lösung gelingt über eine lineare Regressionsanalyse nach der Methode der kleinsten Verbesserungsquadratsummen für die Vorkommenshäufigkeit der Endmember.

Innerhalb eines Pixels belegt jeder Endmember in jedem Kanal den gleichen Flächenanteil.

Wegen der Überbestimmung ist eine Qualitätsanalyse durch Restfehler und Standardabweichung zulässig. Die Entmischung wird für jedes Pixel einzeln berechnet.

2 Der AAI – Imagine Subpixel Classifier

Der AAI Imagine Subpixel Classifier (eine für das Bildverarbeitungspaket ERDAS von der Firma Applied Analysis Inc., Billerica, USA, entwickelte Software) baut eine Signatur für ein spezielles Material auf. Dieses Material wird im folgenden als MOI – Material of Interest bezeichnet. Die Subpixelanalyse soll eine feinere Klassifizierung als herkömmliche traditionelle Klassifizierungsalgorithmen liefern. Für jedes Pixel im Bild wird geprüft, ob das gesuchte Material (MOI) enthalten ist; im Ergebnis werden die Pixel je nach detektiertem Anteil des gesuchten MOIs den entsprechenden Klassen zugewiesen.

2.1 Ablauf der Subpixelanalyse

Die Durchführung einer Subpixelanalyse umfasst fünf Prozesse, die im Folgenden erläutert werden.

2.1.1 Quality Assurance

Diese Funktion prüft die verwendeten Satellitenbilder hinsichtlich ihrer Qualität. Sollten beim Resampling der Bilder Datenlücken aufgetreten sein, werden diese aufgefüllt durch duplizierte Daten. In der Regel werden komplette Zeilen oder Spalten dupliziert. Auch bei Datenlücken aus Sensorfehlern findet die Technik des Datenduplizierens Verwendung. Die duplizierten Daten werden als DLAs bezeichnet, Duplicate Line Artefacts. Der Modus Quality Assurance findet duplizierte Daten, unabhängig für jedes Band durch Vergleich der Pixelgrauwerte und Suche nach identischen Pixelspektren. Gefundene DLAs werden in einem separatem Layer dargestellt.

2.1.2 Preprocessing

Die Funktion überwacht den Hintergrund des Bildes, um ihn für die Signaturenableitung und die Klassifizierung zu entfernen. Die in einer Bibliothek zusammengestellten potentiellen Hintergrundspektren werden hinsichtlich ihrer spektralen Eigenschaften mit den auftretenden Pixelspektren verglichen. Die 44 Hintergrundspektren der Bibliothek, umfassen sowohl reine, wie auch gemischte Spektren. Es ist nicht bekannt, um welche Spektren es sich handelt.

2.1.3 Automatic Environmental Correction

Die Funktion Automatic Environmental Correction analysiert die atmosphärischen Parameter zum Zeitpunkt der Aufnahme. Es werden Koeffizienten berechnet für die Korrektur der Bilder wegen der aktuellen Atmosphäre zum Aufnahmezeitpunkt sowie der Topographie innerhalb der Szene. Notwendig ist dieser Prozess sowohl für Auswertung genau dieser Szene (in-scene - Modus), als auch für Klassifikationen in anderen Bildern, die auf Signaturen dieser Szene basieren (scene-to-scene - Modus). Für den Fortgang der Subpixelanalyse ist dieser Prozess unerlässlich.

2.1.4 Signature Derivation

Die Funktion Signature Derivation ermöglicht die Ableitung einer Signatur für ein bestimmtes zu klassifizierendes Material im Bild; dieses Material wird als MOI – Material of Interest bezeichnet. Der AAI Imagine Subpixel Classifier erlaubt die Ableitung von Signaturen für Materialien, die nur partiell in Pixeln auftreten. So ist die abgeleitete Signatur nicht als reines Reflexionsspektrum eines Materials zu betrachten, sondern enthält darüber hinaus zusätzliche Informationen, die einen Einsatz der Signatur im scene-to-scene – Modus erlauben. Die aus dem Material of Interest abgeleitete Signatur enthält neben dem Signaturespektrum, das als Äquivalent zu einem Pixelspektrum des reinen MOI betrachtet werden kann, den nicht – parametrischen Merkmalsraum, um die Restspektren bei der Ermittlung des Hintergrunds zu filtern. Grundlage für die Signaturenableitung sind vom Anwender vorgegebene Trainingsgebiete, deren Bedeckung mit Material of Interest wohl bekannt sein muss. Der Anteil an MOI innerhalb der Trainingsflächen wird dem Algorithmus durch den Anwender als MPF (Mean Material Pixel Fraction) vor der Signaturenableitung bekanntgegeben. Ebenfalls durch den Anwender wird eine Wahrscheinlichkeit geschätzt (confidence factor) über die Sicherheit der angegebenen MPF, anhand derer der Algorithmus während der Signaturenableitung Trainingspixel vom Prozess der Signaturenableitung ausschliessen wird. Hintergrund der Variationen der Restspektren sind einerseits tatsächliche Variationen im Spektrum des Materials of Interest, andererseits aber auch unvermeidbare Fehler während der Separation des Signaturhintergrunds. Während traditionelle Klassifizierungsalgorithmen über die spektrale Variation innerhalb der Trainingsgebiete die Breite der Signatur festlegen, extrahiert die Subpixelanalyse das Material als Signatur, welches in allen Trainingspixeln innerhalb der, durch Mean Material Fraction und confidence factor gesteckten Grenzen, vorhanden ist. Die Funktion Signature Environment and Refinement bietet die Möglichkeit der Verbesserung einer erzeugten Signatur, basierend auf neuen AOIs der Klassen: „Richtige Detektionen“; „Fälschlich nicht klassifizierte Pixel“ und „Fälschlich klassifizierte Pixel“.

2.1.5 MOI Classification

Inhalt dieser Funktion ist die eigentliche Klassifikation eines gesuchten MOI in einem Bild durch Anwendung einer zuvor abgeleiteten Signatur. Ergebnis der MOI – Classification ist ein Bild, das dem klassifizierten überlagert werden kann, um die Pixel, in denen MOI lokalisiert wurde, im Bild darzustellen. Die Schrittweite der zu klassifizierenden Subpixelklassen ist vor der Klassifizierung festzusetzen. Zu wählen ist hier zwischen 2 Klassen in 40% - Schritten, 4 Klassen in 20% - Schritten oder 8 Klassen in 10% - Schritten. Die niedrigste Klasse von 0 bis 20 % MOI – Pixelanteil ist Standard. Nach Anwendung der berechneten Korrekturparameter auf Bild und Signatur berechnet der Subpixelalgorithmus die Trennung von Signatur und Hintergrundspektrum für jedes Pixel unabhängig. Die innerhalb der Wahrscheinlichkeitsgrenzen des Merkmalsraumes gefundenen MOI – Anteile jedes Pixels werden in einer separaten Bildebene als Layer dargestellt. Die Angabe des Toleranzparameters erlaubt es dem Anwender, den Merkmalsraum der Signatur zu verkleinern oder auszudehnen, um die Detektionsrate zu optimieren.

3 Untersuchungen zur Detektion verschiedener Baumarten

3.1 Georeferenzierung

Erster Schritt nach Erhalt der LANDSAT TM7 – Daten war das Erstellen eines Ausschnitts, der die Testgebiete enthält. Es handelt sich um eine Fläche von 2500 km² südöstlich von Hannover. Aufnahmezeitpunkt der Szene war September 1999. Da das bevorzugte Datenformat für die Subpixelanalyse von LANDSAT – Daten vorsieht, radiometrisch korrigierte Daten, geometrisch nicht korrigiert, zu verwenden (AAI, 2001), wurden Daten mit dem Prozessierungslevel L1R verwendet. Daten dieses Levels sind radiometrisch korrigiert, jedoch weder geometrisch korrigiert, noch sind sie resampled. (USGS, United States Geological Survey, 2001).

Zur Zuordnung der Testflächen, die durch die Landwirtschaftskammer Hannover bereitgestellt wurden, war eine Georeferenzierung der Szene unerlässlich. Durch Festlegung von 62 Referenzpunkten mittels der Topographischen Karte 1:50000 für Niedersachsen wurde ein Resampling der Methode „Nearest-Neighbour“ durchgeführt. Da hier die Grauwertzuordnung nach dem Kriterium der nächsten Nachbarschaft geschieht, ist gegenüber anderen Verfahren die höchste Erhaltungsstufe der Grauwerte des Originalbildes zu erwarten (RICHARDS, 1999). Die Pixelgröße wurde mit 30 x 30 m² gewählt, um die Sensorauflösung nicht zu unterschreiten und somit ein Duplizieren von Grauwerten zu provozieren. Die Innere Genauigkeit der Entzerrung betrug 0,53 m, die Kontrolle an zehn unabhängigen Kontrollpunkten ergab einen mittleren Fehler von 6,2 m.

3.2 Festlegung der Trainingsgebiete

Durch die Landwirtschaftskammer Hannover wurden Forstdatenbanken zur Verfügung gestellt, die durch das Programm ArcView das Erstellen von Trainingsgebieten zulassen. In der flächenhaften Gliederung nach Gemarkung / Abteilung / Unterabteilung und Unterfläche sind die Bestandsschichten nach Hauptbaumart und zugehöriger Angabe über Teilflächenprozent

und Altersdurchschnitt nachgewiesen zum Aufnahmezeitpunkt 1990. Jedoch gibt es keinerlei Angaben über die Dichte des Bestandes mit Kronenabschlussgrad und dem Bodenbewuchs. Um zunächst von reinen Trainingsgebieten ausgehen zu können wurde lediglich auf Flächen trainiert, deren Hauptbaumart zu 100 % in einer einzigen Bestandsschicht angesiedelt war.

Die gefundenen Trainingspixel pro Baumart spiegeln das regionale Vorkommen der Baumart in der Region Hannover wieder. So ergab sich die Zusammensetzung der Trainingsgebiete wie folgt:

- 73 % Fichte (Fi)
- 16 % Buche (Bu)
- 6 % Eiche (Ei)
- 3 % Bergahorn (Bah)
- 1 % Esche (Es)
- 1 % Roterle (Rerl)

3.3 Signaturentraining

Ausgehend von diesen Trainingsflächen wurde das Signaturentraining iterativ durchgeführt. An identischen, laut Datenbank, reinen Pixeln wurde bis Iteration 10 das Verhalten der Signaturen ableitung für die beiden am häufigsten vertretenen Baumarten Buche und Fichte beobachtet und dokumentiert. Angegeben in Prozent sind jeweils folgende Klassen:

- richtig detektierte Pixel (valid det.)
- fälschlich nicht detektierte Pixel (missing det.)
- falsch detektierte Pixel (false det.) - aus Trainingsgebieten der anderen Baumarten

Die berechneten prozentualen Werte beziehen sich jeweils auf die Gesamtheit der maximal möglichen Menge an Pixeln pro Klasse.

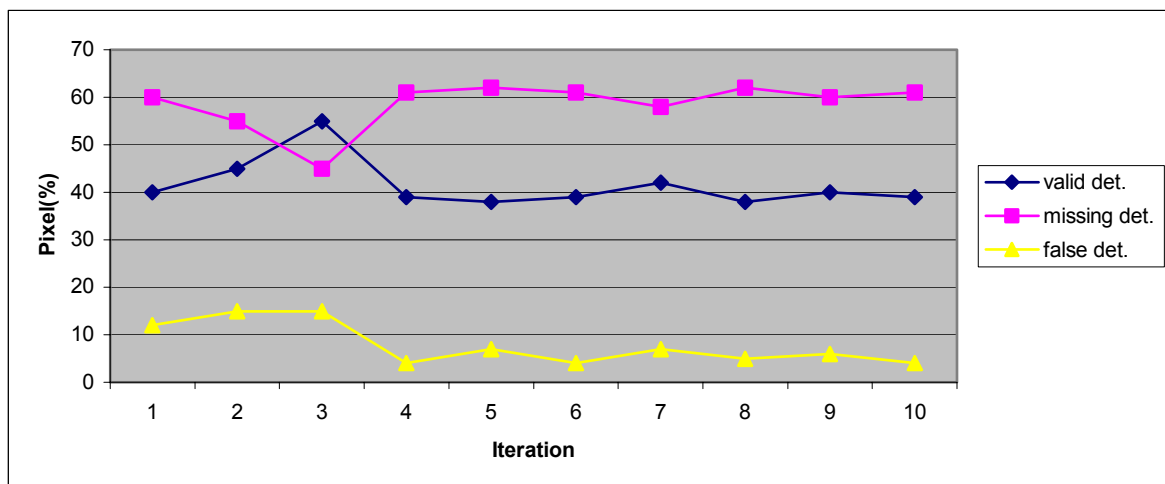


Abb. 2 : Iterative Signaturen ableitung der Baumart Buche

Da beide Untersuchungen im Ergebnis zeigen, dass eine Iteration bis Schritt 4 nachhaltige Verbesserungen der Signatur erwarten lässt, wurden die übrigen genannten Signaturen bis dorthin entwickelt. Als Grundlage eines Vergleichs der Subpixelanalyse mit einem traditionellen Klassifizierungsansatz wurde mit identischen Trainingsgebieten eine überwachte Klas-

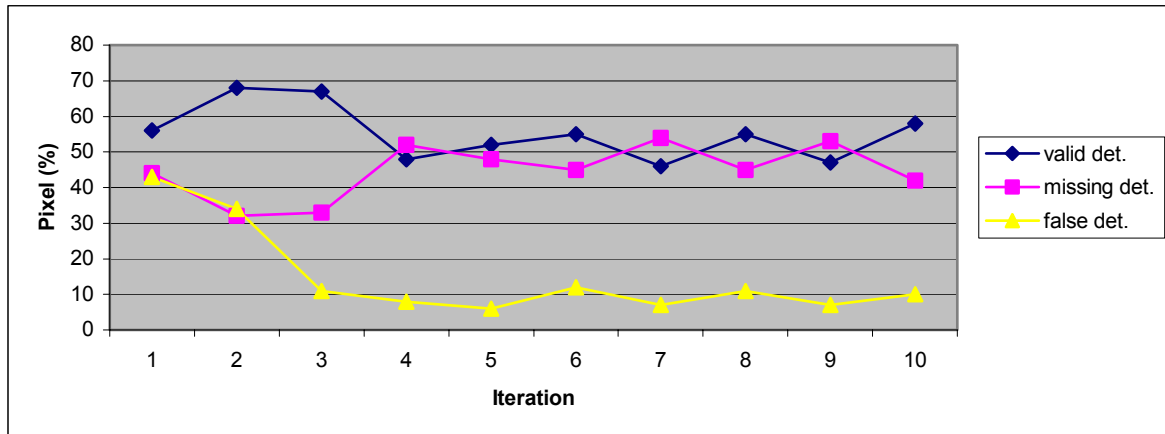


Abb. 3 : Iterative Signatureableitung der Baumart Fichte

sifizierung nach der Maximum – Likelihood – Methode durchgeführt. In einem zweiten Ansatz wurden Signaturen bereits auf Subpixelebene entwickelt, auf Flächen, deren Hauptbestand nur 60 bis 80 % des Gesamtbestandes beinhalten. Auch hier wurde parallel eine überwachte Klassifizierung der Methode Maximum – Likelihood durchgeführt, ebenfalls ausgehend von identischen Trainingsflächen.

3.4 Auswertung

Der Vergleich der beiden Algorithmen wurde durchgeführt an Beständen des niedersächsischen Staatswalds, dessen Datengrundlage das Niedersächsische Forstplanungsamt in Wolfenbüttel zur Verfügung stellte. Auch diese Daten wurden im ArcView – Format zur Verfügung gestellt mit Datenbanken, deren Inhalt an Details reichhaltig ist. Aufnahmezeitpunkte der Referenzdaten waren je nach Forstamtsbezirk variabel die für Jahre 1990 bis 2000. Neben der bestandsmässigen Zuordnung in Hauptbestand, Nachwuchs, Unterstand und Überhalt sind hier auch Angaben über die Mischungsart, wie zum Beispiel truppweise, horstweise oder flächenweise, sowie Angaben zum Vorbestand und Schäden nachgewiesen. Auch sind Daten zum Bestockungsgrad enthalten, der flächenmässig am Boden einen Ansatz zur Bestandsdichte liefert. Angaben zum Kronenabschluss oder zur Art des zu erwartenden Bodensignals sind jedoch nicht niedergelegt. Zum Abschluss wurden fragliche Klassifizierungsergebnisse stichprobenartig in einem Feldvergleich im Deister beurteilt, der sachverständig durch den zuständigen Revierförster unterstützt wurde.

4 Ergebnisse

Ausgangspunkt zum Finden der Ergebnisse sind die Forstbestandsdatenbanken über niedersächsische Staatswälder, die zur Verfügung gestellt wurden durch das niedersächsische Forstplanungsamt in Wolfenbüttel. Eine flächenhafte Auswertung des kompletten Ausschnitts war mangels Referenzdaten nicht möglich. Grundsätzlich wurden folgende zwei Ansätze verfolgt. Einerseits kam ein flächenhafter Ansatz zum Tragen, in dem für jeden einzelnen Layer der Klassifizierung einer Baumart über die Pixelanzahl der jeweiligen Testfläche der Anteil der gesuchten Baumart an der Fläche bestimmt wurde. Da jede Baumart unabhängig zu klassifizieren war, sind sowohl positive wie negative Differenzen zu einem Gesamtbestand

von 100 % innerhalb der Flächen aufgetreten. Andererseits wurde grundsätzlich der Bestand der Fläche auf 100 % festgesetzt und die Ergebnisse der flächenhaften Betrachtung nach den einzelnen klassifizierten Baumarten gewichtet. Letzterer Ansatz bietet einen engeren Bezug zur Vergleichsgrundlage der Forstbestandsdatenbanken, da hier jede Fläche pro Bestandsschicht als Summe aller Baumarten den Wert 100% aufweist. Gleichwohl werden so die Vorteile der Subpixelanalyse in Bezug auf eine feinere Differenzierbarkeit der Bestände beschnitten. Um an dieser Stelle jedoch eine Bewertung vornehmen zu können, hätten grossräumig Daten in einem Feldvergleich erhoben werden müssen. Nach Zuordnung der Attribute korrespondierender Flächen aus den Bestandsdaten zu den Satellitendaten wurden die benötigten Flächen als Areas of Interest (AOI) in Form von Polygonen eingerichtet. Die Polygone wurden nach innen gepuffert um Randpixel zu vermeiden. Im Anschluss wurden die Pixel innerhalb der Flächen ausgezählt und je nach Bewertung flächenhaft oder bestandsmässig betrachtet.

4.1 Gesamtergebnis

In 59 Testgebieten wurden Pixel ausgewertet und jeweils nach Fläche (SPC) und Bestand (Supervised und SPC(Best.)) bewertet. In der ersten Testreihe wurden Signaturen aus reinen Beständen bewertet, in einer zweiten Testreihe wurden Signaturen entwickelt aus Trainingsgebieten, deren Bedeckung an MOI, nach Aussage der Forstbestandsdaten, ca. 60 % beträgt. Parallel wurde auch hier nach Maximum-Likelihood-Methode eine überwachte Klassifizierung zum Vergleich durchgeführt mit identischen Trainingsflächen. Im Weiteren wurden nur die beiden regional weit verbreiteten Baumarten Buche und Fichte untersucht.

Fehler	SPC	Supervised	SPC (Best.)
Fichte	11,20%	10,30%	10,10%
Buche	33,30%	34,40%	35,90%
Eiche	8,20%	7,80%	7,90%
Bergahorn	18,30%	11,00%	14,40%
Esche	28,20%	29,90%	24,90%
Roterle	4,10%	2,60%	3,90%
Gesamt	17,20%	16,00%	16,20%

Abb.4 : Fehlervergleich aus reinen Trainingsflächen

Aus der Tatsache heraus, dass gemischte Trainingsgebiete verwendet wurden, war zu erwarten, dass das Ergebnis der Subpixelanalyse unter Verwendung der Signaturen aus schwächeren Testgebieten ein deutlich besseres Ergebnis liefert als die überwachte Klassifikation nach Maximum-Likelihood-Methode. Abbildung 5 zeigt, dass die Subpixelanalyse hier nur unwesentlich bessere Ergebnisse bringt auf gleichem Fehlerniveau.

Fehler	SPC	Supervised	SPC (Best.)
Fichte	20,15%	17,35%	18,12%
Buche	23,37%	23,28%	21,73%
Gesamt	21,76%	20,32%	19,92%

Abb.5 : Fehlervergleich aus gemischten Trainingsflächen

Die Signaturen aus gemischten Testflächen wurden, unabhängig zu den „reinen“ Signaturen, getestet auf identischen Flächen, die evaluiert sind durch die Forstbestandsdaten des Niedersächsischen Forstplanungsamtes in Wolfenbüttel. Der Testmenge beläuft sich somit ebenfalls auf 59 Gebiete in den Forstamtsbezirken Deister, Grohnde, Oldendorf und Saupark.

4.2 Bewertung

Auf den ersten Blick scheint die erwartete Verbesserung der multispektralen Klassifikation durch den Ansatz der Subpixelanalyse nicht zuzutreffen. Bei Betrachtung des erreichten Fehlerniveaus liegen sowohl der überwachte Ansatz, als auch der Ansatz der Subpixelanalyse auf gleichem Genauigkeitsniveau. Betrachtet man allerdings Ergebnisse der Subpixelanalyse, stellt man fest, dass Aufschlüsse über die Dichte der Verteilung der Bestände durchaus zulässig sind, die aus der überwachten Methode nicht abzuleiten sind. Die Ergebnisse entstammen dem Ansatz der flächenhaften Auswertung.

Bei näherer Betrachtung des Aufnahmezeitpunkts im September 1999 fällt auf, dass die jahreszeitlich bereits einsetzende Verfärbung der Blätter das Klassifikationsergebnis mindert. Hinzukommt, dass zum Aufnahmezeitpunkt im Jahr 1999 eine lang anhaltende trockene Wetterperiode herrschte, welche die Verfärbung der Blätter forciert hat. Die Verfärbung ist allerdings in ihrem Fortschritt regional unterschiedlich ausgeprägt und zudem abhängig vom Alter der beobachteten Bestände, so dass sie nicht als homogen über alle Testflächen zu erwarten ist. Einen weiteren limitierenden Faktor, der ohne Feldvergleich kaum grossräumig bestimmbar ist, stellt der gesundheitliche Zustand der Bestände dar. Die genaue Information über den Vitalitätszustand der Bestände zum Zeitpunkt der Aufnahme ist den Datenbanken über die Forstbestände nicht zu entnehmen. Hier hätte zum Erheben der Daten für die Trainingsgebiete eine Befliegung oder ein Feldvergleich stattfinden müssen, um genaue Erkenntnisse über den Zustand der Trainingsgebiete erlangen zu können.

Die Erkenntnisse des Feldvergleichs zeigen, dass gerade der Einfluss der Sekundärreflexionen Abweichungen des Klassifikationsergebnisses gegenüber den Forstbestandsdaten hervorbringt. Als Gesamtergebnis des Feldvergleichs ist festzuhalten, dass in erster Linie Verjüngungen des Bestandes und auch aufgelichtete Bestände innerhalb der Klassifikation zu Unsicherheiten führen, da diese Informationen nicht vollständig aus den Bestandsdaten ersichtlich sind. Gerade die Bewertung des empfangenen Bodensignals ist hier von hoher Bedeutung, da während der Signaturenableitung die einzustellende Material Part Fraction besser an die Realität innerhalb der Fläche angepasst werden kann. Auch ein Bestand, der mit 100 % in der Forstdatenbank nachgewiesen ist, kann bei einem hohen Anteil an im Satellitenbild sichtbarer Bodenvegetation als Trainingsfläche ausfallen. Ein Feldvergleich innerhalb der gewählten Trainingsflächen, der zeitgleich mit der Aufnahme der Satellitenbilddaten durchgeführt wird, hat durch die genaue Kenntnis der Realität eine unmittelbare Auswirkung auf die Qualität der abgeleiteten Signaturen. Das Durchführen von Feldvergleichen zur Sicherung der Qualität abgeleiteter Signaturen wird in der Literatur im Zusammenhang mit der Auswertung von Luftbildern bei der Subpixelanalyse empfohlen [HUGUENIN et al., 1997].

Nach Bearbeitung der LANDSAT – Daten wurde testweise, als Stichprobe zum Vergleich eine Unterscheidung von verschiedenartigen Baumarten an einem CIR-Orthofoto durchgeführt. Das verwendete Orthofoto fällt in den Bereich, der durch die Forstbestandsdaten der Landwirtschaftskammer Hannover nachgewiesen ist. Die Auflösung beträgt $30 \times 30 \text{ cm}^2$ bei einem Umfang von 9841×10779 Pixeln. Bei Übertragung der Ergebnisse der Subpixelanalyse aus Orthofotos in Satellitenbilder ist grundsätzlich eine höhere Qualität der Testgebiete zu erreichen. So können ausgedehnte zusammenhängende Bestände einer Baumart, die im Orthofoto mit einer hohen Material Part Fraction erkannt wurden, eine hohe Sicherheit für die zum Signaturentraining benötigten Testgebiete in Satellitendaten geben. Zu beachten ist an

dieser Stelle jedoch, dass die Aufnahmezeitpunkte von Orthofoto und Satellitenbild in zeitlichem Zusammenhang stehen müssen. Diese Forderung war in der vorliegenden Arbeit nicht erfüllt, so dass weitere Aussagen hinsichtlich der Übertragbarkeit nicht gemacht werden können.

5 Ausblick

Als Fortführung der Untersuchung sind Fragestellungen von Interesse, die im Zusammenspiel von Forstbestandsdatenbanken, Luftbildanalysen und Feldvergleichen Signaturen höchster Qualität liefern. Des Weiteren ist in diesem Zusammenhang sicher die Qualität von übertragenen Signaturen zu untersuchen. Denkbar ist der Signaturentransfer sowohl vom Luftbild in ein Satellitenbild, als auch von Satellitenbildern zueinander. Von grosser Bedeutung ist hier jedoch der enge zeitliche Zusammenhang, der gerade für Vegetationsanalysen sicherzustellen ist, da die Spektraleigenschaften von Vegetation erheblichen jahreszeitlichen Veränderungen unterworfen ist. Die Möglichkeit eines Signaturentransfers rechtfertigt in einer operationellen Anwendung die durch den Feldvergleich entstehenden Kosten, da eine Anwendung der Signatur in verschiedenen Szenen und geographischen Regionen zulässig ist. Auch ein temporärer Transfer ist denkbar unter Beachtung der identischen Vegetationsphase.

Ein großer Vorteil des SPC liegt darin, dass Beurteilungen der Bestandsdichte und der Verteilung des Bestandes über die untersuchte Fläche möglich werden und für die Anwendung des Forstmonitorings von großem Interesse sind. Die alleinige Verwendung von Forstdatenbanken reicht allerdings nicht aus, um das Potential des SubpixelClassifiers voll auszuschöpfen, da Informationen über den Kronenschlussgrad und die Bodenvegetation der Bestände fehlen. Die Ergebnisse der Untersuchungen am Orthofoto und insbesondere des Feldvergleichs zeigen jedoch, dass unter erweitertem Einsatz dieser Hilfsmittel ein günstigeres Fehlerniveau der Subpixelanalyse zu erwarten ist.

6 Literaturverzeichnis

AAI : [http:// www.discover-aa.com / subpixel.htm](http://www.discover-aa.com/subpixel.htm), Januar 2001

HUGUENIN, R., KARASKA, M., VAN BLARICOM, D., JENSEN, J. (1997) : Subpixel Classification of Bald Cypress and Tupelo Gum Trees in Thematic Mapper Imagery – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.63, No.6, 1997

RICHARDS, J.A., JIA, X. (1999) : Remote Sensing Digital Image Analysis – Springer, Heidelberg, 1999

SCHOWENGERDT, R. (1997) : Remote Sensing, Models and Methods for Image Interpretation – Academic Press, San Diego, USA, 1997

USGS : [http:// landsat7.usgs.gov / 17_processlevels.html](http://landsat7.usgs.gov/17_processlevels.html), Juni 2001