

Die Nutzung von MOMS-2P-Daten zur Waldzustandserfassung und Aktualisierung von Forsteinrichtungsdaten in Rheinland-Pfalz

J. Hill, H.G. Peerenboom, O. Stöver, C. Atzberger, M. Vohland, C. Diemer,
A. Blümel, H. Egidi und F. Engels



Kontrakt-Nr. C/0228/1C/97
Abschlussbericht
Juni 2000



Vorwort

Die Anregung zu diesem Forschungsprojekt ging von Herrn LFD H.G. Peerenboom (Forstdirektion Koblenz) aus. Ihm sei für sein Engagement bei der Antragstellung, der Absicherung der Teilfinanzierung durch das Ministerium für Umwelt und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz sowie bei der Durchführung des Projektes herzlich gedankt. Bei den Vertretern des Ministeriums, Herrn Dr. Eder und Herrn Rose, möchten wir uns für ihre Bereitschaft bedanken, diese Studie zu unterstützen. Herr Dr. H. Egidi (Forstdirektion Koblenz) hat das Projekt in seiner Durchführung begleitet und durch seine stetige Diskussionsbereitschaft zu seinem Gelingen beigetragen. Dafür sei auch ihm gedankt.

Besonderer Dank gebührt Herrn Friedrich Engels (Forstliche Versuchsanstalt des Landes Rheinland-Pfalz, Trippstadt). Ihm oblag nicht nur die organisationstechnische Abwicklung des Projektes, sondern er unterstützte uns immer wieder mit Ratschlägen, speziellen Informationen und Auswertergebnissen aus dem CIR-Befliegungsprogramm des Landes. Ebenso gilt unser Dank dem Direktor der Forstlichen Versuchsanstalt, Herrn Prof. Dr. A. Röder und dem Leiter der dortigen Abteilung Waldschutz, Herrn Dr. J. Block.

Den Mitarbeitern der Forstdirektion Rheinhessen-Pfalz sowie der Forstämter Schaidt und Hagenbach danken wir für ihre Unterstützung und die Bereitstellung des umfangreichen Datenmaterials. Dies gilt im gleichen Maße für die Mitarbeiter des Forstamtes Morbach. Dort haben uns der Forstamtsleiter, Herr OFR G. Womelsdorf sowie der Forsteinrichter, Herr FD G. Wagner sehr geholfen. Herrn H. Delb sei herzlich gedankt für die fachkundige Beratung hinsichtlich forstlicher Fragestellungen und den Unterstützungsleistungen im Rahmen der Schwammspinner-Untersuchung.

Ganz besonders gedankt sei auch den Mitarbeitern, Diplomandinnen und Diplomanden der Abteilung Fernerkundung, die durch ihre engagierte und kompetente Mitarbeit entscheidend zum Gelingen der Arbeiten beigetragen haben. Im einzelnen waren dies Frau A. Blümel und die Herren M. Vohland und C. Diemer, P. Hostert und Dr. Th. Udelhoven. Herr Dr. C. Atzberger, Abteilung Fernerkundung, hat mit großem Engagement und seiner Fachkompetenz die Entwicklung und Umsetzung der Ansätze zur Reflexionsmodellierung vorangetrieben. Die bisherigen Ergebnisse zeigen das große Potential dieser Arbeitsrichtung auf. Es ist daher besonders erfreulich, dass die daraus resultierenden Perspektiven mittlerweile in einem Teilprojekt des SFB 522 „Umwelt und Region“ weiter bearbeitet werden können.

Zu Dank verpflichtet sind wir ebenfalls den Vertretern des Projektträgers, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), den Herren Dr. W. Steinborn und Dr. H.P. Lüttenberg. Ihr Interesse an der Studie hat uns sehr motiviert.

Prof. Dr. J. Hill
Dipl.-Geograph O. Stöver

Die Nutzung von MOMS-2P-Daten zur Waldzustandserfassung und Aktualisierung von Forsteinrichtungsdaten in Rheinland-Pfalz

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Ziel des Projektvorhabens
3. Einsatz und Perspektiven von GIS und Fernerkundung in der Forstwirtschaft
 - 3.1 Forstliche Betriebsführung
 - 3.2 Waldschadenskartierung
 - 3.3 Analoges Luftbild oder digitale Satellitenbilddaten
4. Grundkomponenten forstlicher Informationssysteme
 - 4.1 Verfügbare Basisinformationen der Forstverwaltung
 - 4.2 ATKIS
 - 4.3 Operationell genutzte Fernerkundungsinformationen
 - 4.4 Perspektiven der Arbeit mit digitalen Abtastsystemen
5. Forst-Informationssystem auf der Basis von Fernerkundungsdaten und Daten der Landesforstverwaltung
 - 5.1 Aufbereitung forstlicher Basisdaten der Landesforstverwaltung
 - 5.2 Aufbau eines FOGIS-Prototypen auf der Basis von Fernerkundungs- und Forstdaten sowie ergänzender Sachdaten im Bereich des Forstamtes Hillesheim
6. Vorverarbeitung der Satellitendaten
 - 6.1 Geometrische Entzerrung
 - 6.2 Radiometrische Korrekturen
7. Fallstudien im Rahmen des Projektvorhabens
 - 7.1 Fernerkundung und GIS in der Forsteinrichtung: Untersuchungen zur Erstellung hochauflösender Forstübersichtskarten mittels Datenfusion (FA Hillesheim)
 - 7.2 Fernerkundung und GIS im Bereich des Waldschutzes: Die Schwammspinner-Kalamität im Bienwald
 - 7.3 Die Nutzung von Reflexionsmodellen zur fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Größen
 - 7.4 Satellitendaten als Unterstützung der Forsteinrichtung
8. Literaturverzeichnis
9. Anhang

1. Einleitung

Wald erfüllt auf der gleichen Fläche die unterschiedlichsten Funktionen; ihm kommt sowohl wirtschaftliche, ökologische, sozioökonomische als auch soziokulturelle Bedeutung zu. Nicht zuletzt aufgrund der vielfältigen Nutzungsansprüche ist das Ökosystem Wald zahlreichen Belastungen ausgesetzt - zum Beispiel durch Erholungsnutzung, Jagd bzw. selektive Förderung jagdbarer Arten oder durch nicht standortgerechte, nivellierend wirkende forstwirtschaftliche Maßnahmen. Abiotische und biotische Schadfaktoren wie zum Beispiel Immissionen, Sturm, Schnee- oder Eisbruch, Insekten- oder Pilzbefall können Schäden bestandsbedrohender Ausmaße verursachen. Seine Multifunktionalität macht den Wald zum Gegenstand gesamtgesellschaftlicher Interessen. Die Sicherstellung seiner Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen in ihrer Gesamtheit erfordert detaillierte, im Idealfall „ganzheitliche“ Konzepte, zu deren Entwicklung es einer Fülle präziser und aktueller Informationen bedarf. Dieser bestehende Informationsbedarf im Forstbereich findet seinen Ausdruck in zahlreichen Waldinventuren, die bei spezifischer Schwerpunktsetzung in zum Teil regelmäßigen Zeitintervallen durchgeführt werden (z.B. Bundeswaldinventur, Forsteinrichtung, Waldschadenserhebungen, Waldfunktionenkartierung, Waldbiotopkartierung, forstliche Standortskartierung, Bestandserhebungen von Tier- und Pflanzenarten, Einrichtung von Dauerbeobachtungsflächen).

Bisherige Inventarisierungen stützen sich dabei neben terrestrischen Erhebungen vorwiegend auf aufwendige und zeitintensive Verfahren der analogen Luftbildinterpretation. Die Darstellung forstlicher Sachverhalte erfolgt mit Hilfe der manuellen Forst-Kartographie. Die moderne Forstwirtschaft sieht sich jedoch mit wachsenden Informationsbedürfnissen einerseits, mit geringerer Mittelausstattung andererseits konfrontiert. Geographische Informationssysteme und Verfahren der digitalen Bildverarbeitung bieten sich als zeitgerechte Alternativen der Informationsverarbeitung und -verwaltung an. Sie erlauben eine flexiblere Arbeitsweise und kommen gleichzeitig den Rationalisierungsbestrebungen entgegen. Während forstliche Informationssysteme eine effizientere Datenhaltung, -verschneidung und kartographische Aufbereitung ermöglichen, versprechen die Möglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung eine schnellere und weitgehend automatisierte Bildinterpretation. Prinzipiell können als Datenquelle hierfür weiterhin Luftbilder dienen, indem diese nachträglich mit einem photogrammetrischen Scanner digitalisiert werden. Es sind aber auch zunehmend unmittelbar digital aufgenommene Daten mit geeigneten Eigenschaften verfügbar: hochauflösende Satellitenbilddaten und Bilddaten flugzeuggetragener digitaler Aufnahmesysteme.

2. Ziel des Projektvorhabens

Die Landesforstverwaltung in Rheinland-Pfalz hat die Möglichkeit zur Durchführung eines gemeinsam getragenen Forschungsprojektes mit der Abteilung Fernerkundung an der Universität Trier nutzen wollen, um verschiedene, an derzeitigen und künftigen Anforderungen der forstlichen Praxis orientierte Themenbereiche im Spannungsfeld zwischen forstlichen Informationssystemen und Möglichkeiten zur Nutzung von Fernerkundungsdaten (insbesondere satellitengestützter Aufnahmesysteme) zu untersuchen. Daher fanden die nachstehend aufgeführten Perspektiven direkten Eingang in die Arbeiten des Projektes:

Terrestrische Felderhebungen im Wald verursachen einen erheblichen Aufwand. Sie werden von hochqualifiziertem Personal durchgeführt (Universitäts- / Fachhochschulabschluss). Die diesbezüglichen Arbeiten sind daher auch auf entsprechend hochwertige, d.h. *gutachterliche und bewertende* Tätigkeiten auszurichten. Unter Gesichtspunkten von Effizienz und absolutem Aufwand wird die Erfassung numerischer Schätz- und Messdaten mittelfristig auf standardisierte *Stichprobenverfahren* hinauslaufen. Ebenso sind Wiederholungsaufnahmen nur in *Zeitintervallen von ca. 10 Jahren* und mehr vertretbar.

Die Zukunft digitaler Abtastsysteme im forstwirtschaftlichen Einsatz wird *neben klassischen Feldern wie Waldschadensforschung* v.a. in folgenden Bereichen gesehen. Hierbei gilt es, Synergien zu nutzen, Ressourcen auf das Notwendigste zu beschränken und Effizienzsteigerung zu betreiben, indem bestehende Daten durch integriertes Arbeiten zu besserer Information aufbereitet werden:

- Extrapolation von terrestrisch erhobenen Stichprobendaten zu flächendeckenden Informationen durch Skalierung von Fernerkundungsmerkmalen mithilfe der am Boden durchgeführten Messungen. Hochrechnung in die Fläche durch Ähnlichkeits-Berechnung zu den übrigen Pixeln der Aufnahme.
- Georeferenzierung dieser Erkundungsdaten in Form der Vergabe von „Adressen“ in forstlichen Geo-Informationssystemen. Hierdurch können Fernerkundungsdaten mit terrestrischen forstlichen Informationen, aber auch denen anderer Fachverwaltungen (z.B. Naturschutz und Wasserwirtschaft) verschnitten werden. Die Verbindung zu Planungs-, Vollzugs- und Infrastrukturdaten wird möglich.
- Die bislang durchgeführten terrestrischen Aufnahmen (alle 10 Jahre) ermöglichten nur eine relativ statische Aufnahme mit bestenfalls einem Periodenvergleich. Durch kurzfristiges, je nach Notwendigkeit auch fallweises Rechnen neuer Szenen wird es möglich, lokal und auf großer Fläche den aktuellen Waldzustand abzubilden. Der Kreislauf von Zustandsbeschreibung, Planung und Vollzug wird deutlich enger. Der Einsatz dieser Mittel dient somit der Betriebsleitung, kann aber auch als Monitoring-System (z.B. Nachhaltigkeitsprüfung) Verwendung finden.
- Die sogenannten Führungs-Unterstützungsaufgaben lassen sich effizienter gestalten. Der Bereich der Forst-Kartographie wandelt sich zum Geoinformationssystem. Kartographischer Aufwand zur Darstellung von Details kann entfallen. In einem Grundgerüst forstlicher Waldorte kann die Dynamik der Waldentwicklung durch Fernerkundung verfolgt und mit der erforderlichen Genauigkeit dargestellt werden.

- Die Ansprache von Waldstrukturen, die unterhalb der Haupt-Kronenschicht liegen (Nebenbestandsbäume, Zwischen- und Unterstand, Vorausverjüngung und Sträucher), ist bislang mit erheblichem terrestrischen Aufwand und hohen Ansprache-Fehlern verbunden. Gleichzeitig sind diese Daten jedoch wichtige Indikatoren für die Beurteilung von Wald-Ökosystemen und deren Veränderung. In der Entwicklung praxisrelevanter Verfahren zur Ansprache dieser Wald-Raumstrukturen (z.B. Vergleich „belaubt/nicht belaubt“; Radar-Technik) liegt noch eine große Zukunft.

Im Rahmen des Forschungsprojektes "Die Nutzung von MOMS-2P-Daten zur Waldzustandserfassung und Aktualisierung von Forsteinrichtungsdaten in Rheinland-Pfalz" sollte speziell untersucht werden, inwieweit hochauflösende, weltraumgestützte Fernerkundungsdaten als mögliche operationelle Informationsquelle für zukünftige Forstinformationssysteme (FGIS) in Rheinland-Pfalz genutzt werden können (PEERENBOOM, & HILL 1996, S.1). Dabei sollen spezielle Verfahrensschritte zur Bearbeitung der Daten erprobt werden, darunter

- Ansätze zur Erstellung hochauflösender Forstübersichtskarten mittels auflösungsverbessernder Datenfusion (Kap. 7.1)
- Untersuchungen zur Nutzung von Satellitenfernerkundung und Forst-GIS im Bereich des Waldschutzes (Kap. 7.2)
- Untersuchungen zum Potential von Reflexionsmodellen zur fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Größen
- Ansätze zur Forstinventarisierung (Kap. 7.4) und die erwähnte auflösungsverbessernde Datenfusion.

Den ersten Teil dieses Projektberichtes bilden jedoch grundsätzliche Betrachtungen zum Einsatz von Geoinformationssystemen und Fernerkundungsdaten für forstliche Anwendungen, zu den Grundkomponenten forstlicher Informationssysteme sowie der konkreten Umsetzung im Rahmen der Erstellung eines Forst-Informationssystems auf der Basis von Fernerkundungsdaten und Daten der Landesforstverwaltung.

3. Einsatz und Perspektiven von GIS und Fernerkundung in der Forstwirtschaft

Mit einem Waldanteil von rund 40% gehört Rheinland-Pfalz zu den walddreichsten Bundesländern. Zur erfolgreichen und nachhaltigen Bewirtschaftung dieser Flächen sind zum einen regelmäßig Informationen über den Zustand des Waldes erforderlich, zum anderen müssen diese Daten strukturiert abgelegt und ausgewertet werden, so dass die komplexen ökosystemaren Zusammenhänge analysiert werden können. Zusätzlich besteht aufgrund der komplexen Waldschadenssituation und den angestrebten neuen Waldstrukturen (naturnaher Waldbau) ein wachsendes Informationsbedürfnis an aktuellen Daten über Zustand und Entwicklung des Waldes. Demgegenüber steht eine zunehmende Verknappung der finanziellen Mittel. Nicht zuletzt deshalb ist die Methodik der aufwendigen und langwierigen forstlichen Inventurverfahren in den letzten Jahren verstärkt in Diskussion geraten.

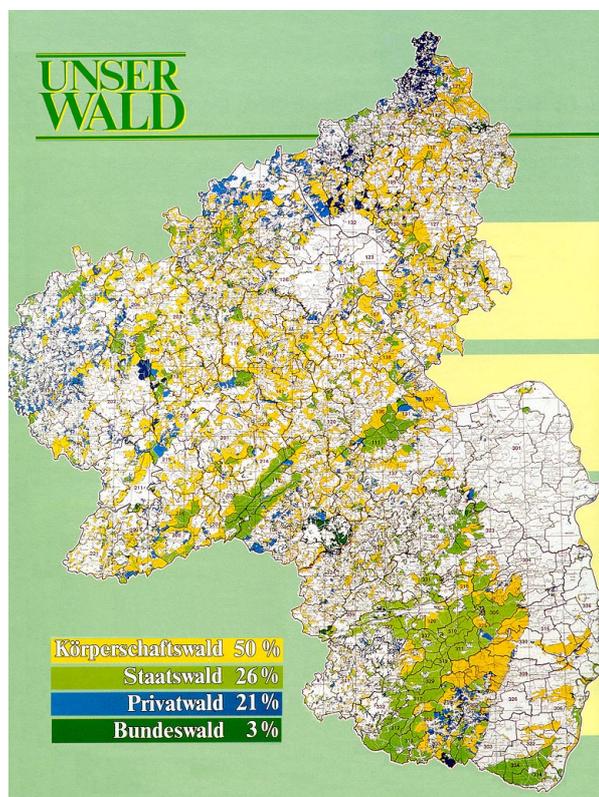


Abb. 1:
Waldverteilung in Rheinland-Pfalz

Ein wertvolles Hilfsmittel bei der Beschaffung von Informationen zum Zustand des Waldes, zeitgleich für große Flächen, kann naturgemäß aus großer Höhe aufgenommenes Bildmaterial darstellen. So ist denn auch die Forstwirtschaft national wie auch international eines der Haupteinsatzgebiete der Fernerkundung. Bereits kurz nachdem Satellitenbilder zur zivilen Bildauswertung zur Verfügung standen, wurden diese zur Bearbeitung forstlicher Fragestellungen eingesetzt. Genauso wie rund 150 Jahre zuvor die ersten Luftbilder über Waldflächen aufgenommen und für Fragen der Waldbewirtschaftung ausgewertet wurden.

Die enormen Fortschritte im Bereich der digitalen Photogrammetrie, der digitalen Bildverarbeitung und der Geographischen Informationssysteme (GIS) legen es nahe, auch im Forstsektor die Datenhaltung, -auswertung und -darstellung zunehmend auf eine digitale Basis zu stellen und im Rahmen forstlicher Informationssysteme (FIS, Forst-GIS) kontinuierlich fortzuführen.

Aus diesem Grund ist in Rheinland-Pfalz, wie auch in anderen Bundesländern, neben dem Trend zu größeren Bewirtschaftungseinheiten auch die Digitalisierung der Datenbestände in Forstlichen Informationssystemen und der forstlichen Kartographie eine nicht mehr aufzuhaltende Entwicklung (OESTER & KÖHL 1996, S. 83; KOCH & FRITZ 1998, S. 164; HILDEBRANDT 1996, S. 350; STOLITZKA 1991, S. 6). Die Verknüpfung von Geometriedaten (Lage im Raum) und Attributdaten (alle weiteren im Bezug zur konkreten Fläche stehenden Informationen z.B. Vorrat, Baumartenanteile, Zuwachs) über relationale Datenbanken bietet nahezu unbegrenzte Abfrage- und Kombinationsmöglichkeiten, die zur Analyse der Daten und der Erstellung von Forstkarten genutzt werden können. Aus der Erkenntnis heraus, dass digitale Forstkarten durch das Verknüpfen mit den Forsteinrichtungsdaten ein viel größeres Einsatzspektrum in der Forstverwaltung erhalten können, hat sich auch Rheinland-Pfalz der Einführung des länderübergreifenden FOGIS, das in zahlreichen Bundesländern bereits im Einsatz ist, (SCHLÜTER & HOLUBA 1996, HÖHNE 1996, HOLUBA 1995, SCHIERMEIER 1995) angeschlossen.

Mit der Umstellung der Forstverwaltungen auf digitale Systeme drängt sich die Frage auf, inwieweit auch die Datenerfassung durch alternative Verfahren ergänzt oder auch ersetzt werden kann. Neben dem Einsatz flugzeuggetragener digitaler Multispektralscannersysteme wird in diesem Zusammenhang auch die Verwendung von Satellitenbildern neu diskutiert (KOCH & FRITZ 1998, S.164; STOLITZKA 1991, S.5; KENNEWEG et al. 1993).

3.1 Forstliche Betriebsführung

Die mitteleuropäische Forstwirtschaft zeichnet sich durch intensive und kleinparzellige Nutzung der Waldflächen aus. Entsprechend dominiert auf betrieblicher Ebene die terrestrische Datenerhebung und die Nutzung von großmaßstäbigen Luftbildern. Die größte praktische Bedeutung kommt der Fernerkundung bei der mittelfristigen Planung des Forstbetriebes und den dafür notwendigen Inventur- und Kontrollarbeiten zu (TZSCHUPKE 1983, S.1239; HUSS 1984, S.248). Im Zuge dieser periodisch, meist alle 10 Jahre vorgenommenen „Forsteinrichtung“ erfolgt nach HILDEBRANDT (1996, S.360) und HUSS (1984, S.248):

- die Erfassung des aktuellen Zustands des Betriebes, seiner Bestände und Standorte
- die Überprüfung des Vollzugs der Planungen im vorangegangenen Zeitraum
- die Planung der Wirtschaftsführung (Hieb- u. Pflegemaßnahmen) für die kommende Dekade unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit der Erträge und der Vielfachfunktion des Waldes

Das Luftbild ermöglicht im Rahmen dieser Aufgabenstellung nicht nur eine weitaus effektivere Waldbegehung, sondern fungiert auch als Referenz und Bezugsbasis für die im Rahmen der Forsteinrichtung zu erstellenden und aktualisierenden Forstkarten. Aufwendige Geländevermessungen können durch photogrammetrische Auswertungen ersetzt werden. Die Luftbildsignaturen sind dem Forsteinrichter Entscheidungshilfe bei der Waldeinteilung und Informationsquelle für die Zustandsbeschreibung der ausgegliederten Einheiten (HILDEBRANDT 1996, S.362; HUSS 1984, S.250). So werden denn auch Luftbilder seit den Anfängen des Luftbildwesens für die Zwecke der Forsteinrichtung erfolgreich und regelmäßig eingesetzt (u.a. ZÖHRER 1980, HUSS 1984).

Die Entstehung und Fortführung des forstlichen Karten- und Flächenwerks mit Hilfe von Luftbildern sei anhand der Vorgehensweise der Forstdirektion Koblenz beispielhaft erläutert (vgl. hierzu Abbildung 2 sowie die Ausführungen von WOHLGEMUTH 1990, S.1079 f).

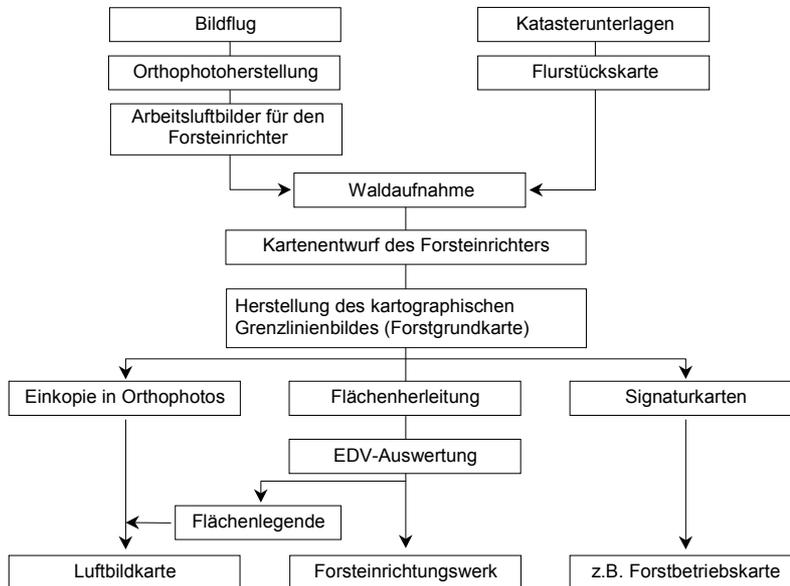


Abb. 2: Entstehung des forstlichen Kartenwerks am Beispiel der Forstdirektion Koblenz (nach: HILDEBRANDT 1996, S.286)

Unter bestimmten Vorgaben bezüglich Aufnahmezeitraum und Tageszeit werden jährlich Befliegungen mit S/W-Infrarotfilm im Bildmaßstab 1:34000 in Auftrag gegeben (Bildflug). Die Luftbildnegative werden mit Hilfe trigonometrischer Steuerdaten entzerrt und auf den Arbeitsmaßstab 1:10000 vergrößert. Abzüge der so entstandenen Orthophotonegative, ergänzt durch einkopierte Grenzlinien der *alten* Forstgrundkarte sowie aktuelle Eigentumsgrenzen (→ Flurstückskarte), dienen dem Forsteinrichter für die Waldaufnahme. Anhand der Befunde in den Orthophotos und im Gelände, wie z.B. stattgefundene Hieb-, Verjüngungsmaßnahmen und Schadereignisse, trifft der Forsteinrichter in Abstimmung mit den Eigentumsverhältnissen seine Entscheidungen zur Abgrenzung der neuen Waldeinheiten. Diese Befundeinheiten sind die neuen Unterabteilungen und Unterabteilungsflächen der unveränderlichen Abteilungen des Waldes. Sie sind gleichzeitig die aus der Einrichtung resultierenden Planungs- und Behandlungseinheiten (vgl. HILDEBRANDT 1996, S.352ff). Der Forsteinrichter trägt die Veränderungen und Neuerungen in die Arbeitsluftbilder ein und reicht den Reinentwurf an den kartographischen Sachbearbeiter weiter. Dieser fertigt hieraus die neue *Forstgrundkarte*, das beschriftete Linienbild der hierarchischen Waldeinteilung und des Wegenetzes. Diese Karte ist Ausgangspunkt für die Erstellung des *Flächenwerks* (Forsteinrichtungswerk) und unterschiedlicher *Forstbetriebskarten* (HUSS 1984, S.263).

Das Flächenwerk stellt eine tabellarische Auflistung aller Flächen und ihrer Kenndaten dar. Die Forstbetriebskarten sind thematische Varianten der Forstgrundkarte, welche durch Signaturen (Farben, Symbole) bestimmte Zustandsmerkmale (Hauptbaumart, Alter, Ertragsklasse) oder Planungsdaten (Hieb-, Pflegemaßnahmen) der Bestandseinheiten visualisieren (HUSS 1984, S.268; HILDEBRANDT 1996, S.352). Sie dienen dem laufenden Forstbetrieb. Im Falle der Forstdirektion Koblenz und Trier werden diese Betriebskarten durch die Einkopie der Forstgrundkarte in das Orthophoto ersetzt. Zustands- und

Planungsdaten werden in dieser *Luftbildkarte* durch eine ausführliche Flächenlegende aufgeschlüsselt. Diese Variante ist zwar weniger übersichtlich als eine eingefärbte Betriebskarte, wie sie für die südlichen Landesteile von der Bezirksregierung Neustadt erstellt werden, bietet aber eine objektivere und detaillierte Darstellung der Verhältnisse bei gleichzeitig schneller und kostengünstiger Herstellung (WOHLGEMUTH 1990, S.1079; HUSS 1984, S.268). Außer in Rheinland-Pfalz wird auch in Nordrhein-Westfalen und Österreich standardmäßig mit Luftbildkarten als Forstbetriebskarte gearbeitet (HILDEBRANDT 1996, S.355).

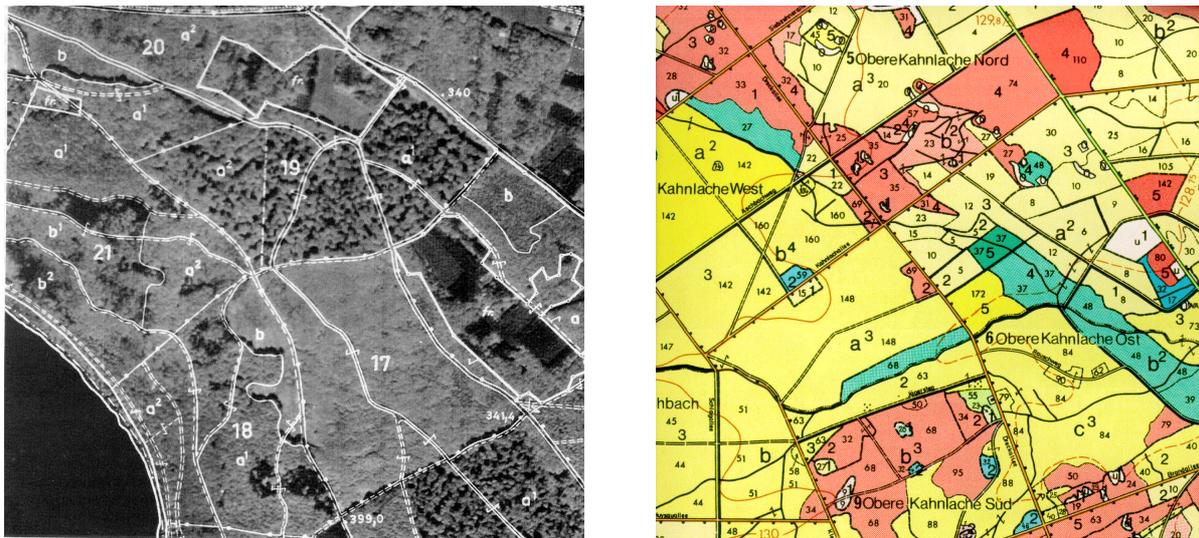


Abb. 3: Forsteinrichtungskarten in Rheinland-Pfalz. Orthophotokarte der Bezirksregierungen Koblenz und Trier (links), farbige Forstbetriebskarte der Bezirksregierung Neustadt (rechts)

Bis in die jüngste Zeit standen im optischen Bereich keine Satellitensysteme mit ausreichendem Detaillierungsgrad für Forsteinrichtungsverfahren in den Ländern zur Verfügung. Weiter eingeschränkt wurde der Einsatz durch die relativ geringe Planungssicherheit, da aufgrund der geringen Überfliegerungsrate eine Aufnahme im geforderten Zeitfenster aufgrund der in Mitteleuropa vorherrschenden Witterungsbedingungen nicht garantiert werden kann.

Durch die Entwicklung neuer, zusätzlicher Satellitensysteme sind diese Beschränkungen zukünftig sicher weniger bedeutsam.

3.2 Waldschadenskartierung

Neben den erläuterten kleinräumigen betrieblichen Zustandserhebungen und Planungen werden in Mitteleuropa auch überbetriebliche, regionale oder nationale Großrauminventuren durchgeführt (in Deutschland: Bundeswaldinventur). Sie dienen übergeordneten forstpolitischen, volkswirtschaftlichen oder raumordnungspolitischen Zwecken. Die Ermittlung nationaler Holzvorräte und -zuwächse als Basis holzmarktpolitischer Entscheidungen kann als eines der wichtigsten Ziele solcher Erhebungen in Mitteleuropa genannt werden (TZSCHUPKE 1983, S.1240; HILDEBRANDT 1996, S.363).

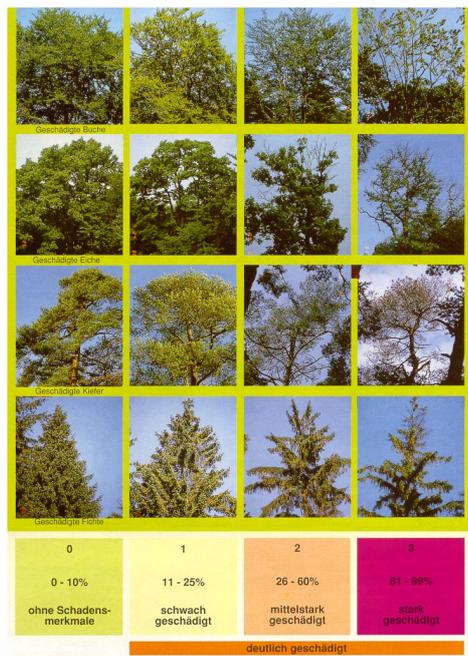


Abb. 4: Ansprache von Kronenverlichtung und Vergilbung im Gelände (MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, WEINBAU und FORSTEN 1987)

Auch die regelmäßige Erfassung der seit Beginn der 80er Jahre verstärkt aufgetretenen „neuartigen Waldschäden“ kann zu den Großrauminventuren gerechnet werden. Ungeachtet der landschaftsökologischen Tragweite der Schäden, ist die Verfolgung der Schadensentwicklung von höchstem Interesse, da durch die Schäden die Holzaufkommensprognosen zunehmend unsicher geworden sind, und damit eine wesentliche Grundlage forstpolitischer Entscheidungen (s.o.) zu entgleiten droht (AKCA & KENNEWEG 1983, S.1244). Bislang erfolgt die Inventur der Waldschäden in Deutschland mittels eines lagefesten Stichprobenetzes, an dessen Probepunkten eine einzelbaumbezogene Ansprache der Nadel- bzw. Blattverluste, Vergilbungen und anderer Symptome erfolgt (ACKERMANN et al. 1996, S.62). Die terrestrischen Erhebungen werden durch die Auswertung von Farbinfrarot-Luftbildern spezieller Befliegungen unterstützt, wobei die Kronenansprache nach einem genormten Interpretationsschlüssel erfolgt (HILDEBRANDT 1996, S.370 ff; HERTEL et al. 1992).

Die Nutzung von satellitengestützten Fernerkundungsdaten für eine *flächige* Aufnahme der Schäden wird bereits seit längerer Zeit geprüft, die Anwendung blieb aber bisher auf die entsprechenden Pilotprojekte beschränkt (LANDAUER & VOSS 1989, S.237; HILDEBRANDT et al. 1990, S.22). Da derartige Auswertungen aber nicht auf die relativ kleinen Betriebseinheiten bezogen durchzuführen sind, sondern oftmals ganze Waldgebiete betroffen sind, ist dies ein hoffnungsvolles Einsatzgebiet der Fernerkundung. Insbesondere bei der Erfassung von Windwurf- und Insektenfraßflächen sowie der Erfassung massiver Waldschäden im Bereich lokaler Schadstoffemittenten wurde nachgewiesen, dass auch Daten des Landsat-Systems erfolgreich eingesetzt werden können (SCHARDT 1990, STIEBIG 1988, COENRADIE 1992, KEIL et al. 1989^a, KEIL et al. 1989^b, HILDEBRANDT et al. 1990, FÖRSTER 1989, WIECZOREK 1990).

Da die Ursachen von Waldschäden extrem vielschichtig und komplex sind, erfordert die Analyse Werkzeuge, die es erlauben, die verschiedensten Einflussgrößen zu berücksichtigen und in ihrem Zusammenwirken zu betrachten. So sind neben dem Schadbild Daten zur Topographie (Digitales Geländemodell und daraus abgeleitete Größen), Informationen über

forstliche Standortsbedingungen, Boden, Geologie und Strahlungstemperatur ebenso zu berücksichtigen wie der Eingriff durch den Menschen. Um alle auf das Ökosystem Wald einwirkenden Faktoren und deren Interaktionen analysieren zu können, bedarf es der Unterstützung der EDV im allgemeinen und Geographischer Informationssysteme im speziellen (BÄHR et al. 1989).

3.3 Analoges Luftbild oder digitale Satellitenbilddaten

Satellitenbilddaten weisen gegenüber photographischen Luftbildern eine Vielzahl von Eigenschaften auf, welche auch aus Sicht der Forstwirtschaft als eindeutige Vorteile zu werten sind:

- hohe spektrale Auflösung
- simultane Erfassung großer Gebiete unter einheitlichen Bedingungen
- Bilddaten können als Messwerte aufgefasst werden
- regelmäßige Aufnahme in vergleichsweise kurzen Intervallen
- digitales Bildformat
- vergleichsweise geringe Kosten für Datenbeschaffung und Bearbeitung

Moderne Satellitenbilddaten weisen standardmäßig eine hohe spektrale Auflösung auf, d.h. mehrere schmale Spektralbereiche werden getrennt abgetastet. Dabei können auch Wellenlängenbereiche wie z.B. das mittlere Infrarot aufgezeichnet werden, welche über photographische Techniken überhaupt nicht erfassbar sind (COPPIN et al. 1996, S.264; HOWARD 1991, S.11).

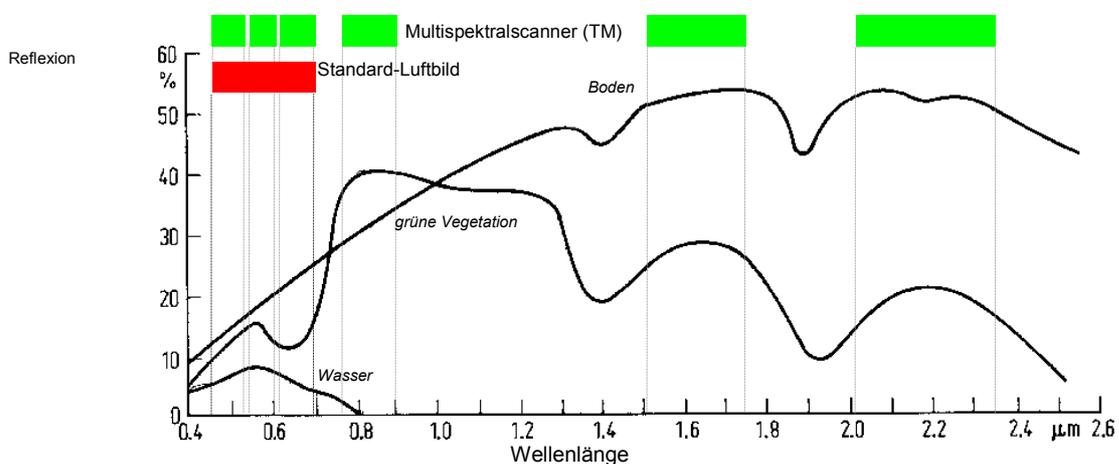


Abb. 5: Spektrale Auflösung eines Standard-Luftbildes und von TM-Daten in Relation zu ausgewählten Spektralsignaturen

Abbildung 5 zeigt, wie die Spektralsignatur von z.B. grüner Vegetation durch einen Multispektralscanner wie den des LANDSAT-TM weitaus vollständiger und differenzierter erfasst wird als durch ein panchromatisches Luftbild, wie es in den meisten Bundesländern immer noch standardmäßig verwendet wird. Damit stehen für die Bildanalyse auch entsprechend mehr diagnostische Spektralmerkmale zur Objekterkennung und -trennung zur Verfügung (vgl. TZSCHUPKE 1983, S.1240; HUSS 1984, S.252; LUCASCHEWSKI 1996, S.86).

Aufgrund der Sichtgeometrie ermöglicht die Aufnahme aus dem Weltraum die Erfassung großer Gebiete unter einheitlichen Konditionen (KOCH et al. 1997, S.27; HILDEBRANDT 1996, S.366).

Abbildung 6 zeigt die ungleich höhere Gebietsabdeckung der Erdbeobachtungssatelliten SPOT und LANDSAT-TM im Vergleich zu einer Standard-Luftbildbefliegung. Die digitale Aufzeichnung gewährleistet dabei radiometrische Linearität, die sonnensynchrone Umlaufbahn eine gleichbleibende Ortszeit der Aufnahme (STOLITZKA 1991, S.5; ALBERTZ 1991, S.47). Bei bekannter Detektorkalibrierung sowie bekanntem Atmosphärenzustand können die aufgezeichneten Strahldichten in Reflexionswerte konvertiert werden (HILL et al. 1996, S.25). Diese Rückrechnung gewährleistet die Vergleichbarkeit mehrerer Aufnahmen und ist Basis quantitativer Analysen. Dagegen führen die großen Bildmengen von Luftbildbefliegungen zu quantitativen Problemen der Verarbeitung (TZSCHUPKE 1983, S.1240; HILDEBRANDT & GROSS 1996, S.60). Alleine für die Forstdirektion Koblenz und Trier werden für die Forsteinrichtung 402 Orthophotos benötigt (WOHLGEMUTH 1990, S.1080). Schwierigkeiten bereitet auch die Vergleichbarkeit des Bildmaterials. Zahlreiche Faktoren wie z.B. Filmmaterialschwankungen, Kamerafehler, Filmprozessierungsunterschiede, abweichende Aufnahmezeiten etc. beeinflussen die Grau- bzw. Farbwerte von Luftbildern auf unnachvollziehbare Weise (vgl. HERTEL et al. 1992, S.182 f).

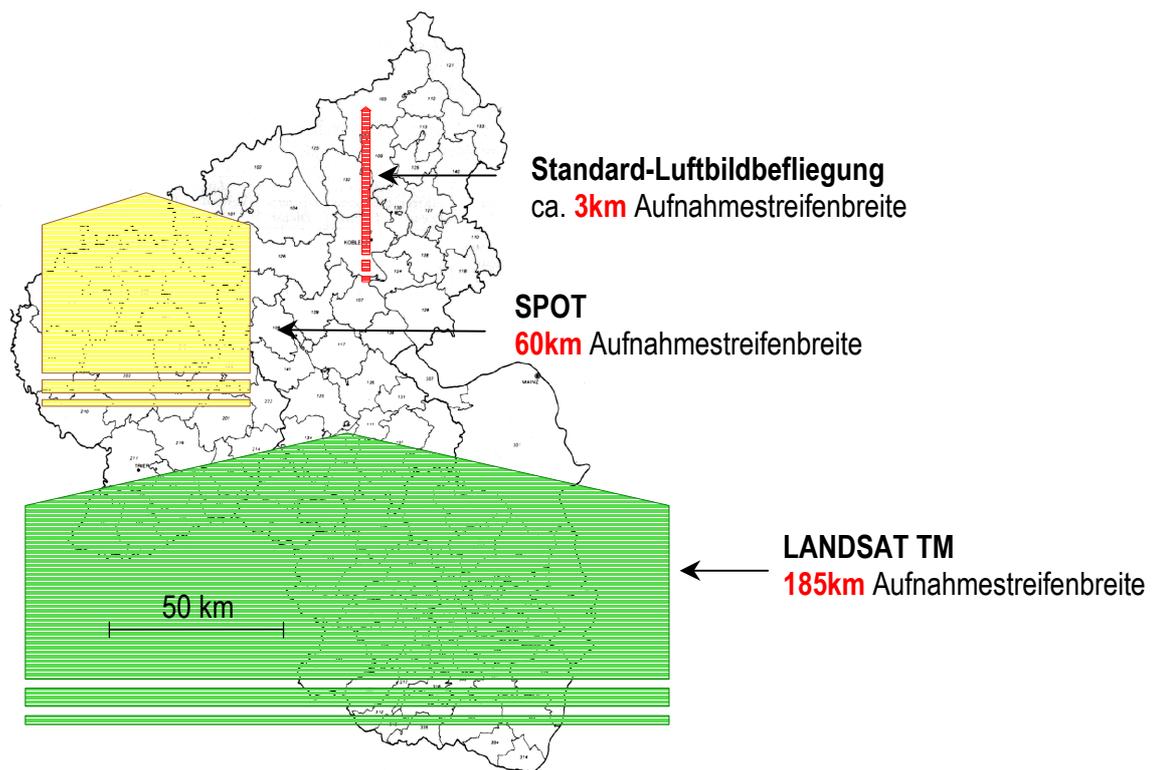


Abb. 6: Vergleich der Aufnahmebreiten ausgewählter Sensoren in Relation zu Rheinland-Pfalz und den alten Forstbezirksgrenzen (Kartengrundlage: MINISTERIUM für LANDWIRTSCHAFT, WEINBAU und FORSTEN 1987, S.81)

Insbesondere beim Monitoring von Objekten macht sich die fehlende Möglichkeit der Standardisierung nachteilig bemerkbar. Neben mangelnder Vergleichbarkeit sind auch der quantitativen Bildauswertung enge Grenzen gesetzt (TZSCHUPKE 1983, S.1240; HERTEL et al. 1992, S.183; HILDEBRANDT & GROSS 1996, S.60).

Die große Gebietsabdeckung durch satellitengetragene Sensoren hat den weiteren Vorteil, dass sich ein weitaus günstigerer Datenbeschaffungspreis pro Flächeneinheit ergibt. Die Einsparungseffekte werden durch eine entsprechend gebündelte und teils automatisierbare Auswertung zusätzlich erhöht (KOCH & FRITZ 1998, S.164; HOWARD 1991, S.318). Da die Satellitenbilddaten unmittelbar im Digitalformat vorliegen, können sie verzögerungsfrei in die neu eingerichteten forstlichen Informationssysteme eingebunden werden und dort digital bearbeitet und mit anderen digitalen Karten und Daten verschnitten werden. Die durchaus kostenintensive A/D-Wandlung entfällt (KOCH & FRITZ 1998, S.164; SCHARDT 1990, S.191; STOLITZKA 1991, S.5).

Die Aktualität der Informationen wird auch durch die regelmäßige Abtastung der Erdoberfläche in Zyklen von 2-3 Wochen unterstützt. Durch die wachsende Zahl ähnlicher Satellitensysteme verringert sich die Länge der Intervalle, so dass eine wolkenfreie Aufnahme im gegebenen Aufnahmezeitfenster eines Jahres zunehmend sicherer wird (vgl. KOCH & FRITZ 1998, S.164).

Flächendeckende Luftbildbefliegungen und deren Auswertung sind dagegen sehr kosten- und arbeitsintensiv (COPPIN et al. 1996, S.264; SCHARDT 1990, S.21). Der Aufwand und die Kosten erlauben deshalb einen Aktualisierungsturnus von lediglich 4-5 oder noch mehr Jahren. Die sich daraus ergebende mangelnde Aktualität der Luftbilder wird immer wieder kritisiert (z.B. TZSCHUPKE 1983, S.1239; HUSS 1984, S.252; HOWARD 1991, S.318).

Den genannten Vorzügen satellitengestützter Fernerkundung steht der Nachteil *geringer geometrischer Auflösung* gegenüber. Die hiermit verbundene mangelnde Genauigkeit bezüglich der Abgrenzbarkeit von Objekten sowie die fehlende Texturinformation (Abb. 7) limitieren die praktische Verwertung bisheriger Satellitenbilddaten in der mitteleuropäischen Forstwirtschaft (HUSS 1984, S.249; HOWARD 1991, S.318; KOCH et al. 1997, S.30; ROLLER & COX 1980, S.1001).

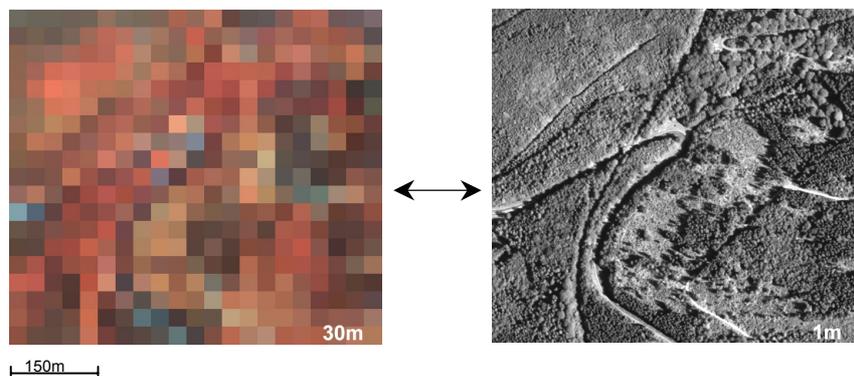


Abb. 7: Vergleich zwischen simulierten multispektralen TM-Daten (links) und panchromatischem Luftbild (rechts)

Nun ist zwar rein sensortechnisch eine Steigerung der geometrischen Auflösung möglich, jedoch ist hiermit zwangsläufig ein exponentieller Anstieg der Datenmenge verbunden (NAITHANI 1990, S.31). Der Gesamtdatenumfang, den der Sensor erzeugt, muss sich aber in der Waage halten mit den aktuell nachrichtentechnisch realisierbaren Übertragungsraten, den Archivierungsmöglichkeiten, und vor allen Dingen mit den Prozessierkapazitäten der Anwender (vgl. COLVOCORESSES 1977, S.1142; SCHOWENGERDT 1980, S.1325). Ein fiktives LANDSAT-Bild mit 1m Auflösung bei sonst gleicher Aufnahmekonstellation hätte die 900fache Datenmenge (ca. 240 Gigabyte) zur Folge, ein Datenumfang, der von keinem

heutigen Bildverarbeitungssystem bewältigt werden kann. Eine Verbesserung der geometrischen Auflösung geht deshalb zwangsläufig auf Kosten anderer datenmengenträchtiger Aufnahmeparameter, wie z.B. die Kanalanzahl oder die Aufnahmestreifenbreite, also *auf Kosten wesentlicher Systemvorteile der Satellitenbildtechnik*. Ein Vergleich verschiedener Sensorkonstellationen bezüglich geometrischer Auflösung, Aufnahmestreifenbreite und Wiederholungsrate belegt die beschriebenen Zusammenhänge (Abb. 8).

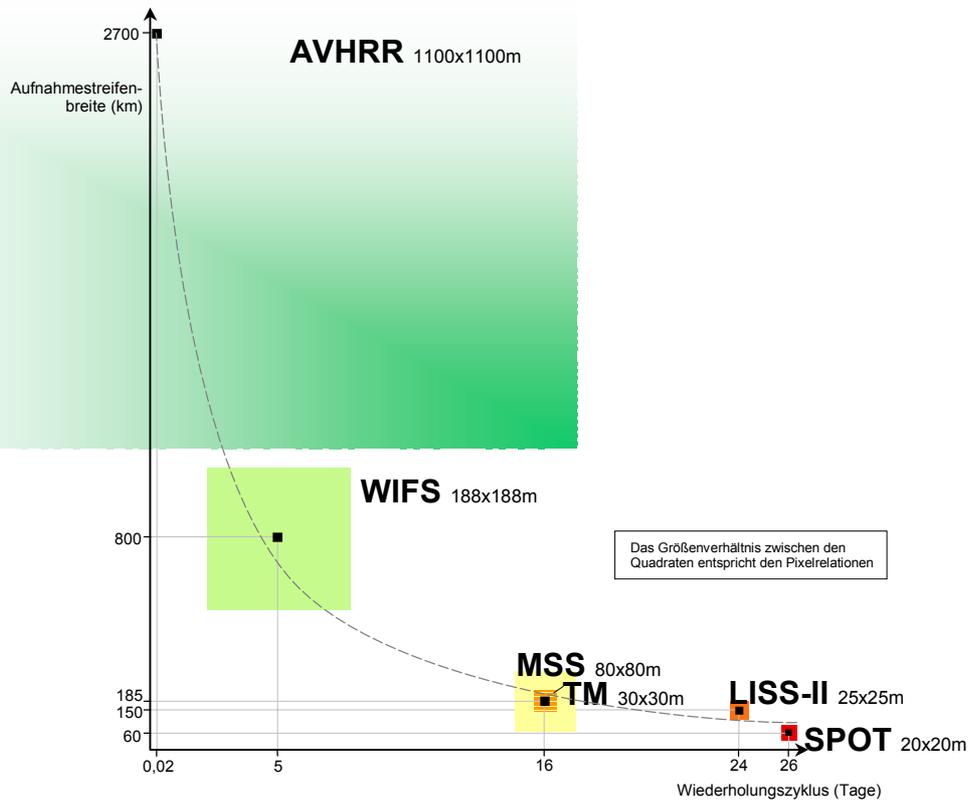


Abb. 8: Zusammenhang zwischen geometrischer Auflösung, Aufnahmestreifenbreite und Wiederholungsrate (Daten aus: STRATHMANN 1993 und KALYANRAMAN et al. 1995)

Die dargestellten Sensoren „kompensieren“ jeweils ihre höhere geometrische Auflösung (farbige Quadrate) durch eine niedrigere Aufnahmestreifenbreite (y-Achse), mit der Konsequenz eines verlängerten Wiederholungszyklus (x-Achse). Berücksichtigt man weiterhin die (nicht dargestellte) Kanalzahl und radiometrische Auflösung (Wertequantisierung), übermitteln alle Sensoren letztlich Gesamtdatenmengen ähnlicher Größenordnung. Die Fortschritte in der Nachrichtentechnik und den Bildverarbeitungsressourcen haben in den letzten Jahren den Spielraum bezüglich Datenumfang erhöht und werden dies auch in Zukunft tun, hinken dabei aber den wachsenden Anforderungen der Anwender stets hinterher.

Wenn also der Wunsch nach geometrisch höher auflösenden Weltraumsensoren laut wird, muss man sich darüber bewusst sein, dass dies nur ein mit Bedacht abzuwägendes Kompromissgeschäft sein kann. In diesem Kontext gewinnt die Frage an Bedeutung, welche Auflösung für welchen Zweck *tatsächlich* notwendig ist. Konsequenterweise sollte bei der Ermittlung der für eine Anwendung optimalen (und dabei auch realisierbaren) Sensorkonstellation bezüglich geometrischer Auflösung der Anspruch gelten: *so hochauflösend wie nötig - so grobauflösend wie möglich*.

Mit dem Wissen um die oben genannten Vorteile von Satellitenbilddaten und der Kenntnis, dass mit bereits seit längerem auf dem Markt befindlichen kommerziellen Softwareprodukten eine Einbindung von Satellitenbilddaten in die im Aufbau befindlichen forstlichen Informationssysteme problemlos möglich ist, erstaunt es, wie wenige Arbeiten sich bisher mit der Zusammenführung beider Bereiche beschäftigen.

4. Grundkomponenten forstlicher Informationssysteme

Unter einem Forstlichen Informationssystem versteht man ein auf Fragen des Waldschutzes und der forstlichen Betriebsführung zugeschnittenes Geographisches Informationssystem. Dieses wiederum ist ein „...rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden“ (BILL & FRITSCH, 1993). Ziel ist es, besonders bei komplexen und mehrschichtigen Analysen, die Wirksamkeit von räumlichen Beziehungen und Prozessen zu prüfen und im Rahmen von Modellen oder statistischen Untersuchungen auch nicht augenscheinliche Zusammenhänge aufzudecken (SAUER, 1989).

Von anderen Informationssystemen unterscheidet sich das Geo-Informationssystem im wesentlichen durch das verbindende Element - den räumlichen Bezug. Dieser ist über das Vermessungswesen, durch zwei- oder dreidimensionale Koordinaten, räumliche Kennziffern (Postleitzahl, Telefonvorwahl etc.) oder Namen (Orts-, Flurnamen, Gemarkungen etc.) herzustellen. Auch die in der mitteleuropäischen Forstwirtschaft übliche Waldunterteilung in Forstämter, Reviere, Abteilungen, Unterabteilung und Bestände kann zur räumlichen Zuordnung genutzt werden. Zentrales Kriterium eines GIS ist demzufolge die enge Integration von geometrischen und thematischen Attributen räumlicher Objekte. Geo-Informationssysteme besitzen die Funktionalität von CAD-Systemen, Computer-Kartographie, Datenbank Management und digitalen Bildverarbeitungssystemen. Die spezifische Zusammenfassung dieser Funktionen ist das eigentlich Neue an einem GIS.

Die Funktionalität liefert (nach ZEHENDER, 1985) ein relationales Datenbanksystem (Database Management System DBMS), dessen wichtigste Aufgabe die Speicherung, Verwaltung und Analyse der semantischen Objektinformation ist, und ein Graphikpaket, welches die topologische Datenstruktur sowie die graphisch geometrischen Funktionen und Algorithmen umfasst (Geometriedaten). Der in der Regel arbeits- und kostenintensivste Teil eines GIS ist die Bereitstellung oder Aufbereitung der Daten in digitaler Form.

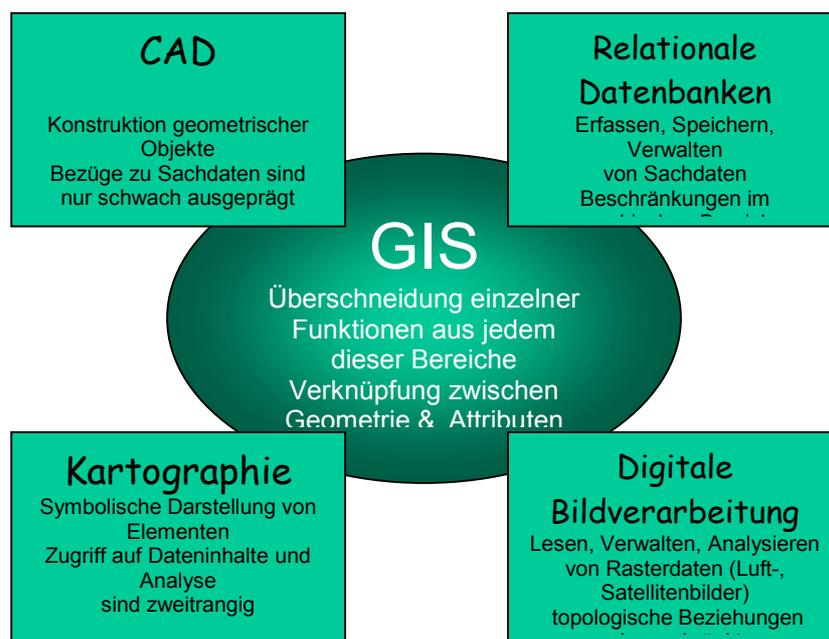


Abb. 9: Grundfunktionen eines Geographischen Informationssystems

Mit der zunehmenden Verbreitung Geographischer Informationssysteme wächst auch das Nutzer- und Anwendungsspektrum. Somit wachsen die Anforderungen an die Systeme ständig. Gleichzeitig besteht der Wunsch, die Produkte möglichst einfach zu gestalten und auch für „Nichtexperten“ beherrschbar zu machen. Um den speziellen Anforderungen einzelner Nutzer- oder Nutzergruppen gerecht werden zu können ohne eine einfache Bedienbarkeit des Programms zu verlieren, können heutige GIS-Systeme den Wünschen und Anforderungen des Kunden entsprechend angepasst werden. Diese kann zum einen ein „Weglassen“ von Funktionalität, zum anderen aber auch ein Schaffen neuer Funktionalität beinhalten.

4.1 Verfügbare Basisinformationen der Forstverwaltung

Der Begriff Forsteinrichtung ist Mitte des 18. Jahrhunderts entstanden. Ursprünglich verstand man darunter die erstmalige „Einteilung“ oder „Ordnung“ von Wäldern zur nachhaltigen Nutzung. Ziel war es, den bisher ungeordneten und unplanmäßig genutzten Wald für die planmäßige und stetige Nutzung durch den Menschen zu ordnen.

Heutige Aufgaben und Ziele der Forsteinrichtung lassen sich in drei Aufgabenbereiche untergliedern (KURTH 1994, S. 27 ff.):

1. Waldinventur oder Waldzustandserfassung,
2. Erfolgskontrolle oder Leistungsprüfung und
3. Festlegung von langfristigen Zielen und mittelfristigen Maßnahmen für die planmäßige Bewirtschaftung des Waldes.

Im forstlichen Sprachgebrauch wird unter langfristiger Planung ein Zeitraum von einem halben bis zu einem Jahrhundert und unter mittelfristiger Planung in erster Linie die Jahrzehntplanung verstanden, welche in die langfristige Planung eingebettet sein muss (KURTH 1994, S. 190).

Das somit in der deutschen Forstwirtschaft seit Jahrhunderten gültige Konzept der nachhaltigen Waldbewirtschaftung trägt dafür Sorge, dass, zumindest für den Staats- und Körperschaftswald, sehr detaillierte Informationen zur aktuellen Bestockung vorliegen.

In Rheinland-Pfalz ist die Forsteinrichtungs-Anweisung FA 72 (LFV R-P, 1974) Grundlage für die periodische Erfassung dieser Daten. Die Durchführung der Forsteinrichtung obliegt in Forsteinrichtungs-Referaten der Forstdirektionen (KURTH 1994, S.498). Der Forsteinrichtungszeitraum ist auf 10 Jahre, der Forsteinrichtungstichtag auf den 1. Oktober, festgelegt.

Die bedeutsamsten Bestandteile des Forsteinrichtungswerkes sind

- Flächen- und Kartenwerk
- Wirtschaftsbuch
- Tabellenwerk
- Schriftsatz

Die im Rahmen des Projektes genutzten Bestockungsinformationen wurden aus dem Flächen- und Kartenwerk sowie dem Tabellenwerk entnommen.

In Rheinland-Pfalz kommen unterschiedliche Forstkarten zum Einsatz: Luftbildkarten in den nördlichen Landesteilen (Bezirksregierung Koblenz und Trier) und kolorierte Betriebskarten in den südlichen Landesteilen (Bezirksregierung Neustadt). Beide Kartenwerke geben in erster Linie die Waldunterteilung wieder. Von der Forstamtsebene werden nachfolgende Flächeneinteilungen durchgeführt: Abteilung, Unterabteilung, Bestand, Besondere Aufnahmeeinheit. Während sich die Einteilung bis zur Bestandesebene vorwiegend an administrative und morphologische Grenzlinien orientiert und nicht verändert wird, erfolgt die weitere Untergliederung nach forstlichen Gesichtspunkten und die Grenzverläufe sind dementsprechend veränderlich.

Das Tabellenwerk liegt in Form einer Datenbank (Forsteinrichtung im **D**ialog **F**ERDI) bei den Forstdirektionen vor. Austausch mit anderen Programmen und Anwendungen ist problemlos möglich.

4.2 ATKIS

Das rasante Fortschreiten der elektronischen Datenverarbeitung in fast allen Bereichen hat zur Folge, dass die rein graphische Präsentation aktueller Informationen über die Topographie der Erdoberfläche, wie sie bisher in den überwiegend mehrfarbigen Drucken der topographischen Kartenwerke von den Landesvermessungsämtern bereitgestellt wurden, den Anforderungen nicht mehr genügen. Ebenso wie in allen anderen Bundesländern ist es so auch in Rheinland-Pfalz Ziel des Landesvermessungsamtes, das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem ATKIS aufzubauen. Der Aufbau von ATKIS ist auf Grund der notwendigen Erfassung umfangreicher Informationen ein zeitintensiver Prozess, wodurch ein stufenweiser Aufbau gewählt wurde. Die erste Ausbaustufe, die für Rheinland-Pfalz seit Ende 1995 flächendeckend vorliegt, beinhaltet durch die Aufnahme sämtlicher Straßen, Wege Eisenbahnen, Gewässer und Grenzen eine geometrisch exakte linienhafte Basisstruktur der Landschaft (FREVEL 1997).

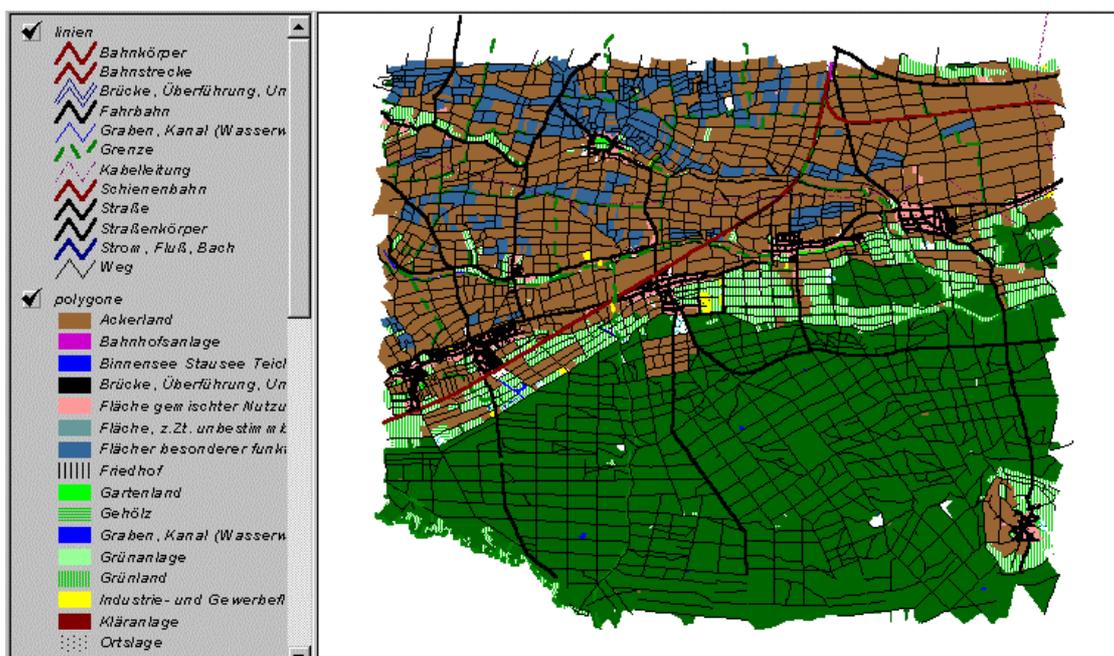


Abb. 10: ATKIS-Daten Bienwald (TK 25: 6914). Dargestellt sind die flächen- und linienhaften Elemente.

Die flächenhaften Elemente sind entsprechend ihrer Nutzung zunächst nur grobflächig erfasst und beschrieben. Für forstliche Fragestellungen ist die Informationstiefe der ersten Ausbaustufe nur eingeschränkt nutzbar, da die Unterteilung in Nadel-, Laub- und Mischwald, wie sie im ATKIS vorgenommen wurde, kaum mit den Informationen der Forsteinrichtung in Bezug zu setzen ist. Da jedoch zukünftig eine Kompatibilität zwischen Forst-Informationssystem und ATKIS sowie die Möglichkeit des Datenaustauschs angestrebt ist, wurden dennoch die ATKIS-Daten in das Projekt integriert. Besonders wertvoll waren deren Daten bei der geometrischen Entzerrung der Bilddaten, da das aufwendige Ablesen von Koordinaten aus analogen Karten entfiel.

4.3 Operationell genutzte Fernerkundungsinformationen

Im Folgenden soll ein Abriss über den Einsatz von Fernerkundungsdaten in der mitteleuropäischen Forstwirtschaft gegeben werden. Neben operationell genutzten Kamerasystemen und Sensoren werden auch zukünftige Perspektiven aufgezeigt.

Für flächen- und streifenweise Bildflüge kommen ausschließlich Reihenmesskammern mit großen Bildformaten (23*23 cm) zum Einsatz. Im Auftrag der rheinland-pfälzischen Forstverwaltung wird jährlich rund eine Fünftel der Waldfläche befliegen. Zum Einsatz kommen Schwarzweiss-Infrarot und Farb-Infrarot-Filme, so dass Vegetationsunterschiede besonders deutlich erkennbar sind. Die Bildmaßstäbe variieren je nach Zielsetzung. Für Inventuraufgaben mit baumweiser Ansprache von Krankheits- oder Schadsymptomen und Klassifizierung des Kronen- und Belaubungszustandes werden Bildmaßstäbe im Bereich 1:3000 bis 1:6000 erflogen. Für Forsteinrichtung, Herstellung und Fortführung forstlicher Wirtschaftskarten einschließlich forstlicher Orthophotokarten sowie der Inventur flächenhafter und den Kronenschlussgrad senkender Waldschäden kommen kleinere Maßstäbe im Bereich 1:10000 bis 1:15000 zum Einsatz (HILDEBRANDT 1996, S. 116).

Innerhalb der Vegetationsperiode ist die Terminierung der Luftbildaufnahme, auf das Auswertungsziel abgestimmt, nach phänologischen Aspekten vorzunehmen. Sollen Daten verschiedener Jahre miteinander verglichen werden, wie bspw. bei der jährlichen Waldschadenskartierung, so ist in der Regel der Zeitraum um den Vegetationshöhepunkt zu wählen. Eine ausführliche Beschreibung und einen umfassenden Literaturüberblick zu diesem Thema geben u.a. HUSS 1984, HILDEBRANDT 1996, HEIDINGSFELD 1989, HEIDINGSFELD 1993.

4.4 Perspektiven der Arbeit mit digitalen Abtastsystemen

Während Luftbilder wie beschrieben seit Jahrzehnten erfolgreich in der forstlichen Praxis der Bundesrepublik Deutschland eingesetzt werden, findet ein operationeller Einsatz von Satellitendaten noch nicht statt, obwohl eine Vielzahl von Erdbeobachtungssatelliten regelmäßig Daten über den Zustand der Erdoberfläche liefern. Als Ursache hierfür wird in erster Linie die geringe geometrische Auflösung der bisher zur Verfügung stehenden Aufnahmesysteme genannt. So waren denn auch vor allem großräumige Waldinventuren und Schadenskartierungen mit einem Maßstab von 1:50000 oder kleiner die wesentlichen Einsatzbereiche von Satellitendaten (SCHARDT 1990) und Anwendungen blieb auf großräumige Projekte mit synoptischem Informationsbedarf beschränkt.

Im Rahmen des Projektes wurden Daten unterschiedlichster Fernerkundungssensoren eingesetzt. Neben den „klassischen“ Erdbeobachtungssatelliten Landsat und SPOT sind inzwischen Systeme mit erheblich verbesserter geometrischer Auflösung verfügbar bzw. noch höher auflösende in Planung (CARLSON 1997), so dass sich zukünftig auch innerhalb der feinparzellierten mitteleuropäischen Forstwirtschaft neue Anwendungsgebiete für die Fernerkundung eröffnen könnten und eine detailliertere und großmaßstäbige Bearbeitung forstlicher Fragestellungen ermöglicht wird. Einen Überblick über geometrische und radiometrische Auflösung bestehender und geplanter Sensoren gibt Abbildung 11. Erläuterungen zu den einzelnen Sensoren geben die nachfolgenden Kapitel.

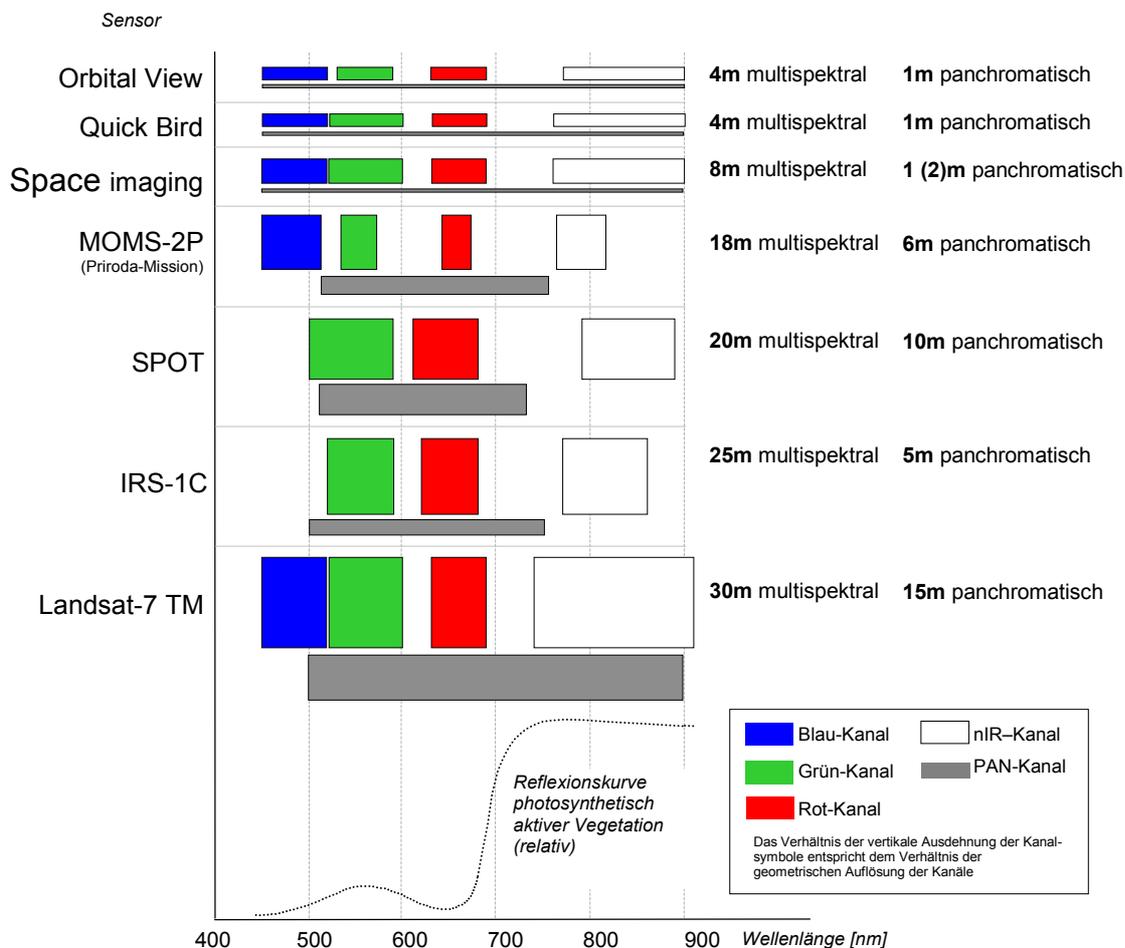


Abb. 11: Spektrale und geometrische Auflösung einer Auswahl bestehender und geplanter Sensoren (Daten aus: STRATHMANN 1993, FRITZ 1996, APLIN et al. 1997, KALYANARAMAN et al. 1995 und DLR-DFD 1997)

4.4.1 Landsat TM / SPOT. Am 23.7.1972 wurde der erste zivile Erdbeobachtungssatellit Landsat 1 (=ERTS 1) erfolgreich ins Orbit gebracht. Somit kann mittlerweile eine Zeitschiene von über 25 Jahren abgedeckt werden. Wie bei den meisten zur Erdbeobachtung entwickelten Satelliten, befinden sich auch die bisher erfolgreich installierten Landsat- und SPOT-Satelliten auf einer sonnensynchronen fast-polaren Umlaufbahn um die Erde. Die Flugparameter sind beim Landsat-System hierbei so ausgelegt, dass identische Geländeausschnitte alle 16 Tage zur gleichen Ortszeit (ähnliche Beleuchtungsverhältnisse) überflogen werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Datenverfügbarkeit durch meteorologische Bedingungen (Wolkenbedeckung) stark eingeschränkt sein kann.

Die eigentliche Aufnahmeeinrichtung des Landsat-Systems ist ein optisch mechanischer Scanner. Während bei einer Photographie zeitgleich ein mehr oder weniger großes Bild auf

einen lichtempfindlichen Film aufgenommen wird, erfassen die Scanner stets nur die von einem kleinen Bildelement (Pixel) reflektierte Sonnenstrahlung. Erst durch das Zusammenfügen vieler derartiger Einzelmessungen entsteht das Abbild eines größeren Gebietes. Während die ersten Landsat-Satelliten mit dem sogenannten Multi Spectral Scanner (MSS) ausgerüstet waren, der eine räumliche Auflösung von 79*79 Meter erreicht, wurde 1983/84 mit Landsat 4 und 5 die Auflösung mit dem Thematic Mapper (TM) auf 30*30 Meter verbessert. Landsat 7 verfügt zusätzlich über einen panchromatischen Kanal mit 15 Meter Auflösung. Die spektrale Auflösung des TM ist besonders für vegetationskundliche Auswertungen interessant. Detektoren zeichnen die am Satelliten ankommende, von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung in sechs Wellenlängenbereichen auf. Anders als das menschliche Auge ist der Sensor auch auf Spektralbereiche außerhalb des sichtbaren Lichts sensibilisiert. Zusätzlich zum sichtbaren Rot, Grün und Blau werden auch Informationen im nahen, mittleren und thermalen Infrarot aufgezeichnet.

Anders als bei Landsat können mittels des französischen SPOT-Systems auch Stereomodelle erzeugt werden. Die Aufnahmeeinrichtung der beiden optisch-elektronischen HRV-Scanner (HRV=high resolution visible) kann von der Bodenstation aus durch einen vor der Eingangsoptik angebrachten Schwenkspiegel stufenweise bis zu 27° seitlich nach rechts und links der Flugbahn verändert werden, so dass identische Geländeausschnitte von benachbarten Flugbahnen aus mit einem für stereophotogrammetrische Messungen und Kartierungen brauchbaren Basisverhältnis aufgenommen werden können. Des Weiteren kann durch die häufigere Aufnahmemöglichkeit die Wahrscheinlichkeit, wolkenfreies Bildmaterial zu erhalten, wesentlich erhöht werden.

Seit dem erfolgreichen Start des ersten französischen Erdbeobachtungssatelliten SPOT 1 (Satellite pour observation de terre) im Jahr 1986 wurden zwei weitere Satelliten in eine 822 km hohe Umlaufbahn um die Erde gebracht. Die mit opto-elektronischen Zeilenabastern ausgestattete Satelliten nehmen die Erdoberfläche ebenfalls streifenweise rechtwinklig zur Flugrichtung auf. Im Gegensatz zu opto-mechanischen Scannern werden die einzelnen Bildelemente jedoch nicht nacheinander, sondern zeitgleich erfasst. Dies wird durch die Verwendung von Zeilensensoren (linear detector arrays) ermöglicht, die aus einer Vielzahl, bei SPOT 3000, kleinster Photoelemente bestehen. Für jeden der drei Spektralkanäle wird ein eigener Zeilensensor eingesetzt.

Zusätzlich verfügt der Satellit über einen panchromatischen Kanal mit 10 Meter Bodenauflösung.

4.4.2 MOMS / IRS 1C/1D. Wegen der Pannenserie auf der russischen Raumstation MIR wurde anstelle von nicht lieferbaren Daten des dort installierten MOMS 2-P Sensors ersatzweise solche des indischen Systems IRS-1C/1D (Indien Remote Sensing Program) von der DLR zur Verfügung gestellt. Vergleichbar mit SPOT wird zeitgleich im multispektral und panchromatisch aufgezeichnet. Für forstliche Anwendungen ist vor allem der panchromatische Sensor von Interesse. Mit einer Bildelementgröße von 5,8 * 5,8 Metern verspricht dieser im Vergleich zu herkömmlichen Systemen, zu einer verbesserten Identifizierung und Abgrenzung von unterschiedlich strukturierten Waldbeständen beizutragen. Der multispektrale LISS 3 Sensor (Linear Imaging Self Scanning Sensor) nimmt Reflexionswerte in vier Spektralbereichen auf. Mit einer räumlichen Auflösung von 25 Metern unterscheidet er sich kaum von SPOT und TM. Abstriche sind hinsichtlich der radiometrischen Qualität der Daten zu machen. Während bei Landsat als auch bei SPOT die Daten im 8 Bit Format aufgezeichnet werden, was für 256 Graustufen steht, unterscheidet das indische System nur 128 im multispektralen und 64 Graustufen im panchromatisch Modus.

Somit sind die Differenzierungsmöglichkeiten erheblich eingeschränkt, was insbesondere in niedrig reflektierenden Nadelwaldgebieten eine Auswertung erschwert. Die systemkorrigierten panchromatischen IRS 1C Szenen weisen hier eine feine, unregelmäßige Streifung in Flugrichtung auf und offenbaren so die radiometrischen Qualitätsdefizite des PAN-Sensors.

4.4.3 DPA / IKONOS. In den letzten Jahren werden verstärkt Sensoren mit einer auch gegenüber den indischen Satelliten stark verbesserten geometrischen Auflösung diskutiert und entwickelt. Bodenauflösungen im Bereich von 1 - 5 Meter sollen hier erzielt werden (KONECNY 1996). Nach zahlreichen Fehlschlägen (Mission EARLYBIRD und IKONOS-1) ist mit IKONOS-2 (jetzt IKONOS) seit September 1999 der erste Sensor funktionstüchtig im All und liefert vielversprechende Bilder mit der so lange angestrebten Auflösung im Ein-Meter-Bereich.

Daten vergleichbarer räumlicher Auflösung konnten bisher nur mittels Flugzeugen erhoben werden. Zur Unterstützung der deutschen Nutzerbereiche bei der Realisierung ihrer Pilotprojekte im Rahmen des MOMS-2P-Weltraumprogramms wurde durch die DARA (DLR-BO) ein Aufnahmeprogramm mit der Flugzeugversion DPA (Digital Photogrammetric Assembly) des MOMS-Weltraumsensors initiiert. Die Befliegungskampagne für 19 Nutzerbereiche wurde im Zeitraum 09.-12.07.1997 auf insgesamt 21 Teilflächen der MOMS-2P-Testgebiete in Deutschland durchgeführt. So auch ein ca. 36 km² großes Gebiet im Untersuchungsgebiet Hillesheim. Die Aufnahme erfolgte am 10.7.1997 um 10:20 Uhr morgens aus einer Höhe von 13000 Fuß.

Diese Befliegungskampagne gilt als erster Routineeinsatz einer digitalen Luftbildkamera für Multispektral- und Stereoaufnahmen. Von den gleichzeitig aufgenommenen Stereo- und Multispektraldaten wurden im Rahmen dieses Projektes jedoch nur die Multispektraldaten genutzt.

Die Konstellation des flugzeuggetragenen DPA-Sensors entspricht weitgehend dem weltraumgestützten MOMS-2P-System. Beide Systeme arbeiteten nach dem „pushbroom“-Abtastprinzip. Hierbei existiert für jedes abzutastende Pixel einer Bildzeile ein eigener CCD-Detektor, so dass die gesamte Bildzeile simultan aufgenommen werden kann - eine aufwendige und anfällige Schwenkspiegelmechanik entfällt somit (RICHARDS 1993, S.14). Kennzeichnend ist weiterhin der gleichzeitige Einsatz eines Multispektral- und Stereomoduls. Das DPA-Multispektralmodul zeichnet bei einem Bildwinkel von 37° simultan 4 Kanäle mit je 6000 Pixeln pro Zeile auf:

- Kanal 1 (blau) : 440-525nm
- Kanal 2 (grün) : 520-600nm
- Kanal 3 (rot) : 610-685nm
- Kanal 4 (nIR) : 770-890nm

Das DPA-Stereomodul arbeitet panchromatisch (515-780nm) in 3 Blickrichtungen. Während eine Einheit des Stereomoduls nadirgerichtet ist, blicken die beiden anderen mit +/- 25° vorwärts und rückwärts entlang der Flugrichtung. Bei gleicher Gebietsabdeckung wie das Multispektralmodul, zeichnen die 3 panchromatischen Kanäle 12000 Pixel je Bildzeile auf. Die resultierenden hochauflösenden Stereodaten sind insbesondere für photogrammetrische Anwendungen vorgesehen. In Verbindung mit den simultan aufgezeichneten „thematischen“ Multispektraldaten ergibt sich somit eine leistungsstarke Gesamteinheit (LFK-LENKFLUGKÖRPERSYSTEME GmbH 1997). Der MOMS-2P-Sensor weicht von dem beschriebenen DPA-System bezüglich Brennweite der Optik, Blickwinkel und

Konvergenzwinkel des Stereomoduls ab, entsprechend dem andersartigen Aufnahmeorbit. Geringfügige Abweichungen bestehen auch in der Bandbreite der Kanäle. Die Anzahl der Aufnahmeelemente beträgt beim MOMS-2P-Sensor je Zeile und Modul konstant 6000 Pixel. Doppelte geometrische Auflösung hat lediglich das nadirgerichtete PAN-Modul, realisiert durch die Halbierung der Aufnahmestreifenbreite (DLR-DFD 1997, S.41 ff).

5. Forst-Informationssystem auf der Basis von Fernerkundungsdaten und Daten der Landesforstverwaltung

Durch ein Forstlich-Geographisches Informationssystem (FOGIS) soll der rasche Zugriff auf die von einem bestimmten Waldgebiet vorliegenden Daten gewährleistet werden. Zusätzlich soll aber auch die Möglichkeit bestehen, sich aus der Informationsflut das gerade benötigte Detail herauszufiltern, wobei sowohl räumliche als auch semantische Abfragen in Betracht kommen.

Eine regelmäßige Aktualisierung der Daten ist nicht immer möglich. Sei es aus finanziellen Gründen, oder, wie im Falle der Forsteinrichtungsdaten auch nicht gewünscht, da letztere auch als Kontrollwerkzeug für die nächste Forsteinrichtung dient. Aus diesen Gründen kommt es immer wieder vor, dass infolge von Naturereignissen wie Windwurf oder Insektenfraß, die Daten rasch nicht mehr die Realität widerspiegeln und somit zur Bearbeitung waldbaulicher und ökologischer Fragestellungen nicht mehr herangezogen werden können.

Eine Lösung dieses Problems könnte die verstärkte Nutzung von Fernerkundungsdaten sein. Sie sind ein hervorragendes Medium zur Dokumentation des Waldzustandes eines bestimmten Stichtages. Durch eine Zeitreihe von Luft- oder Satellitenbildern lassen sich räumliche Veränderungen erfassen und jederzeit visualisieren. Somit soll mittels des FOGIS nicht nur der aktuelle Zustand des Waldes abrufbar sein, sondern auch Auskunft darüber geben werden, wie er sich entwickelt.

5.1 Aufbereitung forstlicher Basisdaten der Landesforstverwaltung

In Rheinland-Pfalz wird, ebenso wie in anderen Bundesländern, derzeit daran gearbeitet die Herstellung der Forstkarten rechnergestützt zu bewerkstelligen. Die hierfür erforderlichen Digitalisierungsarbeiten werden in den Forsteinrichtungsreferaten der zuständigen Forstdirektionen durchgeführt. Somit liegen für die einzelnen Forstämter bzw. Forstreviere Karten entweder bisher nur analog vor oder sie sind mittels uneinheitlicher Software in unterschiedlicher Detailtiefe digitalisiert worden, so dass sie in keinem einheitlichen Format vorliegen.

Da die Karten ursprünglich nicht für den Einsatz in Geographischen Informationssystemen gedacht waren, sind Verknüpfungen mit Sachdaten bei der Konzeption der Layerstruktur nicht berücksichtigt worden, wodurch sich teilweise erhebliche Probleme ergaben und die Daten aufwendig aufbereitet werden mussten, wodurch sich Verzögerungen in der Projektbearbeitung ergaben. Seit diese Probleme bekannt sind, wurden Veränderungen bei der Digitalisierung der Grundkarten eingeführt, so dass damit zu rechnen ist, dass die Einbindung der CAD-Daten in das GIS zukünftig weniger Zeit in Anspruch nimmt. Im Anhang befindet sich eine technische Anleitung, wie der Datentransfer aus AUTOCAD nach ARC/INFO/ArcView durchzuführen ist.

Nach den Digitalisierungsarbeiten (Abb. 12) mussten den einzelnen Objekten, in der Regel stellen sie Bestände dar, Kennnummern zugewiesen werden. Sinnvollerweise wurden hierzu die Kennnummern vergeben, die sich in gleicher Form auch in der Forsteinrichtungsdatenbank FERDI (Forsteinrichtung im Dialog) wiederfinden. Hierdurch wurde die wesentliche

Nach der Codierung sämtlicher Teilfläche sind die aus dem Programm FERDI exportierten forstlichen Betriebsdaten mit der digitalen Forstbetriebskarte verknüpft. Nach diesem Arbeitsschritt sind alle im Zuge der periodischen Bestandsaufnahme erhobenen Daten mit einem Flächenbezug versehen (Abb. 13). Dementsprechend lassen sich die unterschiedlichsten Themenkarten erstellen. Als Beispiel sei hier auf die nach Alter oder Baumartenanteil klassifizierte kartographische Darstellung der Betriebsdaten (Forstämter Hagenbach und Schaidt im Bereich des Bienwaldes) verwiesen (Abb. 14).

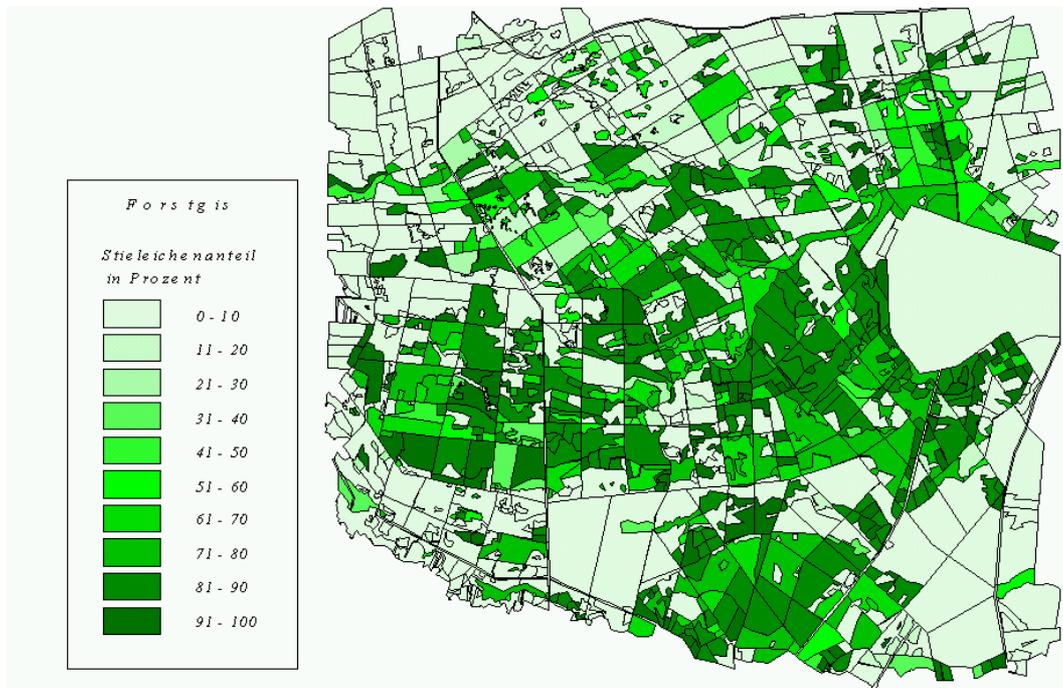


Abb. 14: Mittels GIS erstellte Karte der Stieleichenanteile in Prozent (Forstämter Hagenbach und Schaidt)

Zusätzlich wurden im Rahmen der drei Teilstudien ergänzende Fachinformationen in Form digitaler Karten eingebunden. Durch Nutzung von Basisfunktionalität Geographischer Informationen (Verschneiden, Puffern etc.) lassen sich nun derartige Informationen mit denen der Forsteinrichtung verbinden. Hierdurch lassen sich gezielt Flächen selektieren, die das geforderte Kriterium (z.B. Anteil Stieleiche >90% und Durchschnittsalter >150 Jahre und wechselfeuchte Standorteigenschaften und vom Schwammspinner wiederholt befallen). Falls gewünscht lässt sich das Ergebnis in Form einer Karte oder einer Tabelle ausgeben.

5.2 Aufbau eines FOGIS-Prototypen auf der Basis von Fernerkundungs- und Forstdaten sowie ergänzender Sachdaten im Bereich des Forstamtes Hillesheim

Im Rahmen des Projektes wurde ein Forstliches Informationssystem auf der Basis der Softwareprodukte ARC/INFO (Version 7) und ArcView (Version 3.1) der Firma ESRI erstellt. Als Arbeitsplattform diente eine UNIX-Workstation.

ARC/INFO verwaltet die Vektordaten mittels eines sogenannten topologisch relationalen Modells, welches auf den topologischen Bezügen Verbundenheit, Flächendefinition und Nachbarschaftsbeziehung basiert. Über Relationen zwischen Knoten und Kanten lassen sich beliebig komplexe Gebilde erstellen. Diese redundanzfreie Verwaltung der Geometriedaten

reduziert den erforderlichen Speicherplatz und die erforderlichen Zugriffszeiten. Den einzelnen Objekten können neben automatisch erstellten Sachdaten (z.B. Umfang und Fläche eines Polygons, Länge einer Kante) weitere Sachdaten in Form von Attributen zugeordnet werden.

Bei berechneter Topologie stellt ein GIS Kommandos zur Verfügung über die Objekte aktualisiert, partiell gelöscht, herausgeschnitten oder aufgrund eines bestimmten Kriteriums miteinander verbunden werden können. Während ARCINFO im wesentlichen zur Dateneingabe, -bearbeitung und -analyse eingesetzt wurde, dient ArcView als Auskunftsarbeitsplatz, an dem sich die Daten auf einfache Weise visualisieren und ausdrucken lassen. Eine Veränderung der Daten ist hier bewusst nicht gestattet.

Grundvoraussetzung für das Verknüpfen der o.g. digitalen Daten, ist deren gemeinsamer Raumbezug, der in unserem Fall über das Gauß-Krüger-Koordinatensystem hergestellt wurde. Während die digitalen Forstkarten bereits im Gauß-Krüger-System erfasst wurden, erfolgte die Geocodierung der Luft- und Satellitenbilder mittels der in Kapitel 6 beschriebenen Entzerrungsverfahren.

Die Forsteinrichtungsdaten dienen lediglich als Basisinformation. Bei der Bearbeitung der einzelnen Teilstudien wurden für die jeweilige Fragestellung bedeutsame Daten in das System eingebunden. Um die teilweise recht umfangreiche Datenmenge übersichtlich bereitstellen zu können, wurde die Programmoberfläche von ArcView an die spezifischen Anforderungen angepasst, so dass die Bedienung auch Personen möglich ist, die nicht über Erfahrung mit GIS verfügen. So ist beispielsweise die Auswahl eines bestimmten Kartentyps und Maßstabs über das Menü möglich. Je nach gewähltem Maßstab werden die passenden Bilddaten automatisch hinzugeladen, z. B. Landsat TM für kleinmaßstäbige Darstellungen, Luftbilder oder IRS 1C PAN bei großem Maßstab.

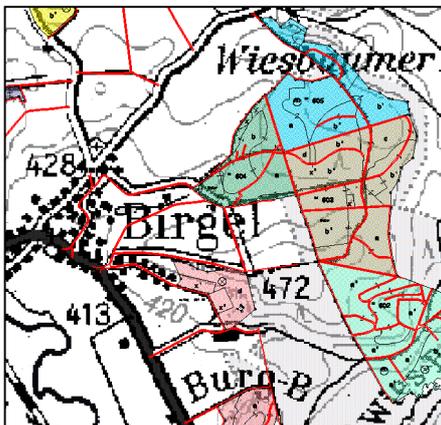


Abb. 15:
Unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten der Forstbetriebskarte, z. B. mit hinterlegter TK 25 (oben) bzw. DPA-Aufnahme (rechts)

Mittels dieser ArcView-Anwendung lassen sich zusätzlich für das jeweilige Gebiet bzw. die entsprechende Fragestellung eingebettete Sachinformationen, wie z.B. Standortkarte im Falle des Bienwaldes, Rohstoffkarten in Hillesheim und Karten mit Flächen auf denen

Kompensationskalkungen durchgeführt wurden im Bereich des FA Morbach einblenden. Diese werden bei der Darstellung der einzelnen Teilstudien erläutert. Selbstverständlich lassen sich die Daten jedoch nicht nur darstellen, sondern auch statistisch mit anderen Daten in Bezug setzen. Über die Analysemöglichkeiten des GIS lassen sich so beispielsweise die Zusammenhänge zwischen Forsteinrichtungsdaten und Folgeschäden nach Insektenfraß im Bienwald ebenso untersuchen wie der Wirkungsgrad von Kompensationskalkungen zu Reduzierung von Blatt- und Nadelverlust sowie Vergilbung.

Eine weitere wesentliche Funktionalität des Systems besteht darin, eine Verknüpfung zwischen Forsteinrichtungsdaten und Satellitendaten, bzw. deren Auswertungsergebnissen, herzustellen. So können aus den Satellitenbildern abgeleitete Informationen zur Aktualisierung der Forsteinrichtungsdaten oder unterstützend zur Kartierung von Schadflächen eingesetzt werden.

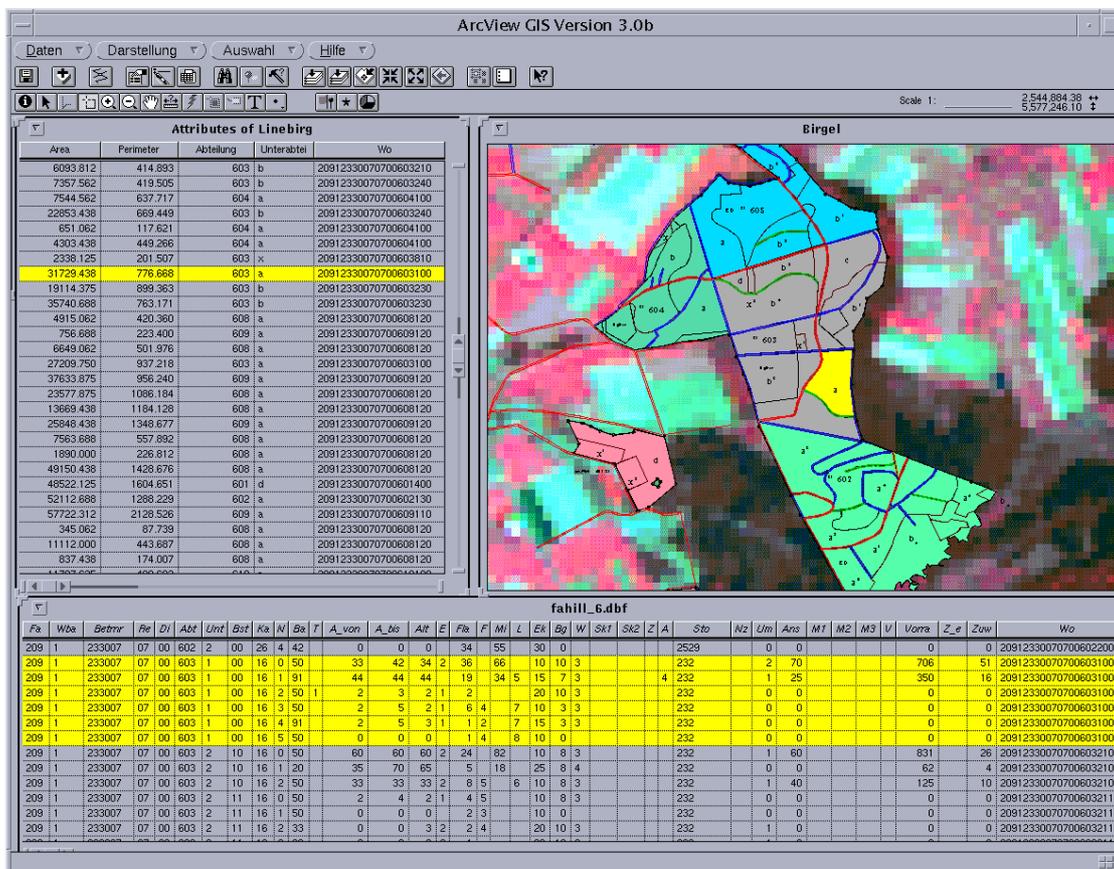


Abb. 16: ArcView basiertes Forstinformationssystem. Der selektierte Bestand und die zugehörigen Daten der Forsteinrichtung sind gelb markiert

Der für das Forstamt Hillesheim entwickelte Prototyp eines ArcView basierten Forstinformationssystems ist so aufgebaut, dass die zu dem Bestand gehörigen Teilflächen markiert werden. Wahlweise lässt sich die Fläche einer Teilfläche oder aber die der Summe aller Teilflächen ausgeben. Wahlweise lässt sich ein Diagramm darstellen das die Baumartenverteilung des Bestandes wiedergibt. Umgekehrt lassen sich aber auch aus der Datenbank bestimmte Baumarten oder Altersklassen suchen. Das Ergebnis kann in tabellarischer und kartographischer Form begutachtet werden.

6. Vorverarbeitung der Satellitendaten

In diesem Abschnitt wird grundsätzlich zur geometrischen und radiometrischen Vorverarbeitung der Satellitendaten Stellung bezogen. Die hier erläuterten Verarbeitungsschritte bilden die Grundlage zu sämtlichen, in Abschnitt 7 beschriebenen Fallstudien. Im Zusammenhang mit den individuellen Fallstudien wird lediglich auf Besonderheiten bzw. Modifikationen der anschließend geschilderten Verarbeitungskonzepte Bezug genommen.

6.1 Geometrische Entzerrung

Um den räumlichen Bezug für die in den digitalen Fernerkundungsdaten enthaltenen Informationen herzustellen und somit eine Verknüpfung mit anderen Informationsebenen (z.B. Daten der Forsteinrichtung) innerhalb eines Geographischen Informationssystems (GIS) zu ermöglichen, ist es erforderlich, geometrische Verzerrungen zu eliminieren und die Bilddaten in ein geodätisches Referenzsystem zu transformieren (Geocodierung).

Als systematische Verzerrungen der TM-Bilddaten werden Fehler bezeichnet, die durch die Arbeitsweise eines satellitengestützten optisch-mechanischen Scanners hervorgerufen werden. Sie resultieren aus der Schrägsicht des Scanners zum Szenenrand hin (Zunahme der Größe der abgetasteten Flächenelemente bei konstantem Scanwinkel, Panoramaeffekt), aus Erdkrümmung, Nichtlinearität der Spiegelbewegung, Vorwärtsbewegung des Satelliten während des Abtastvorgangs (Scherung der Scanlinien) und der Erdrotation (Scherung des Bildes). Diese Fehler können rechnerisch genau erfasst und durch entsprechende Korrekturverfahren beseitigt werden (RICHARDS 1986, S.42-50).

Zu den systematischen Störeinflüssen treten geometrische Verzerrungen aufgrund langperiodisch instabiler Fluglage (Veränderung der Flughöhe, Nick-, Gier- und Rollbewegungen) und variierender Umlaufgeschwindigkeit. Als lokale „Störgröße“ verursacht das Relief zusätzliche Abbildungsfehler (RICHARDS 1986, S.48; ALBERTZ et al. 1991, S.51).

Zur Entzerrung ist es notwendig, den geometrischen Bezug zwischen Bilddaten (bzw. Bildkoordinatensystem) und Referenzsystem durch Aufstellen von Transformationsgleichungen herzustellen bzw. zu approximieren. Diese Modellbildung erfolgt mit bivariablen Polynomen (n-ten Grades) der Form:

$$\begin{aligned}x' &= a_{00} + a_{10}x + a_{11}y + a_{20}x^2 + a_{21}xy + a_{22}y^2 + \dots + a_{n0}x^n + a_{n1}x^{n-1}y + a_{nn}y^n \\y' &= b_{00} + b_{10}x + b_{11}y + b_{20}x^2 + b_{21}xy + b_{22}y^2 + \dots + b_{n0}x^n + b_{n1}x^{n-1}y + b_{nn}y^n,\end{aligned}\tag{6.1}$$

wobei a_i und b_i die zu bestimmenden Transformationsparameter zwischen Bildsystem (x', y') und Referenzsystem (x, y) darstellen (EHLERS & WELCH 1988, S.143; ALBERTZ 1991, S.52).

Die Bestimmung von a_i und b_i erfolgt mit Hilfe der Passpunktmethode. Passpunkte (also Punkte, die sowohl im Bild als auch in der Referenzabbildung eindeutig bestimmt werden können, z.B. Straßenkreuzungen oder zeitlich konstante Landnutzungsgrenzen) liefern Koordinatenpaare x', y' und x, y , mit denen die Transformationsgleichungen aufgestellt werden können. Zur Berechnung der Parameter ist - in Abhängigkeit vom gewählten Polynomgrad (t) - eine Mindestanzahl (n) von Passpunkten notwendig:

$$n = \frac{((t+1)(t+2))}{2} \quad (6.2)$$

(HABERÄCKER 1987, S.176-178; ALBERTZ et al. 1991, S.52)

Es ist jedoch sinnvoll, mehr Passpunkte als notwendig zu ermitteln, also das Gleichungssystem überzubestimmen; durch die Bestimmung der Transformationsparameter nach der Methode der kleinsten Quadrate (Ausgleichsrechnung) kann so eine Fehlerminimierung vorgenommen werden (HABERÄCKER 1987, S.178-179). Bei der Passpunktauswahl ist neben der notwendigen Anzahl auf eine gleichmäßige Verteilung über den gesamten zu entzerrenden Bildausschnitt zu achten, um insbesondere bei der Verwendung von Polynomen höheren Grades ins Gewicht fallende Inter- und Extrapolationsfehler zu vermeiden (RICHARDS 1986, S.54-55). Durch Polynome 1. Grades können bei entsprechender Wahl der Parameter a_i und b_i lineare (affine) Transformationen (Verschiebungen, Drehungen, Streckungen und Stauchungen) erreicht werden. Transformationspolynome höherer Ordnung lassen die Korrektur nichtlinearer Verzerrungen zu (HABERÄCKER 1987, S.173-175; ERDAS 1994, S.288-293).

Geringe Restfehlerbeträge und eine zufällige Restfehlerverteilung lassen die Annahme zu, dass der Zusammenhang zwischen Referenz und verzerrtem Bild durch das gebildete Transformationsmodell gut approximiert wird (HABERÄCKER 1987, S.181-183). Zu beachten ist, dass sich mit Erhöhung des Polynomgrades die Residuen an den Passpunkten zwar verringern lassen, gleichzeitig aber auch die Entzerrungsunsicherheiten zwischen den Passpunkten bzw. in den Randbereichen zunehmen. Aus diesem Grund sollte bei der Entzerrung ein ausreichend genauer Polynomansatz möglichst niedrigen Grades gewählt werden (EHLERS & WELCH 1988, S.144; ALBERTZ et al. 1991, S.54; RICHARDS 1986, S.55).

Aufgrund vorliegender Erfahrungen bei der Entzerrung von Landsat-5 TM-Daten (HILL 1993, S.31; EHLERS & WELCH 1988, S.144-145; ALBERTZ et al. 1991, S.54) wird als Transformationsfunktion jeweils ein Polynom ersten Grades gewählt. Die hohe Stabilität des Landsat-5-Systems und die sehr gute Qualität der geometrischen Vorverarbeitung, die sowohl langperiodische Veränderungen der Fluglage als auch systematische Störeinflüsse berücksichtigt, bewirken, dass eine präzise Entzerrung (bzw. Geocodierung) bei flachem Gelände im wesentlichen eine Drehung beinhaltet, mit der die Parallelogrammgeometrie des Bildes (als Folge der Inklination der Satellitenbahn gegen die Pole) korrigiert, also eine Einnordung der Bilddaten erreicht werden kann (HILL 1993, S.31).

Zu beachten ist, dass bei der Verwendung von Polynom-Ansätzen sowohl Bild- als auch Referenzdaten als ebene Punktfelder verstanden werden, also Höhenunterschiede des Geländes bei der Modellbildung unberücksichtigt bleiben. Da die durch die Topographie hervorgerufenen Abbildungsfehler in der Regel sehr unregelmäßig verlaufen, ist deren exakte Beschreibung und Korrektur auch durch Polynome hoher Ordnung nicht zu erreichen, sondern muss ggf. durch Einbeziehung eines digitalen Geländemodells kompensiert werden (ALBERTZ et al. 1991, S.54; HILL 1993, S.35).

Die Forderung, Passpunkte auszuwählen, die nicht zu stark um die mittlere Geländehöhe schwanken (um von einer Passpunktebene ausgehen und somit die Auswirkungen der reliefbedingten Abbildungsfehler minimieren zu können), kann aufgrund der Reliefgegebenheiten und der Schwierigkeit, z.B. innerhalb der geschlossenen Waldareale geeignete Passpunkte zu finden, nicht immer streng erfüllt werden.

Die Qualität der Entzerrung lässt sich - nach dem Resampling - sowohl anhand der statistischen Residualfehler als auch visuell durch die Überlagerung der entzerrten Bilddaten mit den digitalisierten Vektordaten einer Forstgrundkarte (Abb. 17). In der Regel ergeben sich bei Landsat-, Spot- und IRS-Daten allenfalls Abweichungen von max. $\pm 0,75$ Pixeln. Dies entspricht den operationellen Anforderungen an die Genauigkeit.



Abb. 17: Geokodierte Landsat-TM-Szene aus dem Bereich des Bienwaldes (Oberrhodan) mit der überlagerten Waldeinteilung

Aufgrund der Sensorgeometrie bei optoelektronischen bzw. optomechanischen Abtastsystemen führen Geländehöhenunterschiede zu Lagefehlern senkrecht zur Flugrichtung. Der durch h (Höhenunterschied gegenüber Bezugshöhe) entstehende Bildpunktversatz Δy in Scanrichtung (= P_i (Bildkoordinaten) - P' (Punktkoordinaten in Orthogonalprojektion)) ergibt sich aus:

$$\begin{aligned} \Delta y &= h \cdot \tan \theta \quad (\text{mit } \theta = \text{Beobachtungswinkel}) \\ \text{bzw. } \Delta y &= h \cdot \frac{y}{H_{\text{sat}}} \quad (\text{mit } y = \text{Abstand des Bildpunktes vom Nadir,} \\ &\quad H_{\text{sat}} = \text{Flughöhe des Satelliten}) \end{aligned} \quad (6.3)$$

(HILL 1993, S.35-36; ALBERTZ et al. 1991, S.54).

Der kritische Geländehöhenunterschied Δh , bei dem am Rand des Bildstreifens ein seitlicher Bildpunktversatz von einem Pixel erfolgt, liegt beim TM bei ± 230 m (Bezugsebene: mittlere Geländehöhe). Höhenunterschiede von ± 100 -500 m, wie sie charakteristischerweise im Deutschen Mittelgebirgsraum auftreten können, verursachen demnach Lagefehler von maximal 0,2-1,8 Pixeln (ALBERTZ et al. 1991, S.56, 72).

Auf die Genauigkeit der Entzerrung wirken sich die topographiebedingten Lagefehler in zweifacher Hinsicht negativ aus: Sie verfälschen zunächst die gemessenen Passpunkt-Bildkoordinaten und damit die aufgestellten Transformationsgleichungen; außerdem verhindern sie, dass beim Resampling die lagerichtige Bildinformation aus dem Eingabe- in das Ergebnisbild übernommen wird (ALBERTZ et al. 1991, S.56).

Die reliefbedingten Abbildungsfehler können mit Polynomen nicht genau erfasst werden. Ihre Korrektur ist jedoch durch die Einbeziehung eines Digitalen Höhenmodells möglich:

1. Nach der Passpunktsuche wird der Einfluss der Geländehöhen auf die Passpunktkoordinaten eliminiert, indem ihre Spaltenkoordinaten um den entsprechenden Betrag Δy korrigiert werden (s.o.: y und H_{sat} sind bekannt, h ist aus dem Digitalen Höhenmodell zu entnehmen). Danach können - von der Bezugsebene ausgehend - die Transformationsparameter über den Polynomansatz berechnet werden.
2. Im Ergebnisbild kann für jedes Flächenelement die Geländehöhe aus dem Digitalen Höhenmodell abgeleitet werden. Beim Resampling können somit über die zurückgerechneten und anschließend höhenkorrigierten Pixelkoordinaten die lagerichtigen Grauwerte übernommen werden.

Mit den über die Passpunktmethode bestimmten Transformationsgleichungen kann die eigentliche Entzerrung durchgeführt werden. Bei dem verwandten Verfahren der indirekten Transformation werden die Transformationsgleichungen dazu verwandt, vom Ausgabebild in das Eingabebild zurückzurechnen, also für die Pixel des Ausgabebildes die Grauwerte im Eingabebild zu suchen (im Gegensatz zur direkten Transformation, bei der für jedes Pixel des Eingabebildes die Lage im Ausgabebild berechnet und der entsprechende Grauwert zugewiesen wird, können so Nicht- bzw. Mehrfachbelegungen einzelner Positionen des Ausgabebildes vermieden werden). Der Prozess der Neuordnung der Grauwerte in der für das Ausgabebild gewählten Matrix wird als Resampling bezeichnet (ALBERTZ 1991, S.94-95; ALBERTZ et al. 1991, S.14).

6.2 Radiometrische Korrekturen

Satellitenbildrohdaten bestehen aus einer Vielzahl von radiometrischen Einzelmessungen. Die jeweils gemessenen und sensorspezifisch in Grauwerte übersetzten spektralen Strahldichten werden zwar primär vom Reflexionsverhalten der beobachteten Objekte bestimmt, Beleuchtungsverhältnisse, Aufnahmegeometrie, topographische und atmosphärische Bedingungen überlagern jedoch die Objektreflexion und verfälschen entsprechend die gemessene Spektralsignatur. Um die spektralen Reflexionsgrade von Objekten ermitteln und z.B. multitemporal Veränderungen der Reflexionswerte analysieren zu können, ist es somit notwendig, sensor-, atmosphären- und topographiebedingte Effekte in entsprechenden Korrekturverfahren zu eliminieren (HILL 1993, S.45; HILL & STURM 1991, S.1471-1472).

Die am Sensor registrierten Strahldichten werden als „digital number“ (DN) abgespeichert (radiometrische Auflösung des TM: 8 bit = 256 Grautonstufen). Für alle Flächenelemente lässt sich aus diesen DN die jeweils gemessene Strahldichte L für jeden Spektralkanal mit Hilfe der entsprechenden Kalibrierungskoeffizienten a_1 (gain) und a_0 (offset) ableiten:

$$L = a_0 + a_1 \cdot \text{DN} \quad (6.4)$$

$$L = \text{spektrale Strahldichte am Sensor [mW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}\text{]}$$

(HILL 1993, S.45; HILL & STURM 1991, S.1472-1473)

Bei der Auswertung von TM-Szenen unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte muss eine eventuelle Degradation der Sensoren berücksichtigt werden. Eine Verifizierung der Kalibrierungsdaten ist z.B. mit Hilfe von parallel zum Satellitenüberflug stattfindenden Referenzmessungen in geeigneten, spektral homogenen Testgebieten (z.B. White Sands/New Mexico) möglich. Die am Boden gemessenen Reflexionswerte und Atmosphärenparameter werden zur Modellierung („radiative transfer code“) der spektralen Strahldichten am Sensor L_c benutzt. Weichen die modellierten Werte L_c und die mit den zu überprüfenden aus den DN errechneten Strahldichten L signifikant voneinander ab, müssen die Kalibrierungsdaten entsprechend korrigiert werden (HILL 1993, S.45-47; HILL & STURM 1991, S.1472-1474).

Die elektromagnetische Strahlung (als Informationsträger der Fernerkundung) wird beim Gang durch die Atmosphäre - also sowohl auf dem Weg von der Strahlungsquelle zum Objekt als auch vom Objekt zum Sensor - durch Streuungs- und Absorptionsprozesse geschwächt und in ihrer spektralen Zusammensetzung verändert. Wasserdampf (H_2O), Ozon (O_3) und Kohlendioxid (CO_2) stellen die wichtigsten absorbierenden Bestandteile der Atmosphäre dar. Sie bewirken eine Abschwächung der elektromagnetischen Strahlung in ganz bestimmten Spektralbereichen, den sog. Absorptionsbanden. Die übrigen, weitgehend durchlässigen und somit für Fernerkundungssensoren nutzbaren Bereiche werden als atmosphärische Fenster bezeichnet (KRAUS & SCHNEIDER 1988, S.60-61; WEISCHET 1988, S.63-64).

Die Kanäle im sichtbaren Spektralbereich werden in geringem Maße von der Ozonabsorption, die Kanäle im nahen und mittleren IR durch den variablen Wassergehalt der Atmosphäre beeinflusst. Streuungsprozesse in der Atmosphäre führen zu einer Ablenkung der Strahlung aus ihrer ursprünglichen Richtung. Als Streuungsmechanismen können Rayleigh-, Mie- und nicht selektive Streuung unterschieden werden (KRAUS & SCHNEIDER 1988, S.63-65). Rayleigh-Streuung findet vor allem an den Molekülen der permanenten Gase der Atmosphäre statt; ihre Teilchengröße liegt mit einem Durchmesser von ca. 10^{-7} cm weit unterhalb der Wellenlänge des Lichtes. Die resultierende Streufunktion weist sowohl eine Richtungs- als auch eine starke Wellenlängenabhängigkeit auf (Streukoeffizient $\sim \lambda^{-4}$, kurzwellige Strahlung wird somit wesentlich stärker gestreut als langwellige).

Mie-Streuung tritt an Aerosolen mit einem Teilchendurchmesser von ca. 10^{-6} - 10^{-4} cm auf. Der spektrale Streukoeffizient ist proportional zu λ^{-a} , wobei der Exponent der Wellenlängenabhängigkeit (a) je nach Teilchengröße zwischen 0 und 4 liegen kann. Bei großen Teilchen mit einem Durchmesser von ca. 10^{-4} - 10^{-2} cm wird $a = 0$, d.h. die Streufunktion ist nicht von der Wellenlänge abhängig (nichtselektive Streuung). Aufgrund der kombinierten Wirkung aller Streumechanismen liegt der Exponent der Wellenlängenabhängigkeit für die reale Atmosphäre zwischen 0,7 und 2,0 (Abb. 15) (KRAUS & SCHNEIDER 1988, S.63-65, WEISCHET 1988, S.62-63).

Ziel der Atmosphärenkorrektur ist es, über die Simulation des Strahlengangs durch die Atmosphäre aus den Satellitenrohdaten letztendlich die absoluten Reflexionsfaktoren der Geländeobjekte abzuleiten (ITTEN et al. 1992, S.22-23). Zu diesem Zweck wird ein von TANRE et al. entwickeltes und von HILL modifiziertes Strahlungstransfermodell, der „5S code“ („Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum“) verwandt (TANRE et al. 1990, HILL 1993, HILL 1996). Dessen erfolgreiche Anwendung hängt von der Verfügbarkeit gültiger Kalibrierungsdaten ab, um die am Sensor gemessene spektrale Strahldichte ableiten zu können. Aus L lässt sich unter Berücksichtigung des Sonnenstandes die entsprechende Reflexion am Sensor ρ^* - auch als planetarische Reflexion bezeichnet - nach

$$\rho^* = \frac{\pi \cdot L}{E_0 \cdot \mu_0 \cdot d} \quad (6.5)$$

mit L = spektrale Strahldichte am Sensor [mW/cm²/sr/μm]
 E_0 = Sonneneinstrahlung an der Atmosphärenoberfläche (TOA=top of atmosphere) [mW/cm²/μm]
 μ_0 = Kosinus des Sonnenzenitwinkels
 d = Korrekturfaktor für die täglich variierende Distanz Sonne-Erde (errechnet sich aus $1/au^2$, wobei au die Sonne-Erde Distanz in „Astronomical Units“ angibt (1AU = mittlere Distanz Sonne-Erde = $149,6 \cdot 10^6$ km)

berechnen (HILL 1993, S.50; MARKHAM & BARKER 1987, S.520). ρ^* steht dabei in direkter Beziehung zur Objektreflexion (ρ_t = „target reflectance factor“), die durch Absorptions- und Streuungsprozesse überlagert wird (vgl. Abb. 16). Als Funktion der verschiedenen einflussnehmenden Effekte kann ρ^* in einer entsprechenden Strahlungstransfergleichung ausgedrückt werden als

$$\rho^* = t_{gas} \cdot \left\{ \rho_{at} + \frac{T \downarrow \cdot [t_d \uparrow \cdot \rho_t + t_s \uparrow \cdot \langle \rho \rangle]}{1 - \langle \rho \rangle \cdot s} \right\} \quad (6.6)$$

mit t_{gas} = Transmissionsfaktor der atmosphärischen Gase (v.a. O₃, H₂O)
 ρ_{at} = von Atmosphäre in Richtung Sensor gestreute Strahlung („atmospheric path radiance“)
 $\langle \rho \rangle$ = Hintergrundstrahlung durch Objekt-/ Pixelumgebung
 ρ_t = Objektreflexion
 s = sphärische Albedo
 \downarrow, \uparrow = Abwärts- bzw. Aufwärtsrichtung (des jeweiligen Transmissionsterms)
 T = Gesamttransmission der Atmosphäre
 t_d = direkte Transmission
 t_s = diffuse Transmission

(HILL 1993, S.50-51; HILL 1996, S.31). Durch Umformung ergibt sich für die Objektreflexion ρ_t gemäß

$$\rho_t = \frac{\rho^* / t_{gas} \cdot (1 - \langle \rho \rangle s) - \rho_{at} \cdot (1 - \langle \rho \rangle s) - T \downarrow \cdot t_s \uparrow \cdot \langle \rho \rangle}{T \downarrow \cdot t_d \uparrow} \quad (6.7)$$

Zur Lösung der Strahlungstransfergleichung (4.3) ist die Schätzung der optischen Dicke τ (τ_r + τ_a) notwendig. τ_r kann nach

$$\tau_r = 0,0088 \cdot \lambda^{(-4,15+0,2 \cdot \lambda)} \quad (6.8)$$

approximiert werden. Der stark variable Aerosolanteil τ_a kann über in der Szene enthaltene Referenzobjekte mit bekannten und im Idealfall invarianten Reflexionseigenschaften bestimmt werden; geeignet sind z.B. klare, tiefe Wasserflächen oder - für den sichtbaren Spektralbereich - Nadelwaldbestände, also dunkle Oberflächen, die durch die additive Komponente des Luftlichtes entsprechend aufgehellt werden.

Die Schätzung von τ_a erfolgt über den Abgleich der bekannten Standardsignatur mit der scheinbaren, szenengemessenen Reflexion des Referenzobjekts (ρ^* , vgl. HILL 1993, S.53-54). Mit einem initialen Schätzwert kann τ_a abgeleitet werden. Die Berechnung von τ_a erfolgt iterativ und wird in dem Moment abgebrochen, in dem der modellierte Wert ρ^* mit dem gemessenen Wert ρ^* übereinstimmt (Abb. 18). Die optische Dicke des Aerosols kann mit Hilfe der sogenannten Ångstrom-Koeffizienten b und n nach

$$\tau_a = b \cdot \lambda^{-n} \quad (6.9)$$

auch auf andere Spektralbereiche extrapoliert werden (HILL 1993, S.55).

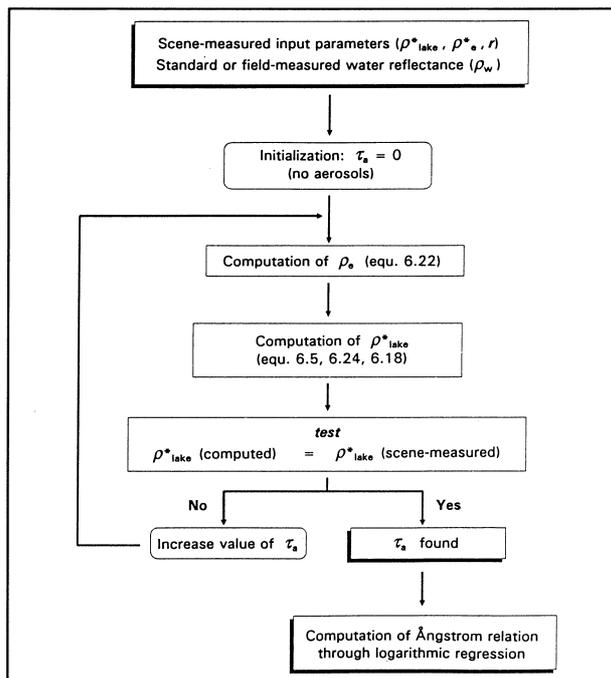


Abb. 18:

Szenenbasierte Bestimmung der optischen Dicke des Aerosols (nach ROYER et al., 1988; HILL, 1994)

In stark reliefiertem Gelände kann es infolge wechselnder Hangneigung und Exposition zu kleinräumigen Veränderungen der Beleuchtungsverhältnisse kommen. Bei identischer Oberflächenbeschaffenheit erscheinen Sonnhänge heller, Schattenhänge dunkler als kaum geneigte oder ebene Flächen (ein besonntes Objekt erhält und reflektiert mehr Strahlung als das gleiche im Schatten liegende Objekt). Dieser Effekt - je nach Sonnenstand unterschiedlich stark ausgeprägt - macht sich im Satellitenbild als Reliefeindruck bemerkbar.

Die topographiebedingte Modifizierung von Spektralsignaturen erschwert multitemporale Auswertungen („change detection“) und Multispektralklassifikationen (die spektrale Trennschärfe von Objektklassen wird verringert) (HILL et al. 1995, S. 143; ITTEN et al. 1992, S.2-3). Ohne Reliefkorrektur können die Klassifikationsergebnisse durch eine der Klassifikation vorausgehende Stratifizierung nach Geländeparametern verbessert werden (vgl. Studien von SCHARDT 1990, COENRADIE 1992).

Bei den in dieser Untersuchung verwandten TM-Szenen wird die Topographiekorrektur nach der von HILL et al. (1995) entwickelten Methode als Vorverarbeitungsschritt durchgeführt.

Grundlegend bei der Korrektur des Topographieeffekts ist eine möglichst exakte Einschätzung der jeweils von der Oberfläche empfangenen Sonnenstrahlung E_g bzw. E_g^* , also der Summe aus diffuser und direkter Einstrahlung. Da bei der Atmosphärenkorrektur über die

Schätzung der optischen Dicke τ (bzw. τ_a und τ_r) die abwärts gerichteten Transmissionsterme $t_{a\downarrow}$ und $t_{s\downarrow}$ berechnet werden können, ist die Integration der Reliefkorrektur in eine kombinierte Atmosphären-/Topographiekorrektur sinnvoll (HILL et al. 1995, S.145; CONESE et al. 1993, S.1745).

Bei dem hier verwandten Korrekturverfahren wird - wie auch bei der Atmosphärenkorrektur - für die Geländeoberfläche Lambertsches Reflexionsverhalten angenommen. Unter dieser Annahme lässt sich für eine horizontal orientierte Oberfläche die am Satelliten gemessene Strahlung L_t aus der modellierten Objektreflexion ρ_t nach

$$L_t = E_g \cdot \rho_t \cdot T \uparrow / \pi \quad (6.10)$$

mit $T \uparrow$ = aufwärts gerichtete Gesamttransmission der Atmosphäre

berechnen. Für eine geneigte Oberfläche muss der Einstrahlungsterm E_g verändert und durch E_g^* (= der nach den topographischen Bedingungen korrigierten Globalstrahlung) ersetzt werden. Entsprechend ergibt sich für die beleuchtungskorrigierte Objektreflexion ρ_t^* :

$$\rho_t^* = \frac{L_t \cdot \pi}{E_g^* \cdot T \uparrow} = \frac{E_g \cdot \rho_t}{E_g^*} \quad (6.11)$$

(HILL et al. 1995, S.146)

Zur Approximierung von E_g^* müssen grundsätzlich die folgenden möglichen Modifikationen der Einstrahlung berücksichtigt werden:

1. direkte Einstrahlung und Anteile der diffusen Strahlung variieren je nach Pixelorientierung (s.u.: Kosinuskorrektur)
2. aufgrund von Schattenwurf benachbarter Objekte empfängt ein Pixel keine direkte Einstrahlung
3. ein Teil der Himmelskalotte wird durch umgebende Reliefelemente verdeckt, die diffuse Einstrahlung wird entsprechend verringert
4. Strahlung, die von der Umgebung Richtung Objektpixel reflektiert wird, stellt einen zusätzlichen Einstrahlterm dar

(HILL et al. 1995, S.146; PROY et al. 1989, S.23)

Der Kosinus des Winkels zwischen einfallender Sonnenstrahlung und Flächennormalen ($\cos \gamma$) verhält sich proportional zum Betrag der einfallenden direkten Strahlung und - Lambertsches Reflexionsverhalten vorausgesetzt - zu den reflektierten Anteilen. Entsprechend kann die über geneigten Flächen gemessene Strahlung L_s in den korrigierten Wert für eine horizontal orientierte Oberfläche L_h umgerechnet werden:

$$L_h = L_s \cdot \cos(\theta_0) / \cos(\gamma) \quad (6.11)$$

mit θ_0 = Sonnenzenitwinkel

Bei dieser einfachen Kosinuskorrektur bleibt die diffuse Einstrahlung unberücksichtigt, obwohl sie auch für gut beleuchtete Objekte einen bedeutenden Anteil an E_g besitzt (PROY et al. 1989, S.31). Um Überkorrekturen zu vermeiden und den komplexen Beleuchtungsverhältnissen im reliefierten Gelände gerecht zu werden, muss die Kosinuskorrektur entsprechend erweitert werden (HILL et al. 1995, S.145).

Folgende Beleuchtungssituationen sind zu berücksichtigen:

- (1) bei $\cos(\gamma) > 0$ und fehlendem Schattenwurf durch die Umgebung: das Objektpixel erhält sowohl direkte als auch diffuse Strahlung;
 - (2) bei $\cos(\gamma) < 0$ empfängt es lediglich diffuse Einstrahlung;
 - (3) liegt ein Pixel im Schatten benachbarter Reliefelemente, erhält es auch bei $\cos(\gamma) > 0$ nur diffuse Einstrahlung
- (HILL et al. 1995, S.146)

Bei der Einschätzung des diffusen Einstrahlungsterms muss die aus dem Streuverhalten der Atmosphärenpartikel resultierende anisotrope Verteilung des diffusen Himmelslichts berücksichtigt werden (PROY et al. 1989, S.25-26). Entsprechend unterscheiden HAY & MCKAY (1985, nach CONESE et al. 1993, S.1747) einen anisotropen Anteil, der in der zirkumsolaren Zone der Himmelskalotte maximal wird, und einen isotropen Teil der diffusen Einstrahlung. Bei Oberflächen, die der Sonne zugewandt sind addieren sich entsprechend anisotrope (zirkumsolare) und isotrope Anteile diffuser Strahlung zur direkten Sonneneinstrahlung, alle anderen Flächen ((2) und (3)) erhalten lediglich isotrope diffuse Strahlung. Das mit dem Atmosphärenzustand variierende Verhältnis der anisotropen und isotropen Anteile zueinander wird von HAY & MCKAY durch die Einführung eines wellenlängenabhängigen Anisotropie-Index k berücksichtigt:

$$k = (E_0' \cdot t_d \downarrow) / E_0 \quad (6.12)$$

mit $E_0' \cdot t_d \downarrow$ = direkter Anteil der an der Erdoberfläche empfangenen Globalstrahlung
 E_0 = exatmosphärische spektrale Einstrahlung (TOA)

Der einzusetzende Wert für E_g^* lässt sich somit berechnen nach:

$$E_g^* = (E_0' \cdot t_d \downarrow) \cdot \cos(\gamma) / \cos(\theta_0) \quad (6.13) \\
+ (E_0' \cdot t_s \downarrow) \cdot k \cdot \cos(\gamma) / \cos(\theta_0) \\
+ (E_0' \cdot t_s \downarrow) \cdot (1 - k) \cdot Fr_{sky}$$

mit Fr_{sky} = von Flächenelement aus sichtbarer Anteil der Himmelskalotte

Für Pixel, die lediglich isotrope diffuse Strahlung erhalten, werden die ersten beiden Summanden = 0 (HILL et al. 1995, S.147).

Abbildung 19 zeigt einen Ausschnitt aus dem Bereich der Mittelmosel vor und nach der durchgeführten Atmosphären- und Reliefkorrektur im Vergleich (Kanalkombination TM 4-5-3 als Rot-Grün-Blau (RGB)- Farbkomposite). Vor der Korrektur rufen die Beleuchtungsunterschiede im Bereich des abgebildeten Flusssystemes einen deutlichen Reliefeindruck hervor, der nach der Korrektur weitgehend verschwunden ist. Sonn- und Schattenhänge, die sich vorher deutlich unterschieden, erscheinen nach der Korrektur homogen. Durch eine einfache Signaturanalyse - durchgeführt an bewaldeten Sonn- und Schattenhängen bzw. an einzelnen, über GIS-Abfragen selektierten Forstbeständen sich ebenfalls nachweisen, dass der Verlauf der Reflexionskurve des Objektes Wald nach der Korrektur der typischen Spektralkurve grüner Vegetation entspricht. Die Reflexionswerte im blauen Spektralbereich (TM1) entsprechen bzw. liegen geringfügig unter den Werten im roten Spektralbereich (TM3), was auf eine gute Approximierung von τ (= optische Dicke) bei der Atmosphärenkorrektur hinweist.

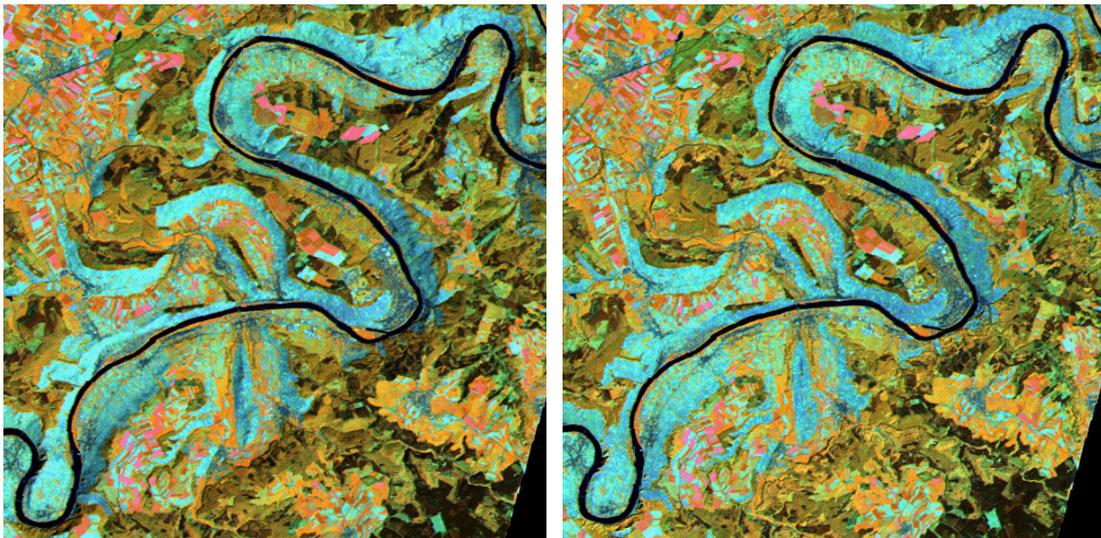


Abb. 19: Landsat-TM-Szene vor und nach der durchgeführten Atmosphären- und Reliefkorrektur im Vergleich (Kanalkombination TM 4-5-3 als Rot-Grün-Blau (RGB)-Farbkomposite)

Tabelle 1 Absolute Reflexion (%) ausgewählter Bestände für 1990 und 1995

	Fichte Altholz Einzelbestand		Fichte mittleres Baumholz, Einzelbestand		Reinbestände Nadelholz, Stangenholz, Mittelwert alle Reviere		Buche Stangenholz Einzelbestand		Laubreinbestände (Buche Eiche), starkes Baumholz, Mittelwert	
	1990	1995	1990	1995	1990	1995	1990	1995	1990	1995
TM1	1,92	1,81	1,77	1,62	2,21	1,94	2,64	2,35	2,74	2,37
TM2	2,99	2,96	3,02	2,91	3,59	3,57	4,74	3,94	4,32	4,10
TM3	2,17	2,20	2,04	1,97	2,35	2,52	3,20	2,65	3,01	3,00
TM4	14,57	15,31	15,31	15,47	17,91	18,47	42,82	39,58	36,45	36,09
TM5	5,25	5,17	5,72	5,54	5,64	5,72	18,58	15,38	14,81	14,05
TM7	2,29	2,50	2,52	2,67	2,30	2,62	7,41	6,17	5,84	5,82

Tabelle 1 belegt außerdem für ausgewählten älteren Waldbestände (Baum-/Altholz) im Bereich des Forstamtes Morbach nur geringfügige Abweichungen der Reflexionswerte von 1995 gegenüber 1990. Für die bearbeiteten Szenen kann deshalb angenommen werden, dass Atmosphären- und Reliefeinflüsse nahezu vollständig und korrekt „herausgerechnet“ worden sind. Multitemporales Arbeiten ist ohne Einschränkung möglich, die Reflexionswerte der verschiedenen Jahre können direkt miteinander verrechnet werden.

Abbildung 20 gibt die Reflexionsmittelwerte (in %) und Standardabweichungen für bewaldete Sonnenhänge im Vergleich zu korrespondierenden bewaldeten Schattenhängen vor (ρ^*) und nach (ρ) der Atmosphären-/Reliefkorrektur wieder. Dabei konnten jeweils acht besonnte bzw. beschattete Talhänge ausgewählt und bei der Auswertung berücksichtigt werden. Vor der Korrektur wird die Objektreflexion im sichtbaren Bereich (vor allem im TM1) stark von der

additiven Komponente der „path radiance“ überlagert. Vor allem im nahen Infrarot, aber auch in den Kanälen des mittleren Infrarot führen die unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnisse zu starken Reflexionsunterschieden. Nach der Korrektur weisen die Spektralkurven einen vegetationstypischen Verlauf auf. Die Reflexionsunterschiede zwischen Sonnen- und Schattenhängen sind weitgehend verschwunden (nach der Korrektur verbleibende Unterschiede sind auch vor dem Hintergrund möglicher Bestockungsunterschiede zwischen den jeweils ausgewählten Hängen zu bewerten). Hinweise auf eine systematische Fehleinschätzung der Einstrahlungsterme (wie z.B. eine Unterschätzung der diffusen Einstrahlung) - erkennbar z.B. am Effekt der Überkorrektur der Schattenhänge - können nicht gefunden werden.

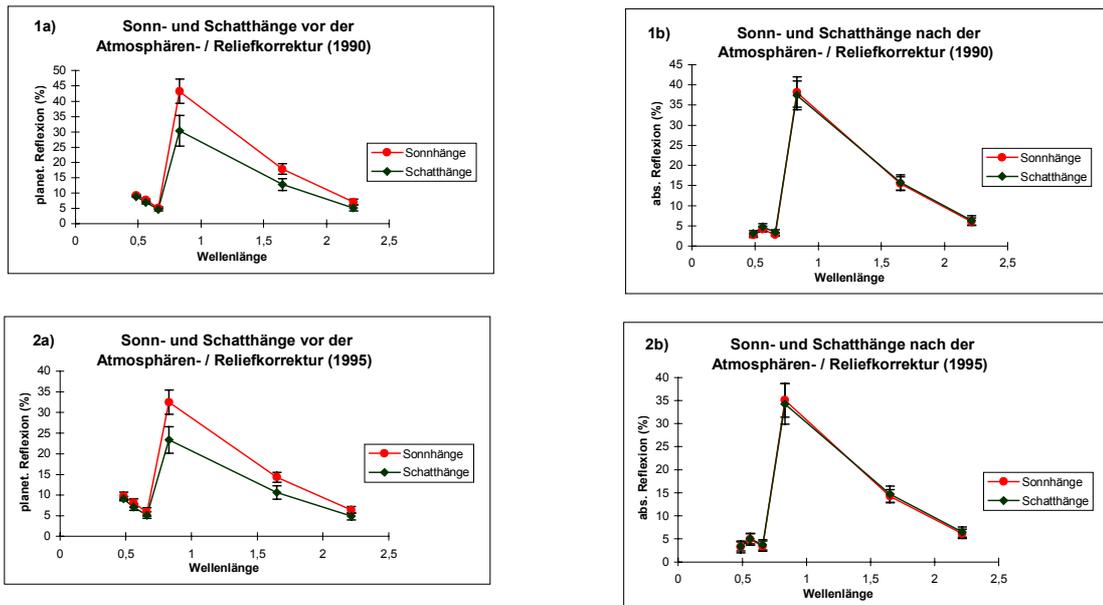


Abb. 20: Vergleich der Reflexionswerte bewaldeter Sonnen- und Schattenhänge vor und nach der Atmosphären- / Reliefkorrektur für beide Aufnahmejahre (Wellenlänge jeweils in μm)

7. Fallstudien im Rahmen des Projektvorhabens

Zur Bearbeitung der genannten forstlichen Fragestellungen wurden drei Untersuchungsgebiete ausgewählt. Sie sind regional als auch thematisch sehr verschieden, um unterschiedlichen forstlichen Fragestellungen und den sich deutlich unterscheidenden physio-geographischen Naturräumen von Rheinland-Pfalz gerecht zu werden.

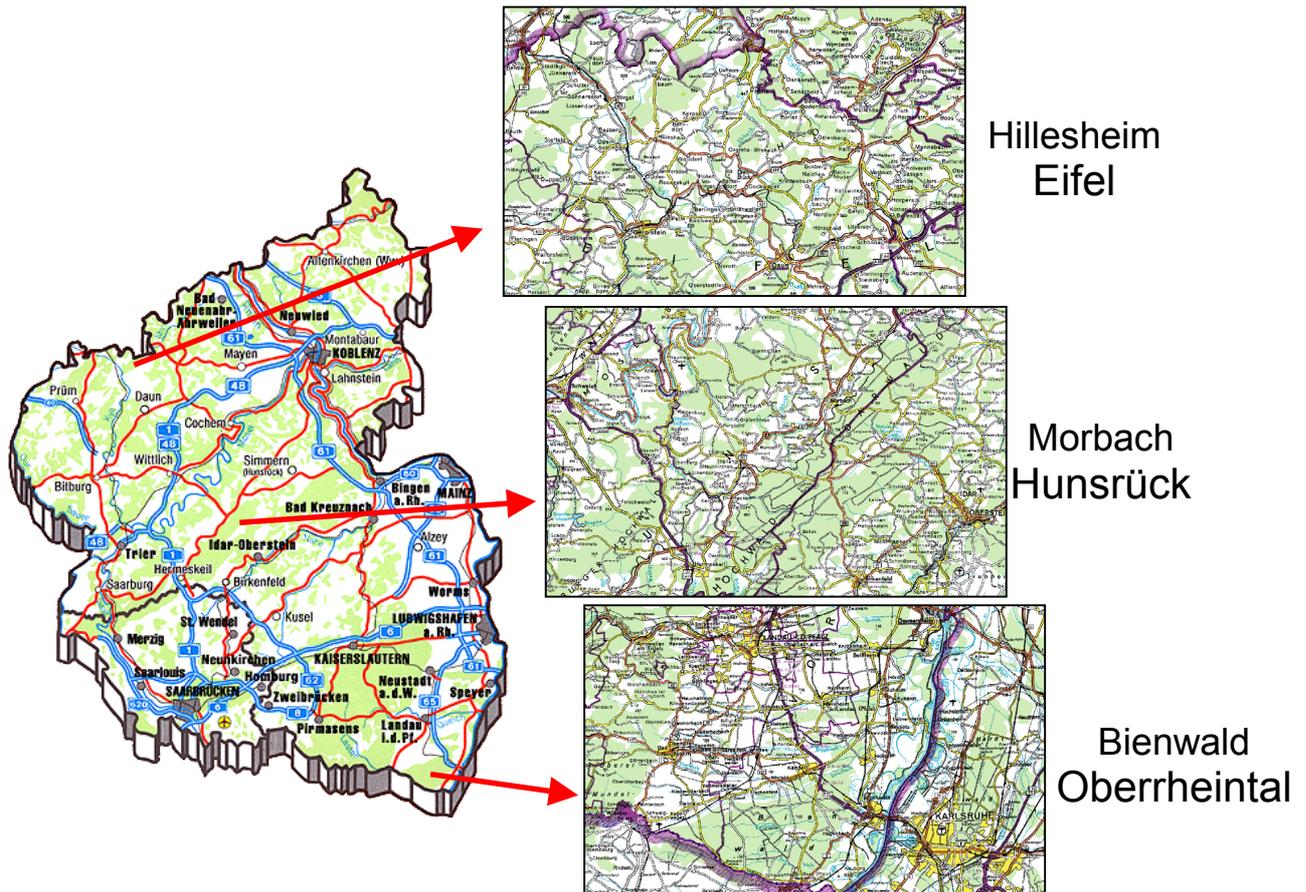


Abb. 21: Geographische Lage der drei ausgewählten Untersuchungsgebiete

Während im Bereich des klimatischen Gunstraumes Bienwald sehr große Laubwaldgebiete erhalten sind, die durch die hier thematisierte Schwammspinnerkalamität der Jahre 1993/94 gefährdet sind, ist der Bereich des Forstamtes Morbach im Hunsrück durch die weitflächige Aufforstung von Fichten gekennzeichnet. Hier sind die seit Jahren zu beobachtenden Blatt-/Nadelverluste sowie Vergilbungserscheinungen Thema der Untersuchungen, wobei insbesondere der Einfluss der Kompensationskalkungen berücksichtigt wird. Im dritten Untersuchungsgebiet (FA Hillesheim / Eifel) stand der Aufbau des FOGIS und die rechnergestützte Erstellung hochaufgelöster Forstkarten auf der Basis digitaler Luft und Satellitenbilder im Mittelpunkt. In allen Teilstudien wurden weiter Aktualisierungsmöglichkeiten der vorhandener forstlicher Grunddaten diskutiert und analysiert.

7.1 Fernerkundung und GIS in der Forsteinrichtung: Untersuchungen zur Erstellung hochauflösender Forstübersichtskarten mittels Datenfusion (FA Hillesheim)

Dem offenbar unvereinbarem Wunsch, die Vorteile satellitengetragener Sensoren uneingeschränkt nutzen zu können, und gleichzeitig Daten hoher geometrische Auflösung zur Verfügung zu haben, begegnet COLVOCORESSES (1977, S.1142) mit einer alternativen Kompromissidee: er schlägt vor, satellitengetragene Sensoren so zu konzipieren, dass nicht *alle* Kanäle eine hohe geometrische Auflösung aufweisen, sondern nur *ein* Kanal als „Repräsentant“ der höheren Auflösungsstufe fungiert. Damit würde die primär aufgenommene und zu übertragene Datenmenge auf akzeptablem Niveau gehalten, dem Anwender aber die Option gegeben, für das jeweilige Untersuchungsgebiet die Detailinformation des einzelnen hochauflösenden (meist panchromatischen) Kanals zur Schärfung der niedriger aufgelösten Multispektralkanäle zu nutzen, wie es in Abbildung 22 schematisiert ist (SCHOWENGERDT 1980, S.1325; HALLADA & COX 1983, S.1024).

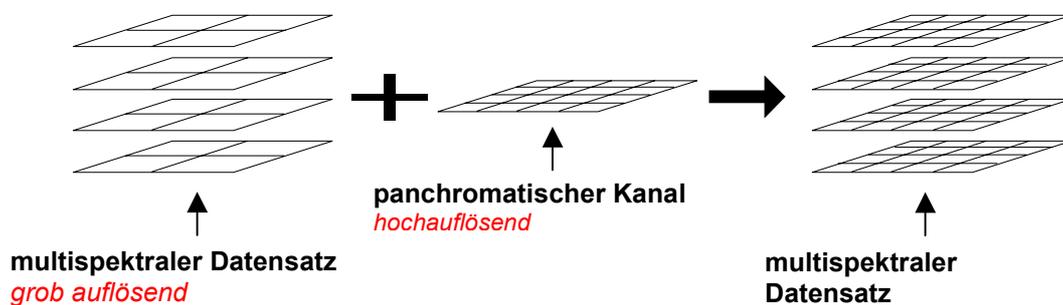


Abb. 22: Schematische Darstellung des Konzeptes zur Verbesserung der geometrischen Auflösung mit Hilfe der Datenfusion

Ziel ist es, die Eigenschaften vom niedrig auflösenden Multispektralbild (→ Objektidentifikation) und hochauflösenden panchromatischen Kanal (→ Objektlokalisierung, Texturinformation) durch eine Fusionsprozedur in einem gemeinsamen, hochwertigeren Datensatz zu vereinen. Die „Berechtigung“ zur Übertragung der Detailinformation eines einzelnen Kanals auf einen Multispektraldatensatz niedrigerer Auflösung wird dabei darin gesehen, dass die *Lage* von Objektgrenzen (als Manifestierung räumlicher Details) über einen weiten Spektralbereich hinweg als konstant angenommen werden kann, bezüglich der geometrischen Information also eine Datenredundanz besteht (SCHOWENGERDT 1980, S.1326; TOM 1986, S.559; PRICE 1987, S.119f).

Mittlerweile sind mehrere Satellitensensoren mit der geforderten gemischten Sensorkonstellation im Umlauf (SPOT, IRS-1C), andere Systeme sind geplant und werden in Kürze verfügbar sein (LANDSAT-7, MOMS-2P, Space Imaging etc.). Abbildung 22 zeigt die Kanalkonstellation einer Auswahl dieser Systeme, begrenzt auf den sichtbaren Bereich und das nahe Infrarot. Bereits heute liefert der indische Satellit IRS-1C panchromatische Daten mit 5m Auflösung; die erwarteten Daten des MOMS-2P-Systems liegen in einer ähnlichen Größenordnung. Die angekündigte neue Generation kommerzieller Satelliten wird sogar Satellitenbilder mit bis zu 1m im panchromatischen Modus und 4m im Multispektralmodus aufzeichnen. Diese extrem hohe räumliche Auflösung wird mit schmalen Aufnahmestreifenbreiten zwischen 8 und 36km bezahlt. Die aufgrund dieses engen Blickwinkels theoretisch zu erwartende geringe zeitliche Auflösung (Wiederholungsrate) soll durch die flexible Blickrichtung der Instrumente sowie durch die geplanten Konstellationen

mehrerer versetzt arbeitender Satelliten verhindert werden (APLIN et al. 1997, S.3880; FRITZ 1996, S.42)

Wurde anfänglich die Konstruktion von „gemischt“ auflösenden Sensoren durch die Fusionsidee angeregt, ist es die gewachsene tatsächliche Verfügbarkeit von Mischdatensätzen der letzten Jahre, welche die Entwicklung von zahlreichen unterschiedlichen Fusionstechniken gefördert hat (vgl. SHETTIGARA 1989, S.2615; HALLADA & COX 1983, S.1024). Die zukünftige Satellitengeneration wird der auflösungsverbessernden Datenfusion voraussichtlich eine neue Bedeutung verleihen, da die über eine Bildfusion herstellbaren hochauflösenden Multispektralbilder für viele Anwendungen den Sprung vom Luft- zum Satellitenbild ermöglichen werden.

Aufgrund dieser zu erwartenden Schlüsselposition kommt der Frage nach der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Fusionstechniken eine erhöhte Bedeutung zu. Neben der

- Operationalität der Methode in der Anwendung,
- Robustheit der Methode in der Arbeitsweise
- Übertragbarkeit der Methode auf unterschiedliche Sensorszenarien / -konstellationen

spielt die *Qualität* der Ergebnisse die größte Rolle für die Wertschätzung einer Fusionstechnik (IVERSON & LERSCH 1994, S.75; WALD et al. 1997, S.693 ff). Bezüglich der Ergebniseigenschaften stellen die zahllosen „Fusionsautoren“ dabei durchaus unterschiedliche Ansprüche, je nachdem, ob das Ergebnis nur für visuelle Zwecke bestimmt ist oder auch rechnergestützten Analysen (z.B. Klassifikationen) unterzogen werden soll. Die drei am häufigsten gestellten Forderungen lauten nach CARPER et al. (1990, S.459), CHAVEZ et al. (1991, S.295), GARGUET-DUPOUR et al. (1996, S.1057), IVERSON & LERSCH (1994, S.72); PRICE (1987, S.119), SHETTIGARA (1992, S.561), VRABEL (1996, S.1075) und WALD et al. (1997, S.691):

- die spektrale Charakteristik des eingehenden Multispektralbildes sollte nicht verzerrt werden
- der „Schärfungseffekt“ durch die Fusion sollte maximal sein
- das Ergebnisbild sollte dem theoretisch „wahren“ hochauflösenden Multispektralbild soweit wie möglich entsprechen

Die Erfüllung des letztgenannten Kriteriums ist insofern ideal, als dass es die beiden ersten beiden Forderungen automatisch einschließt und alle Anwendungen, visuelle Auswertungen wie auch computergestützte Analysen, prinzipiell offen stehen. Es muss jedoch auch klar sein, dass das Fusionsergebnis nie die exakt gleichen spektralen und geometrischen Qualitäten haben wird wie jenes Bild, welches theoretisch von einem „echten“ hochauflösenden Sensor aufgenommen werden würde (IVERSON & LERSCH 1994, S.72).

Zusammenfassend bleibt festzuhalten: die Nutzung satellitengestützter Aufnahmen ist für forstliche Belange aufgrund der zahlreichen günstigen Systemparameter generell von hohem Interesse. Die geringe geometrische Auflösung hemmt jedoch eine verstärkte Nutzung dieser Datenquelle. Eine Erhöhung der geometrischen Auflösung führt aus technischen Gründen zur gleichzeitigen Degradierung von Systemeigenschaften, welche ursprünglich die Satellitenbildtechnik so interessant machen: *hohe Gebietsabdeckung* und *hohe spektrale Auflösung*. Einen Ausweg aus dem Dilemma bietet die auflösungsverbessernde Datenfusion, welche als eine Art „Datenkompression“ fungiert. Das Konzept der Datenfusion ermöglicht in gewissem Maße die *Gleichzeitigkeit* von hoher geometrischer und spektraler Auflösung bei relativ hoher Gebietsabdeckung. Es erhebt sich die Frage nach der Qualität der Fusionsergebnisse im Vergleich zu dem „wahren“ hochauflösenden Bild. Hier setzt die vorliegende Studie an, indem sie versucht, anhand einer speziellen Testkonstellation

unterschiedliche Datenfusionstechniken hinsichtlich ihrer Qualität vergleichend zu untersuchen. Besonderes Augenmerk soll dabei auf die forstwirtschaftlichen Interessen gelegt werden.

Es sollte an dieser Stelle noch betont werden, dass der Begriff *Datenfusion* eine äußerst allgemeine Bezeichnung im Sinne von Datenverschmelzung oder auch -mischung (Merging) darstellt. Die Fusion von *Bildern* (Image Fusion) ist ein Subklasse der Datenfusion. Hierunter fallen alle Operationen, bei denen zwei oder mehr Bilder bzw. Kanäle zu einem neuen Bildprodukt besserer Qualität verschmolzen werden. Das Verständnis von „besserer Qualität“ hängt von der jeweiligen Anwendung ab (WALD 1998, S.2 f). Unter die Kategorie *Bildfusion* fallen z.B. auch Klassifikationsprozeduren, die Berechnung von Kanalindices, die Integration unterschiedlicher Bildtypen (z.B. optische- mit Radardaten) oder eben auch Operationen, die der Verbesserung der geometrischen Auflösung dienen (WALD 1998, mündliche Mitteilung). Die „Bildfusion zur Verbesserung der geometrischen Auflösung“, wie die korrekte und vollständige Bezeichnung der in dieser Arbeit untersuchten Prozeduren wäre, ist also ein Untertyp der Bildfusion. Gleichzeitig ist die Verbesserung der geometrischen Auflösung mit Hilfe der Bildfusion nur *eine* von mehreren möglichen Maßnahmen zur Auflösungsverbesserung (Resolution Enhancement).

7.1.1 Der Testdatensatz. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes stand ein hochwertiger Datensatz eines Flugzeugäquivalents zum MOMS-2P-Weltraumsensor zur Verfügung. Die zugrundeliegende DPA-Befliegung (Digitale Photogrammetrie Ausstattung) wurde als Unterstützungsmaßnahme der DLR für die Pilotprojekte im Rahmen des MOMS-2P-Weltraumprogrammes initiiert, zu denen auch obiges Forschungsvorhaben gehört. Vom 09.-12.07.1997 wurden auf insgesamt 21 Teilflächen der deutschen MOMS-2P-Testgebiete Stereo- und Multispektraldaten aufgenommen (vgl. UVE FERNERKUNDUNGSZENTRUM POTSDAM GmbH 1998), darunter auch eine 4,5x7,5km² große Fläche innerhalb des Forstbezirks Hillesheim / Eifel (Abb. 23). Letztgenanntes Areal fällt in das Testgebiet des Trierer MOMS-2P-Projektes.

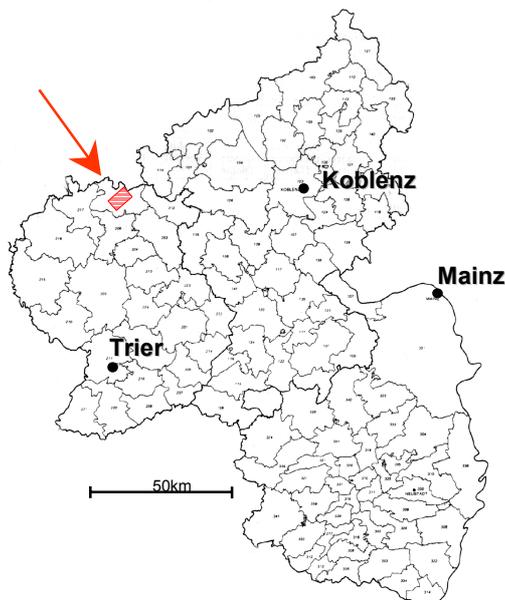


Abb. 23: Lage des DPA-Befliegungstreifens „Hillesheim“ in Relation zu den (alten) Forstbezirken Rheinland-Pfalz (Kartengrundlage: MINISTERIUM für LANDWIRTSCHAFT, WEINBAU und FORSTEN 1987, S.81)

Die Konstellation des flugzeuggetragenen DPA-Sensors entspricht weitgehend dem weltraumgestützten MOMS-2P-System. Beide Systeme arbeiteten nach dem „pushbroom“-Abtastprinzip. Hierbei existiert für jedes abzutastende Pixel einer Bildzeile ein eigener CCD-Detektor, so dass die gesamte Bildzeile simultan aufgenommen werden kann - eine aufwendige und anfällige Schwenkspiegelmechanik entfällt somit (RICHARDS 1993, S.14). Kennzeichnend ist weiterhin der gleichzeitige Einsatz eines Multispektral- und Stereomoduls. Das DPA-Multispektralmodul zeichnet bei einem Bildwinkel von 37° simultan 4 Kanäle mit je 6000 Pixeln pro Zeile auf:

- Kanal 1 (blau) : 440-525nm
- Kanal 2 (grün) : 520-600nm
- Kanal 3 (rot) : 610-685nm
- Kanal 4 (nIR) : 770-890nm

Das DPA-Stereomodul arbeitet panchromatisch (515-780nm) in 3 Blickrichtungen. Während eine Einheit des Stereomoduls nadirgerichtet ist, blicken die beiden anderen mit +/- 25° vorwärts und rückwärts entlang der Flugrichtung. Bei gleicher Gebietsabdeckung wie das Multispektralmodul, zeichnen die 3 panchromatischen Kanäle 12000 Pixel je Bildzeile auf. Die resultierenden hochauflösenden Stereodaten sind insbesondere für photogrammetrische Anwendungen vorgesehen. In Verbindung mit den simultan aufgezeichneten „thematischen“ Multispektralmodul ergibt sich somit eine leistungsstarke Gesamteinheit (LFK-LENKFLUGKÖRPERSYSTEME GmbH 1997). Der MOMS-2P-Sensor weicht von dem beschriebenen DPA-System bezüglich Brennweite der Optik, Blickwinkel und Konvergenzwinkel des Stereomodules ab, entsprechend dem andersartigen Aufnahmeorbit. Geringfügige Abweichungen bestehen auch in der Bandbreite der Kanäle. Die Anzahl der Aufnahmeelemente beträgt beim MOMS-2P-Sensor je Zeile und Modul konstant 6000 Pixel. Doppelte geometrische Auflösung hat lediglich das nadirgerichtete PAN-Modul, realisiert durch die Halbierung der Aufnahmestreifenbreite (DLR-DFD 1997, S.4-1 ff).

Im Falle der Hillesheimer DPA-Befliegung konnten der Universität Trier ausschließlich die Aufnahmedaten des Multispektralmoduls bereitgestellt werden. Resultierend aus Blickwinkel, Pixelzahl und Flughöhe (ca. 4000m) weisen die Bilddaten eine geometrische Auflösung von 0,75m pro Pixel auf. Nach STALLMANN (IFP Universität Stuttgart, mündliche Mitteilung) sind bei den gelieferten Daten Zeilenfehler durch Rollbewegung des Flugzeugs während der Aufnahme bereits ausgeglichen. Die Korrektur erfolgte mit Hilfe während des Fluges aufgezeichneter, hochpräziser GPS-Daten. Die Flugstreifenmodul dienten weiterhin für eine grobe Gesamtkorrektur der Bildmatrix.

7.1.2 Die simulierte Sensorkonstellation. Aufgrund der hohe Basisauflösung des DPA-Datensatzes von 0,75m, der typischen Kanalkombination des Sensors sowie der hervorragenden Datenqualität können die Befliegungsdaten als ideale Ausgangsbasis bezeichnet werden, jeglichen bestehenden oder zukünftigen satellitengetragenen Sensor ähnlicher Kanal-Konstellation zu simulieren (HILL et al. 1998, S.42). Die generelle Strategie zur Nutzung der hochauflösenden Multispektralmodul als Ausgangsbasis für die vergleichende Qualitätsanalyse von Fusionstechniken ist in folgendem Schema zusammengefasst (Abb. 24).

Der hochauflösende primäre Multispektralmodul wird über eine Resampling-Prozedur auf die gewünschte Auflösung der „Referenz“ gebracht (Abb. 24 oben). Diese Auflösung sollte *der* entsprechen, die der PAN-Kanal des zu simulierenden Datensatzes und damit auch das spätere Fusionsergebnis aufweisen soll. Von der Referenz ausgehend wird die gewünschte Sensorkonstellation abgeleitet. Dabei wird für die Erzeugung des niedrig aufgelösten Multispektralmodul eine Degradierung jeden Kanals um den gewünschten Faktor

durchgeführt. Der PAN-Kanal wird über die Mittelung aller Kanäle simuliert, ohne dass die geometrische Auflösung verändert wird. Niedrig aufgelöste Multispektraldaten und höher auflösender PAN-Kanal bilden zusammen die simulierte Datenkonstellation, wie sie ein reeller Satellitensensor theoretisch übermitteln könnte (Abb. 24 Mitte). Der Simulationsdatensatz ist dabei absolut deckungsgleich mit den Referenzdaten. Er ist der Input für die zu testenden Datenfusionsprozeduren, die durch den roten Block im unteren Teil der Abbildung angedeutet sind. Die verschiedenen Fusionstechniken führen zu multispektralen Ergebnisbildern mit der geometrischen Auflösung des PAN-Kanals bzw. der Referenz (Abb. 18 unten). Die Ergebnisse („Ist“) können nun auf vielfältige Weise mit der Referenz („Soll“) verglichen werden (vgl. HILL et al. 1998, S.42).

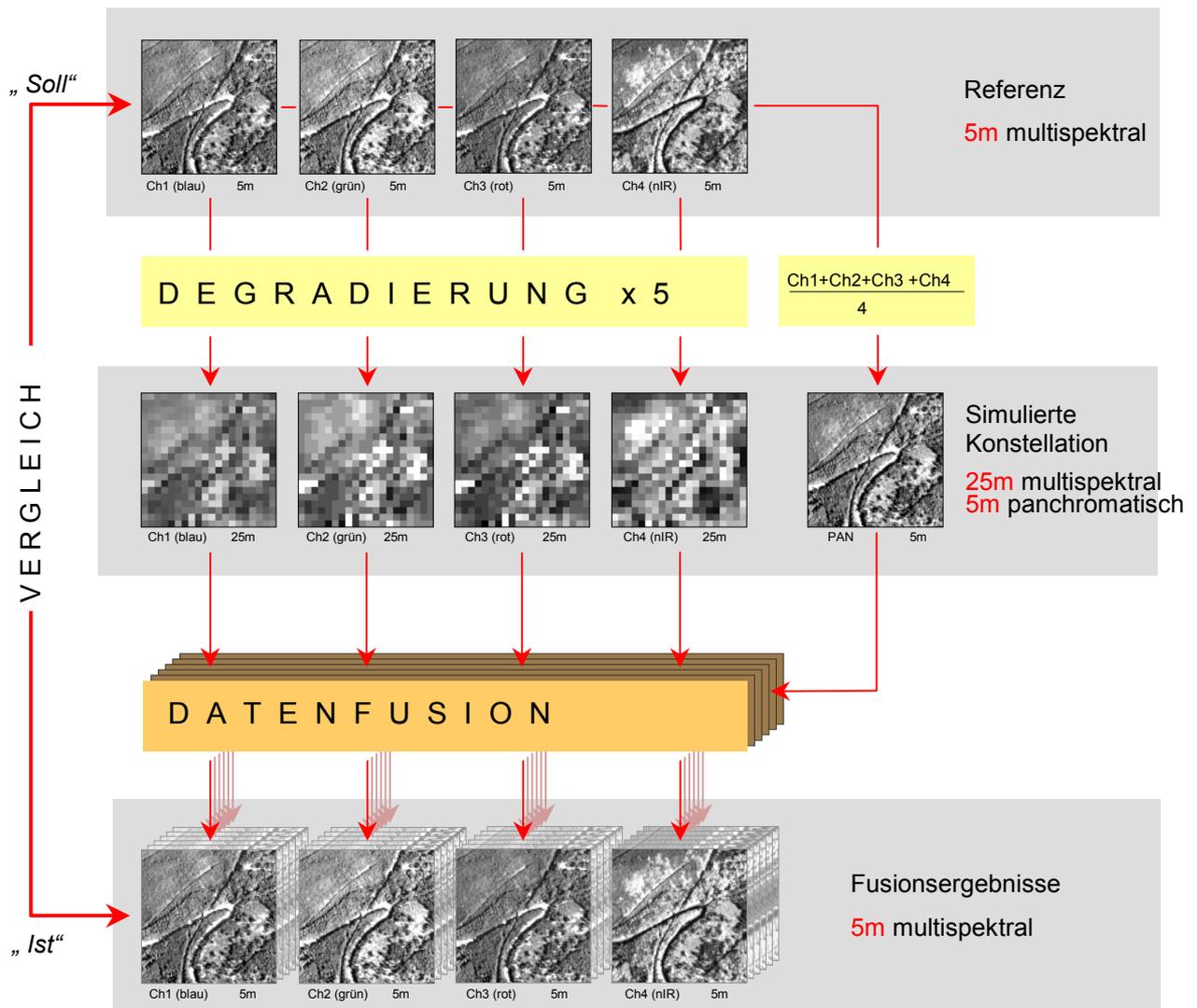


Abb. 24: Konzept der vergleichenden Analyse von Datenfusionstechniken auf der Basis hochauflösender Ausgangsdaten

Im konkreten Fall wurde von einer Referenz- und PAN-Kanal-Auflösung von 5m sowie einem niedrig aufgelösten Multispektralbild von 25m ausgegangen, also einem Verhältnis von 1:5. Für die Wahl dieser Auflösungskonstellation waren folgende Faktoren maßgeblich:

Für das hohe *Auflösungsverhältnis* von 1:5 sprach die Annahme, dass die Fusionstechniken hier eher an ihre Leistungsgrenzen stoßen und damit Qualitätsunterschiede in den Ergebnissen

deutlicher hervortreten als bei geringeren (unproblematischeren) Auflösungsunterschieden. Unterstützend wirkte auch die Tatsache, dass bei realen satellitengetragenen Sensoren ein Auflösungsverhältnis von 1:5 zwischen PAN-Kanal und Multispektralbild derzeit die Obergrenze darstellt (IRS-1C). Alle anderen bestehenden und geplanten Sensoren operieren mit geringeren Verhältnissen. Es erschien sinnvoll, bei dieser Studie von dem „kritischsten“ Fall (dem 1:5-Verhältnis) auszugehen, und auf Basis der aus dieser Konstellation resultierenden Ergebnisse die Wertung der Methoden vorzunehmen. Bei Verkleinerung der Auflösungsunterschiede kann wohl davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisqualität aller Methoden tendenziell ansteigt (vgl. VRABEL 1996, S.1080).

Bezüglich des *Auflösungsniveaus* der Referenz bzw. des PAN-Kanals von 5m waren mehrere Überlegungen ausschlaggebend. Zum einen stellt die geometrische Auflösung von 5m einen Wert dar, der bereits von dem existierenden Satellitensensor IRS-1C erreicht wird bzw. wie er in Kürze von der MOMS-2P PRIRODA-Mission annähernd zu erwarten ist (DLR-DFD 1997, S.2-3). Da beide genannten Datentypen im Rahmen des Trierer Forstprojektes vom gleichen Testgebiet zur Verfügung stehen bzw. stehen werden, erschien es sinnvoll, sich an deren maximaler Auflösung zu orientieren. So können die Ergebnisse, die in dieser Studie an einem (sicherlich) idealisierten Simulationsdatensatz gewonnen wurden, in einer Anschlussstudie auf einen „realen“ Datensatz gleicher Endauflösung angewandt und bezüglich der *absoluten* Qualität verglichen werden. Ein anderes Argument für die Wahl des 5m-Wertes liefern WOODCOCK & STRAHLER (1987, S.316ff). Die Autoren zeigen, dass Pixel von etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ der Größe der zu beobachtenden Objekte (hier: *Bäume*) den idealen bzw. effektivsten Wert darstellen, um eine maximale Wertevarianz bezüglich dieser Objekte im Bild zu erhalten. Höhere Auflösungen führen zu einer großen Zahl ähnlicher Pixelwerte, weil nun jeweils mehrere Pixel auf die einheitlichen Beobachtungsobjekte fallen. Niedrigere Auflösungen verringern die Wertevarianz ebenfalls, da die Objekte und ihre Struktur immer mehr „zusammengefasst“ und dadurch vereinheitlicht werden (der nächsthöhere Objektlevel, der *Bestand*, wird nun das Beobachtungsobjekt). Die Autoren berechnen für Wälder mit Baumdurchmessern von etwa 8m einen „Idealwert“ von ca. 6m Auflösung. Unabhängig von genannter Studie kommen auch KOCH et al. (1997, S.30) und KOCH & FRITZ (1998, S.166) zu dem Ergebnis, dass eine räumliche Auflösung von 5m für die Ziele der deutschen Forstinventur und -einrichtung eine befriedigende Größe darstellt. Geht man weiterhin von dem unter Kapitel 2 herausgearbeitetem Motto „so hochauflösend wie nötig - so grob wie möglich“ aus, ist die Verwendung des 5m-Wertes als Testgröße eine logische Konsequenz.

7.1.3 Das Testgebiet Hillesheim. Das Testgebiet „Hillesheim“ befindet sich innerhalb der welligen Hochfläche der zentralen Eifel, bei Höhenlagen zwischen 400 und 600m (submontane bis montane Stufe, vgl. SCHWIND 1986, S.873). In Nachbarschaft zu der Schneifel im Westen, der Hocheifel im Osten, und der südlich unmittelbar angrenzenden Vulkaneifel, gehört das Befliegungsareal zu der sogenannten Nord-Süd-Zone. Hier besteht eine tektonische Bewegungszone, welche vermutlich schon im Altpaläozoikum angelegt wurde. Nach dem Paläozoikum wirkte diese Zone immer wieder als Depression, so dass hier unter anderem mittel- bis oberdevonische Kalksteine sowie mesozoischer Buntsandstein abgelagert wurden. Die beflogene Fläche befindet sich genau im Schnittbereich zwischen Buntsandsteinablagerungen, unterdevonischen Schiefen sowie der Hillesheimer und Dollendorfer Kalkmulde (vgl. HENNINGSEN & KATZUNG 1992, S.49f).

Die 4,5x7,5km² messende Fläche des Testgebietes setzt mit seiner schmalen Seite etwa im Kylltal bei Oberbettingen an und spannt sich von dort aus nordöstlich über ein großes Waldareal zwischen Hillesheim, Üxheim und Miebach. Das eigentliche Testgebiet dieser

Studie (rot umrandet) befindet sich im südwestlichen Teil des Befliegungsstreifens. Eine Ausschnittwahl war erforderlich, um einen randlosen und kompakteren Datensatz zu erhalten. Störende Wolken und Dunstschleier in der nordöstlichen Hälfte des Befliegungsstreifens erzwangen dabei die Festlegung des Testgebietes in der Südwesthälfte. Das Testgebiet misst ca. 3,3x2,36km und deckt damit eine Fläche von etwa 7,8km² oder 780ha ab. Ein wesentlicher Teil des Areal wird von dem *Hillesheimer Wald* eingenommen, welcher zusammen mit einigen kleineren Inselflächen den 589,4ha umfassenden Gemeindewald Hillesheim bildet. Das Übergewicht an Waldflächen innerhalb der Testfläche entspricht dem Anliegen der Studie, die Fusionsqualitäten insbesondere in Hinblick auf forstliche Interessen zu untersuchen.

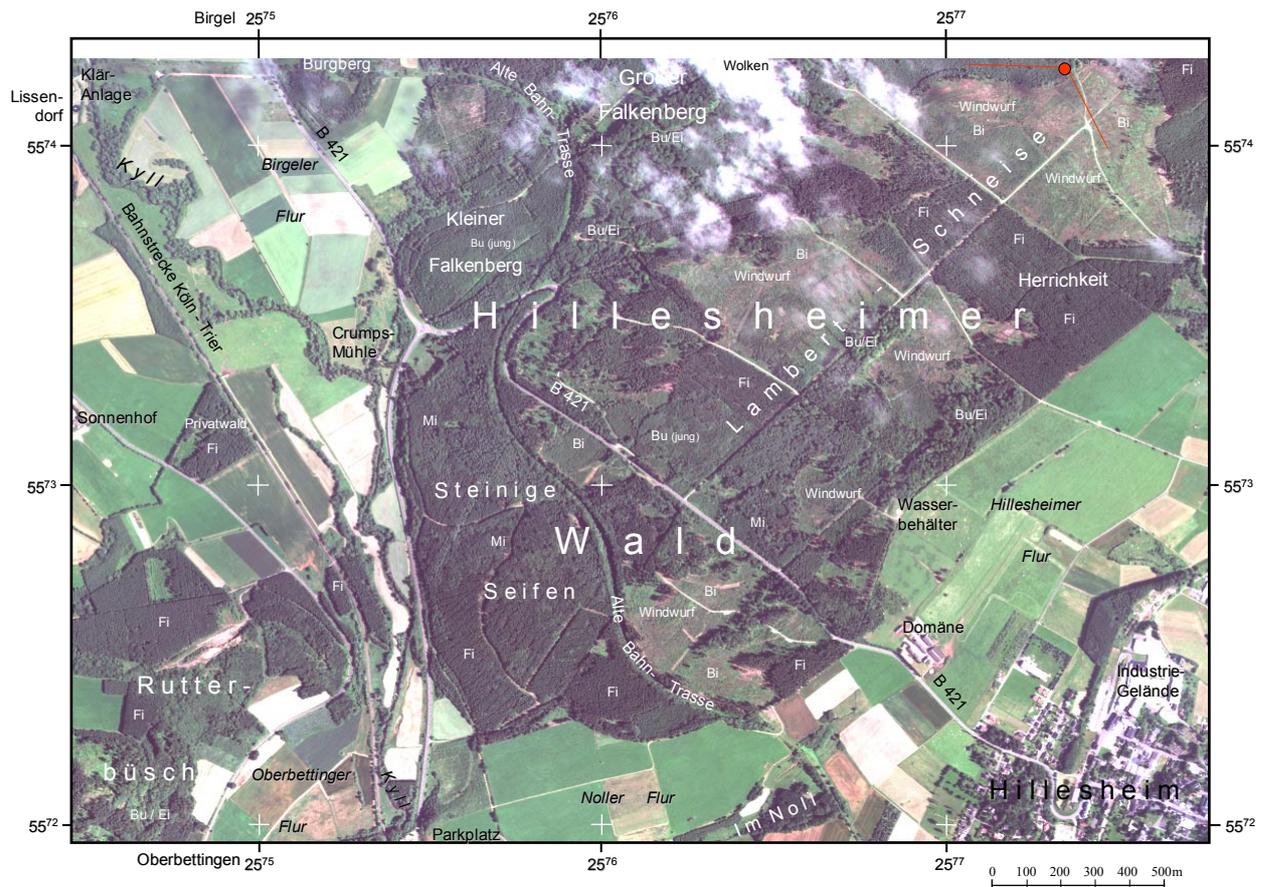


Abb. 25: Das Testgebiet Hillesheim (Kanalkombination 3-2-1 der DPA-Befliegung, 3m Bodenauflösung)

In Abbildung 25 ist das Arbeitsgebiet im Detail zu erkennen. Es handelt sich hierbei um den georeferenzierten endgültigen Gebietsausschnitt der DPA-Befliegung, resultierend aus den Vorverarbeitungsschritten, wie sie nachfolgend beschrieben werden. Die Darstellung erfolgt hier in einer Kanalkombination, welche der natürlichen Farbwahrnehmung entspricht. Lokalbezeichnungen und UTM-Gitter befinden sich auch auf einem Folienoverlay im Anhang, welches genau der Größe der Fusionsergebnisse und der Referenzabbildungen entspricht.

Das Areal enthält zu etwa 56% deutlich strukturierte und differenzierte Forstflächen, wobei der Hillesheimer Wald hiervon den größten Anteil stellt. Die übrigen 44% des Gebietes werden durch landwirtschaftliche Nutzflächen, Siedlungen (Hillesheim), Verkehrs- und Sonderflächen eingenommen. Der Hillesheimer Wald bedeckt einen weitläufigen, zur Kyll sanft abfallenden Höhenrücken, welcher entlang der Lambert-Schneise ein knapp 500m hoch gelegenes Plateau

bildet. Lediglich im Bereich des Falkenberges ist das Waldeareal stärker zertalt. Hier befinden sich mit über 200 Jahren die ältesten Laubholzbestände. Weite Teile des übrigen (heutigen) Waldgebietes bestanden Mitte des vorigen Jahrhunderts lediglich aus lichten Waldresten, Heide- und vereinzelt Ackerflächen (MANHELLER 1998, Forstamt Hillesheim, mündliche Mitteilung). Die Ödflächen dieser Zeit, fast 40% der Vulkaneifelfläche, waren Folge einer Jahrhunderte langen übermäßigen Nutzung der Wälder durch den Menschen. Brennholz- und Sreuentnahme, Eichelmast und Waldfeldbau führten zur aktiven und passiven Veränderung der vorkommenden Baumarten (ursprünglich Buche) und schließlich zur starken Degradierung von Wald und Boden bis hin zu vollständigen Verheidung. Erst Mitte des 19. Jahrhunderts, mit der Gründung erster Forsteinrichtungen, kam es zur gezielten Wiederbestockung ausgedehnter Flächen. Zunächst aus der Not heraus, weil schnellwachsend und anspruchslos, später aus wirtschaftlichen Gründen, erfolgte die Wiederbewaldung fast ausnahmslos mit der Fichte im Reinbestand, in der Eifel z.T.



Abb. 26: Windwurffläche von 1984 nördlich der Herrlichkeit, Blickrichtung SW (Aufnahme 3.8.1998)

durchmischt mit Kiefern (SCHWIND 1986, S.844f). So befinden sich im Jahre 1980 auch im Gemeindewald Hillesheim nur noch 29% Laubwald (überwiegend Buche), dagegen 71% Nadelwald (überwiegend Fichte). Teils substratbedingt (Buntsandstein), teils aufgrund der geschilderten Bodendegradierung durch den Menschen, wachsen die Bäume dabei auf tendenziell eher armen Standorten (FORSTDIREKTION KOBLENZ 1997). Im Bereich des Plateaus (Lambert-Schneise) dominieren nach MANHELLER (1998, Forstamt Hillesheim, mündliche Mitteilung) stark vernässungsgefährdete Böden.

Die flachwurzelnden Fichtenreinkulturen sind an den hochgelegenen und staunassen Standorten gegenüber mechanischer Einwirkung besonders anfällig. So ist es nicht verwunderlich, dass es hier im Zuge der Herbststürme 1984 und der Winterstürme 1990 zu massiven Windwurfschäden gekommen ist. Das Foto (Abb. 26) zeigt die große Windwurffläche nördlich der Herrlichkeit, 14 Jahre nach dem Schadereignis. Die Erstbestockung der Blößen erfolgt hier zwecks Bodenaufbereitung zunächst mit Pioniergehölzen wie Birke und Erle (MANHELLER 1998, Forstamt Hillesheim, mündliche Mitteilung). Die Perspektive der Aufnahme ist in Abbildung 25 (s.o.) als roter Winkel eingezeichnet. Im Hintergrund sind die Fichtenbestände der Herrlichkeit zu erkennen.

Windwurfschäden, fortschreitende Bodenversauerung unter Fichten-Reinbeständen sowie die hohe Anfälligkeit der Monokulturen gegenüber Krankheiten haben (nicht nur in der Eifel) zu einem Überdenken bisheriger Forstkonzeptionen geführt. Neuere Ziele sehen vor, die verbliebenen Fichtenbestände nach und nach in ökologisch stabilere Mischkulturen oder Laubwälder zu überführen. Aus wirtschaftlichen Gründen wird die ertragreiche Fichte aber auch in Zukunft nicht gänzlich ersetzt werden können (SCHWIND 1986, S.846; MANHELLER 1998, Forstamt Hillesheim, mündliche Mitteilung).

Das heutige Bild des Hillesheimer Waldes stellt sich entsprechend der bewegten Entwicklung als ein buntes Gemisch dar aus:

- alten Laubholzbeständen (Bu/Ei) → Großer Falkenberg; Gebiet südwestlich Herrlichkeit
- großen Fichtenreinbeständen (Fi), die den Sturmkatastrophen nicht zum Opfer gefallen sind → Herrlichkeit; südlicher Teil der Steinigen Seifen; Nordteil Rutterbüsch
- Windwurfflächen, Neubestockt mit Pioniergehölzen, insbesondere Birke (Bi) → Flächen beidseitig der Lambert-Schneise; Flächen südöstlich der Steinigen Seifen
- Mischbeständen (Mi), resultierend aus a) Fichten-Aufforstung / -Verjüngung innerhalb alter Laubholzbestände vor der neuen Konzeption; b) aktuelle Laubholz-Aufforstungen innerhalb durchforsteter (ehemaliger) Fichten-Monokulturen → Steinige Seifen; Kleiner Falkenberg

Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Verhältnisse der Waldzusammensetzung sehr viel besser in einer Falschfarben-Infrarotdarstellung erkennen lassen. Fichtenbestände sind hier sehr dunkel gefärbt, während junge Laubholzbestände durch ein leuchtendes Rot auffallen. Alte Laubholzbestände zeigen eine deutlich grobe Textur bei orange bis roten Farbtönen. Die Windwurfflächen heben sich durch ihre helle, schmutzige Farbe (leicht orange bis bläulich) ab.

7.1.4 Fusionsstudien der letzten 20 Jahre im Überblick. Der Autor COLVOCORESSES (1977) weist in seiner Studie über die wünschenswerte zukünftige LANDSAT-Sensorkonfigurierung darauf hin, dass die geometrische Auflösung kostenbestimmend für Konstruktion und Operation des Sensors sei, denn jedes Daten-Bit müsse übertragen, empfangen, prozessiert und archiviert werden. Angesichts exponentiell ansteigender Datenmengen bei Anhebung der geometrischen Auflösung, schlägt der Autor erstmalig vor, nur einem Band eine (relativ) höhere geometrische Auflösung zu verleihen, und diesen Kanal bedarfsweise zur Schärfung der anderen Kanäle zu nutzen (COLVOCORESSES 1977, S.1142). SCHOWENGERDT (1980) greift diesen Vorschlag auf und versucht, aus einem künstlich degradierten MSS-Datensatz den Originaldatensatz wieder zu rekonstruieren, indem er den über einen Filter extrahierten hochfrequenten Anteil des Original-Grünkanals zur Schärfung aller niedrig aufgelösten (degradierten) Kanäle heranzieht. Der Autor zeigt sich in der Schlußbetrachtung seiner Studie zuversichtlich, dass 1-2 hochauflösende Kanäle ausreichen, um die hochfrequente Information für alle anderen Kanäle angemessen zu repräsentieren (SCHOWENGERDT 1980, S.1334). Bis Mitte der 80er Jahre folgen weitere grundlegende Pionierstudien. Mehrere Autoren beschäftigen sich mit bandarithmetischen Verfahren. LAUER & TODD (1981), CHAVEZ et al. (1983) und CHAVEZ (1986) verwenden simple Additionsverfahren, während CLICHE et al. (1985) je Kanal unterschiedliche Rechenverfahren und Gewichtungen einsetzen, um so aus SPOT-Daten ein Farbinfrarotluftbild-ähnliches Produkt für die visuelle Interpretation zu schaffen (CLICHE 1985, S. 312). Auch ROLLER & COX (1980) und HALLADA & COX (1983), verwenden komplexere bandarithmetische Operationen, stellen dabei aber die radiometrische Qualität bzw. die „Ausbalanciertheit“ des Fusionsproduktes in den Vordergrund.

HAYDN et al. (1982) beschäftigen sich in ihrer ausführlichen IHS-Studie erstmals mit den Anwendungsmöglichkeiten der IHS-Transformation im Bereich der Datenfusion. Mit etwas Verzögerung erfolgt nun Ende der 80er bis Anfang der 90er Jahre ein regelrechter Boom in der Verwendung des IHS-Verfahrens (z.B. WELCH & EHLERS 1987, HARRIS et al. 1990, EHLERS 1991, GRASSO 1993). Im gleichen Zeitraum findet ein verwandtes Fusionsverfahren auf Basis der Hauptkomponentenanalyse (PCS) Erwähnung (CHAVEZ 1986, CHAVEZ &

BOWELL 1988). SHETTIGARA (1989, 1992) fasst das IHS- und PCS-Verfahren zu der Kategorie „Component Substitution Techniques“ zusammen und versucht diesen Fusionstypus zu optimieren, indem er das Verfahren der Regression Variable Substitution (RVS) entwickelt. Parallel versuchen CARPER et al. (1990) und PELLEMANS et al. (1993), das IHS-Verfahren zu optimieren, indem sie die Intensity-Komponente auf abgewandelte Weise zu erzeugen bzw. auszutauschen versuchen.

Neben den bandarithmetischen und den Component-Substitution-Verfahren findet auch der von SCHOWENGERDT (1980) entwickelte Filter-Ansatz wiederholte Anwendung (CHAVEZ 1984; CHAVEZ & BOWELL 1988; CHAVEZ et al. 1991). Der extrahierte hochfrequente Anteil des PAN-Kanals wird von den genannten Autoren dem Multispektralbild additiv zugefügt. Auch PRADINES (1986), PRICE (1987), MUNESHIKA et al. (1993) und FILIBERTI et al. (1994) verfolgen das Ziel, nur die hochfrequenten Informationen zu übertragen, arbeiten dabei aber multiplikativ.

Andere Wege geht TOM (1986), indem er den jeweils gewünschten hochauflösenden Kanal durch die Parameter einer lokalen Regressionsanalyse zwischen Eingangskanal und auf gleiche Auflösung degradiertem PAN-Kanal zu schätzen versucht. Bereits in den Vorjahren hatten TOM et al. (1984) und TOM & CARLOTTO (1985) mit dem Regressionsverfahren experimentiert, die Anwendung jedoch zunächst auf den Fall der TM6-Modellierung (Thermalkanal) mit Hilfe der übrigen TM-Kanäle beschränkt bzw. das Verfahren zur Rauschminimierung von Radarbildern verwendet.

Ein weiteres Alternativverfahren wird von PRICE (1987) zur Behandlung des „kritischen“ nIR-Kanals verwendet. Der Autor erzeugt eine Ergebnisvorstufe durch eine simple Rekodierung der Histogrammwerte des PAN-Kanals auf Basis der räumlich korrespondierenden Werte im nIR-Kanal. MORAN (1990) setzt das Rekodierungs-Verfahren zur Verbesserung des Thermalkanals TM6 ein und versucht, die Methode zu optimieren, indem die Wertabfrage und Rekodierung auf Basis eines wandernden Fensters vorgenommen wird. ZHUKOV et al. (1995) und ZHUKOV & OERTEL (1996) stellen das gleiche Verfahren ihrerseits als neue Technik vor, einen niedrig aufgelösten Multi- oder auch Hyperspektraldatensatz mit Hilfe eines panchromatischen Kanals zu „entmischen“ (ZHUKOV & OERTEL 1996, S.11). Ihre Abwandlung liegt dabei darin, den panchromatischen Kanal optional zunächst zu klassifizieren, und von diesen Klassen ausgehend die Abfrage der Histogrammwerte des Eingangskanals zu starten.

Ebenfalls mit Hyperspektraldaten arbeiten GROSS & SCHOTT (1996, 1998). Die Autoren versuchen, die mit Hilfe der Mischpixelanalyse auf niedrigem Auflösungslevel ermittelten Materialanteile (Abundanzen) mittels eines „optimization algorithm“ in dem hochaufgelösten Band zu verorten, um somit genauere Fraktionsbilder zu schaffen (GROSS & SCHOTT 1996, S. 429, 431). Da es bei dem Ansatz um die räumliche Verbesserung eines speziellen Analyseproduktes geht, und nicht um die Verbesserung des Ausgangsbildes an sich wird dieses Verfahren im Verlaufe dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Neueste Entwicklung im Bereich der Datenfusion ist die Verwendung der Wavelet-Transformation (IVERSON & LERSCH 1994; MANJUNATH & MITRA 1995; GARGUET-DUPORT et al. 1996; RANCHIN & WALD 1996^a, 1996^b; RANCHIN et al. 1996; YOCKY 1996). Die Signale von Eingangs- und PAN-Kanal werden hier sukzessive in hoch- und niederfrequente Anteile verschiedener Auflösung zerlegt. Die Fusion erfolgt schließlich dadurch, dass vor der Rücktransformation bestimmte Frequenzanteile von Multispektralkanal und PAN-Kanal miteinander verrechnet oder ausgetauscht werden.

Autoren & Jahr	Fusionstechnik										Sensoren					Testareal		Gütebestimmung																			
	Gemischte Farbkomposite	Addition (A)	Multiplikation (M)	gemischte Arithmetik (M/A)	Color Normalizing (CN)	IHS-Transformation (IHS)	Principal Component Substitution (PCS)	Regression Variable Substitution (RVS)	Hochfrequenz-Addition (HFA)	Hochfrequenz-Modulation (HFM)	Wavelet (WV)	LUT-Rekodierung (LUT)	Lokale Regressionsanalyse (LSM)	Landsat RBV	Landsat MSS	Landsat TM 1-5, 7	Landsat TM 6	SPOT Pan	SPOT XS	Radarbild	Andere Daten	städtisch	landwirtschaftlich geprägt	ohne Bodenbedeckung (geolog. Interessen)	forstwirtschaftlich geprägt	Mischung	Referenzbild vorhanden oder simuliert?	visuell	Korrelation	RMS	Differenzbilder	Signaturenvergleich	Statistikvergleich	Folgeproduktgüte (z.B. Klassifikation)	Andere Maße		
Daily et al. 1979	■													X						X			X	X			X										
Schowengerdt 1980									■					X									X	X			X	X									
Roller & Cox 1980				■									X	X												X		X								X	
Lauer & Todd 1981	?												X	X												?		?									
Haydn et al. 1982						■							X	X							X		X				X										
Hallada & Cox 1983				■						■										X					X			X	X								
Chavez et al. 1983	■													X						X				X			?										
Tom et al. 1984												■		X	X								X	X			X		X								
Chavez 1984	■									■				X		X							X	X													
Tom et al. 1985												■		X	X								X	X			X		X								
Tom & Carlotto 1985												■		X	X					X			X	X			X		X								
Cliche et al. 1985				■														X	X			X					X										
Pradines 1986			+															X	X																		
Tom 1986			+					+				■		X	X	X	X					X	X		X		X		X								
Chavez 1986	+	■	+			+		+						X						X					X		X										
Price 1987			+																																		
Welch & Ehlers 1987			■			■								X	X	X						X					X										
Chavez & Powell 1988	+	+	+	+		+		■		■				X	X							X	X	X			X										
Shettigara 1989	+	+	■	+		■		■	+									X	X			X					X	X									
Carper et al. 1990			■			■												X	X				X		X		X	X									
Moran 1990			+									■		X	X								X			X		X								X	
Harris et al. 1990						■								X						X	X		X			X		X									
Ehlers 1991	■	+	■			■	+							X	X	X	X					X				X		X									
Chavez et al. 1991			■			■		■						X	X								X				X	X		X	X						X
Shettigara 1992			+			■		■		■				X	X	X						X				X	X										
Grasso 1993	+	+	+			■	+							X	X					X			X			X											
Conese et al. 1993						+		■		■				X	X								X				X										
Munehika et al. 1993	?			+	+	+		■		■				X	X							X														X	
Pellemans et al. 1993				■		■		■		■								X	X				X				X	X						X	X		
Filberti et al. 1994	+	■	+	+	+	+	+	■		■	+	+								X			X			X		X					X	X			X
Iverson & Lersch 1994				+	+	+	+	■		■	+			X	X	X									?		?		?								
Ranchin et al. 1994																		X	X				?			?		?									
Manjunath & Mitra 1995														X	X	X										X	X										
Zhukov et al. 1995						■																X	X			X		X									
Zhukov & Oertel 1996						■																X	X		X	X	X	X	X				X	X			X
Vrabel 1996	+	+	+	■		■	+	■		■											X	X	X	X	X	X	X	X									X
Garguet-Duport et al. 1996	■			■		■		+		■	+						X	X								X	X		X	X							X
Ranchin & Wald 1996a						■											X					X	X			X											
Ranchin & Wald 1996b						■											X				X	X				X											
Ranchin et al. 1996						■											X	X							X	X	X	X									X
Yocky 1996	+		+	■		■	+	+	+	+	■	+		X	X							X				X	X	X									X
Koch et al. 1997		■	■	■		■								X	X	X				X				X			X										
Hill 1997														X	X	X							X	X													X
Sunar & Musaoglu 1998						■								X	X								X			X										X	
Hill et al. 1998			+	+	+				+			■									X				X	X	X	X	X					X	X		X

- = Neuentwicklung oder 1. Nennung
- = Weiterentwicklung oder Modifikation
- = Anwendung bestehender Algorithmen
- = Methode wird zum Vergleich herangezogen
- + = Methode wird genannt
- ? = Zuordnung unsicher

Abb. 27: Konfigurationen wichtiger Fusionsstudien von 1979-1998 (Auswahl)

Die Abbildung 27 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die Fusionsstudien der letzten 20 Jahre. Die Auflistung der Autoren erfolgt dabei zeilenweise und nach Jahr geordnet. In den Spalten befindet sich eine Zuordnung zu den Variablen

- verwendete Fusionstechnik
- verwendeter Sensor / verwendete Sensoren
- Eigenschaften des Testareals
- verwendete Maße zur Gütebestimmung

Deutlich lässt sich der Schwerpunkt der Fusionstechnikentwicklung von Mitte der 80er bis Mitte der 90er Jahre erkennen, entsprechend der (neuen) Verfügbarkeit von SPOT- und TM-Daten. Zu beachten ist, dass es sich bei den meisten Testgebieten der Studien um rein agrare, städtische oder morphologisch-geologisch betonte Räume handelt (Spaltengruppe „Testareal“). Ausgewogen gemischte Szenen werden eher selten, reine Forstszenen fast gar nicht verwendet. Auffällig ist auch die oftmals rein visuelle Bewertung der Fusionsergebnisse (Spaltengruppe „Gütebestimmung“). Referenzbilder als „ehrlichstes“ Gütekriterium kommen nur vereinzelt zum Einsatz. Weiterhin wird in den meisten Studien, wenn überhaupt, nur ein einziges, meist auffällig schlechteres Verfahren als Vergleich zu der aktuell getesteten Methode herangezogen. Selbst in ausgesprochenen Vergleichsstudien (CHAVEZ et al. 1991, VRABEL 1996) wird nur auf ein sehr begrenztes Spektrum der vorhandenen Verfahren zurückgegriffen.

Resümierend lässt sich also feststellen, dass in den letzten 20 Jahren eine Vielzahl von Algorithmen entwickelt und vorgestellt worden sind, die sich mit der Möglichkeit der auflösungsverbessernden Datenfusion befassen. Es lässt sich jedoch ein deutliches Defizit beobachten, was den objektiven *Vergleich* solcher Fusionstechniken betrifft. Annähernd ins „Niemandland“ begibt man sich, wenn man das Augenmerk der Qualitätsanalyse auf forstwirtschaftlich genutzte Flächen konzentriert haben will. Eine spezielle Studie von WALD et al. (1997) über die Gütebestimmung von Fusionsresultaten mag bezüglich der mangelnden Güteabschätzung als Wink mit dem Zeigefinger verstanden werden, zeigt gleichzeitig aber auch, dass die Qualität der Fusionsergebnisse insgesamt mehr und mehr in den Vordergrund gerät.

7.1.5 Fusionstechniken und ihre Umsetzung im Detail. Nachfolgend findet die Detailbetrachtung der Fusionstechniken sowie die Erläuterung ihrer Umsetzung statt. Die Gliederung orientiert sich dabei an folgenden methodischen Sparten:

- Gemischte Farbkomposite (Band Replacement)
- Bandarithmetik
- Komponentenaustausch nach linearer Transformation (Component Substitution)
- Filterverfahren
- Lookup-Table Rekodierung
- Lokale Regressionsanalyse

Die Unterteilung und Zuordnung ist als subjektive Gliederung des Verfassers dieser Arbeit zu sehen. Für eine systematische Behandlung der Techniken schien sie aber die sinnvollste. Es ist zu betonen, dass die Zuordnung der einzelnen Verfahren zu einer der Kategorien nicht immer eindeutig ausfällt. Viele der Techniken beinhalten mehrere methodische Elemente. In solchen Fällen erfolgte die Zuordnung nach demjenigen Aspekt, der für die Ergebnisqualität der entscheidendste ist.

Es folgen zunächst noch einige Bemerkungen zur Auswahl der Testverfahren sowie allgemeine Aspekte zur Umsetzung.

Nicht alle Verfahren konnten im Rahmen dieser Studie auch implementiert und getestet werden. An dieser Stelle sollen deshalb einige Kriterien genannt werden, welche für die Selektion der Verfahren maßgeblich waren:

- generell sollten nur solche Verfahren getestet werden, welche der Auflösungsverbesserung eines mehrkanaligen Multispektraldatensatzes mit Hilfe eines einzelnen höher auflösenden Kanals dienen (→ Ausschluss von Spezialverfahren für bestimmte Kanalkonstellationen)
- die Auflösungsverbesserung sollte dabei das Bild *an sich* betreffen, so dass alle Anwendungen, visuelle Interpretation und nachgelagerte computergestützte Analyse, theoretisch möglich sind (→ Ausschluss von Spezialverfahren, die auf ein bestimmtes Bildprodukt abzielen)
- es sollte sich um Techniken handeln, welche auf verschiedene Sensorszenarien anzuwenden sind, also flexibel einzusetzen sind (→ Ausschluss von sensorbezogenen Spezialverfahren)
- die Methoden sollten operationell verwendbar sein und möglichst ohne zusätzliche Daten auskommen (→ Ausschluss von in der Praxis uneffektiven Verfahren)
- das jeweilige Fusionstool sollte sich bereits bewährt haben und in mehreren Studien verwendet oder zitiert worden sein (→ Ausschluss experimenteller Verfahren, deren Verwendbarkeit nicht weiter bestätigt wurde)
- die in Frage kommenden Verfahren sollten im Zeitrahmen einer Diplomarbeit und mit den zur Verfügung stehenden Mitteln (Hard- und Software) implementierbar sein oder bereits zur Verfügung stehen (→ Ausschluss von extrem aufwendig zu implementierenden oder nur mit speziellen Programmen realisierbaren Verfahren)

Nach diesen Kriterien wurden folgende Verfahren ausgewählt (in Klammern befindet sich das im weiteren Studienverlauf verwendete Kürzel):

- Addition (A)
- Multiplikation (M)
- Kombination von Multiplikation und gewichteter Addition (M/A)
- Color Normalizing (CN)
- IHS-Transformation (IHS)
- Principal Component Substitution (PCS)
- Hochfrequenz-Addition (HFA)
- Hochfrequenz-Modulation (HFM)
- WAVELET-Transformation (WV)
- Lookup-Table-Rekodierung (LUT)
- Lokale Regressionsanalyse (LSM)

Einige der ausgewählten Techniken, wie z.B. die einfache Addition oder Multiplikation, sind heute zweifelsfrei überholt. Das Verfahren der Kombination von Multiplikation und gewichteter Addition nach CLICHE et al. (1985) ist rein für visuelle Zwecke konzipiert worden. Somit sind für diese Methoden nicht alle genannten Kriterien (s.o.) erfüllt. Für ihre Auswahl war jedoch ihre „historische“ Bedeutung und die Tatsache, dass sie mitunter immer noch verwendet werden, mitentscheidend. Ihr Einbezug erfolgte auch mit dem Hintergedanken, die (positive) Entwicklung im Bereich auflösungsverbessernder Fusionstechniken zu unterstreichen.

Mit Ausnahme des Verfahrens der Lokalen Regressionsanalyse, welches bereits als FEUT Image Processing Software, Vol. 3, im Fach Fernerkundung der Universität Trier zur

Verfügung stand (HILL 1997), wurden alle getesteten Fusionstechniken anlässlich dieser Arbeit programmiert. Die Umsetzung der Wavelet-Methode erfolgte von Dr. Thomas Udelhoven (Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fach Fernerkundung, Universität Trier) mit Hilfe der Programmiersprache IDL. Alle anderen Verfahren wurden vom Verfasser dieser Arbeit mit der „Spatial Modeler Language“ unter der Bildverarbeitungssoftware IMAGINE realisiert.

Einige der Verfahren, z.B. Addition und Multiplikation, führen operationsbedingt zu einer völligen Veränderung der Grauwertverteilungen der Kanäle. Um für die spätere Analyse eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, waren in diesen Fällen deshalb nachgeschobene Histogrammanpassungen erforderlich. Maßgabe waren dabei die Histogrammparameter des *Eingangsbildes*. Ein Referenzbild wie in dieser Studie steht ja im Praxisfall nicht zur Verfügung; somit stellt die Histogrammanpassung an das Eingangsbild die einzige mögliche Approximation der operationsbedingten Histogrammveränderungen dar. Es sei daran erinnert, dass eine Histogrammveränderung nur etwas mit der „Balance“ der globalen Grauwertverteilung zu tun hat. Die „echten“ lokalen Verzerrungen können (und sollen) durch die Histogrammangleichung *nicht* aufgefangen werden. Die konkrete Prozedur der Histogrammanpassung wird in dem jeweiligen Kapitel zur Umsetzung beschrieben.

Bis auf wenige Ausnahmen setzen alle Fusionsverfahren voraus, dass das geometrisch niedriger aufgelöste Multispektralbild vor der Prozedur an die Bildgröße des höher aufgelösten PAN-Kanals angepasst wird. Bei der Wahl der hierfür erforderlichen Resamplingprozedur kam die „Nearest Neighbour“-Methode (Verwendung des nächststehenden Grauwerts) generell nicht in Frage, da sich die verfahrensbedingten Blockstrukturen im Fusionsergebnis überall dort durchpausen, wo im panchromatischen Kanal großflächig nur geringfügige, im Multispektralkanal dagegen starke Grauwertvariationen auftreten. Es wurde deshalb die „bilineare Interpolation“ gewählt (Interpolation aus den 4 benachbarten Werten), das Verfahren, welches bei annähernd allen ausgewerteten Fusionsstudien zur Anwendung kommt.

Kategorie 1: Gemischte Farbkomposite

Die einfachste und direkteste Form, Daten verschiedener Auflösung zu kombinieren, ist die Mischung der Datensätze in der RGB-Darstellung am Bildschirm oder im Druck (VRABEL 1996, S.1076). So ordnet DAILY et al. (1979, S.1111) erstmals einen Landsat-Kanal und zwei unterschiedlich polarisierte Radarbilder den drei Farbkanonen eines Bildschirms zu, um den größtmöglichen Informationsgehalt gleichzeitig zur Darstellung zu bringen. CHAVEZ (1984, S.105) schlägt die gleiche Methode vor, um die Auflösung des LANDSAT-TM zu verbessern, indem der SPOT PAN-Kanal den am höchsten korrelierten TM-Kanal in der Darstellung ersetzt. Auch EHLERS (1991, S.22, 26) nutzt diese Möglichkeit der Datenmischung, um den Informationsgehalt bei der Visualisierung der Daten zu maximieren.

Es dürfte klar sein, dass dieses „Band Replacement“ nur eine Behelfsmöglichkeit für reine Darstellungszwecke sein kann. Die effektive Schärfung kann sich verfahrensbedingt nur in engen Grenzen halten und die gewohnte Farbdarstellung wird zwangsläufig gestört. Die Methode wird in der Praxis auch weniger für die Integration von Daten verschiedener Auflösung, sondern vielmehr für die Integration von Daten unterschiedlichen *Typs* und *Datums* verwendet. Sie sei hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Kategorie 2: Bandarithmetische Verfahren

Als bandarithmetische Fusionstechniken werden hier all jene Verfahren zusammengefasst, welche auf einfachen, Pixel für Pixel stattfindenden arithmetischen Operationen wie Addition, Multiplikation etc. und deren Kombinationen basieren. Als Abgrenzungskriterium zu anderen Methodensparten gilt weiterhin, dass die Anwendung der Operationen zwar kanalweise unterschiedlich stattfinden kann, *innerhalb* eines Kanals aber immer einheitlich ist. Die Abgrenzung zu komplexeren Verfahren bleibt trotzdem nicht immer eindeutig, wie sich noch zeigen wird. Bandarithmetische Verfahren lassen sich relativ einfach in Bildverarbeitungsprogrammen wie IMAGINE oder ENVI umsetzen. gibt das Konzept der bandarithmetischen Verfahren schematisch wieder:

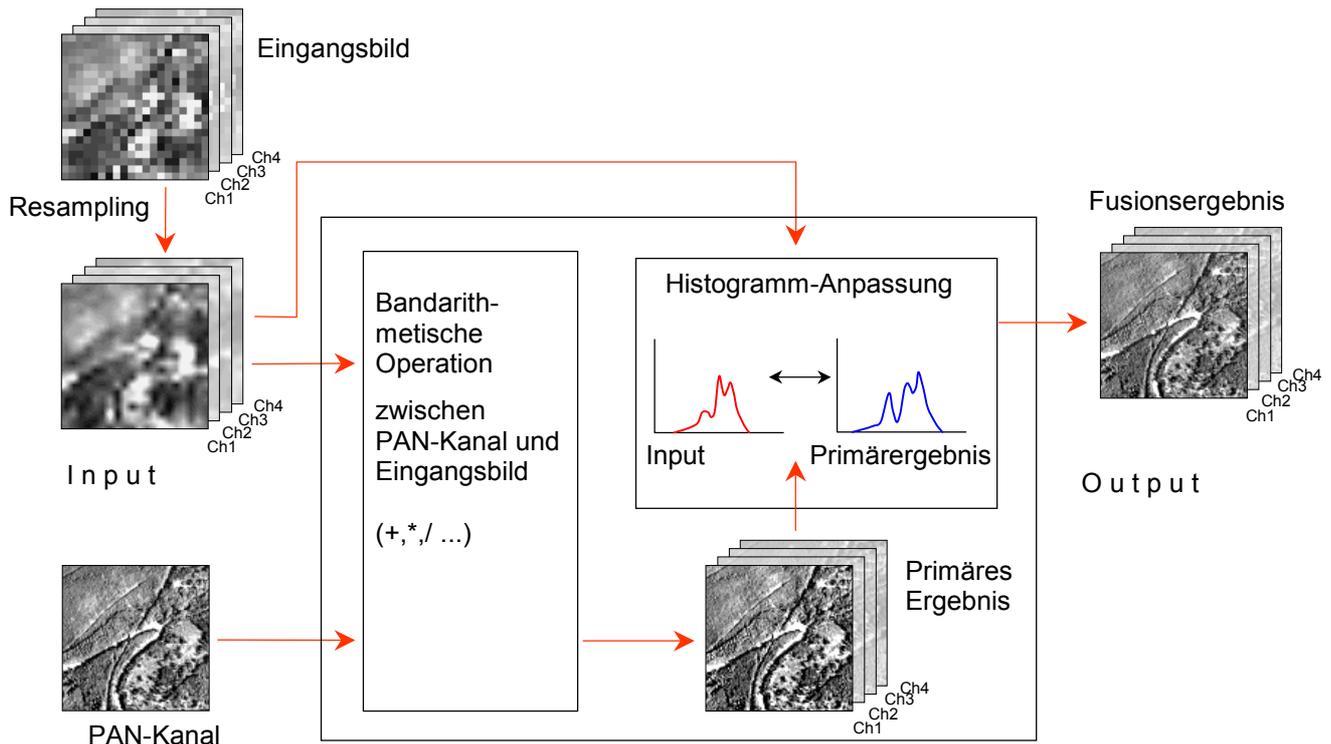


Abb. 28: Schema zur Datenfusion über bandarithmetische Operationen

Die Addition gehört zusammen mit der Multiplikation zu den einfachsten auflösungsverbessernden Fusionstechniken. Mit der Addition beschäftigen sich insbesondere LAUER & TODD (1981), CHAVEZ et al. (1983), CHAVEZ (1986) und CLICHE et al. (1985).

Das Additionsverfahren beruht auf der pixelweisen Addition eines jeden Multispektralkanals mit dem hochauflösenden panchromatischen Kanal (CHAVEZ 1986, S.1640). Voraussetzung für die Operation ist dabei die bereits erwähnte Anpassung der Bilddimension des Multispektralbildes an die des PAN-Kanals (Resampling).

$$M_i^{hi} = M_i^{low} + P^{hi}$$

M_i^{low} = Multispektraldaten, niedrige Auflösung
 P^{hi} = PAN-Kanal, hohe Auflösung
 M_i^{hi} = Fusionsergebnis
 i = Kanalindex

Die Implementierung des Additionsverfahrens erfolgte nach CHAVEZ et al. (1983) und CHAVEZ (1986). Allen Kanälen des Multispektralbildes werden hier die Subpixelvariationen des PAN-Kanals gleichwertig aufaddiert. Die Umsetzung erfolgte im „Model-Maker“ (IMAGINE). Nach Definition der beiden Input-Rasterlayer (Multispektralbild, PAN-Kanal)

erfolgte deren Verknüpfung durch die Funktion „+“. Das Modell wurde so programmiert, dass nach der Addition eine automatische Histogrammanpassung gemäß

$$M_i^{hi} \text{ skaliert} = \left(M_i^{hi} - \overline{M_i^{hi}} \right) \cdot \left(\frac{Std.M_i^{low}}{Std.M_i^{hi}} \right) + \overline{M_i^{low}}$$

M_i^{low} = Multispektraldaten, niedrige Auflösung
 M_i^{hi} = primäres Fusionsergebnis
 $\overline{M_i^{hi}}$ = Mittelwert
 $Std.$ = Standardabweichung
 i = Kanalindex

erfolgt (HALLADA & COX 1983, S.1028). Mit dieser Operation ist gewährleistet, dass die Ergebniswerte in den Wertebereich 0-255 überführt werden und gleichzeitig die Ergebnishistogramme denen des Originalbildes bezüglich Mittelwert und Standardabweichung angepasst werden.

Das Multiplikationsverfahren, angewendet auf *alle* zu fusionierenden Kanäle, wird offenbar erst bei FILIBERTI et al. (1994) durchgeführt und vergleichend bewertet. Sehr viel früher wird die Operation im Rahmen der von CLICHE et al. (1985) vorgeschlagenen *gemischten* Bandarithmetik angewendet. Der Referenzcharakter letzterer Studie ist vielleicht mit ein Grund dafür, dass die Fusion über die Multiplikation auch als separate Möglichkeit gelegentlich genannt bzw. verwendet wird (z.B. VRABEL 1996; KOCH et al. 1997), und als Standardtool unter der Software IMAGINE implementiert ist.

Analog zum Additionsverfahren, beruht die Technik auf der pixelweisen Multiplikation eines jeden Multispektralkanals mit dem hochauflösenden panchromatischen Kanal (CHAVEZ 1986, S.1640) gemäß:

$$M_i^{hi} = M_i^{low} \cdot P^{hi}$$

M_i^{low} = Multispektraldaten, niedrige Auflösung
 P^{hi} = PAN-Kanal, hohe Auflösung
 M_i^{hi} = Fusionsergebnis
 i = Kanalindex

Im Falle der Multiplikation handelt es sich um eine *Modulation* der Multispektralpixelwerte durch die Subpixelvariationen des PAN-Kanals. Auf der Betrachtungsebene eines einzelnen Multispektralpixels bleiben alle Proportionen korrekt erhalten: das relative Verhältnis der Subpixelvariationen entspricht in allen Kanälen denen des PAN-Kanals, gleichzeitig bleiben die Verhältnisse zwischen den Kanälen bestehen, ebenfalls das der neuen Mittelwerte.

Eine entsprechende nachgeschobene Skalierung vorausgesetzt, scheint die Multiplikation auf den ersten Blick das richtige Verfahren zu sein, die geometrische Information des PAN-Kanals auf alle Kanäle gleichmäßig zu übertragen, und gleichzeitig die spektralen Proportionen des Originalbildes zu bewahren. Weitet man die Betrachtung jedoch auf *mehrere* Multispektralpixel aus (in der Abbildung nicht darstellbar), so stellt man fest, dass in Abhängigkeit des lokalen Wertenniveaus der modulierenden PAN-Kanal-Pixel der Kontrast *zwischen* den einzelnen Multispektralpixeln, bezogen auf die alte Auflösungsstufe, gestört wird. Hier macht sich die Tatsache nachteilig bemerkbar, dass bei der Modulation durch den PAN-Kanal nicht nur *ergänzende* hohe Frequenzen beteiligt sind, sondern auch niederfrequente Informationen (eben das „Wertenniveau“ bzw. der Mittelwert der lokal modulierenden Pixel). Das geschilderte Problem findet im Color Normalizing-Verfahren Berücksichtigung und wird schließlich mit dem HFM-Verfahren gelöst.

Das Multiplikationsverfahren steht als Standardfusionstool unter der Software IMAGINE zur Verfügung, wurde aber wegen der dort automatisch durchgeführten (für diese Studie unerwünschten) Kontrastpreizung nicht verwendet. Die Umsetzung des Multiplikationsverfahrens erfolgte deshalb als eigenes Modell völlig analog zur dem des Additionsverfahrens. Der einzige Implementierungsunterschied bestand darin, die Verknüpfungsfunktion „+“ durch „•“ zu ersetzen. Die notwendige Histogrammanpassung an das Originalbild erfolgte ebenfalls nach HALLADA & COX (1983, S.1028, s.o.).

CLICHE et al. (1985, S.312) testeten verschiedene Multiplikations- und Additionsverfahren aus, um SPOT-XS und SPOT-P-Daten so zu kombinieren, dass ein visuell optimal interpretierbares Produkt mit hoher Ähnlichkeit zu einem Falschfarbeninfrarot-Luftbild entsteht. Das resultierende gemischte Verfahren wird von mehreren Autoren als Vergleichsreferenz herangezogen (WELCH & EHLERS 1987; CARPER et al. 1990; EHLERS 1991) und findet darüber hinaus in zahlreichen anderen Studien Erwähnung.

Das von CLICHE et al. (1985, S.312) empirisch ermittelte Verfahren sieht für den Grün- und Rotkanal eine Multiplikation mit anschließender Wurzelbildung vor, während die Fusion zwischen PAN- und nIR-Kanal über eine gewichtete Addition stattfindet:

$$M_1^{hi} = a_1 \cdot \sqrt{P^{hi} \cdot M_1^{low}} + b_1$$

$$M_2^{hi} = a_2 \cdot \sqrt{P^{hi} \cdot M_2^{low}} + b_2$$

$$M_3^{hi} = a_3 \cdot (0.25 \cdot P^{hi} + 0.75 \cdot M_3^{low}) + b_3$$

M^{low}	= Multispektraldaten, niedrige Auflösung
P^{hi}	= PAN-Kanal, hohe Auflösung
M^{hi}	= Fusionsergebnis
a_i, b_i	= Skalierungsfaktoren
1	= Grünkanal
2	= Rotkanal
3	= nIR-Kanal

Die Autoren argumentieren, dass sie mit der gesonderten Behandlung des nIR-Kanals der Tatsache Rechnung tragen wollen, dass die Korrelation zwischen PAN- und nIR-Kanal weitaus geringer ausfällt als zwischen PAN-Kanal und den Kanälen des sichtbaren Spektrums. Durch die Additionsoperation bei gleichzeitig geringer Gewichtung des panchromatischen Kanals würde der größte Teil der nIR-Information beibehalten werden, aber trotzdem eine gewisse Auflösungsverbesserung des Kanals stattfinden (CLICHE et al. 1985, S.313). CARPER et al. (1990, S.460ff) vergleichen den Algorithmus mit dem IHS-Verfahren; sie loben den offenbar positiven Effekt der speziellen nIR-Behandlung und bescheinigen gute Ergebniswerte für die getesteten Szenen. Andere Autoren kritisieren dagegen das Verfahren, weil es primär für visuelle Zwecke entwickelt wurde und radiometrische Ansprüche an das Ergebnis nicht berücksichtigt (PRADINES 1986, S.100; SHETTIGARA 1989, S.2615; EHLERS 1991, S.28; FILIBERTI et al. 1994, S.2521).

Die Anwendung der gemischten bandarithmetischen Fusion nach CLICHE et al. (1985) innerhalb dieser Teststudie ist insofern kritisch zu sehen, als dass die Wahl der Operation und der Gewichtungsfaktoren (nIR-Kanal) damals rein empirisch in Hinblick auf Erhalt eines bestmöglichen visuellen Produktes erfolgte. Genaugenommen gilt die ermittelte Formelkonstellation nur für die spezifische Szene, das spezifische Sensorsystem (SPOT) und die spezifischen Randbedingungen. Die Häufigkeit, mit der das Verfahren jedoch zitiert und als Referenz verwendet worden ist, gab Anlass, das Verfahren trotzdem auszutesten. Die Methode musste der Teststudie jedoch leicht angepasst werden. CLICHE et al. (1985, S.312) verwenden in ihrer Studie insgesamt nur 3 Kanäle, zwei aus dem sichtbaren Spektrum (Grünkanal, Rotkanal) und einen nIR-Kanal, entsprechend der SPOT-Konstellation. Da in der hiesigen Studie zusätzlich ein Blaukanal zur Verfügung stand, musste diesem ein passender Algorithmus zugeteilt werden. Angesichts der Tatsache, dass es sich beim Blaukanal ebenfalls um einen Kanal des sichtbaren Spektrums handelt und eine hohe Korrelation zu

Grün- und Rotkanal besteht, lag es nahe, für den Blaukanal den gleichen Algorithmus anzuwenden wie für diese beiden Kanäle. Alle 3 Kanäle des sichtbaren Spektrums wurden im Test also über die Multiplikation mit anschließender Wurzelbildung fusioniert, während der nIR-Kanal über die gewichtete Addition verbessert wurde. Eine weitere Modifikation betraf die Skalierungsfaktoren. Die simple Anpassung des Datenraumes an den Wertebereich 0-255 über einen multiplikativen und additiven Skalierungsfaktor (a, b), wie es CLICHE et al. (1985, S.312) vorschlagen, wurde hier ersetzt durch die Histogrammanpassungsfunktion nach HALLADA & COX (1983, S.1028; s.o.). Hiermit sollte wiederum sichergestellt werden, dass die Grauwertverteilungen mit den Ergebnissen der anderen Methoden vergleichbar bleiben.

Im konkreten Modell folgt der getrennten Behandlung der einzelnen Kanäle eine „Stapelung“ der Ergebniskanäle zu einem mehrkanaligen Multispektralbild. Nach diesem „Layerstack“ erfolgt die bereits erwähnte Histogrammanpassung an das Eingangsbild und das Herausschreiben des endgültigen Ergebnisbildes.

Color Normalizing (CN)

Die Bildfusion über das Color Normalizing-Verfahren wird von VRABEL (1996, S.1076) als „one of the more sophisticated arithmetic techniques“ bezeichnet. Die Methode wird erstmals von ROLLER & COX (1980) vorgestellt, von HALLADA & COX (1983) mit der HFA-Technik (Kapitel 0) verglichen und als besser bewertet. Auch VRABEL (1996) vergleicht das Verfahren mit mehreren anderen Fusionstechniken. Die CN-Methode steht unter IMAGINE (Version 8.2) standardmäßig als sogenanntes „Brovey“-Tool zur Verfügung.

Der Algorithmus des CN-Verfahrens stellt im Prinzip eine Erweiterung der einfachen Multiplikation dar:

$$M_i^{hi} = \frac{M_i^{low} \cdot P^{hi}}{M_1^{low} + M_2^{low} + \dots + M_n^{low}}$$

M^{low}	= Multispektraldaten, niedrige Auflösung
P^{hi}	= PAN-Kanal, hohe Auflösung
M_i^{hi}	= Fusionsergebnis
i	= Kanalindex
1	= Kanal 1
2	= Kanal 2
n	= Kanal n

Jedes (resampelte) Multispektralband wird mit dem PAN-Kanal multipliziert und anschließend durch die Summe der Multispektralpixelwerte dividiert. Der Divisor entspricht dabei der lokalen „Intensity“; somit bewirkt die Operation die Extraktion der reinen Farbinformation aus den Multispektralpixelwerten und damit deren „Normalisierung“ (ROLLER & COX 1980, S.1002; HALLADA & COX 1983, S.1027, VRABEL 1996, S.1083).

Das Ergebnis kann so interpretiert werden, dass die spektralen Informationen der neuen Multispektralpixel durch die Proportionen im alten Multispektralpixel bestimmt werden, die Gesamtenergie oder „Intensity“ dagegen durch den PAN-Kanal (die Summe der neuen Multispektralpixelwerte ergibt die alten PAN-Kanalwerte). Während bei der reinen Multiplikation die „Intensity“ von beiden Komponenten beteiligt ist und deshalb der Kontrast innerhalb des Bildes gestört wird, ist bei dem CN-Verfahren durch das Herausrechnen der Multispektralpixel-Intensity ein ausgewogener Gesamtkontrast zu erwarten, allerdings gemäß den Verhältnissen im PAN-Kanal.

Noch einmal zusammenfassend: das Problem der einfachen Multiplikation bestand darin, dass auf Betrachtungsebene eines einzelnen Multispektralpixels (und seiner korrespondierenden Fläche nach der Fusion) zwar alle Proportionen erhalten werden, die Werteverhältnisse über das Gesamtbild hinweg jedoch stark gestört werden. Eine nachgeschobene *globale* Skalierung ändert an diesem Problem nichts. Ziel ist es, bereits auf *Pixelebene*, bezogen auf die alte

Auflösungsstufe, eine lokalspezifische „Skalierung“ des Multiplikationsergebnisses vorzunehmen. Die Normalisierung des Multispektralpixels durch Extrahierung der reinen Farbinformation ist hierfür eine Möglichkeit. Ob die Helligkeit des PAN-Kanals als Maßgabe für das neue hochauflösende Bild hierbei der optimale Weg ist, sei an dieser Stelle noch dahingestellt.

Das CN-Verfahren ist zwar als „Brovey“-Tool unter IMAGINE (Version 8.2) implementiert, beinhaltet aber eine (hier) unpassende Kontraststreckung. Die Realisierung des CN-Verfahrens nach ROLLER & COX (1980) erfolgte deshalb durch eine Abwandlung des eigenen Multiplikationsmodelles. Als zusätzlichen Schritt beinhaltet das Modell die Berechnung der pixelweisen Summe der Multispektralkanäle. Das temporäre Summenbild geht als Divisor in die Fusionsformel ein, während der Zähler aus dem Produkt zwischen jeweiligem Kanal und dem PAN-Kanal gebildet wird. Die notwendige Anpassung des Summenbildes an die Bildgröße des PAN-Kanals erfolgt in dem Modell mit dem gleichen Resampling-Verfahren, wie auch die einzelnen Multispektralkanäle behandelt werden („bilineare Interpolation“).

Kategorie 3: Komponentenaustausch nach linearer Transformation

SHETTIGARA (1992, S.561) fasst das IHS- (Intensity-Hue-Saturation), das PCS- (Principal Component Substitution) und das von ihm entwickelte RVS-Verfahren (Regression Variable Substitution) zu den *Component Substitution Techniques* zusammen. Allen 3 Verfahren gemeinsam ist das Prinzip, den niedriger aufgelösten multispektralen Datensatz zunächst in einen neuen Datenraum zu transformieren, eine der Komponenten gegen den höher auflösenden, eventuell histogrammangepassten PAN-Kanal auszutauschen (Component Substitution), und anschließend eine inverse Transformation in das ursprüngliche Koordinatensystem durchzuführen (IVERSON & LERSCH 1994, S.74).

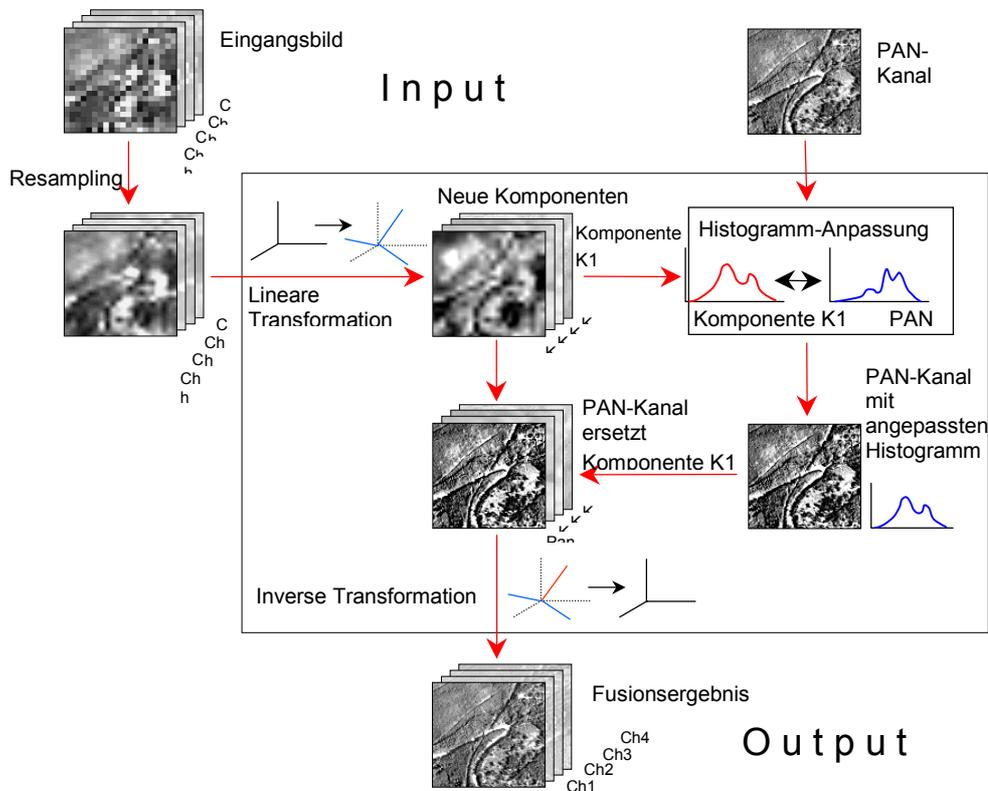


Abb. 29: Schema zur Datenfusion mit Hilfe von Component Substitution - Verfahren

Im Falle des IHS-Verfahrens handelt es sich bei dem neuen Datenraum um das IHS-Farbsystem, im Falle des PCS-Verfahrens um die Hauptkomponenten, und im Falle des RVS-Verfahrens um jenes Koordinatensystem, in welchem eine der Achsen mit dem PAN-Kanal maximal korreliert (SHETTIGARA 1992, S.563). SHETTIGARA (1992, S.566) stellt folgende Forderungen an die auszutauschende Komponente:

- sie sollte möglichst hoch mit dem PAN-Kanal korrelieren
- sie sollte einen möglichst hohen Varianzanteil des Multispektraldatensatzes repräsentieren
- die Ausgangskanäle sollten zu gleichwertigen Anteilen in der Komponente vertreten sein

Erstgenannter Aspekt stellt sicher, dass die spektralen Eigenschaften des Originalbildes durch den Fusionsprozess möglichst wenig verändert werden. Die 2. Forderung zielt auf eine maximale Übertragung der räumlichen Informationen des PAN-Kanals bei der inversen Transformation ab, während letzterer Aspekt sicherstellen soll, dass diese Übertragung auf alle Kanäle gleichmäßig stattfindet. Dass die 3 genannten Forderungen von keiner der möglichen Component-Substitution-Verfahren *gleichzeitig* erfüllt werden können, zeigen nachfolgende Detailbetrachtungen.

Intensity-Hue-Saturation-Transformation (IHS)

Die IHS-Transformation gehört mit Abstand zu der populärsten und am meisten benutzten Techniken, Daten unterschiedlicher Auflösung oder auch unterschiedlichen Typs miteinander zu mischen (GRASSO 1993, S.74; PELLEMANS et al. 1993, S.81; SHETTIGARA 1989, S.2615). So beschäftigen sich zahllose Studien von Mitte der 80er Jahre an bis heute immer wieder mit der Verwendung des IHS-Verfahrens zur Datenfusion. Als Pionieraufsatz gilt dabei die Studie von HAYDN et al. (1982). Wichtige Beiträge liefern auch z.B. WELCH & EHLERS (1987), SHETTIGARA (1989), CARPER et al. (1990), EHLERS (1991), GRASSO (1993) und PELLEMANS et al. (1993).

Die Flut an Zeitschriftenbeiträgen ist wohl dafür verantwortlich, dass in Lehrbüchern der Fernerkundung zum Thema auflösungsverbessernder Datenfusion typischerweise die IHS-Transformation genannt wird (z.B. LILLESAND & KIEFER 1994, S.584; ALBERTZ 1991, S.104; KRAUS 1990, S.404). Dies suggeriert wiederum bei Fernerkundlern, die zum ersten Mal mit der Aufgabe der Datenfusion konfrontiert werden, dass die IHS-Transformation das ideale Instrument zur Umsetzung sei. Die leichte Umsetzung des IHS-Verfahrens in praktisch jeder Bildverarbeitungssoftware fördert dabei die Verwendung des Verfahrens. Zweifellos besticht die Methodik durch ihre Einfachheit und „Eleganz“ in der Arbeitsweise, doch bestehen recht eindeutige Grenzen in der Anwendbarkeit, wie noch zu zeigen sein wird.

Die IHS-Transformation konvertiert einen RGB-Farbraum in ein Koordinatensystem, dessen Achsen die 3 grundlegenden physiologischen Farbparameter repräsentieren (GILLESPIE 1980, S.203):

- *Intensity* (Gesamte reflektierte Energie → Helligkeit, „Intensität“, Albedo)
- *Hue* (mittlere Wellenlänge des reflektierten Lichts → Farbe)
- *Saturation* („Purheit“ der Farbe → Sättigung)

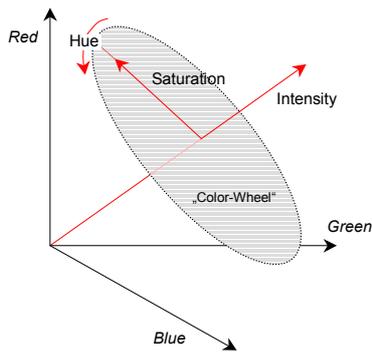


Abb. 30: Zusammenhang zwischen RGB- und IHS-Farbraum (nach RAINES 1977, S.1467)

In Abbildung 30 ist der Zusammenhang zwischen RGB- und IHS-Farbraum grob schematisch dargestellt. Die *Intensity*-Achse entspricht der Graulinie des Farbwürfels, welcher durch die Grundfarben Rot, Grün und Blau aufgespannt wird. Der Intensity-Wert eines Objektes ist als Abstand entlang der Graulinie ausgehend vom Wert Null (=schwarz) definiert und hängt von der Summe der RGB-Komponenten ab. Die *Hue*-Komponente stellt einen von der Graulinie lotrecht ausgehenden Winkel dar. Er bestimmt die Proportionen der einzelnen Grundfarben bzw. die mittlere Wellenlänge der spezifischen Objektfarbe. Der *Saturation*-Vektor zeigt, ausgehend von der Graulinie, auf diese vom Hue-Winkel definierte Farbe. Je länger der Saturation-Vektor ist, desto „reiner“ ist die Farbe ausgeprägt bzw. desto geringer ist ihr „Grauanteil“. Tragen alle Teile des Spektrums gleichmäßig zu der Objektfarbe bei, ist der Betrag der Sättigung = Null und es resultiert ein Grau, dessen Helligkeit vom Intensity-Wert abhängt (GILLESPIE 1980, S.203; CARPER et al. 1990, S.459f; LILLESAND & KIEFER 1994, S.582).

Es ist zu beachten, dass die IHS-Systeme und die entsprechenden Transformationen nicht einheitlich definiert sind (KRAUS 1990, S.403). Eine detaillierte Betrachtung der zahlreichen unterschiedlichen Modellvorstellungen ist an dieser Stelle jedoch unzweckmäßig; hier sei auf die zusammenfassenden Darstellungen von CARPER et al. (1990) und KRAUS (1990) sowie auf die Literaturhinweise von GRASSO (1993) verwiesen. Entscheidend ist die Tatsache, dass je nach implementierten Algorithmus auch mit leicht unterschiedlichen Ergebnissen zu rechnen ist und somit eine direkte Vergleichbarkeit von IHS-Werten erschwert wird.

Was macht nun die IHS-Transformation für die auflösungsverbessernde Datenfusion so nützlich? Die IHS-Transformation erlaubt nach CARPER et al. (1990, S.459) und GRASSO (1993, S.74) eine effiziente Trennung der *räumlichen* und *spektralen* Information eines 3-kanaligen Farbkomposits. GRASSO (1993, S.74) bemerkt hierzu, dass die Helligkeit (I) mit der Oberflächenrauigkeit und Morphologie korrespondiert (→ Objektgeometrie), während Farbe (H) und Farbsättigung (S) von den spektralen Eigenschaften der Oberflächenmaterialien bestimmt werden. HAYDN et al. (1982) führen diesbezüglich ein Experiment durch, in dem sie „Hue“ und „Saturation“ eines transformierten Bildes in unterschiedlichen Stufen degradieren und anschließend, mit unveränderter „Intensity“, eine Rückwärtstransformation in den RGB-Farbraum veranlassen. Sie stellen fest, dass das Ergebnisbild nur geringfügig degradiert wirkt, was die Folgerung zulässt, dass die Intensity-Komponente tatsächlich den *größten Teil* der Auflösungsinformation (und Varianz) des Datensatzes beinhalten muss. Somit ist auch theoretisch die separate Manipulation der räumlichen Information in Form des Austausches der „Intensity“ durch einen höher auflösenden PAN-Kanal denkbar, ohne dass die Farbbalance der Szene beeinträchtigt wird (CARPER et al. 1990, S.459; GRASSO 1993, S.74). Man beachte an dieser Stelle die Analogien zum CN-Verfahren! Einige der sich mit der IHS-

Methode beschäftigenden Autoren räumen einschränkend ein, dass die modifizierte „Intensity“ (der PAN-Kanal) eine *hohe Ähnlichkeit* mit der originalen Intensity-Komponente haben muss, um spektrale Verzerrungen im Fusionsergebnis zu vermeiden bzw. zu minimieren (CARPER et al. 1990, S.459ff; CHAVEZ et al. 1991, S.295; SHETTIGARA 1989, S.2615; VRABEL 1996, S.1075).

Die verlangte hohe Korrelation ist prinzipiell nur dann gegeben, wenn sich die Spektralbereiche des Input-RGB-Bildes und des PAN-Kanals decken. Wird z.B. die Intensity-Komponente aus der Summe der 3 Kanäle des sichtbaren Spektrums gebildet, und handelt es sich bei der Austauschkomponente um einen klassischen, über den sichtbaren Bereich hinweg integrierenden PAN-Kanal, ist eine hohe Korrelation zwischen den beiden Termen und damit ein gutes Fusionsergebnis zu erwarten. PELLEMANS et al. (1993, S.81 ff) geht hier noch einen Schritt weiter und verlangt eine Berücksichtigung der Sensitivitätskurven der einzelnen Multispektralkanäle, um die Ähnlichkeit zwischen Intensity und PAN-Kanal weiter zu steigern.

Werden in die Farbtransformation Kanäle mit einbezogen, welche von vornherein schon schlecht mit der Information im PAN-Kanal korrespondieren, ist auch eine geringere Ähnlichkeit zwischen der resultierenden Intensity-Komponente und dem PAN-Kanal zu erwarten, und damit auch Verzerrungen im Fusionsergebnis (vgl. VRABEL 1996, S.1075; CONESE et al. 1993, S.892; CARPER et al. 1990, S.460 f). So ist es insbesondere der Einbezug des nIR-Kanals, welcher zu Problemen bei der auflösungsverbessernden Datenfusion mittels der IHS-Transformation führt. CARPER et al. (1990, S.462 ff) schlagen deshalb vor, in diesem Fall anstelle des *direkten* Austausches der Intensity durch den PAN-Kanal einen *gewichteten Mittelwert* aus PAN- und nIR-Kanal als Austauschpartner einzusetzen. Hintergrund der Überlegung ist die Tatsache, dass die „Intensity“ eines 4-3-2 RGB-Komposits (nIR, rot, grün) ja aus der Summe von 2 Kanälen des sichtbaren Spektrums und dem nIR-Kanal (geteilt durch 3) gebildet wird. Da der PAN-Kanal im Regelfall mit den Kanälen des sichtbaren Spektrums hochkorreliert ist, scheint die Summe aus 2x PAN-Kanal und nIR-Kanal (geteilt durch 3) eine gelungene Annäherung an die Intensity-Komponente zu sein. Tatsächlich ermitteln CARPER et al. (1990, S.463), dass das „gewichtete Mittel“ gegenüber dem „puren“ PAN-Kanal eine sehr viel höhere Ähnlichkeit zu der Intensity-Komponente aufweist, und als Folge das Fusionsergebnis dem Eingangsbild hinsichtlich der spektralen Eigenschaften sehr viel ähnlicher ist. Leider wird diese höhere spektrale Treue mit einem deutlich geringerem Schärfungseffekt erkaufte, entsprechend dem verringertem Einfluss des PAN-Kanals bei dem Austausch der „Intensity“. Auf das gleiche Problem wird bei dem RVS-Verfahren noch zurückzukommen sein.

Die Implementierung und Durchführung des IHS-Verfahrens erfolgte „klassisch“, also mit direktem und vollem Ersatz der Intensity-Komponente durch den PAN-Kanal. Eine wirklich „objektive“ Umsetzung des Verfahrens war dabei nicht möglich, weil zur Gewinnung der IHS-Komponenten und für die Rücktransformation in den RGB-Farbraum *unterschiedliche* Algorithmen existieren. So weichen auch die unter IMAGINE implementierten RGB→IHS- und IHS→RGB-Algorithmen von denen ab, die z.B. HAYDN et al. (1982, S.602) verwendet haben, stellten aber zwangsläufig die Vorgabe für das zu programmierende Modell dar. Ein weiteres Problem ergab sich aus der Tatsache, dass verfahrensbedingt immer nur 3 Kanäle gleichzeitig behandelt werden können. Um trotzdem ein 4-kanaliges (End-) Ergebnisbild zu erhalten, waren deshalb 2 Durchläufe der IHS-Methode mit unterschiedlichen Kanalkombinationen erforderlich. Hierbei stellte sich die Frage, *welche* der möglichen 3er-Kanalkombinationen in die jeweilige IHS-Transformation eingehen, und von welchen Ergebnissen welche Kanäle schließlich zum Endergebnisbild kombiniert werden sollen. Es wurde entschieden, einen IHS-Durchlauf mit der Kanalkombination 3-2-1 (RGB) und einen

mit der Kombination 4-2-1 (RGB) durchzuführen. Hierzu mussten zunächst die entsprechenden 3-kanaligen Bildversionen des Multispektralbildes über die Funktion „Subset“ hergestellt werden. Weiterhin musste bei der Programmierung des Modells entschieden werden, ob und wie der PAN-Kanal der Intensity-Komponente vor dem Austausch angepasst werden soll. Da mit höherem Anpassungsgrad und damit höherer Korrelation zwischen Intensity-Komponente und PAN-Kanal auch mit besseren Fusionsresultaten zu rechnen ist, wurde eine Histogrammanpassung über die Summenkurve der Intensity-Komponente implementiert. Für spätere Kontrollzwecke wurde das Modell so gestaltet, dass die Intensity-Komponente und der angepasste PAN-Kanal als eigene Files während der Prozedur herausgeschrieben werden.

Bei der konkreten Durchführung der IHS-Methode kam es zu 2 primären, 3-kanaligen Ausgabebildern (s.o.). Als abschließender Schritt galt es nun, diese zu einem Gesamtbild mit 4 Kanälen zu kombinieren (Layerstack). Hierzu wurden alle 3 Kanäle aus den 3-2-1 Durchlauf verwendet, aus dem 4-2-1 Durchlauf lediglich der nIR-Kanal. Dieser Entscheidung lag die Annahme zugrunde, dass Grün-(2) und Blaukanal (1) bei dem 3-2-1 Durchlauf weniger verzerrt werden als bei der Variante mit nIR-Einbezug.

Principal Component Substitution (PCS)

Die Verwendung der Hauptkomponentenanalyse für die auflösungsverbessernde Datenfusion findet seit Mitte der 80 Jahre immer wieder Erwähnung (z.B. CHAVEZ 1986; CHAVEZ & BOWELL 1988; SHETTIGARA 1989; EHLERS 1991; GRASSO 1993; IVERSON & LERSCH 1994; YOCKY 1996). Konkret durchgeführt und verglichen wird das Verfahren in der ausgewerteten Literatur offenbar aber erst von CHAVEZ et al. (1991) und SHETTIGARA (1992). CONESE et al. (1993) versuchen sich an einer Kombination aus Filter- und PCS-Verfahren. ZHUKOV et al. (1995) verwenden das PCS-Verfahren als Vergleichsreferenz für das von ihnen getestete Verfahren.

Bei dem Verfahren der Principal Component Substitution wird der neue Datenraum durch die Hauptkomponenten des Multispektraldatensatzes aufgespannt, d.h. die Drehung der Achsen wird durch die datensatzspezifische Kovarianz-Matrix bestimmt (SHETTIGARA 1992, S.563). Die für den Komponentenaustausch maßgebliche Annahme ist in diesem Fall, dass die 1. Hauptkomponente dem PAN-Kanal ähnlich ist (CHAVEZ et al. 1991, S.296). Tatsächlich konnten CHAVEZ et al. (1991, S.297) für den von ihnen verwendeten Datensatz nachweisen, dass die Korrelation zwischen PAN-Kanal und 1. Hauptkomponente signifikant höher ist als zwischen PAN-Kanal und „Intensity“. Analog zu dem Austausch der „Intensity“ beim IHS-Verfahren wird nun die 1. Hauptkomponente durch den PAN-Kanal ersetzt. CHAVEZ et al. (1991, S.296) schlagen vor, den PAN-Kanal zuvor dem Histogramm der 1. Komponente anzupassen. Nach Austausch der 1. Hauptkomponente erfolgt die inverse Hauptkomponententransformation und damit die Fusion der beiden Datensätze.

Die Verwendung der Hauptkomponentenanalyse anstelle der IHS-Transformation lässt nicht nur geringere spektrale Verzerrungen erwarten, sondern ermöglicht auch den Einbezug von mehr als 3 Kanälen (VRABEL 1996, S.1075; CHAVEZ et al. 1991, S.297). Weiterhin ist der Einfluss des PAN-Kanals auf das Fusionsergebnis maximal, da der PAN-Kanal jene Komponente ersetzt, welche die maximale Varianz des Multispektraldatensatzes beinhaltet (SHETTIGARA 1992, S.563). Die zu erwartende Schärfung ist somit am höchsten (SHETTIGARA 1992, S.566) andererseits aber auch die zu erwartende spektrale Verzerrung im Falle (lokal) mangelnder Korrelation. Ein weiteres Problem besteht darin, dass in der 1. Hauptkomponente die Varianz der Kanäle nicht zu gleichen Anteilen vertreten sind und somit die

Auflösungsübertragung nicht gleichmäßig auf alle Kanäle erfolgen kann (CHAVEZ et al. 1991, S.298). Hier ist das IHS- dem PCS-Verfahren überlegen.

Die Datenfusion über den Weg der Hauptkomponentenanalyse ist unter IMAGINE als Standardtool implementiert. In dem dazugehörigen Modell ist jedoch keine Histogrammanpassung des PAN-Kanals an die 1. Hauptkomponente vorgesehen. Weiterhin wird das primäre Ergebnis der Fusion auf den vollen Grauwertbereich von 0-255 gespreizt, um einen maximalen Kontrast im Endergebnis zu erreichen. In Hinblick auf bestmöglichen Erhalt der Originalradiometrie ist diese Form der Umsetzung ungünstig, deshalb wurde ein eigenes Modell der PCS-Methode programmiert. Hierzu wurden zunächst die vorliegenden Einzeltools „PC Calculation“ und „Reverse PC Calculation“ in einem neuen Modell hintereinander geschaltet. Die Durchführung dieser Verarbeitungskette führt, wie nachgeprüft wurde, zu einer identischen Rekonstruktion des Eingangsbildes mit ebenso identischen Histogrammen. Das Modell wurde nun im Sinne der Datenfusion ausgebaut, indem vor der Rückwärtstransformation der Austausch der 1. Komponente durch den PAN-Kanal implementiert wurde. Die Programmierung erfolgte so, dass der PAN-Kanal vor dem Austausch zunächst auf den gleichen Wertebereich der Hauptkomponenten reskaliert (Float 0-1) und der 1. Hauptkomponente über deren Histogramm-Summenkurve angepasst wird (vgl. IHS-Verfahren). Mit diesem Schritt ist eine maximal mögliche „Ähnlichkeit“ zwischen PAN-Kanal und 1. Hauptkomponente sichergestellt. Um die Korrelation zwischen den beiden Termen später überprüfen zu können, wurde auch in diesem Modell vorgesehen, sowohl die 1. Hauptkomponente als auch den angepassten PAN-Kanal herauszuschreiben.

Regression Variable Substitution (RVS)

Der Autor SHETTIGARA (1989, S.2615 ff; 1992, S.563) stellt den Erhalt der Originalradiometrie als wichtigstes Kriterium der Fusionsqualität heraus. Bezogen auf die Component Substitution-Techniken fordert es deshalb eine maximal mögliche Ähnlichkeit der auszutauschenden Komponente mit dem PAN-Kanal, denn mit steigender Korrelation der Austauschterme werden die zu erwartenden spektralen Verzerrungen im Ergebnis immer kleiner. Angesichts der nur mäßigen Erfüllung dieses Kriteriums bei der IHS- und PCS-Methode folgert er, dass die Ermittlung der Transformationsparameter anhand einer multiplen Regressionsanalyse zu besseren Ergebnissen führen muss (SHETTIGARA 1992, S.563 ff). Die Ausrichtung des zu transformierenden Datenraumes erfolgt hier dahingehend, dass eine der neuen Achsen *maximal* mit der unabhängigen Variable „PAN-Kanal“ korreliert. SHETTIGARA (1992, S.565) kommt zu dem Ergebnis, dass das neue Verfahren der *Regression Variable Substitution* zu deutlich geringeren spektralen Veränderungen führt als das IHS- und PCS-Verfahren. Gleichzeitig beobachtet der Autor aber auch eine deutlich schlechtere Schärfeübertragung als bei den beiden Alternativverfahren, was er damit erklärt, dass die vom PAN-Kanal ersetzten Varianzanteile des Multispektralbildes beim IHS- und natürlich besonders beim PCS-Verfahren ungleich höher sind. Hier besteht also offenbar ein Dilemma der Component Substitution Verfahren: einerseits muss für eine adäquate Schärfeübertragung (das *eigentliche Ziel* der Fusion) ein Mindestmaß von Varianz durch den PAN-Kanal ersetzt werden, andererseits sollte die ersetzte Komponente zur Vermeidung spektraler Verzerrungen möglichst hoch mit dem PAN-Kanal korrelieren, was offenbar auf Kosten des ersetzten Varianzanteiles geht.

Das RVS-Verfahren konnte im Rahmen dieser Arbeit leider nicht getestet werden, da die Implementierung einer multiplen Regressionsanalyse mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nur mit sehr erheblichen Aufwand möglich gewesen wäre. Angesichts der zu erwartenden Mängel in den Schärfeeigenschaften des Ergebnisses (s.o.) wurde der Aufwand als nicht verhältnismäßig eingestuft.

Kategorie 4: Filterverfahren

Filterverfahren kommen in der auflösungsverbessernden Datenfusion beinahe „traditionell“ zum Einsatz. Mit beginnender Anwendung der Wavelet-Transformation als Datenfusionstool seit Mitte der 90er Jahre erhält diese Fusionstechnik-Kategorie neue Impulse.

Leitgedanke aller auf Filtertechniken basierenden Fusionsverfahren ist die Idee, dass das zu rekonstruierende hochauflösende Multispektralbild als eine Summe niedrig- und hochfrequenter Informationsanteile vorstellbar ist (SCHOWENGERDT 1980, S.1329):

$$i = Lp_i + Hp_i$$

i	= Bild
Lp_i	= Lowpaß-Komponente
Hp_i	= Highpaß-Komponente

Die zur Fusion überleitende Annahme ist nun, dass die Tiefpasskomponente durch das (resampelte) niedrig auflösende Multispektralbild approximiert werden kann, während die Hochpasskomponente für alle Kanäle durch eine Hochpassvariante des PAN-Kanals vertretbar erscheint (HALLADA & COX 1983, S.1027). Letztere Annahme wird dabei durch die Beobachtung unterstützt, dass die hochfrequenten Anteile verschiedener Multispektralkanäle weitaus stärker untereinander korrelieren als die jeweiligen niederfrequenten Anteile (SCHOWENGERDT 1980, S.1326). Vorteil der Strategie gegenüber den bisher erläuterten Verfahren ist die Tatsache, dass nur die „überschüssige“ hochfrequente (räumliche) Information des PAN-Kanals genutzt wird, während seine niederfrequente (spektrale) Information unterdrückt wird (CHAVEZ & BOWELL 1988, S.1700; CHAVEZ et al. 1991, S.299; VRABEL 1996, S.1082).

Abbildung 31 gibt die generelle Arbeitsweise der filterbasierten Datenfusionstechniken schematisch wieder. Die Art und Weise, *wie* die hochfrequente Komponente aus dem panchromatischen Kanal extrahiert wird, und *wie* schließlich die Verrechnung der beiden Komponenten erfolgt, differiert je nach Methode. Das Wavelet-Verfahren ist dabei mit Abstand am komplexesten.

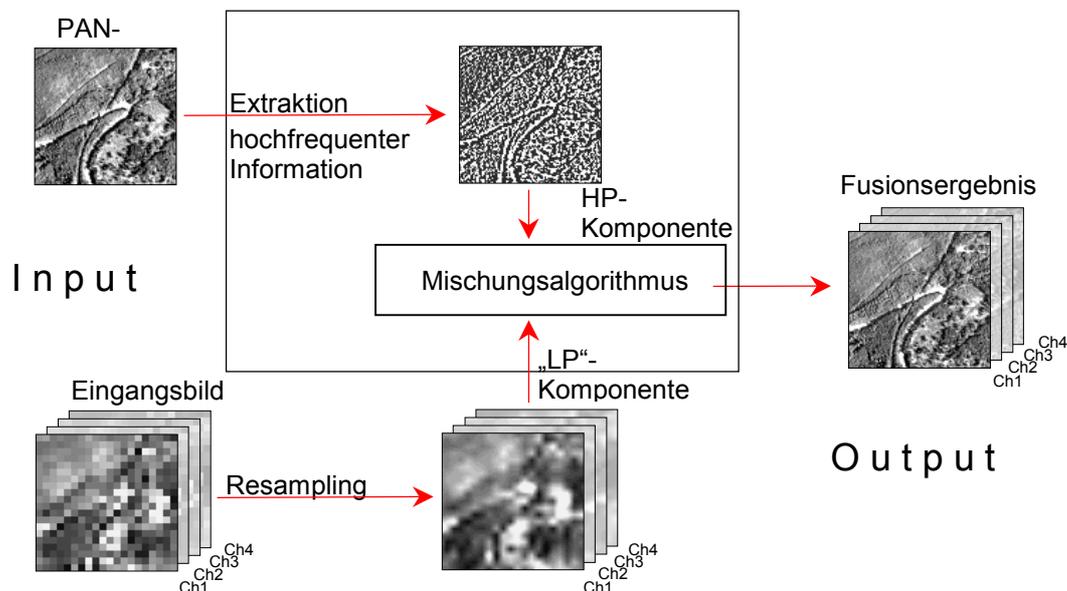


Abb. 31: Schema zu Datenfusion mit Hochpass-Filtertechniken im Ortsbereich

Addition von Hochfrequenzkomponenten (HFA)

Das im folgenden beschriebene Verfahren gehört mit zu den am frühesten entwickelten Fusionstechniken überhaupt (SCHOWENGERDT 1980; HALLADA & COX 1983; CHAVEZ 1984). Im Laufe der Entwicklung auflösungsverbessernder Fusionstechniken wird die Methode immer wieder erwähnt, aufgegriffen und als Referenz verwendet (z.B. CHAVEZ et al. 1991; VRABEL 1996).

Die Datenfusion wird bei dem HFA-Verfahren dadurch realisiert, dass dem niedrig aufgelösten, resampelten Multispektralbild der hochfrequente Anteil des PAN-Kanals *additiv* beigemischt wird. Die Methode ist somit die konsequente Umsetzung oben genannter Vorstellung des zu rekonstruierenden Bildes als *Summe* eines niederfrequenten und hochfrequenten Anteils.

Im Zusammenhang mit der möglichst realistischen Simulation der niederfrequenten Komponente kommt dem Resampling des Eingangsbildes aufgrund des Tiefpass-Effekts eine entsprechend hohe Bedeutung zu (HALLADA & COX 1983, S.1983; SCHOWENGERDT 1980, S.1328). Für die Simulation des hochfrequenten Terms erfolgt eine simple Ortsbereich-Filterung des PAN-Kanals, wobei zur Extraktion der hohen Frequenzen a) ein Hochpassfilter und b) die Subtraktion einer tiefpassgefilterten PAN-Variante von dem original PAN-Kanal in Frage kommt. Nach HALLADA & COX (1983, S.1027) sollte die Kernelgröße bei der Filterung dem Auflösungsunterschied entsprechen. Dagegen wenden CHAVEZ (1984, S.105), CHAVEZ & BOWELL (1988, S.1700), CHAVEZ et al. (1991, S.299) und VRABEL (1996, S.1082) auf Basis empirischer Versuche unterschiedliche Kernelgrößen zwischen 3x3 und 25x25 Pixel an. Geht man zur Extraktion der hohen Frequenzen den Weg über die Tiefpassfilterung (s.o.), und wählt man eine Kernelgröße entsprechend dem Auflösungsunterschied, beinhaltet das Filterergebnis die *absoluten* (hochfrequenten) Differenzen zwischen dem PAN-Kanal und einer dem Auflösungsunterschied entsprechenden degradierten Variante des PAN-Kanals, gestreut um den Mittelwert Null. Diese Konstellation erscheint wünschenswert, denn Ziel ist es ja, nur die *zusätzliche* geometrische Information des PAN-Kanals „oberhalb“ des Auflösungs-niveaus des Multispektralbildes zu verwenden, aber auch nicht weniger.

Durch die Additionsoperation wird die hochfrequente Information allen Kanälen des (resampelten) Multispektralbildes als Subpixelvariationen zugefügt. Aufgrund der Eigenschaften der beigemischten Werte (Streuung um den Mittelwert Null) erfolgt dabei im Gegensatz zum einfachen Additionsverfahren *keine* generelle Verzerrung der Originalradiometrie. Es besteht jedoch ebenfalls das operationsbedingte Problem, dass die *Tiefe* der induzierten Veränderungen je Kanal unterschiedlich ausfällt. Während CHAVEZ (1984), CHAVEZ & BOWELL (1988), CHAVEZ et al. (1991) und VRABEL (1996) diese Schwierigkeit unberücksichtigt lassen, versuchen SCHOWENGERDT (1980) und HALLADA & COX (1983) den Effekt auszugleichen, indem sie die Hochpasskomponente kanalspezifisch gewichten. Den Skalierungsfaktor gewinnen sie dabei behelfsmäßig aus dem Verhältnis zwischen der Standardabweichung des jeweiligen Multispektralkanals und der des tiefpassgefilterten PAN-Kanals (SCHOWENGERDT 1980, S.1330). Es gilt:

$$M_i^{hi} = M_i^{low} + \frac{\sigma_{LpP^{hi}}}{\sigma_{M_i^{low}}} \cdot HpP^{hi}$$

M^{low}	= Multispektraldaten, niedrige Auflösung
LpP^{hi}	= tiefpaßgefilterter PAN-Kanal, hohe Auflösung
HpP^{hi}	= hochpaßgefilterter PAN-Kanal, hohe Auflösung
σ	= Standardabweichung
M^{hi}	= Fusionsergebnis
i	= Kanalindex

Die Umsetzung des additiven HPF-Verfahrens erfolgte nach SCHOWENGERDT (1980) und HALLADA & COX (1983). Der Ansatz dieser beiden Autoren, eine Kernelgröße entsprechend

dem Auflösungsunterschied zu verwenden, und die Mischung zumindest behelfsmäßig kanalspezifisch zu gewichten, erschien am ehesten nachvollziehbar.

Aufgrund der speziellen Koeffizientenberechnung gestaltete sich die Programmierung als recht komplex. Das fertige Modell sieht vor, von jedem der 4 resampelten Inputkanäle zunächst die Standardabweichung zu berechnen und zwischenspeichern. Gleichzeitig wird von dem panchromatischen Kanal eine Tiefpassfilter-Variante berechnet, wobei die Kernelgröße dem Auflösungsunterschied entspricht. Von dem tiefpassgefilterten PAN-Kanal wird ebenfalls die Standardabweichung abgeleitet und mit jeder Standardabweichung der Multispektralkanäle ins Verhältnis gesetzt. Hierdurch ergeben sich die kanalspezifischen Gewichtungsfaktoren, welche die Missverhältnisse bei der späteren Verrechnung durch die Operation „Addition“ kompensieren sollen. Parallel wird die hochfrequente Information des PAN-Kanals extrahiert, indem vom original PAN-Kanal die tiefpassgefilterte Version (s.o.) subtrahiert wird. Bei der Definition der Ausgabeparameter dieser Operation war darauf zu achten, dass das Subtraktionsergebnis als Float-Typ deklariert wird, damit sich tatsächlich die notwendige Streuung der hochfrequenten Information um den Wert Null ergibt.

Die hochpassgefilterte PAN-Variante, die resampelten Multispektralkanäle und die berechneten kanalspezifischen Gewichtungsfaktoren gehen schließlich in die eigentliche Fusion ein, deren Umsetzung in Form einer einfachen Gleichung kein mehr Problem darstellt. Die resultierenden fusionierten Einzelkanäle werden in dem Modell abschließend zu einem 4-kanaligen Gesamtbild zusammengeführt (Layerstack). Eine nachträgliche Histogrammanpassung ist bei der Methode nicht erforderlich, da die induzierten Subpixelvariationen die Originalradiometrie theoretisch unbeeinflusst lassen (erneute Degradierung sollte zu den Originalwerten führen).

Modulation durch Hochfrequenzkomponenten (HFM)

Die *Modulation* des Multispektralbildes durch Hochfrequenzanteile des PAN-Kanals kann als eine Weiterentwicklung des HFA-Verfahrens angesehen werden. Das Verfahren wird in einer ersten Version bereits von PRADINES (1986) vorgestellt, parallel von PRICE (1987) in einer modifizierten Form entwickelt und von MUNESHIKA et al. (1993) sowie FILIBERTI et al. (1994) in verschiedenen Varianten verwendet und beschrieben. Zu letztgenanntem Autorenteam gehört auch SCHOWENGERDT, welcher im Jahre 1980 das HFA-Verfahren entwickelt hat. Weiterhin stellt VRABEL (1996) in einer Vergleichsstudie das „Sparkle“-Verfahren als neue Technik vor, welches allerdings nach dem Verständnis des Verfassers dieser Diplomarbeit dem HFM-Verfahren entspricht.

Bei dem HFM-Verfahren wird die Gewichtungproblematik der HFA-Methode umgangen, indem die Übertragung der hochfrequenten Information des PAN-Kanals *multiplikativ* und in Form von *Proportionen* erfolgt, wie aus folgender Formel nach FILIBERTI et al. (1994, S.2521) ersichtlich wird:

$$M_i^{hi} = \frac{M_i^{low} \cdot P^{hi}}{P^{low}}$$

M_i^{low}	= Multispektraldaten, niedrige Auflösung
P^{hi}	= PAN-Kanal, hohe Auflösung
P^{low}	= PAN-Kanal, niedrige Auflösung (degradiert)
M_i^{hi}	= Fusionsergebnis
i	= Kanalindex

Die hochfrequente Information des PAN-Kanals wird hier nicht durch einen Kernel-Filter extrahiert, sondern über die Division des voll auflösenden PAN-Kanals durch seine degradierte Variante. Der Degradierungsfaktor entspricht dabei dem Auflösungsunterschied zwischen Multispektralbild und PAN-Kanal. Ergebnis des Divisionsprozesses sind um den

Mittelwert *Eins* streuende „Koeffizienten“, welche, angewandt auf einen beliebigen Multispektralpixelwert, immer jene Hochfrequenzproportionen hervorruft, wie sie im korrespondierenden PAN-Kanal-Ausschnitt geherrscht haben.

Die tiefen Frequenzen des zu rekonstruierenden Bildes, repräsentiert durch das niedrig aufgelöste, resampelte Multispektralbild, werden in diesem Fall also *moduliert* (FILIBERTI et al. 1994, S.2521). Die Grauwertveränderungen innerhalb der alten Pixelfläche erfolgt dabei derart, dass die Originalradiometrien (die tiefen Frequenzen) erhalten bleiben, d.h. eine erneute Degradierung des Fusionsergebnis führt theoretisch wieder zu den Ausgangswerten (siehe Mittelwerte). Gleichzeitig erhalten alle Kanäle die hochfrequenten Informationen zu *gleichen Proportionen*, so wie sie im PAN-Kanal geherrscht haben. Man vergleiche hierzu auch die aufgezeigten Unterschiede zwischen dem Additions- und Multiplikationsverfahren. Je nach Sichtweise kann das HFM-Verfahren auch als optimiertes Multiplikationsverfahren angesehen werden. Aus dieser Perspektive fungiert die Division durch die degradierte PAN-Kanal-Variante als „idealer“ lokaler Skalierungsfaktor, der dafür sorgt, dass auch die Proportionen der Multispektralpixel *untereinander* (über das Bild hinweg) erhalten bleiben.

Die Implementierung des HFM-Verfahrens als graphisches Modell unter IMAGINE gestaltete sich äußerst einfach. Es wurden 3 Inputbilder definiert :

- das niedrig aufgelöste Multispektralbild
- der hochaufgelöste PAN-Kanal
- der auf Multispektralbildauflösung degradierte PAN-Kanal

Der degradierte PAN-Kanal wurde zuvor über das bereits beschriebene Degradierungstool abgeleitet. Alle 3 Eingangsbilder sind in dem Modell über die HFM-Funktion (s.o.) verbunden, wobei zur Vermeidung einer eventuellen Division durch den Wert Null die Formel leicht modifiziert wurde :

$$M_i^{hi} = \left(\frac{(M_i^{low} \cdot P^{hi}) + 1}{P^{low} + 1} \right) - 1$$

M^{low}	= Multispektraldaten, niedrige Auflösung
P^{hi}	= PAN-Kanal, hohe Auflösung
P^{low}	= PAN-Kanal, niedrige Auflösung (degradiert)
M^{hi}	= Fusionsergebnis
i	= Kanalindex

Zur Ausführung des Modells muss neben dem Multispektralbild auch der degradierte PAN-Kanal an die Bildgröße des hochauflösenden PAN-Kanals angepasst werden. Das Resamplingverfahren wurde dabei wieder entsprechend dem des Multispektralbildes gewählt (bilinare Interpolation).

WAVELET-Transformation (WV)

Die Wavelet-Transformation ist ursprünglich für die Zwecke der Signal- oder Datenkompression entwickelt worden. Seit Mitte der 90er Jahre findet das Wavelet-Konzept zunehmend Einsatz in der Fernerkundung, und hierbei insbesondere in der Datenfusion (IVERSON & LERSCH 1994; RANCHIN et al. 1994; MANJUNATH & MITRA 1995; YOCKY 1995; GARGUET-DUPORT et al. 1996; RANCHIN & WALD 1996^a, 1996^b; RANCHIN et al. 1996; YOCKY 1996).

Die mathematischen Grundlagen zur Wavelet-Theorie werden ausführlich in den Basisaufsätzen von MALLAT (1989) und DAUBECHIES (1990) behandelt. Im Rahmen dieser Arbeit kann die komplexe Theorie nur in Form eines kurzen und stark vereinfachten Abrisses behandelt werden.

Die Wavelet-Transformation stellt eine alternative Bild- bzw. Datenrepräsentation im Sinne des Konzeptes der „Multiresolution-Image-Analysis“ (MRA) dar. Das MRA-Konzept sieht eine Zerlegung des zu untersuchenden Bildes in immer gröbere Auflösungsstufen vor. Das Zerlegungsergebnis ist dabei als Pyramide vorstellbar: das Originalbild voller Auflösung bildet die *Basis* der Pyramide, die einzelnen gröber auflösenden Approximationen die *Etagen*, und der Mittelwert des Bildes (als größtes Element) schließlich die *Spitze* (MALLAT 1989, S.689; RANCHIN & WALD 1996^b, S.401). Die Differenzinformationen zwischen den einzelnen Auflösungsebenen werden dabei in „Detailbildern“ aufgefangen.

Im Falle der (diskreten) Wavelet-Transformation erfolgt die Dekomposition des Bildes durch die sequentielle Anwendung spezieller, eindimensional arbeitender Hoch- und Tiefpassfilter (SCHWARZ & DACTU 1997). Die den Filtern zugrunde liegenden Funktionen werden dabei als *Wavelets* bezeichnet. Sie werden allesamt von einer Prototyp-Funktion, der *Mother-Wavelet*, durch Dehnungen / Stauchungen (Dilatationen) und Verschiebung (Translationen) abgeleitet (YOCKY 1995, S.1835). Die Hoch- und Tiefpassfilter werden zunächst in horizontaler, dann in vertikaler Richtung auf das Bild angewandt, wobei beim 1. Schritt jede 2. Spalte, beim 2. Schritt jede zweite Zeile entfernt wird (ZELLER 1994, S.263). Ergebnis sind 3 *Detailbilder* unterschiedlicher Orientierung (horizontal, vertikal, diagonal) sowie ein *Context-Bild*, welches eine Approximation des Ausgangsbild in der nächstgrößeren Auflösungsstufe (Faktor 2) darstellt. Das gewonnene Contextbild ist wiederum Basis für die nächste Filterung bzw. Zerlegungsstufe, das hierbei erzeugte kleinere Contextbild seinerseits usw.. Bei vollständiger Durchführung führt die Wavelet-Transformation somit zu immer weiter ineinander verschachtelten Detailbildsätzen. Die Detailbilder jeder Zerlegungsstufe enthalten dabei immer exakt die Informationen, die beiden jeweils angrenzende Auflösungsstufen des Bildes unterscheiden, die sogenannten *Wavelet-Koeffizienten*. Da jedes Detailbild-Triplets ausschließlich (!) die Differenzinformationen zwischen den angrenzenden beiden Auflösungsstufen beinhaltet, korrespondiert ihr Inhalt mit einem diskreten, schmalen Frequenzbereich, der auf diese Weise auch separat analysier- und manipulierbar wird (vgl. IVERSON & LERSCH 1994, S.75f). Aufgrund dieser Tatsache wird dem Wavelet-zerlegten Signal von vielen Autoren eine Mittelstellung zwischen Orts- und Frequenzbereich zugesprochen. Dabei sind, im Gegensatz zur *Short Time Fourier Transformation*, die hohen Frequenzen besser lokalisierbar als die niedrigen (höhere räumliche Auflösung), letztere dafür aber feiner in der Frequenz unterscheidbar (logarithmische angeordnete Auflösungsstufen in der Dekomposition) (YOCKY 1995, S.1834; YOCKY 1996, S.1067).

Manipulierbarkeit einzelner Frequenzbereiche einerseits, exakte Rekonstruierbarkeit des Ausgangsbildes durch die *inverse Wavelet-Transformation* andererseits, sind die Eigenschaften, die das Verfahren für die auflösungsverbessernde Datenfusion interessant machen. Der Grundgedanke ist es, sowohl vom hochauflösenden PAN-Kanal, als auch vom jeweiligen Multispektralkanal die Wavelet-Transformation durchzuführen, und auf korrespondierenden Auflösungsstufen gezielt Detail- oder Contextbilder (bestimmte Frequenzbereiche) auszutauschen, zu mischen, zu ersetzen, zu modellieren etc.. Die eigentliche Fusion findet statt, indem die modifizierte Pyramide eine inverse Wavelet-Transformation durchläuft und damit ein neuer Kanal entsteht.

Die Möglichkeiten der Mischung oder Verrechnung innerhalb der Wavelet-Domäne sind prinzipiell sehr vielfältig. YOCKY (1996, S.1070) bezeichnet die Wavelet-Datenfusion dann als „Standard“, wenn der Multispektralkanal auf die gleiche Pixelzahl des PAN-Kanals gebracht wird, von beiden Bildern eine Wavelet-Transformation bis zu einer definierten Stufe durchgeführt wird, und auf diesem Niveau dann das Contextbild des PAN-Kanals von dem des Multispektralkanals vollständig ersetzt wird. Die Autoren GARGUET-DUPORT et al. (1996, S.1059) gehen noch direkter vor, indem sie die Wavelet-Transformation von dem

verwendeten SPOT PAN-Kanal (10m) nur *eine* Stufe durchführen lassen, das 20m aufgelöste Contextbild unmittelbar durch den jeweiligen XS-Multispektralkanal (20m) ersetzen, und anschließend die Rückwärtstransformation berechnen. In diesem Fall werden jedem Multispektralkanal tatsächlich nur die Strukturen (Frequenzen) „oberhalb“ seines Auflösungs-niveaus beigefügt. IVERSON & LERSCH (1994, S.78 ff) arbeiten letztlich nach dem gleichen Prinzip, versuchen aber zuvor, die Detailinformationen des PAN-Kanals passend zu „transformieren“. Hierzu führen sie eine vollständige Dekomposition von beiden Bildern durch, um auf verschiedenen korrespondierenden Auflösungsstufen ein Neuronales Netz mit den Beziehungen zwischen PAN- und jeweiligen Multispektralkanal zu trainieren. Unter der Annahme, dass die Beziehungen auf niedrigerer Auflösungsstufe mit denen auf höherer Stufe korrespondieren, wird der trainierte „Schätzer“ schließlich auf die Detailbilder angewandt, die *oberhalb* der Auflösungsstufe des Multispektralkanales liegen. Die veränderten Detailbilder werden zuletzt dem Multispektralkanal „aufgesetzt“, bevor die inverse Wavelet-Transformation gerechnet wird. RANCHIN & WALD (1996^a, S.262) arbeiten mit der ebenfalls komplexen „ARSIS“-Methode (Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures), bei der beide Bilder vollständig zerlegt werden und ein Modell die jeweils korrespondierenden Detailbilder bzw. Wavelet-Koeffizienten mehrerer Auflösungsstufen verrechnet. Die Art und Weise der Verrechnung wird von den Autoren jedoch nicht aufgeschlüsselt.

Das vorangegangene Kapitel dürfte klar gemacht haben, dass es nicht „*die*“ Umsetzung des Wavelet-Verfahrens gibt, sondern dass die Wavelet-Transformation lediglich eine Plattform darstellt, von der aus zahlreiche Fusionierungswege eingeschlagen werden können. Die Tatsache, dass es *mehrere* Wavelet-Transformationen mit unterschiedlichen Eigenschaften gibt, erschwert eine repräsentative Umsetzung zusätzlich. Das im folgenden erläuterte Programm ist entsprechend als nur eine von vielen Umsetzungsmöglichkeiten zu sehen. Die Programmierung erfolgte von Dr. Thomas Udelhoven, Mitarbeiter des Faches Fernerkundung der Universität Trier, unter der Programmiersprache IDL („Interactive Data Language“). Ausgangspunkt für die Umsetzung waren dabei insbesondere die Darstellungen von GARGUET-DUPORT et al. (1996) und YOCKY (1996).

Das Programm sieht vor, zunächst den „high-resolution-input“ (den PAN-Kanal) auf seine Spalten- und Zeilenzahl hin zu untersuchen. Dieser Schritt ist notwendig, da die Wavelet-Transformation entsprechend ihrer Arbeitsweise nur solche Bilder zerlegen kann, welche in ihrer Dimension einem Vielfachen von 2 entsprechen. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, passt das Programm den PAN-Kanal automatisch an die nächstliegende Potenz von 2 an. Der „low-resolution-input“ (der jeweilige Multispektralkanal) wird nun der Dimension des modifizierten PAN-Kanals angeglichen, damit die Transformation beider Bilder vom gleichen Niveau aus beginnen kann. Als weiterer Vorbereitungsschritt erfolgt eine Histogramm-Anpassung des PAN-Kanals an den Multispektralkanal. Die Wavelet-Transformation wird nun von beiden Bildern vollständig bis zur letzten Stufe durchgeführt.

Abbildung 32 zeigt im linken und mittleren Teil die Dekomposition von präparierten PAN- und Multispektralkanal in immer verschachteltere Detailbilder. Die Fusionierung erfolgt in dem Programm nun derart, dass der Wavelet-Repräsentation des PAN-Kanals die Strukturinformation des Multispektralbildes in bestimmten Anteilen zugeführt wird. Dabei hat der Nutzer die Möglichkeit, einen 1. und 2. Auflösungslevel zu bestimmen, innerhalb dessen die erstmalige Verrechnung der Strukturinformation stattfindet. Das Gewichtungsverhältnis zwischen den korrespondierenden Detailbildern kann hierbei vom Nutzer frei gewählt werden. Unterhalb der beiden definierten „Mischungsniveaus“ erfolgt automatisch der *vollständige* Ersatz aller Frequenzkanäle des PAN-Kanals durch die des Multispektralkanals. Der gesamte Verrechnungsvorgang ist in der Abbildung 32 als „Modell zur Verrechnung der

Wavelet-Koeffizienten“ zusammengefaßt. Die gemischte Pyramide ist nun Ausgangsbasis für die inverse Wavelet-Transformation (rechts). Als abschließender Schritt wird das rekonstruierte Bild wieder auf die originale Bildgröße gebracht und bezüglich seiner Grauwertverteilung dem korrespondierenden Multispektralkanal niedriger Auflösung angepasst.

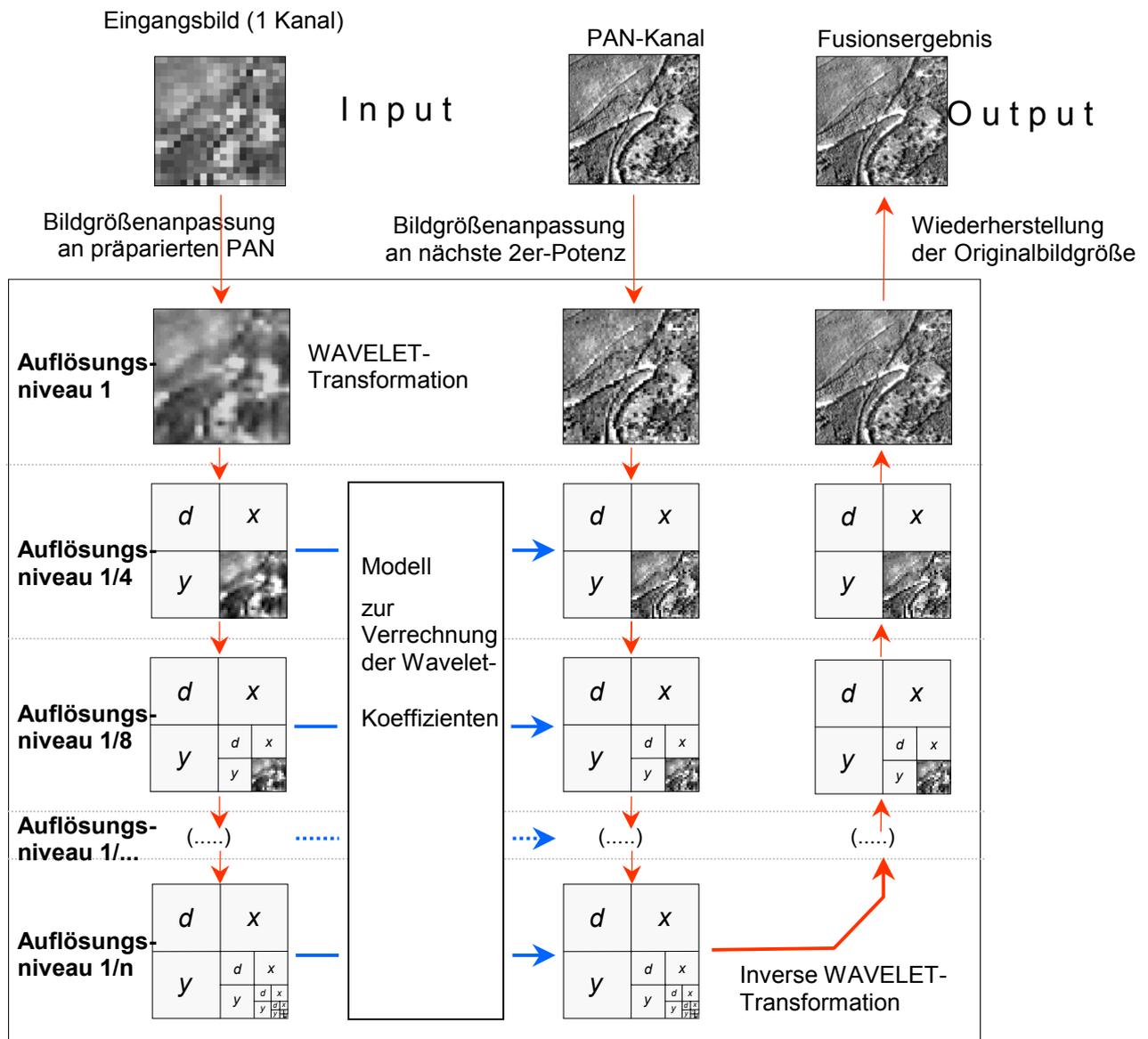


Abb. 32: Schema zur Datenfusion mit Hilfe der WAVELET-Transformation

Das Fusionierungskonzept ist so zu verstehen, dass die niedrigen Frequenzen des PAN-Kanals durch die Informationen des jeweiligen Multispektralkanals ersetzt werden sollen, und somit indirekt nur die hochfrequente, ergänzende Information des PAN-Kanals genutzt wird. Dementsprechend macht ein „Einbau“ der Multispektralbild-Information erst ab dem Niveau des PAN-Kanal-Dekomposits Sinn, welches der Auflösungsstufe des Original-Multispektralkanals entspricht. Hierbei ergibt sich im konkreten Fall das Problem, dass eine solche Stufe bei dem benutzten Auflösungsverhältnis von 1:5 nicht exakt existiert. Somit wird hier auch nie die exakt komplementäre Information der beiden Bilder gemischt werden

können, so dass im Ausgabebild zwangsläufig Artefakte durch redundante oder fehlende Information zu erwarten sind.

Bei der konkreten Anwendung des Programms auf den Testdatensatz wurden zunächst Dutzende von Parameterkonstellationen bezüglich 1. / 2. Mischungs niveau und Gewichtung ausgetestet. Dabei erwies sich die Programmeigenschaft als sehr hilfreich, dass das Multispektralbild *mehrkanalig* eingehen kann und die getrennte Bearbeitung der Kanäle und die spätere Zusammensetzung automatisch und programmintern erfolgt. Bei der jeweiligen visuellen Sichtung war schnell klar, dass ein Kompromiss einzugehen ist zwischen Schärfegrad, Artefakte und Erhalt der Multispektralbildcharakteristik. Es wurde schließlich eine Parameterkombination gewählt, die zwar nur mäßige Schärfübertragung gewährleistet, dafür aber bezüglich Radiometrie und Artefakte akzeptabel erschien.

Kategorie 5: Lookup-Table Rekodierung (LUT)

Das Verfahren der Lookup-Table Rekodierung geht ursprünglich auf PRICE (1987) zurück und wurde speziell für die Behandlung von „kritischen“ Kanälen entwickelt, welche keine oder nur eine sehr geringe lineare Beziehung zu dem PAN-Kanal aufweisen. MORAN (1990), ZHUKOV et al. (1995) und ZHUKOV & OERTEL (1996) arbeiten mit modifizierten Varianten der LUT-Methode, wobei die beiden zuletzt genannten Autorenteams das Verfahren offenbar unabhängig von den vorhergehenden Studien entwickelt haben. MUNECHIKA et al. (1993) verwenden die LUT-Methode nach PRICE (1987) als Referenz und liefern eine verständliche Dokumentation des Verfahrensablaufs. In dem folgenden Kapitel zur Theorie wird vornehmlich zu dem mehrstufigem Verfahren von PRICE (1987) Stellung genommen. Die eigentliche Lookup-Table-Rekodierung stellt dabei nur einen *Teilaspekt* des gesamten Verfahrens dar, hat aber so dominanten Einfluß auf die Ergebnisqualität, dass eine Benennung der Methode nach diesem Teilverarbeitungsschritt angemessen erscheint. MORAN (1990), ZHUKOV et al. (1995) und ZHUKOV & OERTEL (1996) nutzen das LUT-Verfahren auf sehr viel „puristischere“ Weise, verfolgen dabei aber von der Intention dieser Arbeit abweichende Ziele.

Sieht man von speziellen Methoden im Rahmen der Wavelet-Transformation ab (vgl. IVERSON & LERSCH 1994), verwenden alle bisher beschriebenen Verfahren die Grauwertvariationen des PAN-Kanals in ihrer lokalen Anordnung und Tiefe als Maßgabe für die zu erzeugenden feineren Grauwertvariationen in den Kanälen des niedriger auflösenden Multispektralbildes. Die Werte jedes Pixels im Multispektralbild stellen ja quasi einen Mittelwert von feineren Grauwertvariationen dar, die wir nicht kennen. Einziger Anhaltspunkt sind zunächst die Variationen im PAN-Kanal, die es nun zu übertragen gilt. In Kanälen, welche global wenig mit dem PAN-Kanal korrelierten, insbesondere dem nahen Infrarot, ist allerdings kaum zu erwarten, dass im Subpixelbereich diese Korrelation plötzlich besteht. Genau diese Annahme wird aber getroffen, wenn die Subpixelinformationen des PAN-Kanals in ihren Proportionen identisch übernommen werden. Unabhängig von einem visuellen eventuell ansprechendem Schärfegewinn werden in diesem Fall möglicherweise also völlig unrealistische Subpixelvariationen herbeigeführt. Folgernd könnte man neben dem Erhalt der spektralen Ursprungsinformation (erneute Mittelwertbildung führt zu den alten Werten) und einer visuell sauberen Schärfung als drittes und höchstes Ziel der auflösungsverbessernden Datenfusion den Anspruch formulieren, die initiierten Subpixelvariationen im jeweiligen Kanal so realistisch wie möglich zu gestalten. Dieses Ziel verfolgt das LUT- und auch das später behandelte LSM-Verfahren.

Die Methode von PRICE (1987, S.122 ff) basiert auf dem bereits vorgestellten HFM-Verfahren. Der Autor setzt jedoch nicht den originalen PAN-Kanal und seine degradierte

Variante in die HFM-Formel ein, um die modulierende hochfrequente Information zu gewinnen, sondern speziell an den jeweiligen Kanal angepasste Varianten derselben. Hierdurch wird sichergestellt, dass die hochfrequenten Informationen in einem logischen Kontext zu dem aktuell behandelten Kanal stehen und diesen *sinnvoll* modulieren. Für die Kanäle des sichtbaren Spektrums schlägt PRICE (1987, S.122) vor:

$$M_i^{low} = a_i \cdot P^{deg} + b_i$$

$$M_i^{hi} = a_i \cdot P^{hi} + b_i$$

$$M_i^{hi} = \frac{M_i^{low} \cdot M_i^{hi}}{M_i^{low}}$$

- M^{low} = Multispektraldaten, niedrige Auflösung
- P^{hi} = PAN-Kanal, hohe Auflösung
- P^{deg} = PAN-Kanal, degradiert auf niedrige Auflösung
- M^{low} = „geschätztes“ Multispektralbild niedriger Auflösung
- M^{hi} = „geschätztes“ Multispektralbild hoher Auflösung
- M^{hi} = Fusionsergebnis
- i = Kanalindex

PRICE (1987, S.122) argumentiert, dass aufgrund der hohen Korrelation zwischen PAN-Kanal und Kanälen des sichtbaren Spektrums auch eine regressionsbasierte Schätzung des jeweiligen Bandes durch den PAN-Kanal möglich sein muss. Da die Multispektralkanäle in der hohen Auflösung nicht vorliegen, müssen die Schätzparameter (a, b) auf niedriger Auflösungsstufe ermittelt werden (obere Formel). Im nächsten Schritt werden die ermittelten Koeffizienten auch auf den panchromatischen Kanal in seiner vollen Auflösung angewandt (mittlere Formel). Die beiden berechneten „Schätzkanäle“ (niedrige und hohe Auflösung) pro Eingangskanal stellen faktisch kontrast- und helligkeitsangepasste PAN-Kanäle dar. Diese PAN-Varianten gehen nun in die „HFM-Formel“ (unten) ein. Kanäle, welche *keine* lineare Beziehung zum PAN-Kanal aufweisen, wie z.B. der nIR-Kanal, können auf diese Weise nicht behandelt werden. Hier erfolgt die Vorabschätzung wie folgt:

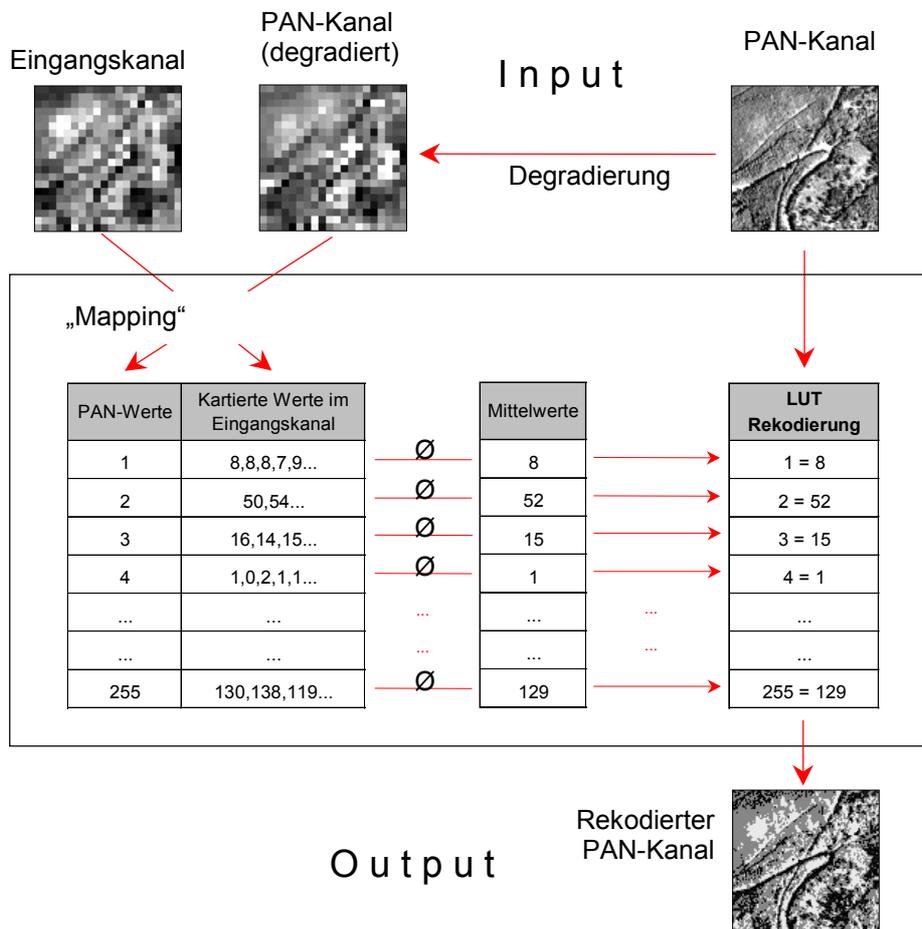


Abb. 33: Rekodierung der PAN-Kanal-Werte anhand korrespondierender Eingangskanalwerte

PRICE (1987, S.123) passt die Grauwertvariationen des PAN-Kanals an den nIR-Kanal an, indem er zunächst für jeden Histogrammwert einer degradierten PAN-Variante den jeweiligen Mittelwert der korrespondierenden Pixel des Eingangskanals ermittelt („Mapping“). Bildlich kann man sich diese Operation als Streuungsdiagramm in Tabellenform vorstellen – für jede „Werte-Klasse“ im PAN-Kanal (0-255) wird die vorkommende Wertestreuung im nIR-Kanal „kartiert“ (vgl. ZHUKOV et al. 1995, S.2154 f). Die jeweiligen arithmetischen Mittel der abgefragten Werte formen eine Lookup-Table, welche zur Rekodierung der Grauwerte des niedrig und voll aufgelösten PAN-Kanal verwendet wird (in der Abbildung ist nur die Rekodierung des voll aufgelösten PAN-Kanals dargestellt). Beide „Schätzungen“ gehen wiederum in die HFM-Formel ein und formen schließlich das endgültige Fusionsergebnis des nIR-Kanals.

Es ist ganz klar, dass gerade bei Kanälen, die nicht oder nur geringfügig mit dem PAN-Kanal korrelieren, die Wertestreuung für einen gegebenen PAN-Wert sehr hoch sein kann. Durch die Verwendung des Mittelwertes ist somit eine extreme Glättung der realen Verhältnisse zu erwarten. Es sei hier aber noch einmal daran erinnert, dass die Methode im Falle von PRICE (1987) und MUNESHIKA et al. (1993) nur dazu dient, die hochfrequente Information, die später den Original-Multispektralkanal moduliert, sinnvoll anzupassen. Der rekodierte PAN-Kanal ist noch nicht das eigentliche Fusionsergebnis. Autoren wie MORAN (1990), ZHUKOV et al. (1995) und ZHUKOV & OERTEL (1996) die das LUT-Verfahren zur *direkten* Bestimmung des hochauflösenden Kanals einsetzen, führen das Verfahren auf Basis eines wandernden Fensters durch. Hierdurch wird natürlich die in Frage kommende Wertestreuung sehr viel kleiner und damit auch der Glättungseffekt geringer. Hier besteht sicherlich ein hohes Potential, auch den indirekten Weg über die HFM-Formel zu optimieren.

Die Umsetzung des LUT-Verfahrens erforderte von allen unter IMAGINE programmierten Verfahren den größten Aufwand. Leider standen keine Programmieroptionen zur Verfügung, die eine LUT-Rekodierung auf Basis eines wandernden Fensters zugelassen hätten. Die Implementierung erfolgte deshalb durchweg nach PRICE (1987) bzw. MUNESHIKA (1993), also mit einer globalen Rekodierung des nIR-Kanals.

Das zu programmierende Modell wurde übersichtshalber in 4 „Bausteine“ gesplittet, welche aber in der Nachbereitungsphase dieser Arbeit noch zusammengeführt werden sollen. In einem 1. Programmteil wird die Regressionsanalyse zwischen dem degradierten PAN-Kanal und den Kanälen 1-3 (sichtbares Spektrum) durchgeführt. Die ermittelten Regressionskoeffizienten werden jeweils auf den degradierten PAN-Kanal angewandt und zusätzlich als Tabelle herausgeschrieben, um dann in einem 2. Modul mit dem voll aufgelösten PAN-Kanal verrechnet zu werden. In einem 3. Programmteil erfolgt die spezielle Behandlung des nIR-Kanals. Zwischen degradiertem PAN-Kanal und nIR-Kanal wird eine Kreuztabelle erstellt, in der allen PAN-Werten (0-255) die korrespondierenden Werte im nIR-Kanal gegenübergestellt werden. Deren Mittelwerte gehen schließlich in die Rekodierung des degradierten PAN-Kanals ein und werden zusätzlich als Tabelle herausgeschrieben. Im finalen 4. Programmteil wird die zuvor gewonnene Lookup-Tabelle schließlich auf den hochauflösenden PAN-Kanal angewandt. Alle Ergebnisbilder

- die über die Regression ermittelten PAN-Kanal-Anpassungen niedriger Auflösung (Ch 1-3)
- die über die Regression ermittelten PAN-Kanal-Anpassungen hoher Auflösung (Ch 1-3)
- die anhand des nIR-Kanals rekodierte PAN-Kanal-Anpassung niedriger Auflösung (Ch 4)
- die anhand des nIR-Kanals rekodierte PAN-Kanal-Anpassung hoher Auflösung (Ch 4)

gehen nun in die eigentliche Fusion durch die HFM-Formel ein. Als abschließender Schritt beinhaltet das Modell die Zusammenfügung der gewonnenen Fusionsergebniskanäle zu einem Gesamtbild.

Kategorie 6: Lokale Regressionsanalyse (LSM)

Die Bildfusion über die lokale Regressionsanalyse („Local Least Squares Modelling“) ist ein Mitte der 80er Jahre entwickeltes Verfahren (TOM et al. 1984; TOM et al. 1985; TOM & CARLOTTO 1985; TOM 1986). Ursprünglich für die Verbesserung des LANDSAT-Thermalkanals (TM6) entwickelt, wendet TOM (1986) die Technik erstmals für die Verbesserung eines Multispektraldatensatzes mit Hilfe eines panchromatischen Kanals an. Letzterer Fall wird nachfolgend betrachtet.

Trotz vielversprechender Ergebnisse fand der Regressionsansatz bis heute offenbar nur wenig weitere Beachtung – in nur drei Datenfusionsstudien wird das Verfahren erwähnt (FILIBERTI et al. 1994; IVERSON & LERSCH 1994; YOCKY 1996); aufgegriffen und umgesetzt wird es erst wieder von HILL (1997) und HILL et al. (1998).

Das Verfahren der lokalen Regressionsanalyse betrachtet und parametrisiert den kleinräumigen Zusammenhang zwischen jeweils einem Eingangskanal und einer auf gleiche (grobe) Auflösung degradierte Variante des PAN-Kanals.

Basis für die Annahme eines lokalen Zusammenhanges zwischen Eingangskanal und PAN-Kanal ist die Tatsache, dass die Lage von Objektgrenzen in verschiedenen Spektralkanälen als weitgehend identisch anzusehen ist und lediglich ihre Ausprägung (Stärke, Polarität) variiert. Diese Stationarität der Objektgrenzen wird nach TOM (1986, S.560) damit begründet, dass die Kanten immer Ausdruck eines Material- oder Beleuchtungswechsels sind. Da sich das charakteristische Reflexionsverhalten eines Materials meist über einen weiten Spektralbereich zieht, muss sich ein Materialwechsel auch in allen Aufnahmekanälen mehr oder weniger bemerkbar machen (TOM 1986, S.560). Der Autor folgert, dass bei genügend kleinem Betrachtungsfenster der resultierende lokale Zusammenhang über Korrelations- und Regressionsparameter greifbar sein muss, auch, wenn zwischen Eingangs- und PAN-Kanal als *Ganzes* keine oder nur eine geringe statistische Korrelation besteht (vgl. TOM et al. 1984, S.385; TOM 1986, S.560). Die Auflösungsstufe, auf der die Parameter des lokalen Zusammenhanges ermittelt werden, kann dabei nur die des (gröber auflösenden) Multispektraldatensatzes sein.

Die Verwertung der Überlegungen für die auflösungsverbessernde Datenfusion liegt nun darin, die auf niedriger Auflösungsstufe gewonnenen Schätzparameter auf den voll aufgelösten PAN-Kanal anzuwenden. Der zu modellierende Kanal (y) bildet zusammen mit dem zuvor auf gleiche Auflösung degradierten PAN-Kanal (x) den eigentlichen Input für die lokale Regressionsanalyse. Ein synchronisiertes, 5×5 Pixel großes Analysefenster (rot) wandert Schritt für Schritt über beide Kanäle (schwarze Pfeile). An jeder Fensterposition findet eine Regressionsanalyse statt, in die alle vom Fenster eingeschlossenen Pixelpaare einbezogen werden (x_{lokal} , y_{lokal}). Die sich für die aktuelle Fensterposition ergebenden Regressionsparameter $[a]$ (additiver Term) und $[b]$ (multiplikativer Term) formen den Schätzwert $[y']$ für das Zentralpixel des Fensters. Die Schätzwerte für die übrigen Pixel werden erst dann berechnet, wenn *sie* die Zentralposition des wandernden Analysefensters einnehmen. Die Differenz zwischen dem Originalwert $[y]$ und dem Schätzwert $[y']$ bildet den Fehlerterm $[e]$ (Residuum) für das jeweilige Pixel. Schätzwert $[y']$ und Fehlerterm $[e]$ bilden zusammen wieder den Originalwert.

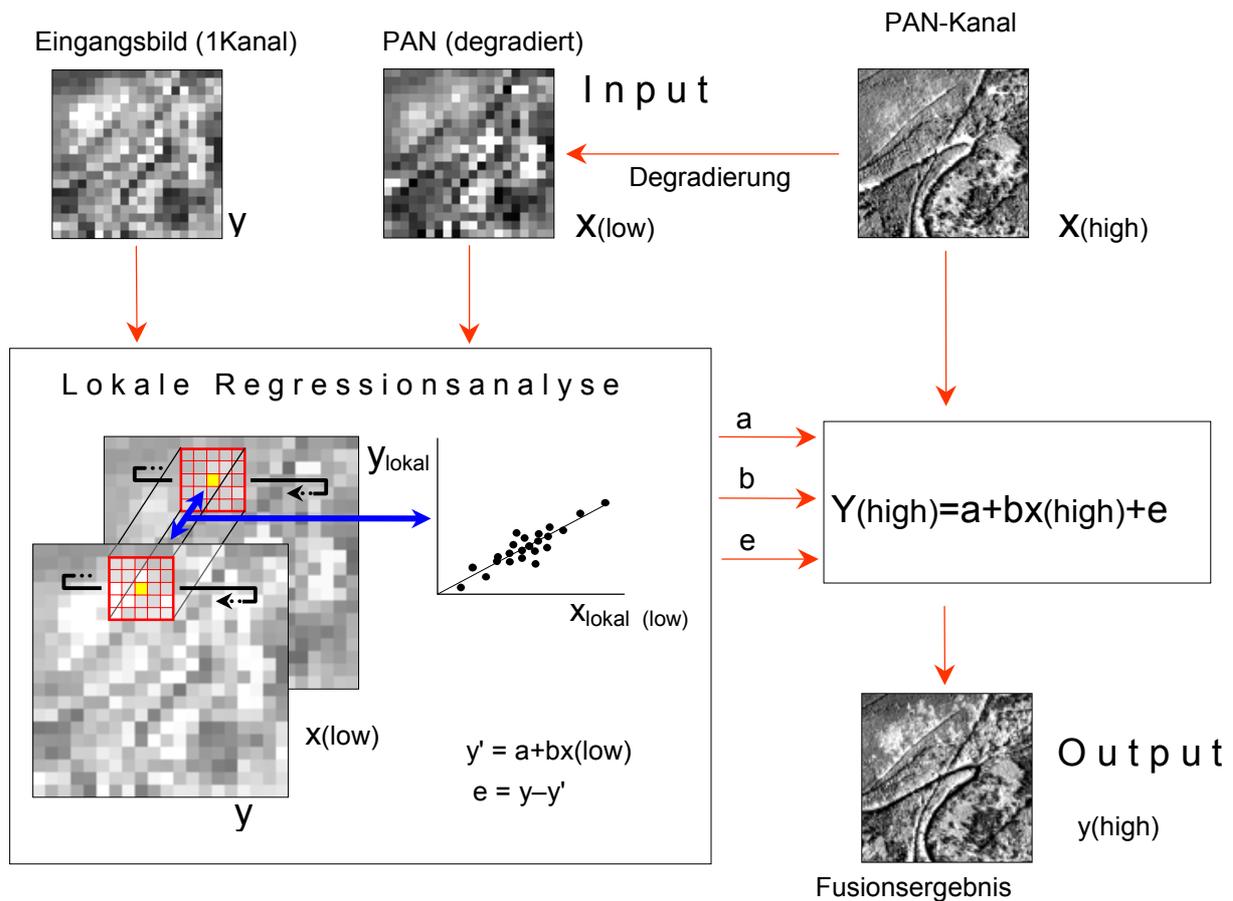


Abb. 34: Schema zur Datenfusion mit Hilfe der lokalen Regressionsanalyse

Die sich über das Bild kontinuierlich ändernden Terme [a], [b] und [e] gehen schließlich in die Berechnung des „gesuchten“ hochaufgelösten Kanals ein, indem sie auf den panchromatischen Kanal in seiner *vollen* Auflösung angewandt werden. Dabei sind die Wertetriplets für die jeweilig korrespondierende Fläche im PAN-Kanal gültig, d.h. für ein Fenster, welches dem Auflösungsunterschied zwischen Referenz (PAN) und Eingangsbild entspricht (hier: 5x5 Pixel). Die Grauwerte des panchromatischen Kanals innerhalb dieses gleich zu behandelnden Fensterausschnittes werden durch die Koeffizienten quasi auf ein neues Niveau katapultiert. Im Prinzip werden also die Grauwerte des Eingangsbildes in das panchromatische Bild als dessen neue niedere Frequenzen hineinmodelliert, was den Ansatz auf den ersten Blick komplementär zu den Hochpassfilterverfahren erscheinen lässt. So wie bei den Filter-Verfahren die hohen Frequenzen des panchromatischen Kanals dem Eingangskanal beigemischt werden, könnte man hier davon sprechen, dass in den panchromatischen Kanal die niederen Frequenzen des jeweiligen Eingangskanals hineinmodelliert werden. Der gravierende Unterschied liegt aber darin, dass nicht nur eine Mischung der Frequenzkomponenten stattfindet, sondern die hohen Frequenzen des PAN-Kanals (Grauwertvariationen „oberhalb“ Auflösungs-niveau Eingangsbild), entsprechend dem multiplikativen Term, in Richtung und Kontrast sinnvoll modifiziert werden! Maßgeblich für die Modifikation der hohen Frequenzen sind dabei die lokalen Beziehungen zwischen Eingangskanal und degradiertem PAN-Kanal: ist z.B. der Kontrast im Eingangskanal lokal viel größer als im degradierten panchromatischen Kanal, ergibt sich für das Zentralpixel des Analysefensters auch ein hoher Betrag für den multiplikativen Term [b]. Damit erfolgt auch bei der Anwendung des Koeffizienten auf den korrespondierenden Ausschnitt im hochaufgelösten PAN-Kanal eine entsprechende Kontrastspitzung der Grauwerte. Die

Detailinformation des Ausgabebildes nimmt also lokal eine Spreizung an, dessen Maßgabe die lokalen Kontrastverhältnisse zwischen Eingangskanal und PAN-Kanal in grober Auflösung ist. Dabei wird z.B. auch ein negativer Zusammenhang, wie er zwischen einem nIR-Kanal und dem PAN-Kanal lokal auftreten kann, ebenso an das Fusionsergebnis „weitergeleitet“ wie die bereits erwähnten Kontrastgegebenheiten.

LSM- und LUT-Verfahren heben sich von den meisten anderen Verfahren ab, indem sie Multispektralbild und PAN-Kanal nicht einfach nur sauber mischen wollen, sondern die Detailinformationen dabei kanalspezifisch anzupassen versuchen. Grundannahme ist dabei, dass die Beziehung zwischen Eingangs- und PAN-Kanal in niedriger Auflösungsstufe auch für die hohe Auflösungsstufe zutrifft. Dieser Zusammenhang *muss* zwar nicht notwendigerweise immer bestehen, erscheint aber eine plausible Annäherung.

Die Bildverbesserungsmöglichkeit über die lokale Regressionsanalyse ist im Fach Fernerkundung der Universität Trier in Form der speziellen Software ENHANCE implementiert. Die Programmierung erfolgte von Prof. Dr. J. Hill unter Turbo-Pascal für Windows. Eine Anleitung liegt als unveröffentlichter Technical Report vor (HILL 1997). Die Software ist zur Zeit noch zweigeteilt. Im 1. Programmteil ENHANCE-2 wird zwar bereits die lokale Regressionsanalyse durchgeführt, alle Berechnungen bleiben dabei aber auf der *niedrigen* Auflösungsstufe. Das Programm dient letztlich dazu, das Residuenbild (Term [e]), zu gewinnen, welches für die Durchführung des 2. Programmteils ENHANCE-5 optionell benötigt wird, hier aber nicht parallel erzeugt werden kann. Neben dem Residuenbild enthält das Ausgabefile von ENHANCE-2 jeweils das aus den Schätzparametern und Residuen rekonstruierte Eingangsbild, sowie ein Bild der lokalen Korrelationen, welches zu Kontrollzwecken verwendet werden kann. Das Programm ENHANCE-5 führt ebenfalls die lokale Regressionsanalyse durch, wendet die gewonnenen Koeffizienten aber umgehend auf den hochauflösenden PAN-Kanal an und erzeugt somit, kanalweise, das gewünschte Fusionsergebnis. Optionell (aber empfohlen) geht bei dem Verrechnungsschritt dann auch das unter ENHANCE-2 gewonnene Residuenbild ein, welches zuvor durch eine externe Software (z.B. IMAGINE) auf die Größe des hochauflösenden PAN-Kanals angepasst werden muss.

ENHANCE-5 sieht eine Abwandlung des Fusionsverfahrens an jenen Pixelpositionen vor, an denen die lokale Korrelation unverhältnismäßig niedrig ausfällt. Geringe lokale Korrelationswerte treten insbesondere dort auf, wo sich im Vergleich zur Analysefensterfläche mehr oder weniger homogene Bildbereiche befinden (HILL et al. 1998, S.40). Die lokalen Regressionsmodelle sind hier mangels Varianz der Wertepaare schlecht definiert; die Gefahr einer Fehlmodellierung im Ergebnisbild ist dementsprechend hoch. Die unsicheren Schätzparameter werden unter ENHANCE-5 von einem Skalierungsfaktor ersetzt, welcher sich aus dem Verhältnis der lokalen Histogramm-Mittelwerte ergibt (HILL et al. 1998, S.40). Der implementierte Schwellenwert, unterhalb dessen für die betroffenen Pixelpositionen nicht die Regressionskoeffizienten sondern die Ersatzkoeffizienten zur Modellierung verwendet werden, beträgt nach HILL (1998, mündliche Mitteilung) derzeit [$r^2=0.45$]. Nachstehende Abbildung zeigt am Beispiel des Testgebietes, welche Flächen im Kanal 4 (nIR) unter diesen Schwellenwert fallen (rot). Die Maske wurde aus dem Korrelationsbild des entsprechenden ENHANCE-2 Durchlaufes abgeleitet.

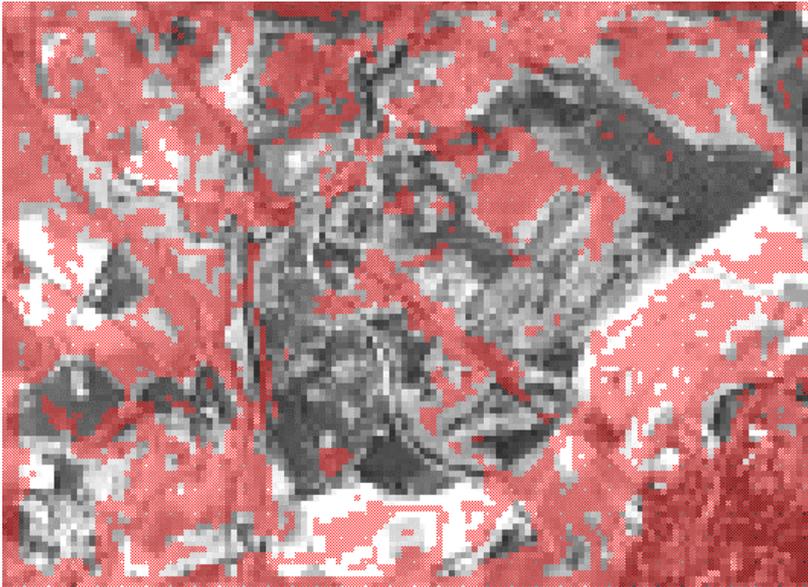


Abb. 35: Bildflächen in Kanal 4, in denen die lokale Korrelation (5x5-Fenster) unter $r^2=0.45$ liegt

Es zeigt sich, dass tatsächlich vorwiegend homogene Flächen wie Wiesen und Ackerflächen die niedrigen Korrelationen aufweisen. Die Tatsache, dass aber auch die deutlich strukturierten Ortsbereiche von Hillesheim betroffen sind, beweist, dass das Konzept der lokalen Korrelation offenbar nicht *immer* greift – zumindest bei einer fixen Analysefenstergröße von 5x5 Pixeln.

Die Größe der von niedrigen Korrelationen betroffenen Fläche (51% bei Schwellenwert $r^2=0.45$, Kanal 4) macht die generelle Problematik des Verfahrens deutlich und betont gleichzeitig die Wichtigkeit eines akkuraten Ersatzverfahrens. Um die derzeitige implementierte Ersatzfunktion auf ihre Qualität hin zu untersuchen, wurde an dieser Stelle beschlossen, das Verfahren als „Local Average Scaling“ (LAS) auszukoppeln, unter IMAGINE als eigenes Modell zu implementieren, auf das *gesamte* Bild anzuwenden, und das Ergebnis zusammen mit den Resultaten der anderen Techniken allen Qualitätstests zu unterziehen. Auf eine genaue Beschreibung der Theorie und Umsetzung des Verfahrens sei hier verzichtet. Entscheidend ist, dass innerhalb des 5x5 Pixel großen Analysefensters keine Regression stattfindet, sondern eine simple Betrachtung der lokalen Mittelwerte. Das Verhältnis der beiden lokalen Mittelwerte bildet den Ergebnis-Koeffizienten für das Zentralpixel, welcher multiplikativ auf den korrespondierenden Bildausschnitts im hochauflösenden PAN-Kanal angewandt wird (vgl. HILL et al. 1998, S.40)

Ein weiteres Problem in der Umsetzung des LSM-Verfahrens ergibt sich aus der Tatsache, dass jedes Koeffiziententriplet bzw. der Ersatz-Skalierungsfaktor mit dem jeweils korrespondierenden 5x5 Pixel großen Ausschnitt im panchromatischen Bild *einheitlich* verrechnet wird. So kann es im Ergebnisbild zu unerwünschten Blockstrukturen kommen, wenn sich im panchromatischen Bild größere homogene Bildbereiche befinden, in dem zu modellierenden Kanal aber deutliche DN-Unterschiede innerhalb dieser Fläche vorkommen. Die ermittelten Regressions- bzw. die Ersatzkoeffizienten modulieren nun bei Anwendung auf den panchromatischen Kanal diese homogene Fläche. Da ja in den von den Koeffizienten jeweils erfassten Quadern keine oder kaum feinere Grauwertunterschiede seitens des PAN-Kanals vorliegen, bilden sich mehr oder weniger einheitlicher Werteblocke quadratischer

Form, welche in ihrer Dimension der Auflösungsstufe entsprechen, in der die Koeffizienten ermittelt worden sind.

Abhilfe bei diesem Problem schafft ein 2. Durchlauf des Programms, wobei der „low-resolution-input“ nun von dem Ergebnis des 1. Durchlaufes gebildet wird. Zwischen dem zu „modellierenden“ Kanal und PAN-Kanal besteht in diesem Fall also kein Auflösungsunterschied. Das nach wie vor 5x5 Pixel einnehmende Analysefenster ermittelt nun Koeffizienten, welche jeweils nur auf *ein* Pixel des panchromatischen Bildes angewandt werden. Während es in sonst allen Teilen des Bildes dabei „nichts Neues“ zu modellieren gibt und die ermittelten Koeffizienten zu demselben Ergebnis führen, kommt es an den Blockstrukturen zu einer selektiven Glättung, die in der Wirkung etwa mit der eines Tiefpassfilters zu vergleichen ist. Entscheidend für diesen Glättungseffekt ist die Tatsache, dass das Analysefenster und sein Zentralpixel eine im Vergleich zur ersten Iteration 5 mal kleinere Fläche einnimmt. Da die Blockstruktur mit ihren scharfen Grenze ja nur in dem Eingangskanal (dem Ergebnis aus dem 1. Durchlauf) vorliegt, nicht aber in dem Regressionspartner (dem PAN-Kanal), kommt es bei der sukzessiven Wanderung des Analysefensters über die Blockstrukturgrenze zu kontinuierlich unterschiedlichen Parametern für das Zentralpixel, je nach dem, welchen Anteil die Blockstrukturfläche gerade in dem Analysefenster einnimmt. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Regression oder das Ersatzverfahren greift. Der abrupte Wechsel von einem Wertebereich zum anderen wird somit im Ausgabebild abgelöst durch einen allmählichen Übergang der Werte – die störenden Strukturen (und nur die) sind geglättet. Es ist zu betonen, dass diese zweite Iteration eine rein kosmetische Funktion hat und sich nur auf die störenden Strukturen auswirkt. Die statistische Qualität des Fusionsergebnis wird von diesem Schritt nicht berührt.

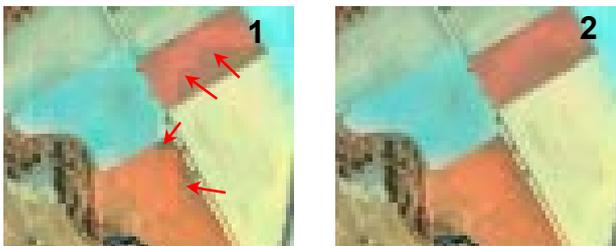


Abb. 36: Beispiel für Blockstrukturen nach 1. Iteration (links) und ihre Behebung durch eine 2. Iteration (rechts)

Für die konkrete Durchführung der Datenfusion mit Hilfe von ENHANCE-2/5 musste zunächst der panchromatische Kanal auf die Auflösung des Eingangsbildes degradiert werden (25m). Da die Programme immer nur einen Eingangskanal analysieren können und diesen in einem Bildfile zusammen mit dem degradierten PAN-Kanal verlangen, musste weiterhin jeder Kanal mit dem PAN-Kanal „gepaart“ werden (Layerstack). Die 4 resultierenden Files bildeten, exportiert als LAN-File, den primären Input für ENHANCE-2. Vorbereitend für den Durchlauf von ENHANCE-5, mussten aus den 4 Ausgabebildern von ENHANCE-2 zunächst die Residuenbilder isoliert und der Auflösung der hochauflösenden PAN-Kanäle (5m) angepasst werden. Das Resampling erfolgte mittels bilinearer Interpolation. Zuvor wurde eine Kopie der primären Ausgabebilder aus ENHANCE-2 für eventuelle spätere Kontrollzwecke gesondert abgespeichert. Angepasstes Residuenbild, die 4 Eingangs-/ PAN-Kanal-Pärchen (s.o.) sowie der voll aufgelöste PAN-Kanal bildeten nun den Input für den ENHANCE-5-Durchlauf. Ausgabe von ENHANCE-5 ist jeweils der modellierte Kanal in hoher Auflösung. Abschließend war ein 2. Durchlauf von ENHANCE-5 vorgesehen, um die teilweise

auftretenden Blockstrukturen in den Ergebnisbildern zu glätten (s.o.). Hierzu wurden alle Ergebniskanäle aus dem 1. ENHANCE-5 Durchlauf mit dem hochauflösenden PAN-Kanal zu neuen „Pärchen“ kombiniert, welche nun den „low-resolution-input“ für den erneuten Programmdurchlauf bilden sollten. Den „high-resolution-input“ bildete, wie beim 1. Durchlauf, der hochaufgelöste PAN-Kanal. Das Residuenbild wurde bei diesem Durchlauf natürlich nicht mit einbezogen. Die Ergebniskanäle aus dem 2. Durchlauf wurden nach IMAGINE importiert und über die Funktion „Layerstack“ zu dem 4-kanaligen Endergebnisbild zusammengesetzt.

7.1.6 Ergebnisauswertung. In den meisten Studien erfolgt die Qualitätsabschätzung anhand des Vergleiches zwischen Fusionsergebnis und dem Eingangsbild der Fusion. Da im Falle dieser Studie eine Referenz vorhanden war, konnten alle vorgesehenen Qualitätstest durch den direkten Vergleich zwischen dem Ergebnisbild und dieser Referenz erfolgen. Sinnvollstes Gütekriterium war dabei der visuelle Vergleich zwischen dem jeweiligen Fusionsergebnis und der Referenz. Der Vorteil dieses Gütekriteriums liegt in der Gesamtschau der spektralen wie auch der geometrischen Eigenschaften des jeweiligen Bildes. Räumliche Unterschiede in der Qualität werden ebenso sichtbar wie eventuelle Störartefakte. Dagegen ist ein objektiver Bildvergleich rein visuell äußerst kritisch. Einschränkend gilt weiterhin, dass das Auge für feinere Unterschiede oftmals nicht empfindlich genug ist (WALD et al. 1997, S.693). Deshalb war eine ergänzende Betrachtung mathematisch-statistischer Kriterien sowie graphischer Ableitungen bzw. Folgeprodukte absolut erforderlich. In Anlehnung an die Ausführungen von CHAVEZ et al. (1991, S.296 f), SCHOWENGERDT (1980, S.1329 ff) und insbesondere WALD et al. (1997, S.693 ff) galt es im Einzelnen zu klären:

- besteht vom visuellen Eindruck her eine Übereinstimmung zwischen Fusionsergebnis und Referenz? → *visueller Vergleich*
- entsprechen die statistischen Grauwertverteilungen in den Ergebniskanälen denen der Referenzkanäle? → *Histogrammvergleich*
- besteht ein statistischer Zusammenhang zwischen den Pixelwerten im Fusionsergebnis und der Referenz? → *Korrelationsberechnung*
- entspricht die Richtung dieses Zusammenhanges dem Soll? → *Regressionsberechnung*
- wie groß ist die durchschnittliche Abweichung der Ergebnispixelwerte von den Werten der Referenz? → *RMS-Fehler-Berechnung*
- gibt es räumliche Strukturen in diesen Abweichungen? → *Differenzbildberechnung*

Die geschilderten Fragen werden versucht, in den nachfolgenden Abschnitten zu beantworten. Bei der Umsetzung wurden alle statistischen Maße für das Gesamtbild und zusätzlich für eine abgegrenzte Waldfläche ermittelt und ausgewertet. Mit dieser Maßnahme sollte festgestellt werden, inwieweit sich bei Fokussierung auf forstwirtschaftlich genutzte Flächen abweichende Ergebnisse und Empfehlungen abzeichnen. Gleichzeitig konnten so die Konsistenzunterschiede der Methoden zwischen Gesamt- und Waldfläche als Indikator für deren „Robustheit“ gewertet werden.

Um später trotz der Vielzahl der auszuwertenden Einzelparameter zu einer Gesamtwertung zu gelangen, wurden die Ergebnisse des jeweiligen Parameters bereits in ihrer graphischen Aufbereitung in eine Rangfolge gebracht. Maßgebend für den Rang einer Methode war dabei die Summe der Abweichungsbeträge aller Kanäle (dieser Methode) vom jeweiligen Sollwert des Gütekriteriums. Dabei wurde angenommen, dass positive und negative Abweichung als gleichwertig ungünstig einzustufen sind. Die resultierenden Sortierungen, getrennt nach Gesamt- und Waldfläche, sollten es später ermöglichen, für jede Methode die Summe der bei den verschiedenen Gütetests belegten Ränge zu bilden. Damit sollte sich eine plakative Gesamtschau der relativen Qualitätsunterschiede bei gleichzeitiger Veranschaulichung der

Qualitätskonsistenz über die verschiedenen Gütekriterien hinweg ergeben. Der generalisierende Effekt und der Verlust der absoluten Unterschiede durch die ordinalskalierte Darstellung wurde dabei bewusst in Kauf genommen. Es steht jedem Leser frei, anhand der Einzeldiagramme und der Ergebnistabellen im Anhang sich ein eigenes, differenzierteres Bild über die Gesamtqualität der einzelnen Fusionstechniken zu machen.

In Hinblick auf die geplanten visuellen und statistischen Qualitätsvergleiche mussten die Fusionsergebnisse in mehrfacher Hinsicht aufbereitet werden. Da einige der getesteten Fusionsmethoden verfahrenstechnisch den äußersten Bildrand nicht bearbeiten können und daher die Ergebnisbilder visuell wie auch statistisch einen störenden Rand aufweisen, mussten von allen Ergebnissen vor der Qualitätsanalyse erneut *einheitliche Subsets* erstellt werden, welche die teilweise auftretenden Ränder ausschließen. Die Subsetbildung erfolgte auch von Referenz, Original und PAN-Kanälen, damit die späteren Vergleiche sich auch auf den identischen Ausschnitt beziehen. Die Beschneidung reduzierte die Bildgröße von 694 x 506 auf 661 x 471 Pixel. Weiterhin wurden von allen relevanten Bildern „Waldsubsets“ auf Basis einer zuvor erstellten Waldmaske angefertigt (Abb. 37).



Abb. 37: Von der Waldmaske betroffene Bildfläche

Die Erstellung dieser Maske erfolgte durch Digitalisierung von Waldarealen im Referenzbild. Dabei kam es nicht auf die vollständige Erfassung des Waldes an, sondern auf die Abgrenzung repräsentativer, von Wolken, Dunst und Sonderflächen ungestörter Forstflächen. Die begrenzenden Polygone wurden gruppiert, als AOI-File („Area of Interest“) abgelegt und schließlich als Flächenbegrenzung bei der Waldsubsetbildung verwendet.

Um eine zentrale Analyse der statistischen Parameter aller Gesamt- und Waldsubsets unter der Software EXCEL zu ermöglichen, war weiterhin die Extrahierung und Exportierung verschiedener Bildparameter erforderlich, um diese dann in die Datenverarbeitungssoftware einzulesen und zusammenzustellen.

Visuelle Ergebnisbeurteilung

Für die visuelle Beurteilung der Ergebnisse wurde als RGB-Farbkomposit die Kanalkombination 4 (nIR), 2 (grün) und 1 (blau) ausgewählt. Der Einbezug des nahen Infrarots stand dabei entsprechend der Bedeutung des Kanals außer Frage; die Kombination mit dem Grün- und Blaukanal hatte sich im Verlauf der Studie als besonders ausgewogene Darstellung herausgestellt. Eine direkte Verwendung der Histogrammwerte für Darstellung und Ausgabe kam allerdings aufgrund deren geringen Niveaus und niedrigen Kontrasts nicht in Frage. Um die Fusionsergebnisse entsprechend aufzubereiten und dabei trotzdem vergleichbar zu halten, wurden alle Bilder nach *einheitlichen* Parametern kontrastgespreizt. Maßgabe waren dabei die am Monitor als „optimal“ ermittelten Streckparameter der Referenz. Die entsprechenden „Breakpoints“ der Kontraststreckungsfunktion wurden auf alle Fusionsergebnisse übertragen

Um die Beurteilung der visuellen Qualität der Fusionsergebnisse etwas objektiver ausfallen zu lassen, wurde vorgesehen, mehrere Testpersonen mit Fernerkundungs-Erfahrung an dieser Einschätzung zu beteiligen. Auch VRABEL (1996) und PELLEMANS et al. (1993) setzen mehrere Personen ein, um die visuelle Qualität der Ergebnisse gegeneinander abzuwägen. VRABEL (1996, S.1076 f) lässt dabei von 13 Teilnehmern immer jeweils ein Bild im unmittelbaren Vergleich zur Referenz und zum originalen Multispektralbild (niedrige Auflösung) am Monitor beurteilen. Die Einschätzung erfolgt dabei auf einer Skala von 0-100 und getrennt nach den Parametern „effektive Auflösung“ und „gesamte Nützlichkeit“. PELLEMANS et al. (1993, S.85) lässt 10 Personen die Ergebnisbilder in ihrer Gesamtqualität auf einer Skala von 0-10 einordnen.

Im vorliegenden Fall mit 12 Ergebnissen wurde von einer Beurteilung der Bilder am kalibrierten Monitor abgesehen, da hier ein unmittelbarer Vergleich *mehrerer* Ergebnisbilder nicht oder nur in sehr eingeschränktem Maße möglich gewesen wäre. Das Fach Fernerkundung stellte freundlicherweise einen Spezialdrucker zur Verfügung, um Original, Referenz und Fusionsergebnisse jeweils als Vollbild mit 4 Ausschnittsvergrößerungen in Form extrem hochwertiger Sublimationsdrucke auszugeben. Die willkürlich nummerierten Drucke wurden in einem tageslichtreichen Raum zum unmittelbaren Vergleich ausgelegt (Abb. 38).



Abb. 38: Visuelles Ranking der Fusionsergebnisse anhand hochwertiger Ausdrücke

Die Testpersonen hatten die Aufgabe, eine Rangfolge der Ergebnisse im Vergleich zu der Referenz aufzustellen. Zunächst war geplant, die Parameter *Schärfe* („wie gut wurde die hohe räumliche Auflösung des PAN-Kanals dem Multispektralbild zugefügt?“) und *spektrale Treue* („wie gut wurde die spektrale Charakteristik des Originals erhalten bzw. die der Referenz erreicht?“) in 2 getrennten Rangfolgen beurteilen zu lassen. Die Separierung der beiden Größen erwies sich jedoch als nicht praktikabel. Die Beurteilung wurde deshalb nach wenigen Tests auf die *Gesamtqualität* reduziert. Jede der 20 Testpersonen, Mitarbeiter und fortgeschrittene Studierende des Faches Fernerkundung (Teilnehmerliste im Anhang), wurde kurz in die Studie eingeführt und anschließend mit den zufällig angeordneten Ergebnisbildern konfrontiert. Die Abbildungen durften von den Teilnehmern frei angeordnet und verschoben werden, um die Erstellung der subjektive Rangfolge zu erleichtern. Referenz und Original standen dabei fortwährend zum unmittelbaren Vergleich zur Verfügung. Nach Abschluss jeder „Sitzung“ wurde die Reihenfolge der Nummerncodes notiert und später in entschlüsselter Form in einer EXCEL-Tabelle zu Auswertung eingegeben.

Ergebnis der visuellen Beurteilung durch die Testpersonen

Abbildung 39 zeigt das Ergebnis der visuellen Beurteilung durch die 20 Testpersonen. Auf der x-Achse sind die verschiedenen Fusionsmethoden aufgeführt, auf der z-Achse die möglichen 13 Beurteilungsränge (entsprechend 13 Methoden), und auf der y-Achse schließlich die Häufigkeit der jeweiligen Rangzuordnung. Die 13. Methode „LSM+LUT“ wird später unter Kapitel 7.2 erläutert. Sie stellt eine Konsequenz der vorab gesichteten statistischen Analyseergebnisse dar und wurde in den visuellen Vergleichstest lediglich zu Bestätigungszwecken mit einbezogen. In den nachfolgenden Erläuterungen wird letztere Methode ignoriert.

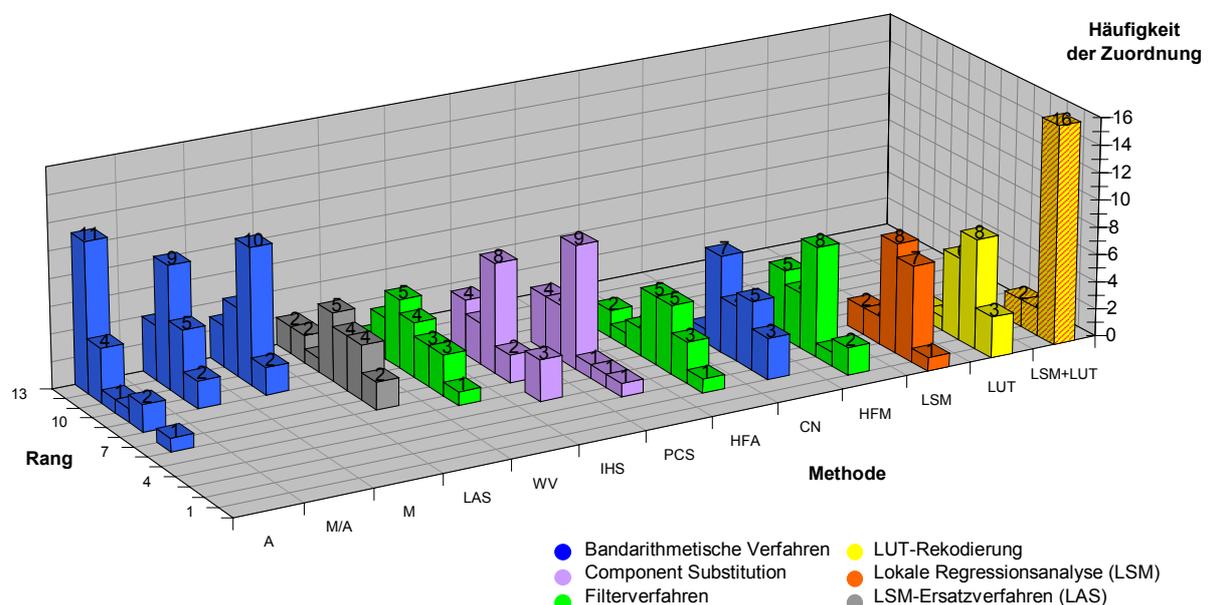


Abb. 39: Resultat der visuellen Beurteilung (Rangzuordnung) der Fusionsergebnisse durch 20 Testpersonen

Die Ergebnisse der bandarithmetischen Verfahren A, M und M/A wurden von allen Teilnehmern recht eindeutig (ausgeprägte Peaks) auf die untersten Stufen der Bewertungsskala gestellt, entsprechend der verminderten Interpretierbarkeit durch die starken Kontrastveränderungen. IHS- und PCS-Ergebnis wurden mittlere Rangpositionen verliehen. Die Einstufung erfolgte dabei aber oberhalb der LAS- und WV-Bilder. Die geringe Schärfe

des WV-Ergebnis und die Glättungseffekte der LAS-Methode wurden also negativer eingestuft als die spektralen Verzerrungen der sonst differenziert und scharf abbildenden IHS- und PCS-Ergebnisse. Die breite Streuung in der Beurteilung von LAS und WV sowie das Fehlen eines eindeutigen Peaks zeigen aber, dass hier offenbar eine gewisse Unsicherheit in der Abwägung zwischen den Parameter „Schärfe“ und „spektrale Qualität“ besteht. Deutlich in die obere Hälfte der Rangskala zugeteilt wurden HFA-, CN- und HFM-Ergebnis. Die erwähnte Texturüberbetonung bei dem HFA-Verfahren ist dabei wohl dafür verantwortlich, dass das CN-Ergebnis trotz leichter spektraler Abweichungen im Durchschnitt als (knapp) hochwertiger empfunden wurde. Das HFM-Ergebnis belegt im Mittel Platz 3 der Gesamtskala. Obwohl das LSM-Verfahren im Waldbereich die wohl realistischste Verbesserung der geometrischen Auflösung liefert, geht das LUT-Verfahren als knapper „Sieger“ der visuellen Beurteilung hervor. Hier wirkt sich offenbar die Tatsache aus, dass das LUT-Verfahren bei kritischen Objekten wie z.B. Straßen oder Feldgrenzen sauberer arbeitet und daher einen besseren Gesamteindruck hinterlässt.

Statistische Ergebnisauswertung

Eine erste pauschale Einordnung der Ergebnisgüte kann über die Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Grauwerte in den Ergebniskanälen erfolgen. Die Grauwertverteilung eines Kanals sollte dabei möglichst deckungsgleich mit dem korrespondierenden Histogramm der Referenz sein. Eine gute Übereinstimmung der Histogramme ist allerdings noch kein Garant für die tatsächliche (lokale) Übereinstimmung der Grauwerte, da im Histogramm Informationen über die Ausprägung *einzelner* Elemente (Pixel) nicht aufgeschlüsselt sind (vgl. BAHRENBURG et al. 1990, S.26).

In Anlehnung an WALD et al. (1997, S.695) werden in den folgenden Diagrammen, stellvertretend für die Histogrammformen, die Kenngrößen *Mittelwert* und *Standardabweichung* verglichen.

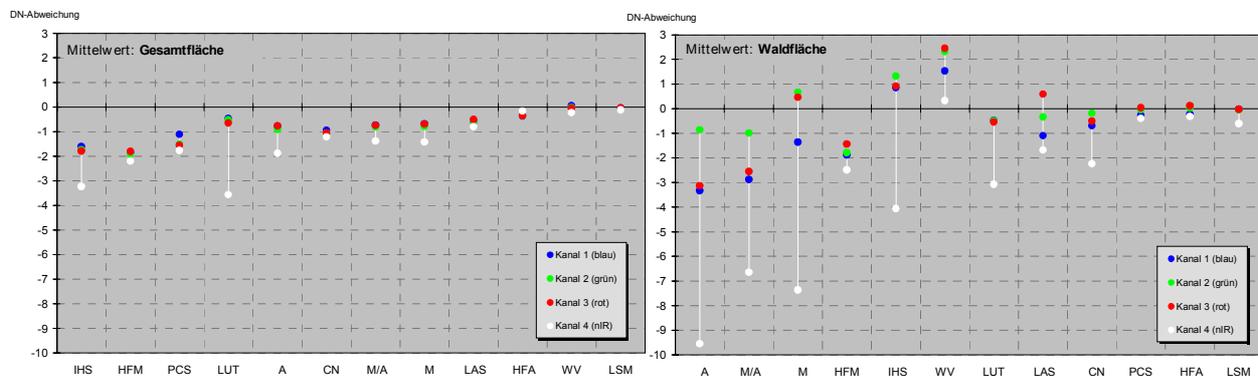


Abb. 40: Absolute Grauwertabweichung zwischen Ergebnis- und Referenzmittelwert

Für die *Gesamtfläche* (Abb. 40 links) ergeben sich fast ausschließlich negative Mittelwertverschiebungen. Dabei sind die Veränderungen im nIR-Kanal mit maximal 3-4 DNs (Digital Number, Grauwert) am größten (IHS, LUT). Die Ergebnisse von A, CN, M/A und M pendeln mit allen Kanälen um den Verschiebungswert -1 und bilden hiermit eine „mittlere“ Diagrammgruppe. Die ähnlichen Werte rühren vermutlich aus der einheitlichen Histogrammanpassung an das Eingangsbild nach der Fusionsprozedur. LAS, HFA und WV reichen noch näher an den Sollwert (Null) heran. Auch das LUT-Ergebnis liegt mit seinen Kanälen des sichtbaren Spektrums bei nur $-0,5$; der schlechte nIR-Wert führt jedoch zu einem

niedrigen Rang. Das LSM-Ergebnis trifft schließlich mit allen Kanälen fast exakt den Idealwert.

Innerhalb der *Waldfläche* (Abb. 40 rechts) ist Streuung in den Abweichungen generell sehr viel größer, sowohl zwischen den Kanälen einer Methode, als auch zwischen den Methoden selber. Dabei schneiden die nIR-Kanäle wie zuvor am schlechtesten ab. A, M/A und M rutschen mit Mittelwertverschiebungen im nIR-Kanal bis zu 10 DN auf die untersten Rangplätze. Dagegen steigen CN- und PCS-Ergebnisse in ihrem Rang auf. LSM- und HFA-Ergebnis zeigen Konsistenz und bleiben in der „Spitzengruppe“.

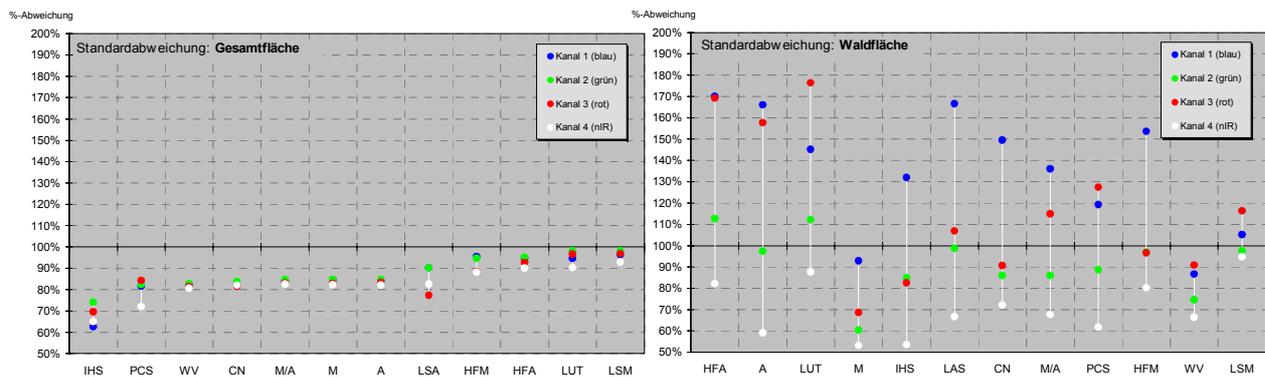


Abb. 41: Prozentualer Unterschied zwischen Ergebnis- und Referenz-Standardabweichung

Für die (prozentualen) Unterschiede zwischen den Standardabweichungen der Ergebnisse und der Referenz ergeben sich ähnliche Trends. Bezüglich *Gesamtfläche* beweisen nun auch HFM- und LUT-Verfahren „Qualität“ und bilden zusammen mit LSM- und HFA-Verfahren die Rangspitzen. Die genannten Verfahren erreichen 90% und 100% der Referenz-Standardabweichungen. Die bandarithmetischen sowie das Wavelet- und LAS-Verfahren bilden mit 80-85% des Sollwertes eine mittlere Gruppe. Die Component Substitution-Verfahren PCS und IHS schneiden am schlechtesten ab. Für die *Waldfläche* ergibt sich ein äußerst inhomogenes Bild mit Wertesprüngen zwischen 50% und 180%. Starke Veränderungen zeigen sich auch in der Reihenfolge. Während LSM- und HFM-Verfahren an den höchsten Rangplätzen verbleiben, fallen LUT- und HFA-Verfahren gegenüber der Gesamtfläche wieder stark zurück. Eine deutliche (relative) Qualitätssteigerung zeigen dagegen das WV- und das PCS-Verfahren.

Stärke des Zusammenhanges (Korrelation)

Die Korrelation als Ähnlichkeitsmaß stellt neben der visuellen Beurteilung das beliebteste Gütekriterium dar. In Studien, in denen keine Referenz zur Verfügung steht, wird mitunter behelfsweise die Korrelation zwischen Fusionsergebnis und dem Eingangsbild der Fusion berechnet (z.B. CARPER et al. 1990, S.463; YOCKY 1996, S.1071). In IHS-Studien wird die Korrelation häufig verwendet, um die Ähnlichkeit zwischen PAN-Kanal und Intensity-Komponente als Indikator der zu erwartenden Ergebnisqualität festzustellen (z.B. SHETTIGARA 1992, S.563; PELLEMANS et al. 1993, S.84; CARPER et al. 1990, S.462).

In Falle dieser Studie war die direkte Korrelationsberechnung zwischen Fusionsergebnissen und Referenz vorgesehen. Hierzu wurde unter IMAGINE eine Korrelationsberechnung zwischen allen Ergebniskanälen und den korrespondierenden Referenzkanälen durchgeführt, getrennt nach Gesamt- und Waldfläche. Die Ergebniswerte wurden exportiert und unter EXCEL zusammengestellt.

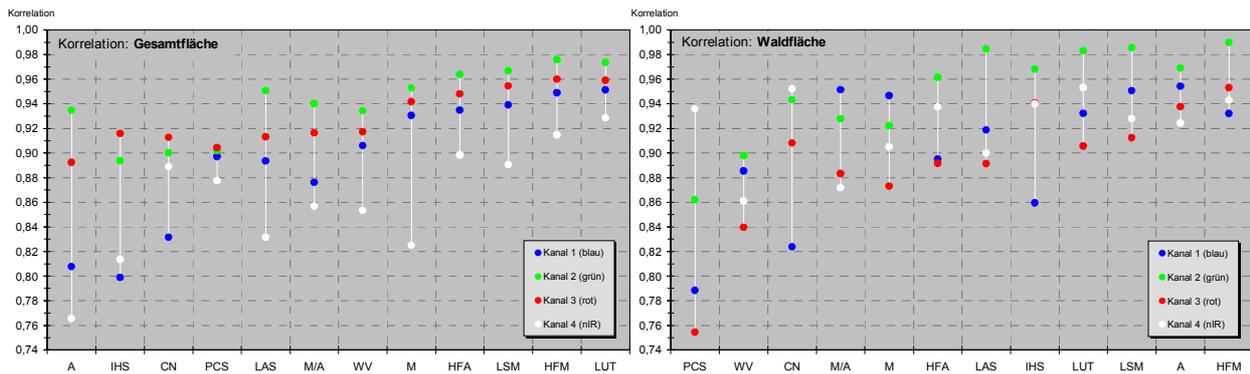


Abb. 42: Korrelationen zwischen Fusionsergebnissen und Referenz

Die Spanne der Korrelationswerte fällt für Gesamt- und Waldfläche recht ähnlich aus. Bezüglich *Gesamtfläche* (links) ergeben sich die besten Korrelationswerte für LUT-, LSM-, HFM- und HFA-Methode. Im Grünkanal werden hier Korrelationswerte zwischen 0,96 und 0,98 erreicht, im nIR-Kanal zwischen 0,89 und 0,93. Die Mittelgruppe, gebildet aus den LAS-, M/A-, WV- und M-Ergebnissen, kann im nahen Infrarot nur noch Werte zwischen 0,82 und 0,86 verzeichnen, während die Grünkanäle mit Werten um 0,94 korrelieren. Die untersten Rangplätze (A, IHS, CN, PCS) fallen demgegenüber weiter ab.

Nur die *Waldfläche* betrachtet (Abb. 42 rechts), kommt es zu Verschiebungen in der Rangbelegung. HFA- und WV-Ergebnis fallen zurück, dagegen drängen sich IHS- und A-Verfahren in die obere Hälfte der Rangskala vor. Höchste Korrelationswerte werden mit >0,98 in den Grünkanälen von HFM-, LSM-, LUT- und HFA-Ergebnis erreicht. Die schlechtesten Werte innerhalb der Waldfläche finden sich tendenziell in den Rot- und Blaukanälen.

Richtung des Zusammenhanges (Regression)

Während die Korrelation etwas über die generelle *Stärke* des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen (Kanälen) aussagt, zielt die Regressionsanalyse auf die *Form* des Zusammenhangs ab, indem versucht wird, die Funktion einer Trendlinie zu bestimmen, welche die Richtungstendenz der Wertepaar-Punktvolke optimal repräsentiert (BAHRENBURG et al. 1990, S.134 ff). Im Sinne der bestmöglichen Simulation des Referenzbildes durch das Fusionsergebnis sollte sich hierbei ein 1:1-Trend zwischen den beiden jeweils betrachteten Kanälen herausbilden. Die Punktvolke im jeweiligen Streudiagramm sollte sich also idealerweise entlang einer Linie orientieren, welche den Nullpunkt des Koordinatensystems schneidet und die Steigung 1 aufweist.

Für die Umsetzung der Regressionsberechnung und -darstellung wurde von allen relevanten Kanälen eine identische, ca. 1400 Elemente umfassende Pixel-„Stichprobe“ erstellt. Für das Gesamtbild wurde dabei eine Samplemaschenweite von 15 definiert (Werteabfrage bei jeder 15. Zeile und Spalte). Für die Waldausschnitte musste eine Maschenweite von 8 gewählt werden, um bei Ausschluss der Restfläche etwa denselben Stichprobenumfang wie bei dem Gesamtbild zu erhalten. Die Werte aller Stichproben wurden unter EXCEL in zwei Tabellen zusammengesetzt, getrennt nach Gesamt- und Waldfläche. Alle hieraus erstellten Streudiagramme befinden sich mit zugehöriger Regressionsgrade und Formel im Anhang. Nachfolgende Diagramme bringen die Ergebniskoeffizienten der Regressionsberechnung in eine kompakte Darstellung.

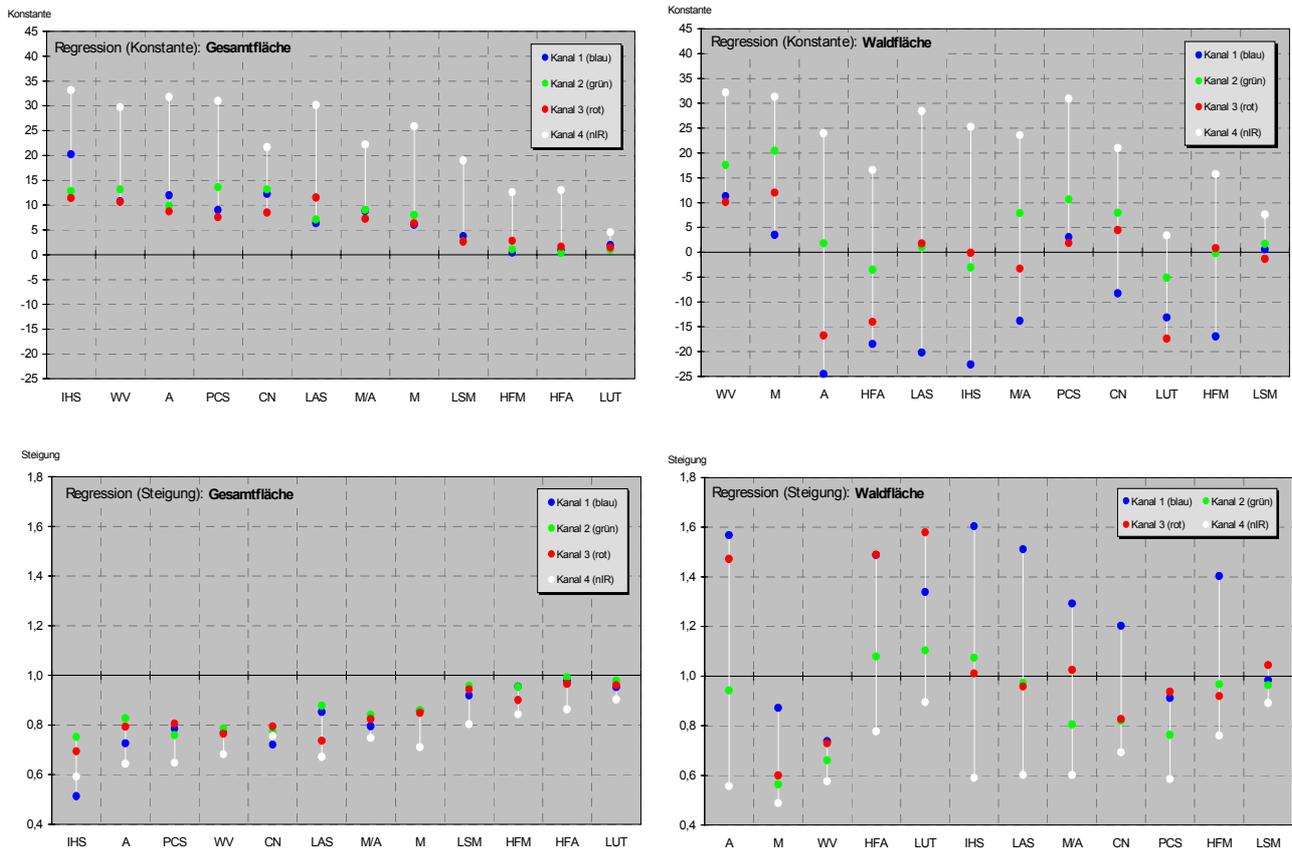


Abb. 43: Regression zwischen Fusionsergebnis und Referenz: Konstante (oben) und Steigung (unten)

Für die *Gesamtfläche* zeigt sich bezüglich der beiden Koeffizienten ein fast identischer Trend. LSM-, HFM-, HFA- und LUT-Verfahren kommen den Idealwerten von Steigung (Eins) und Konstante (Null) am nächsten. CN-, LAS-, M/A- und M-Verfahren weisen mittlere Abweichungen auf, während IHS-, A-, WV- und PCS-Ergebnis die untersten Ränge belegen. Die Unterschiede zwischen den Werten sind zum Teil allerdings marginal. Bezüglich *Waldfläche* kommt es zu starken Umgruppierungen. HFM- und LSM-Verfahren verbleiben an den höchsten Rangplätzen, während HFA- und im Falle der Steigung auch LUT-Verfahren weit zurückfallen. Deutliche Ranggewinne verzeichnen dagegen die PCS- und CN-Ergebnisse. Auch das IHS-Verfahren kann sich in der Waldfläche stärker behaupten. Niedrigste Ränge belegen nun A-, M-, und WV-Verfahren. Insgesamt streuen die Abweichungen in der Waldfläche sehr viel stärker. Bezüglich Konstante kommen nun auch negative, bezüglich Steigung auch Werte >1 vor. Blau- und nIR-Kanal weisen die größten Abweichungen auf.

Mittlere Grauwertabweichung (RMS-Fehler)

Die RMS-Fehlerberechnung erfolgte unter IMAGINE im Sinne von MUNECHIKA et al. (1993, S.70) und WALD et al. (1997, S.696). Die Autoren setzten in der RMS-Formel die Fusionsergebniswerte in Relation zu den Referenzwerten. Der kanalweise berechnete RMS-Fehler bezieht sich somit auf die 1:1-Linie und nicht auf die Schätzwerte einer Regression.

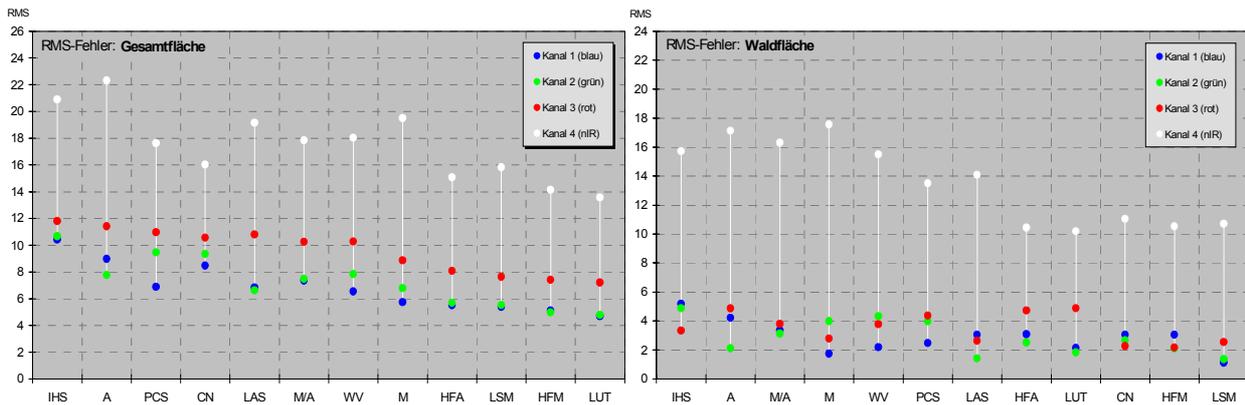


Abb. 44: RMS-Fehler zwischen Fusionsergebnis und Referenz

Bezüglich des RMS-Fehlers zeigen sich in Gesamt- und Waldfläche recht ähnliche Trends, wobei die Abweichungen in der Waldfläche durchweg geringer ausfallen. LUT-, LSM-, HFM- und HFA-Verfahren belegen in beiden Fällen die obersten Ränge, LAS, M/A, WV und M pendeln im mittleren Bereich; IHS- und A-Methode zeigen die größten Abweichungen. Unterschiedlich verhalten sich dagegen PCS und CN: während beide Verfahren bei Betrachtung der Gesamtfläche mit die höchsten Fehlerbeträge aufweisen (Rang 9 u.10), beweisen sie in der Waldfläche deutlich höhere Qualitäten. Das PCS-Verfahren kann hier in das Mittelfeld vorrücken, das CN-Ergebnis erreicht sogar Rang 3 und mischt sich damit mitten in die Spitzengruppe.

Räumliche Strukturen der Grauwertabweichungen (Differenzbilder)

Um festzustellen, ob bei den Pixelwertabweichungen räumliche Abhängigkeiten zu bestimmten Objekttypen oder -eigenschaften bestehen, war abschließend die Berechnung von Differenzbildern geplant. Dieses naheliegende Gütekriterium wird in der Literatur von CHAVEZ et al. (1991, S.297), RANCHIN et al. (1996, S.152), ZHUKOV & OERTEL (1996, S.18) und GARGUET-DUPORT et al. (1996, S.1059) verwendet sowie von WALD et al. (1997, S.694f) empfohlen.

Die Berechnung erfolgte im Sinne von WALD et al. (1997, S.695); die Autoren schlagen die pixelweise Kalkulation des *relativen Fehlers* vor. Hierbei wird der Betrag der Differenz zwischen jeweiligen Referenz- und Fusionsergebniswert erneut durch den Referenzwert geteilt. Multipliziert mit 100 ergibt sich die prozentuale Veränderung oder Abweichung der Ergebniswerte gegenüber der Referenz. Allen Differenzbildern gemeinsam sind die relativ hohen Fehlerwerte im Siedlungsbereich Hillesheim sowie entlang von Verkehrswegen (B421, Verbindungsstraße Lissendorf-Oberbettingen, Bahnstrecke Köln-Trier, alte Bahntrasse) und Feldgrenzen (Hillesheimer, Noller, Birgeler Flur). Hier sind auf engstem Raum extreme Werteschwankungen, denen offenbar keine der Methoden gänzlich gewachsen ist. Weiterhin fällt auf, dass bei allen bandararithmetischen- und Component-Substitution-Verfahren höhere Abweichungsbeträge auch *großflächig* auftreten, während bei den Filtertechniken, LSM- und LUT-Verfahren offenbar Grenzlinienprobleme überwiegen. Insbesondere beim Additions- und IHS-Verfahren weichen große Teile der Ackerfluren zwischen 15% (orange) und 50% (rot) von den Sollwerten ab. CN- und PCS-Ergebnis heben sich qualitativ leicht von den anderen bandararithmetischen- und Component-Substitution-Verfahren ab, insbesondere bezüglich der Waldfläche. Weitaus schlechtere Werte für die Waldflächen weisen dagegen WV- und LAS-Ergebnis auf. Die Resamplingprobleme des WV-Verfahrens und stärker noch die Glättungseffekte des LAS-Verfahrens führen hier und auch an Straßen und Feldgrenzen zu einem Ausfransen der Fehlerflächen. Zwischen den weitaus besseren Ergebnissen der

HFA-, HFM-, LUT- und LSM-Verfahren bestehen nur feine Unterschiede. Die beiden Filtertechniken überzeugen vor allem bei den großflächigen landwirtschaftlich genutzten Flächen, innerhalb dessen die Abweichung weitgehend unter 5% bleiben. Feldgrenzen und Wege werden dagegen durch höhere Fehlerwerte sauber nachgezeichnet. Auf die Problematik der inversen Polarität der bei der Fusion hier aufeinander treffenden Werte wurde bereits hingewiesen. Innerhalb der Waldfläche konzentrieren sich die Abweichungen ebenfalls auf die Bereiche, in denen starke Grauwertsprünge vorkommen (z.B. Bestandsgrenzen, Waldwege, aufgelockerte Bestände). Beim HFM- sind gegenüber dem HFA-Verfahren die Abweichungen leicht geringeren Ausmaßes. LSM- und LUT-Methode weisen trotz angepasster Arbeitsweise Abweichungen ähnlichen Umfangs und ähnlicher Lokalität auf. Auffällig ist jedoch, dass das LUT-Verfahren mit den sonst so kritischen Straßen und Feldgrenzen offenbar deutlich besser zurechtkommt (Hillesheimer, Noller, Birgeler Flur).

Zusammenschau der Rangverteilungen aller Qualitätskriterien

Im folgenden werden die Ränge, die den einzelnen Verfahren bei den unterschiedlichen Gütetests zugeordnet wurden, zusammenfassend als eine Art „Notenspiegel“ zur Darstellung gebracht (Abb. 45). Die möglichen Rangplätze von 1-12 wurden als unterschiedlich hohe Quader, die verschiedenen Gütekriterien in unterschiedlichen Farben dargestellt. Die aus den Einzelblöcken resultierenden Säulen stehen jeweils für eine Methode. Die Gesamthöhe einer Säule als Summe der „Noten“ für ein Verfahren wurde als Kriterium herangezogen, dessen Gesamtrang festzulegen. Bei der Waldfläche wurde das Kriterium „visuellen Beurteilung“ ausgeschlossen (blassrot), da dieser Parameter nur für das Gesamtbild bestimmt wurde. Wie bereits erörtert wurde, ist diese Zusammenschau lediglich eine Behelfslösung, um zu einer Gesamtwertung zu gelangen. Sie unterdrückt die absoluten Unterschiede und unterstellt die gleiche Wichtigkeit aller Kriterien.

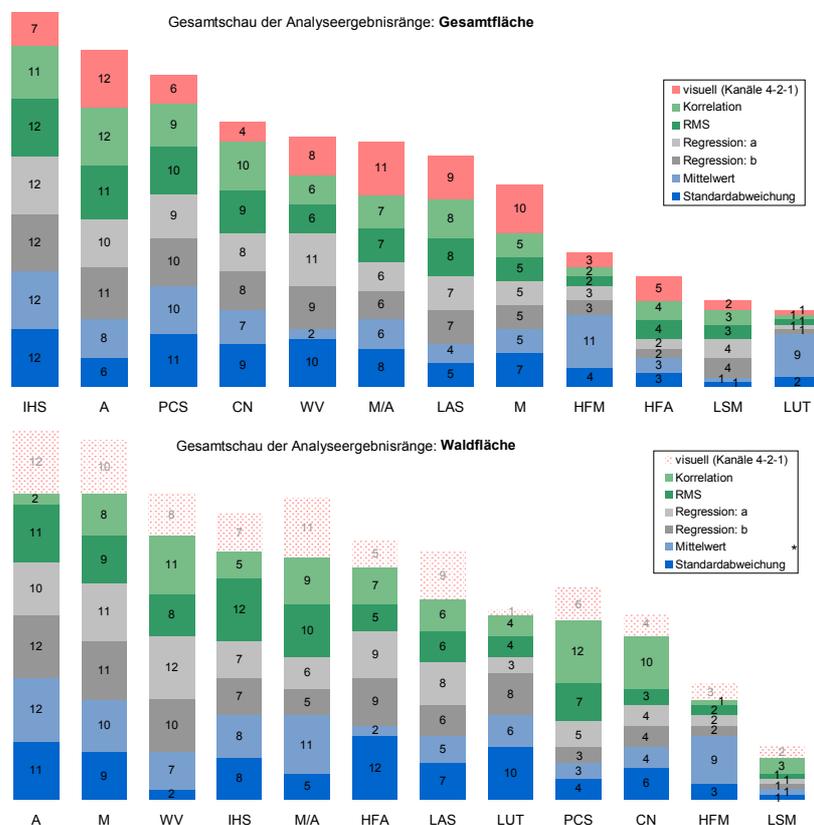


Abb. 45: Gesamtschau der Analyseergebnisränge für Gesamt- und Waldfläche

Betrachtet man das Endergebnis für die *Gesamtfläche* (Abb. 45), bilden das LSM- und LUT-Verfahren sowie die beiden Filtertechniken HFM und HFA die eindeutige „Spitzengruppe“ der getesteten Techniken. Das LUT-Verfahren (Platz 1) belegt bei den statistischen Auswertungen fast ausschließlich Rang 1, sieht man von dem Ausrutscher des Mittelwertes (hellblau, Rang 9) ab. Auch das Ergebnis des HFM-Verfahrens (Platz 4) zeichnet sich bei sonst guten Werten durch einen niedrigen Mittelwertrang aus. HFA- (Platz 3) und LSM-Methode (Platz 2) beweisen dagegen eine annähernd gleichbleibende Qualität über alle Gütekriterien hinweg. Alle 4 Verfahren werden in ihrer hohen Qualität durch die visuelle Beurteilung bestätigt. Das von der Favoritengruppe deutlich abgesetzte Mittelfeld wird von M-, LAS-, M/A-, WV- und CN-Verfahren eingenommen. Dabei gibt es deutliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen der statistischen und visuellen Wertung. So bescheinigt die visuelle Beurteilung den M/A-, LAS- und M-Methoden eine weitaus geringere Qualität, als es die Ergebnisse der statistischen Auswertungen tun. Dagegen bekommt das CN-Verfahren statistisch weitaus schlechtere „Noten“ als bei der visuellen Beurteilung. Die Component Substitution-Verfahren IHS und PCS bilden zusammen mit dem Additionsverfahren das Schlusslicht der Gesamtrangfolge. Das IHS-Verfahren belegt dabei in fast allen Kriterien konsequent den schlechtesten Platz.

Richtet man das Augenmerk auf die *Waldfläche*, kommt es zu starken Verschiebungen in den Gesamträngen. Gleichzeitig werden die Methoden inkonsistenter in ihren Einzelrang-Belegungen. Während HFA- und LUT-Methode um jeweils 4 Ränge in das Mittelfeld abrutschen, belegt nun das LSM-Verfahren mit hoher Deutlichkeit Platz 1, gefolgt von dem HFM-Verfahren. PCS- und CN-Verfahren machen einen großen Sprung nach oben und belegen nun trotz niedriger Korrelationsbewertung die Plätze 3 und 4. Auch das IHS-Verfahren arbeitet bei Waldflächen offenbar besser und steigt 3 Rangplätze nach oben. Die untersten 3 Ränge werden nun von dem A-, M- und WV-Verfahren eingenommen, wobei das Additionsverfahren trotz niedrigstem Gesamtrang den zweitbesten Korrelationsrang aufweist. LAS- und M/A-Methode verbleiben wie schon bei der Gesamtfläche im Mittelfeld.

7.1.7 Zusammenfassende Wertung der Methoden. Alle *bandarithmetischen* (A, M, M/A, CN) und *Component Substitution-Verfahren* (IHS, PCA) führen im Vergleich zu dem Eingangsbild der Fusion zu mehr oder weniger starken spektralen Verzerrungen, entsprechend der Tatsache, dass der PAN-Kanal unverändert und als Ganzes in die Fusion einfließt. Durch die Veränderungen wird nicht nur eine nachgelagerte akkurate digitale Bildanalyse behindert, sondern auch Fehldeutungen bei der visuellen Interpretation provoziert. Die genannten Verfahren werden deshalb als generell ungeeignet eingestuft, den Anforderungen forstlicher Inventur- und Kartieraufgaben gerecht zu werden.

Die *Filtertechniken* zeichnen sich durch weitgehende Beibehaltung der spektralen Ursprungsinformation und einem visuell guten Schärfungseffekt aus, entsprechend der Tatsache, dass hier nur die „überschüssige“ Information des PAN-Kanals Verwendung findet. Dabei ist das HFM- dem HFA-Verfahren deutlich überlegen und darüber hinaus äußerst einfach zu implementieren. Die Tatsache, dass der Entwickler des HFA-Verfahrens mittlerweile selbst das HFM-Verfahren vertritt, spricht dabei für sich. Das HFM-Verfahren wird generell empfohlen, wenn die Ansprüche an die Fusionsqualität nicht über die optimale *Mischung* beider Datensätze hinausgehen und gleichzeitig eine einfache Umsetzung gefragt ist.

Höchste Ansprüche im Sinne der bestmöglichen Simulation der Verhältnisse des „wahren“ hochauflösenden Multispektralbildes erfüllen das *LUT- und LSM-Verfahren*. Die hohe Qualität der beiden Verfahren beruht auf der Tatsache, dass der PAN-Kanal nur *indirekte*

Verwendung findet, indem die spezifischen Beziehungen zwischen jeweiligen Multispektralkanal und PAN-Kanal untersucht und parametrisiert werden. Beide Verfahren sind aufwendig zu programmieren. Angesichts des einmaligen Aufwandes und der deutlich verbesserten Qualität gegenüber Standardverfahren erscheint dieser Aspekt aber vernachlässigbar.

Die Bedeutung der *Wavelet-Methode* konnte im Rahmen dieser Studie nicht voll ermessend werden, da sich die eingesetzte Software noch im Entwicklungsstadium befindet. Eine weitere Problematik bezüglich der objektiven Beurteilung des Verfahrens ergibt sich aus der enormen Vielfalt der möglichen Mischungsalgorithmen. Das hier vorgestellte Ergebnis kann deshalb keinesfalls als repräsentativ für „das“ Wavelet-Verfahren angesehen werden. Es liegt jedoch die Vermutung nahe, dass keine grundlegend anderen oder besseren Ergebnisse erwartet werden können als bei den anderen Filtertechniken, solange eine *globale* Verrechnung von Frequenzanteilen stattfindet. Die Autoren IVERSON & LERSCH (1994) haben jedoch gezeigt, dass auch bei der Wavelet-Methode komplexe *lokale* Verrechnungsoperationen durchgeführt werden können. Leider existiert keine Studie, in der solche Ergebnisse mit denen anderer hochwertiger Fusionstechniken verglichen werden (als Referenz dient in der Regel das IHS-Verfahren).

Die vorgelegte Studie hat gezeigt, dass das LUT-Verfahren, bezogen auf die Gesamtfläche des Testgebietes, in fast allen Gütekriterien den anderen Verfahren überlegen erscheint. Die Stärken des Verfahrens liegen insbesondere im Umgang mit kritischen Objekten wie z.B. Straßen und Feldgrenzen. Andererseits geht bei Fokussierung auf forstwirtschaftlich genutzte Flächen das Verfahren der lokalen Regressionsanalyse (LSM) als mit Abstand bestes Ergebnis hervor (Abb. 46). Dies macht sich auch visuell mit aller Deutlichkeit positiv bemerkbar. Leider ist das LSM-Verfahren in Bildbereichen mangelnder lokaler Korrelation auf ein Ersatzverfahren angewiesen. Das derzeit unter der aktuellen Softwareversion von ENHANCE-5 implementierte Ersatzverfahren (LAS) steht in seiner Qualität jedoch in keinem Verhältnis zu der des Regressionsverfahrens. Da die von dem Ersatzverfahren betroffene Fläche (zumindest im Falle des Testgebietes) von erheblichem Ausmaß ist (51% für Kanal 4), kann davon ausgegangen werden, dass die Gesamtqualität der aus dem LSM-Verfahren hervorgehenden Ergebnisse hierdurch deutlich geschmälert wird.

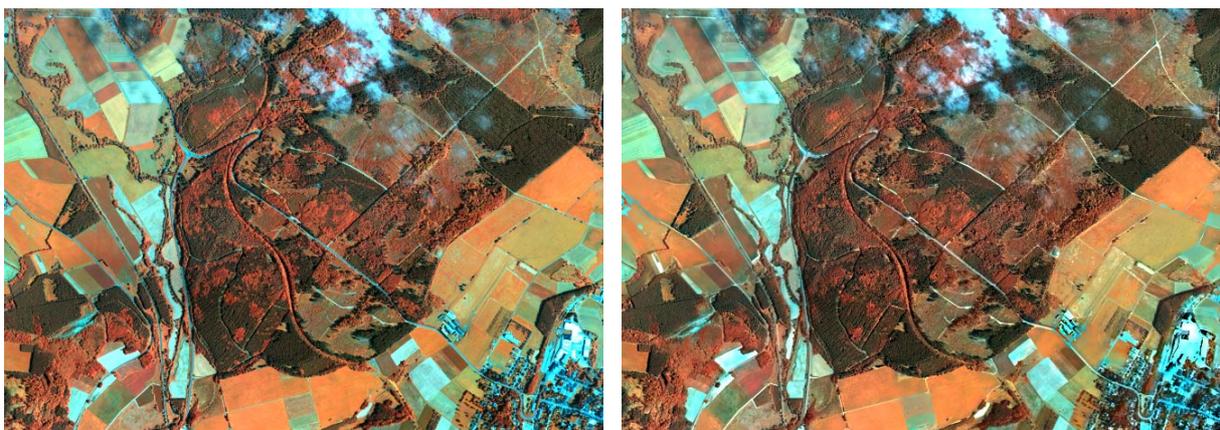


Abb. 46: Mit dem Verfahren der lokalen Regressionsanalyse (LSM) erzieltetes Fusionsergebnis (rechts) im Vergleich zum Original-Datensatz (links)

Die Beobachtungen legen den Schluss nahe, die Lookup-Table-Rekodierung (LUT) als alternatives Ersatzverfahren in die LSM-Methodik einzubeziehen, um so die Stärken beider Verfahren für eine optimale Bildfusion im Sinne forstwirtschaftlicher Interessen zu nutzen. Um diesbezüglich eine Experimentierbasis aufzubauen, wurde das LSM-Verfahren nach TOM (1986) und HILL et al. (1998) unter IMAGINE umgesetzt und dort mit dem bereits bestehenden LUT-Modell kombiniert (Abb. 47).

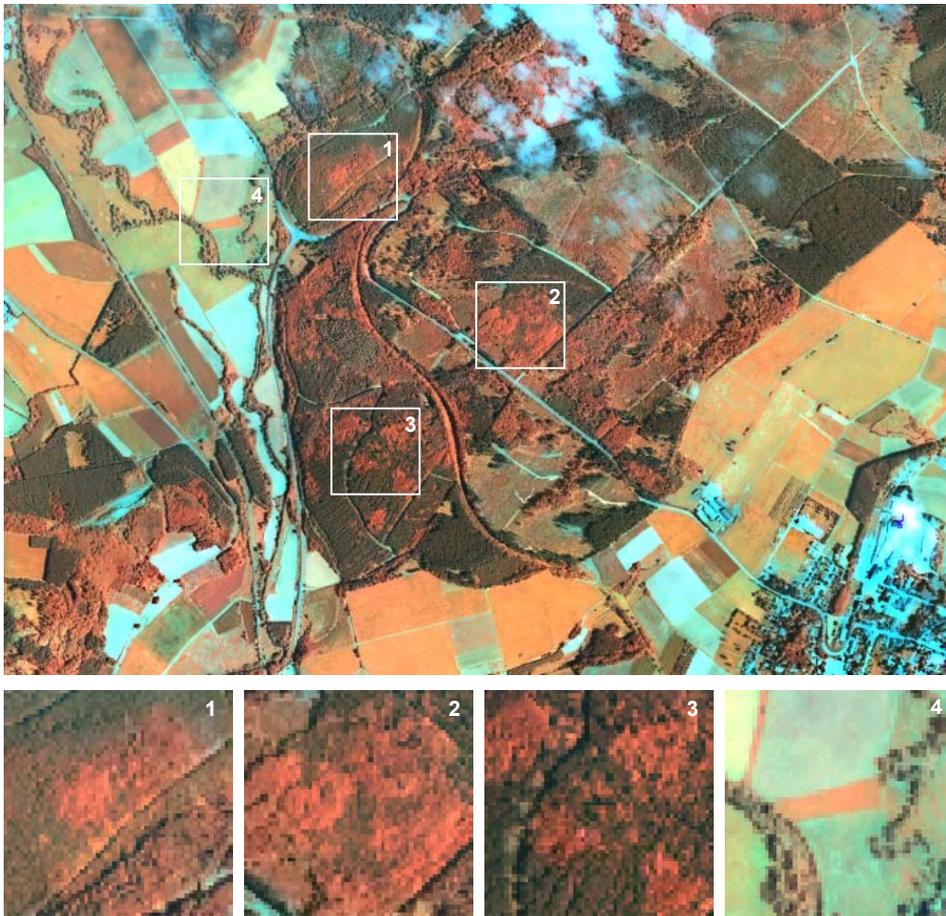


Abb. 47: Fusionsergebnis des neu kombinierten „LSM+LUT“-Verfahrens. Die Kalkulationen der LUT-Methode werden hier unterhalb einer lokalen Korrelation von $[r = 0,8]$ wirksam (Analysefenstergröße 5x5 Pixel)

In der Tat scheint das Ergebnis die positiven Eigenschaften beider Verfahrenselemente zu vereinen. In den Waldflächen ergeben die hervorragenden Kontraste durch das Greifen der lokalen Regressionsanalyse (Abb. 47, Detailbilder 1-3). Bezüglich Straßen- und Wegenetz (blaue Farbe) sowie landwirtschaftlich genutzter Flächen und deren Begrenzung (klarer Umriss) kommen dagegen die positiven Eigenschaften des LUT-Verfahrens zum Tragen (Abb. 41, Detailbild 4). Der Einbezug dieses vorläufigen Ergebnisbildes in die visuelle Beurteilung bestätigt eindrucksvoll die visuellen Qualitäten des Produktes: 18 von 20 Testpersonen haben bei ihrer Beurteilung diesem Ergebnis den höchsten Rang zugesprochen. Es steht noch aus, die visuell empfundene hohe Qualität auch durch statistische Analysen zu bestätigen.

In dieser Studie konnte an einem idealisierten Simulationsdatensatz gezeigt werden, dass die Rekonstruktion eines „wahren“ hochauflösenden Multispektraldatensatzes auf Basis eines

niedrig aufgelösten Multispektralbildes und eines hochauflösenden PAN-Kanals prinzipiell möglich ist. Dabei hat sich gezeigt, dass sowohl hinsichtlich geometrischer wie auch spektraler Eigenschaften deutliche Qualitätsunterschiede zwischen den getesteten Verfahren bestehen. Es ist anzunehmen, dass sich die *relativen* Qualitätsunterschiede zwischen den Methoden auch im Realfall einstellen werden und somit die ermittelten Rangfolgen eine gewisse Gültigkeit bewahren, sofern:

- der nIR-Kanal mit in die Fusion einbezogen wird
- land- und forstwirtschaftliche Nutzflächen im Areal überwiegen
- der „PAN“-Kanal bis in das nahe Infrarot reicht
- das Auflösungsverhältnis 5:1 besteht

Offen ist dagegen geblieben, wie es sich mit der *absoluten Qualität* fusionierter realer Satellitenbilddaten verhält. Hier werden die geometrischen, radiometrischen und spektralen Eigenschaften des realen PAN-Kanals eine entscheidende Rolle spielen, denn nur das, was der PAN-Kanal „sieht“, kann auch später bei der Fusion als Detailinformation verwertet werden. Es stellt sich weiterhin die Frage, wie sich die Fusionstechniken in Abhängigkeit des *Auflösungsverhältnisses* zwischen schärfenden PAN-Kanal und Multispektralbild verhalten. Die Quantifizierung der sicherlich stattfindenden Qualitätsveränderung ist ein bisher offenbar noch nicht bearbeiteter Aspekt und wäre sicherlich eine interessante Aufgabe für zukünftige Studien. Hierbei könnten auch Grenzwerte des Auflösungsunterschiedes ermittelt werden oder auch fusionstypabhängige Optimalwerte. Genauer untersucht werden müsste auch der Einfluss des *Resamplingverfahrens*, welches bei fast allen Fusionsverfahren zwangsläufig zum Einsatz kommen muss. Überdacht werden müssen auch die Möglichkeiten und Grenzen der *Multisensor-Fusion*, Fälle, in denen PAN-Kanal und Multispektraldatensatz nicht vom gleichen Sensor und / oder vom gleichen Zeitpunkt stammen. Hier ergeben sich Probleme durch die notwendige hochgenaue geometrische Anpassung der Daten sowie durch die „echten“ und atmosphärenbedingten Bildunterschiede.

Unabhängig von den zahlreichen offen gebliebenen Fragen hat diese Studie recht deutlich gezeigt, welches Potential optimierte Fusionsalgorithmen wie z.B. das LSM- und LUT-Verfahren offerieren. Bedenkt man, dass nach wie vor das IHS-Verfahren das am meisten verwendete Fusionstool darstellt, genau dieses Verfahren aber in dieser Studie am die schlechteste Qualität zeigt, wird deutlich, welcher Aufklärungsbedarf hier offenbar existiert.

Die Forstwirtschaft wird in Zukunft aller Voraussicht nach mit digitalen Multispektraldaten hoher Auflösung und Gebietsabdeckung rechnen können. Die auflösungsverbessernde Datenfusion kann dabei als entscheidende Schnittstelle fungieren, die gelieferten Mischdatensätze für die Zwecke forstlicher Kartier- und Beobachtungsaufgaben weitaus besser nutzbar zu machen. Diese Option fügt sich nahtlos in die zu beobachtenden Entwicklungstendenzen bezüglich forstlicher Informationssysteme und digitaler Bildauswertung im Forstsektor ein.

7.2 Fernerkundung und GIS im Bereich des Waldschutzes: Die Schwammspinner-Kalamität im Bienwald

Die Satellitenfernerkundung ist in der Lage, sowohl flächenbezogene als auch aktuelle Informationen von der Erdoberfläche bereitzustellen. Somit erscheint der Einsatz von Satellitendaten als prinzipiell besonders geeignete Methode für forstliche Inventarisierungszwecke.

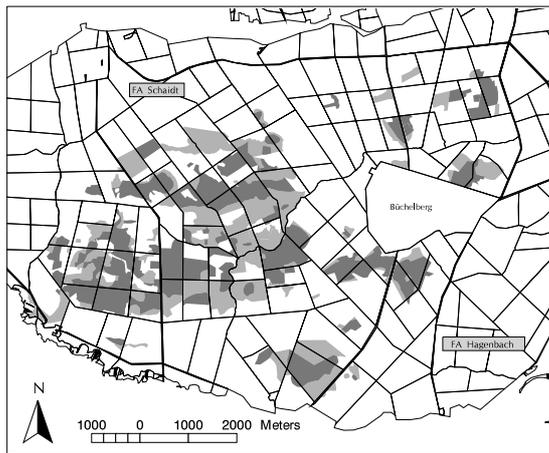
Das Untersuchungsobjekt Wald stellt für die Fernerkundung allerdings eine sehr komplexe Herausforderung dar. Die Reflexion von Waldbeständen kann nicht mit der Reflexion einzelner Blattorgane gleichgesetzt werden; am Sensor gemessen wird eine integrale Mischsignatur, in die eine Vielfalt von internen Bestands-Parametern - wie Baumartenzusammensetzung, Baumalter, Vitalität, Standortsbedingungen, vertikale und horizontale Bestandsgliederung (z.B. Überschirmungsgrad, Schattenräume, Art der Bodenbedeckung) - und externe Parameter wie Beleuchtung, Topographie und Atmosphärenbedingungen eingehen (LANDAUER & VOSS 1996, S.14-15).

7.2.1 Erfassung und Analyse einer Insektenkalamität mittels Fernerkundung und GIS (FA Hagenbach und Schaidt). Der Bienwald ist nach dem Hagenauer Forst das zweitgrößte zusammenhängende Waldgebiet im Oberrheintal. Das erstmalige massive Auftreten des Schwammspinners (*Lymantria dispar* L.), mit weitflächigem Kahlfraß in den Jahren 1993 und 1994, hat auf großen Teilen die dort vorhandenen Eichenbestände befallen. Aufgrund der enormen Folgeschäden, die sich erst in den darauffolgenden Jahren in ihrem tatsächlichen Ausmaß zeigten, wurde vom Land Rheinland-Pfalz ein Projekt zur Analyse der Kalamität initiiert (DELB & BLOCK 1999, BLOCK et al. 1996), in dessen Zusammenhang auch die GIS gestützte Analyse der Folgeschäden an der Universität Trier durchgeführt wurde (STÖVER 1996). Der im folgenden dokumentierte Einsatz von Satellitendaten zur Erfassung derartiger Ereignisse wurde bereits mehrfach erfolgreich durchgeführt. Allerdings handelte es sich hierbei um Untersuchungen in den USA, wo terrestrische Erhebungen, wie im Bienwald ebenfalls durchgeführt, aufgrund der Größe der betroffenen Areale nicht denkbar sind (JORIA & AHEARN 1991, LIEBHOLD et al. 1992, WILLIAMS & NELSON 1986, WILLIAMS et al. 1985).

Chronologischer Abriss der Schwammspinnerkalamität

Der Schwammspinner (*Lymantria dispar* L.) gehört zur Familie der Wollspinner (*Lymantridae*) und damit zur Ordnung der Schmetterlinge (*Lepidoptera*), welche neben den Käfern (*Coleoptera*) die bedeutungsvollste Ordnung unter den forstschädlichen Insekten darstellt (SCHWERDTFEGER 1991, S. 197). Sein Hauptverbreitungsgebiet liegt im südosteuropäischen Raum und dem Mittelmeergebiet. Ein regelmäßige Auftreten ist in Mitteleuropa vor allem in den wärmebegünstigten Flussniederungen wie Oberrheintal, Saar-Nahe-Gebiet, Neckarland und Unterfranken zu beobachten (SKATULLA 1985). Innerhalb des Bienwaldes wurde zuvor keine Massenvermehrung des Schwammspinners registriert (BLOCK et al. 1995, DELB 1995), wohl aber in den benachbarten Regionen, zuletzt in den Jahren 1984-1986 (Abb. 48).

a.) Schwammspinnerfraß 1993



- moderate (50 - 80 %) defoliation
- complete (more than 80 %) defoliation

b.) Fraßprognose für 1994



- moderate (50 - 80 %) defoliation
- complete (more than 80 %) defoliation

c.) Insektizideinsatz 1994



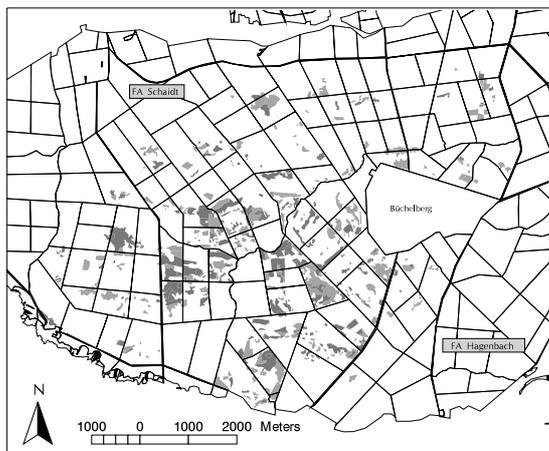
- different insecticides (BTK, Dimilin, Fastac)

d.) Schwammspinnerfraß 1994



- sporadic defoliation
- moderate (50 - 80 %) defoliation
- complete (more than 80 %) defoliation

e.) Folgeschäden 1995



- moderate damages (5 - 30 % dead or dying trees)
- severe damages (more than 30 % dead or dying trees)

Abb. 48: Verlauf der Schwammspinner-Kalamität im Bienwald dokumentiert anhand terrestrischer und luftbildgestützter Inventuren

Bereits wenige Tage nach dem temperaturgesteuerten Schlüpfzeitpunkt, je nach kleinklimatischen Bedingungen April bis Anfang Mai, wandern die Raupen in die Baumkronen, wo sie zu fressen beginnen. Als polyphages Insekt bevorzugt der Schwammspinner zwar Eichen, es werde jedoch auch Buche, Hainbuche, Esskastanie und Obstgehölze befallen. Bei Nahrungsverknappung infolge einer Massenvermehrung, werden auch weitere Laubgehölze sowie Nadelgehölze und die Bodenvegetation nicht verschont. Hauptfrazzeit sind die Monate Mai und Juni. Anschließend kommt es zur Verpuppung. 10-14 Tage später schlüpfen die Falter, Kopulation und Eiablage erfolgt innerhalb einer Woche (SKATULLA 1985). Anhand der Dichte von Eigelegen lässt sich im Gelände frühzeitig abschätzen, wie groß die im Frühsommer zu erwartende Schwammspinner-Population sein wird, was wiederum die Grundlage für eine zu erstellende Fraßprognose ist.

In Rheinland-Pfalz wurden auf Grundlage des Raupenfraßes von 1993 und der im darauffolgenden Winter erstellten Fraßprognose für 1994 mehrheitlich aviotechnisch Insektizide ausgebracht. Lediglich auf Kulturflächen wurden die Insektizide terrestrisch per Rückenspritze ausgebracht. Durch das Ausbringen der Insektizide wurden insbesondere die als besonders gefährdet eingestuften Alt- und Jungbestände vor wiederholtem Kahlfraß geschützt. Als Mittel für die Praxis stehen zwei Produktgruppen zur Verfügung: Die Häutungshemmer auf der Basis von Phenylharnstoffen, zu denen das Dimilin zu zählen ist, und die biologischen Präparate auf der Basis von *Bacillus thuringensis* var. *kurstaki* (BTK). Während bei den BTK-Präparaten kontaminierte Larven den Fraß nach wenigen Stunden einstellen und nach einigen Tagen abstirbt, schädigen die mit Dimilin in Kontakt gekommenen Larven bis zur nächsten Häutung (ROOS 1993, S. 158). Als drittes Mittel wurde in Zusammenarbeit mit der Forstlichen Versuchsanstalt Baden-Württemberg und unter deren fachlicher Aufsicht das Kontaktgift Fastac versuchsweise per Rückenspritze auf Jungwuchsflächen ausgebracht. Im Gegensatz zu anderen Regionen, die ebenfalls von einer Massenvermehrung des Schwammspinners betroffen waren, ereigneten sich im Bienwald 1995 schwere Folgeschäden, insbesondere an Eichen aller Altersklassen.

Satellitengestützte Erfassung der Fraßflächen

Zur Erfassung der Fraßflächen standen drei Landsat TM Szenen zur Verfügung. Eine aus dem Juni 1991 diente als Referenz für den ungeschädigten Zustand des Bienwaldes, zwei weitere aus dem Juni und Juli 1994 dokumentieren das Fraßgeschehen im entsprechenden Jahr. Gemäß der in Kapitel 6 beschriebenen Vorverarbeitungskonzepte wurden die Satellitendaten geometrisch und radiometrisch korrigiert. Es zeigt sich, dass trotz der unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen zu den Aufnahmezeitpunkten (Tabelle 2), die korrigierten Reflexionsspektren normalerweise invarianter Flächen sich nur wenig voneinander unterscheiden. Insbesondere der Signaturenvergleich von zwei Laubwaldbeständen, aber auch solche von Wasser- und Industrieflächen, dokumentiert die Qualität der Atmosphärenkorrektur (Abb. 49) Somit lässt sich abschließend festhalten, dass messbare Reflexionsunterschiede zwischen den Aufnahmen als quantitatives Maß für die Vegetationsveränderung herangezogen werden können.

Tabelle 2: Atmosphärische Bedingungen während der Landsat-Überflüge (Bienwald).

Aufnahmezeitpunkt	Angstrom b	Angstrom n	R ²	Hor. Sichtweite
11. Juli 1991	0.110	-1.266	0.986	25.7 km
1. Juni 1994	0.086	-1.040	0.987	45.5 km
3. Juli 1994	0.186	-1.480	0.997	9.6 km
20. Juni 1995	0.066	-1.342	0.992	52.1 km

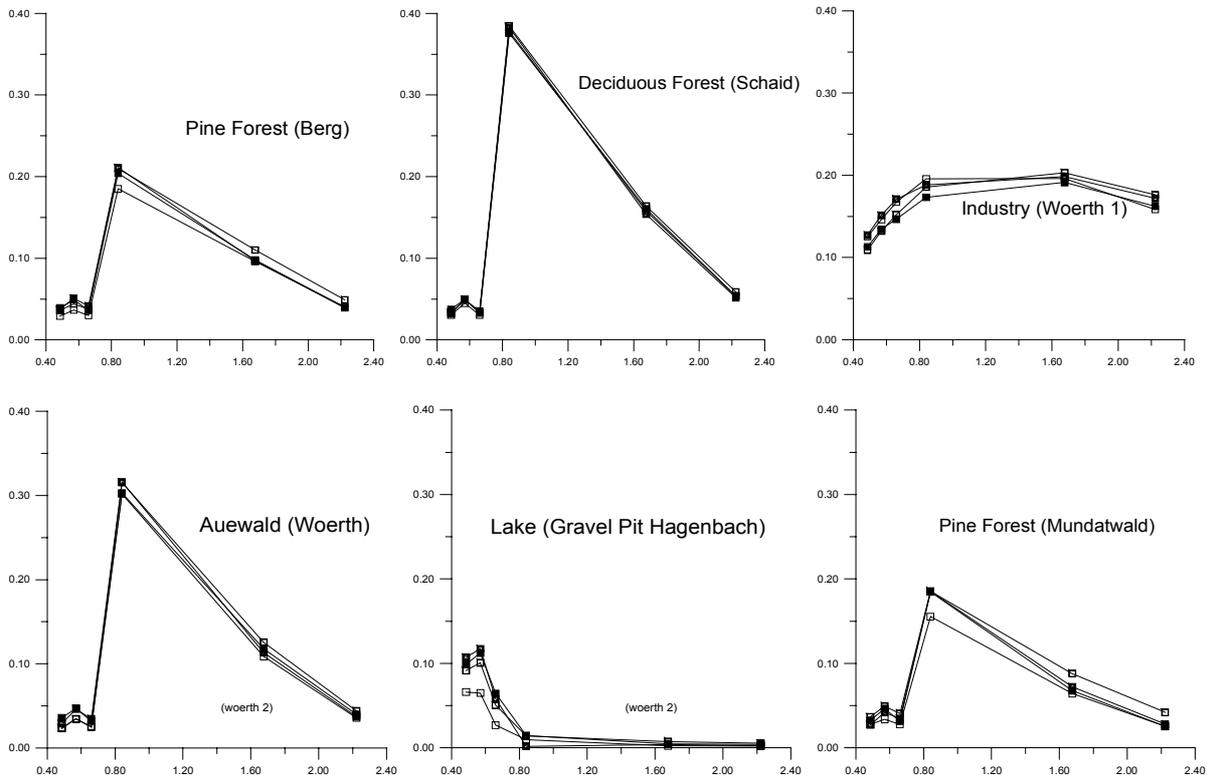
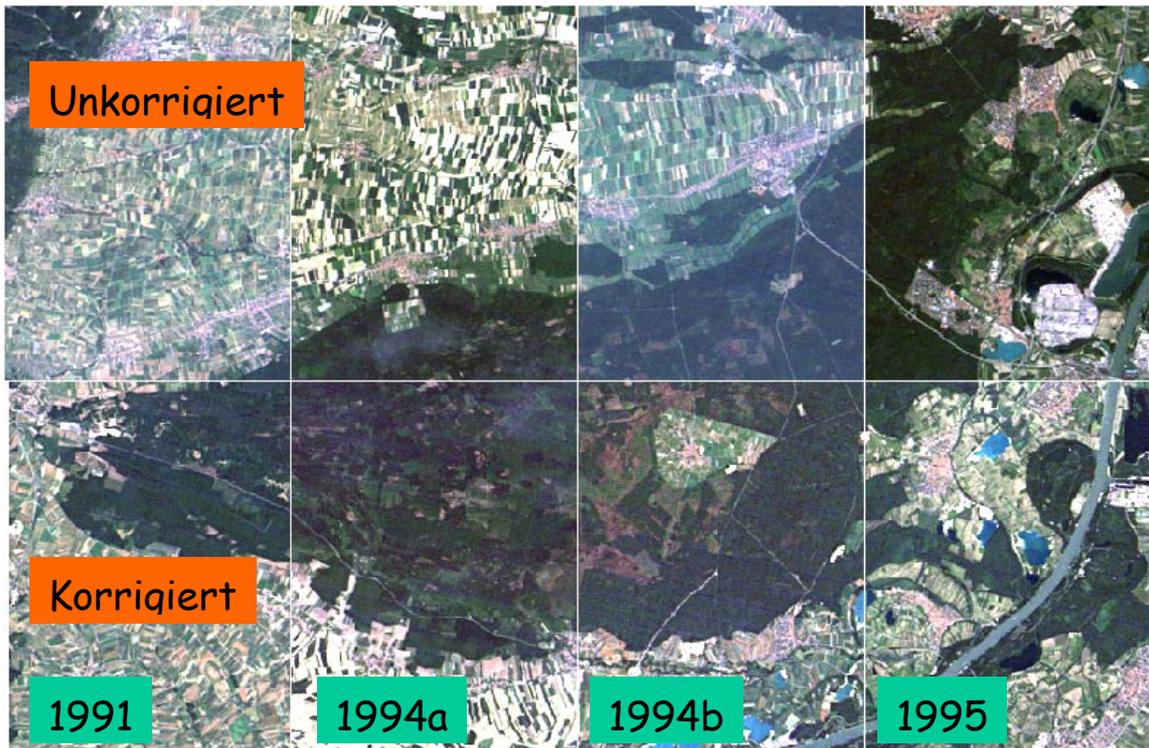


Abb. 49: Vergleich zwischen radiometrisch unkorrigierten und korrigierten TM-Daten (oben) und Reflexionsspektren pseudo-invarianter Flächen im Bereich des Untersuchungsgebietes „Bienwald“ nach der Atmosphärenkorrektur aller vier Aufnahmen (unten)

Während vegetationsfreier Boden durch einen mehr oder weniger linearen Anstieg der Reflexion vom kurz- zum langwelligen Spektralbereich gekennzeichnet ist, hat gesunde Vegetation eine spezifische Reflexionscharakteristik, die sie deutlich von anderen Oberflächen abhebt. Einem relativen Reflexionsmaximum im sichtbaren Grün folgt ein absolutes Reflexionsmaximum im nahen Infrarot, das langsam zum langwelligeren Bereich abfällt. Am deutlichsten lassen sich unterschiedliche Vegetationsformen - und somit auch unterschiedliche Belaubungszustände - durch eine Falschfarbendarstellung der Landsat-TM-Kanäle 5 (mittleres Infrarot), 4 (nahes Infrarot) und 3 (sichtbares Rot) visualisieren.

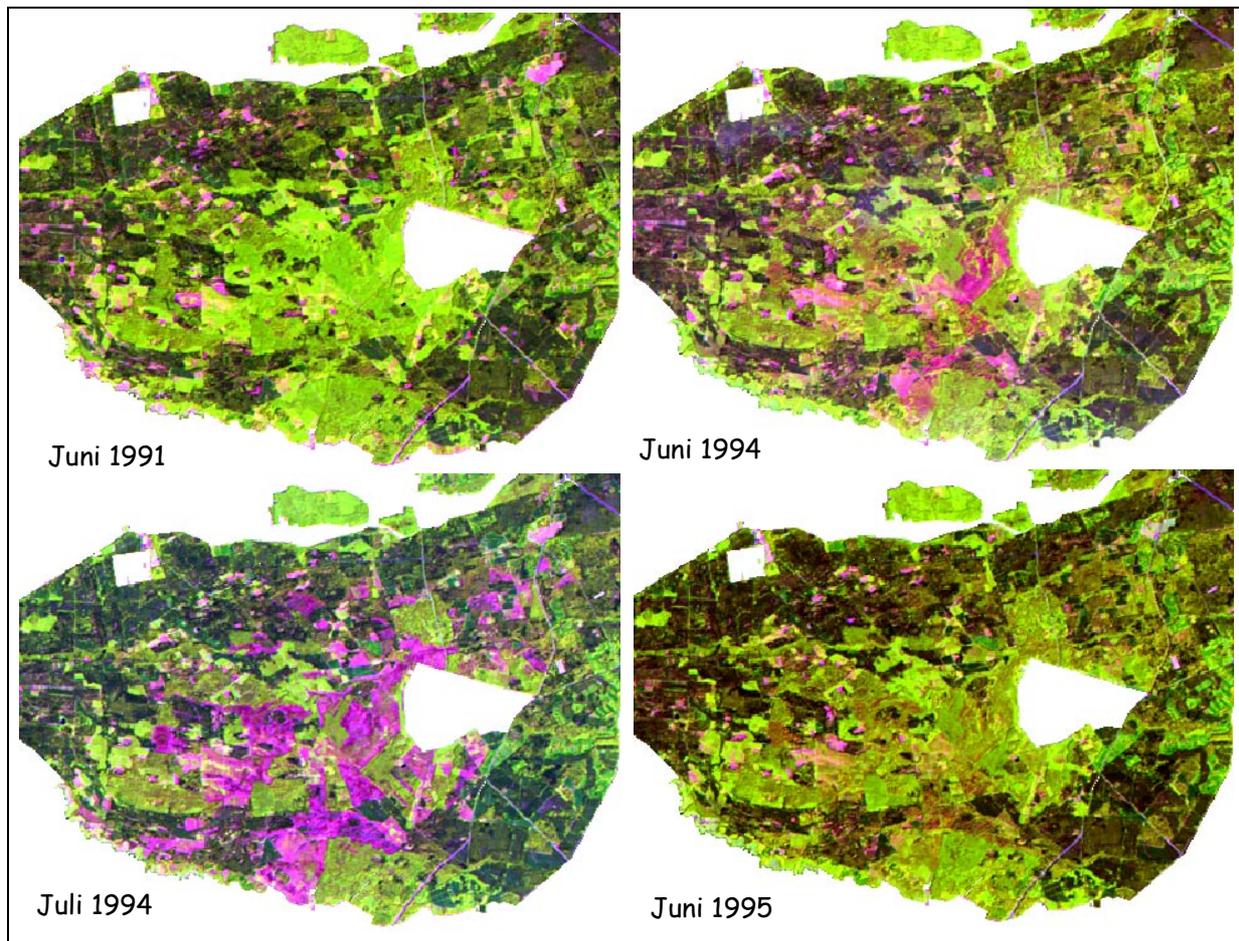


Abb. 50: Landsat-TM-Aufnahmen (Kanalkombination 5,4,3) des Bienwaldes zur Dokumentation der Schwammspinnerkalamität

Während vitale Laubwaldbestände in leuchtendem Grün erscheinen, sind weitgehend unbelaubte Waldgebiete durch intensive Rot- bzw. Violett färbung gekennzeichnet. Die Unterschiede treten im Abb. 50 besonders deutlich hervor, da der Kontrast auf das Waldgebiet optimiert wurde. Die spektralen Eigenschaften unterschiedlicher Objekte können aber auch in Form von Signaturdiagrammen, auf denen die Reflexion in den einzelnen Spektralbereichen abgetragen wird, dargestellt werden (Abb. 51). Die sechs Messwerte geben vom kurz- zum langwelligen Spektralbereich die Reflexionswerte in den sechs TM-Kanälen wieder. Der Vergleich der Spektralsignaturen der Aufnahmen von 1991 und 1994 zeigt, dass bei kahlgefressener Vegetation im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes (TM-Kanäle 1-3) die Reflexion aufgrund der stark verringerten Absorption durch die Blattpigmente zunimmt, während die Reflexion im nahen Infrarot (TM 4), in dem die Mehrfachreflexion durch die Zellstruktur der Blätter von Bedeutung ist, sinkt. Im mittleren Infrarot (TM 5 und 6) liegen

Absorptionsbanden des Wassers. Bedingt durch das fehlende Blattwasser der Laubkrone steigt die Reflexion hier im Falle eines Blattverlustes wieder an.

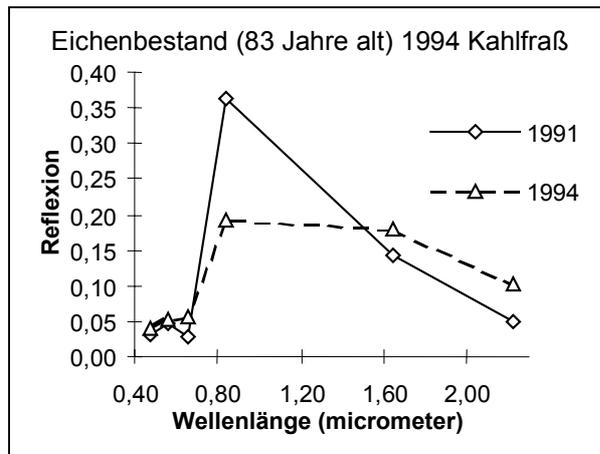


Abb. 51: Durch den Raupenfraß bedingte Reflexionsveränderung eines Eichenbestandes (1991 unbefressen, 1994 befreissen)

Bilddifferenzverfahren

Wie deutlich die flächigen Veränderungen infolge Raupenfraß sind, zeigt der Vergleich von Landsat-TM-Kanal 4 vor (Juni 1991) und während der Kalamität (Juli 1994) (Abb. 52). Während die vitalen Laubwaldbestände 1991 durch sehr helle Grautöne gekennzeichnet sind, da vitale Vegetation im nahen Infrarot sehr stark reflektiert, erscheinen die vom Schwammspinner befreissenen Flächen 1994 sehr dunkel. Die Reflexion ist infolge fehlender Blattmasse stark zurückgegangen. Alleine die Reflexionsveränderung im nahen Infrarot (Kanal 4) reicht somit aus, um befreissene Bereiche von unbefressenen abzugrenzen. Die Intensität der Veränderung lässt sich durch ein Bilddifferenz-Verfahren bestimmen. Hierbei wird für jedes Bildelement der Reflexionswert von 1994 von dem 1991 gemessenen abgezogen und als neuer Grauwert abgespeichert (Abb. 52). Das Ergebnisbild enthält sowohl positive als auch negative Werte. Werte um Null kennzeichnen Flächen, auf denen sich die Reflexion kaum verändert hat. Negative Werte stehen für eine reduzierte Reflexion, die sich durch den Blattverlust erklären lässt, positive Werte für eine Reflexionszunahme, die in einer Vegetationszunahme begründet ist (z.B. auf 1990 entstandenen Windwurfflächen).

Spektrale Entmischung

Bei dem oben beschriebenen Verfahren wird, da nur ein Kanal in die Auswertung einfließt, jedoch nur ein geringer Anteil des vom Sensor erfassten Informationsgehaltes genutzt. Auch die anderen Spektralkanäle des Sensors enthalten für die Kartierung der Fraßflächen wertvolle Informationen und können eine genauere Abgrenzung dieser Flächen ermöglichen. Um die Informationen aller Spektralkanäle zu nutzen, wurde zusätzlich ein Verfahren zur Analyse spektraler Mischsignaturen (Mischpixelmodellierung) angewendet.

Die Analyse spektraler Mischsignaturen (auch als Mischpixelmodellierung, in englischer Sprache als *Spectral Mixture Modelling* bezeichnet) ist ein relativ neues Verfahren, mit dem die spektrale Zusammensetzung einzelner Messung (Pixel) bestimmt und die beteiligten Spektralkomponenten den jeweiligen Oberflächenmaterialien zugeordnet werden (HILL 1998). Dazu bedient man sich der Modellvorstellung, dass die spektrale Reflexion einer inhomogenen Oberfläche durch die Summe der proportional zu den Flächenanteilen ihrer Einzelkomponenten gewichteten Reflexionseigenschaften bestimmt wird.

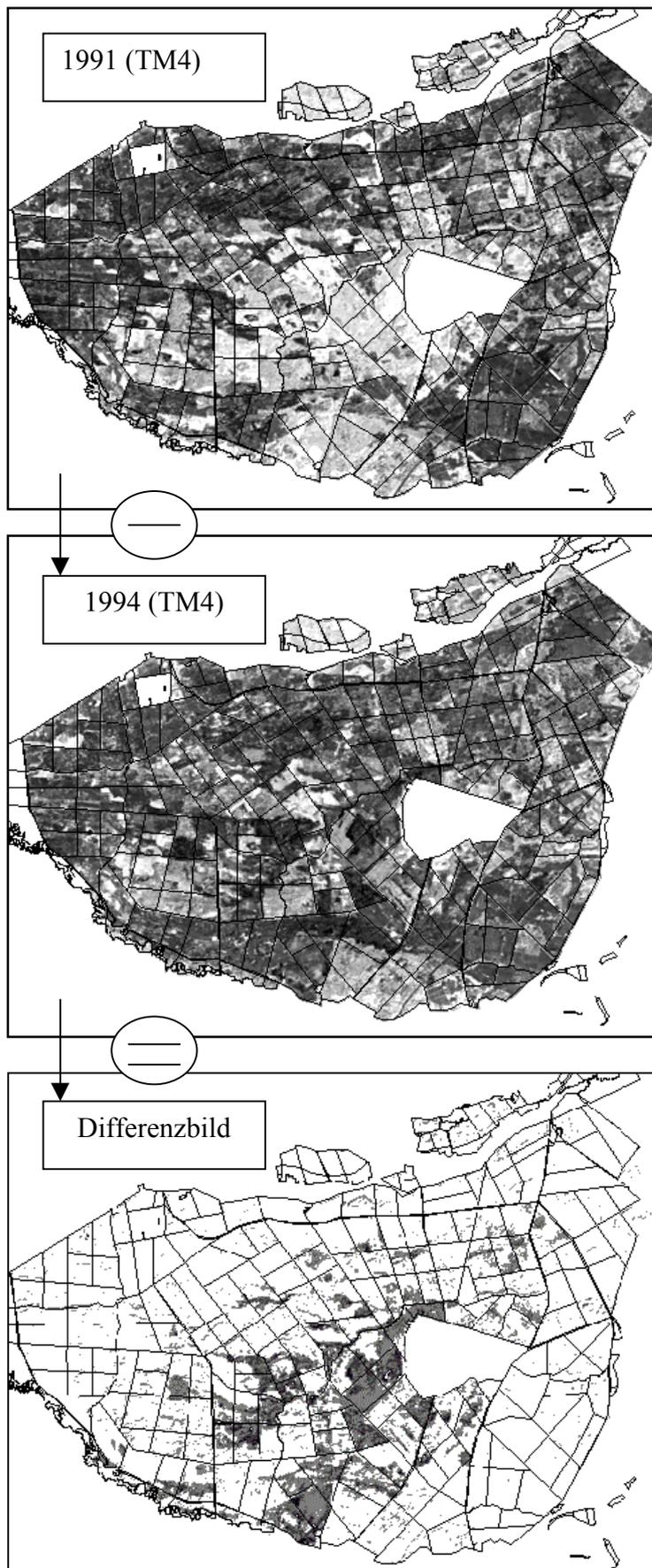


Abb. 52: TM-Aufnahmen (Kanal 4) von 1991 (oben) und 1994 (Mitte) sowie daraus erstelltes Differenzbild (unten). Je mehr der Anteil vitaler Vegetation abgenommen hat, desto dunkler werden die Pixel dargestellt. Weiß eingefärbt sind Flächen ohne nennenswerte Veränderung und Flächen mit einer Vegetationszunahme

Dies gilt streng genommen zwar nur dann, wenn an der entsprechenden Oberfläche keine Mehrfachstreuung stattfindet, d. h. wenn jedes Photon des ankommenden Strahlungsflusses nur mit einer einzigen Materialkomponente in Kontakt kommt. Dies ist etwa bei dichten Vegetationsbeständen wegen der hier auftretenden Mehrfachstreuung von elektromagnetischer Strahlung nicht gegeben, doch die meisten Spektralsignaturen können zumindest in erster Näherung recht gut als Ergebnis additiver Streuungsprozesse modelliert werden. Formal gesehen analysiert man bei der spektralen Entmischung eine bekannte, multispektrale Reflexionsmessung (z. B. die spektrale Signatur eines Pixels) mit Hilfe einer begrenzten Anzahl von Komponentenspektren, der sogenannten spektralen „endmember“. Dieser Begriff ist als geläufige Bezeichnung für die multispektrale Reflexion reiner (d. h. ungemischter) Materialkomponenten eingeführt worden; sie werden in der Regel als bekannt vorausgesetzt und häufig aus bereits verfügbaren Spektralbibliotheken ausgewählt. Die eigentlich interessierenden Prozentanteile der innerhalb des Pixels erfassten Materialien können dann mit Hilfe relativ einfacher mathematischer Operationen (Invertierung der endmember-Matrix) bestimmt werden.

Alle Satellitenszenen wurden auf der Basis eines „drei Endmember“ Modells (Vegetation, Boden und Schatten) prozessiert. Das Ergebnis sind dreikanalige Bilder, deren Grauwerte den modellierten Flächenanteil von Boden, Vegetation und Schatten repräsentieren. Der „Vegetationskanal“ gibt einen Überblick über die Verteilung vitaler Vegetation innerhalb des Bildes. Um die Veränderung gegenüber der Referenz von 1991 zu erfassen, wurden die Vegetationsanteile der beiden 94er Aufnahmen jeweils pixelweise von der 91er Szene subtrahiert. In einem zweiten Schritt wurde die relative Abnahme der Vegetation berechnet, wobei der Wert von 1991 auf 100 Prozent gesetzt wurde. Dies ist sinnvoll, da eine Abnahme des Vegetationsendmembers von 20% in einem aufgelichteten Altbestand, der auch 1991 nur einen Vegetationsanteil von beispielsweise 40% aufzeigte, was einer absoluten Abweichung von 50% entspricht, als gravierender einzustufen ist, als in einem vitalen Jungbestand mit einem Vegetationsanteil von ehemals 80% (25% Abnahme).

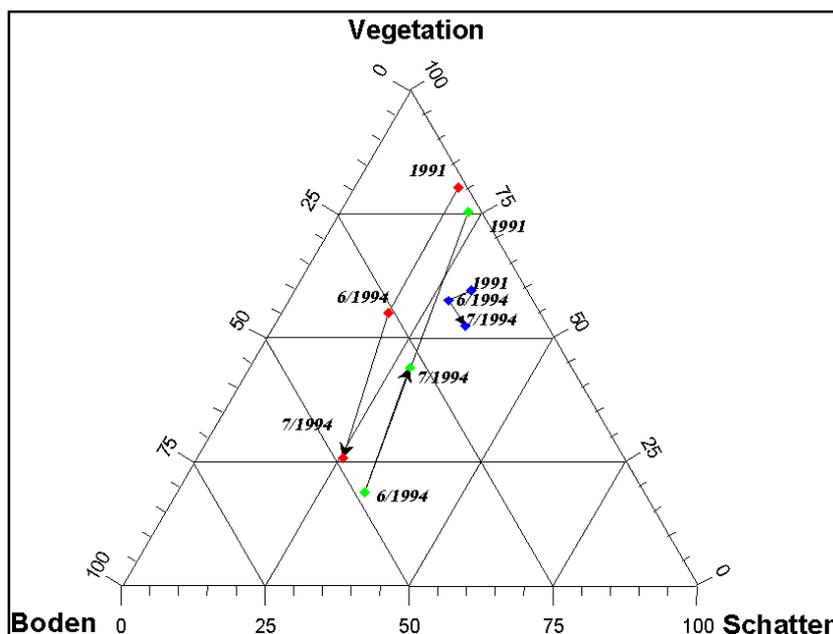


Abb. 53: Entmischungsdiagramm mit Flächen unterschiedlicher Fraßgeschichte. Rote Kurve: Kahlfraß, dessen Höhepunkt erst im Juli erreicht wird, Grün: vom Juni zum Juli regenerierte Kahlfraßfläche; Blau: vom Schwammspinner unbeeinflusster Kiefernforst

Auf diese Weise wird für jedes Bildelement die Zu- bzw. Abnahme der modellierten Vegetation im Vergleich zu 1991 ermittelt. Beim Vergleich der beiden Aufnahmen von 1994 (Abb. 53) lässt sich feststellen, dass in einzelnen Bildbereichen der Anteil modellierter Vegetation binnen fünf Wochen wieder zugenommen hat, was offensichtlich zum einen durch

sekundären Blattaustrieb und zum anderen durch die infolge des erhöhten Lichtgenuss aufkommende Bodenvegetation in den bereits im Juni kahlgefressenen Bereichen verursacht wurde. Umgekehrt war in einigen Bereichen der im Juli festgestellte Blattverlust im Juni desgleichen Jahres noch nicht vorhanden. Um überall den Fraßhöhepunkt zu erfassen, wurden die beiden Ergebnisbilder so miteinander verrechnet, dass der jeweils größere Wert als Maß für den Raupenfraß herangezogen wird.

In Abbildung 54 wird die Veränderung der Waldvegetation verdeutlicht und ein Überblick über das Ausmaß der befreiten Fläche gegeben. Die Vegetationszunahme bzw. -abnahme ist in Klassen dargestellt. Eine Vegetationszunahme ist besonders in den Jungbeständen und Windwurfflächen zu erkennen, Vegetationsabnahme - weitflächig über 40% - kennzeichnet die infolge Raupenfraß weitgehend entlaubten Gebiete.

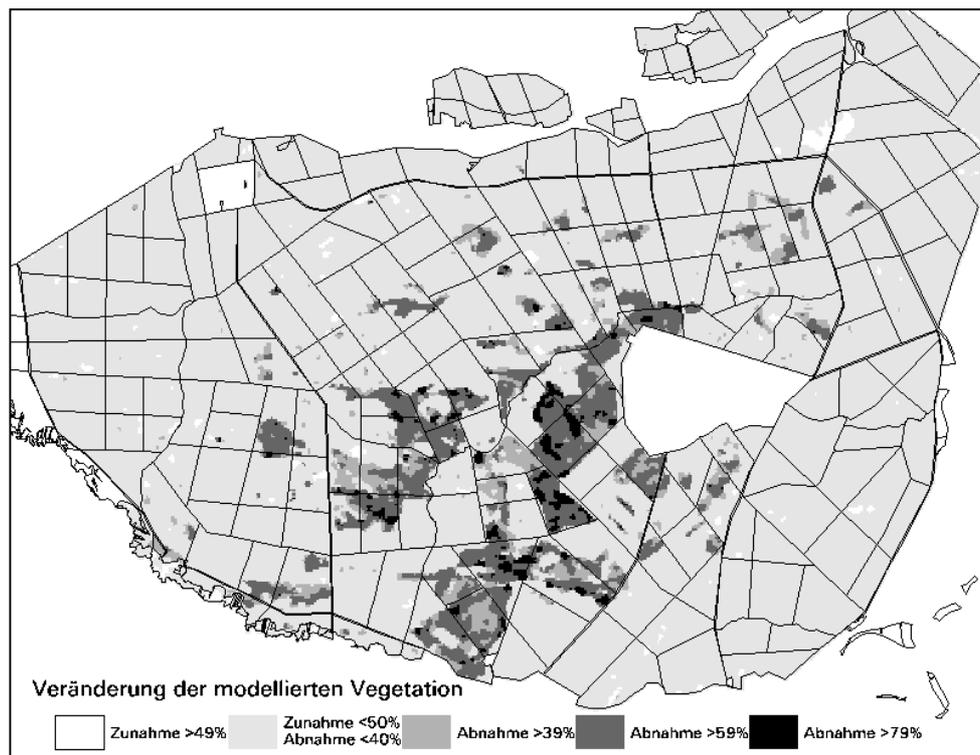
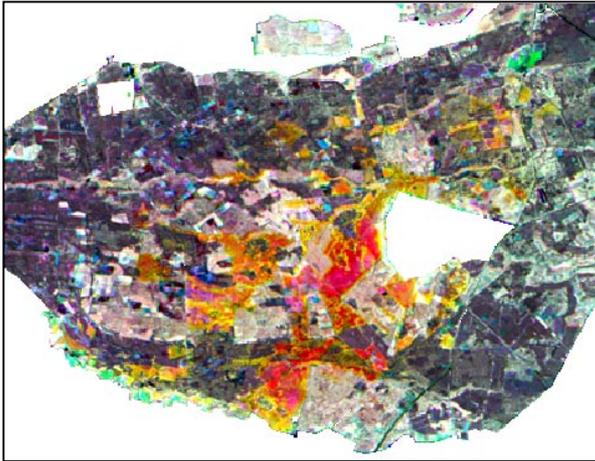


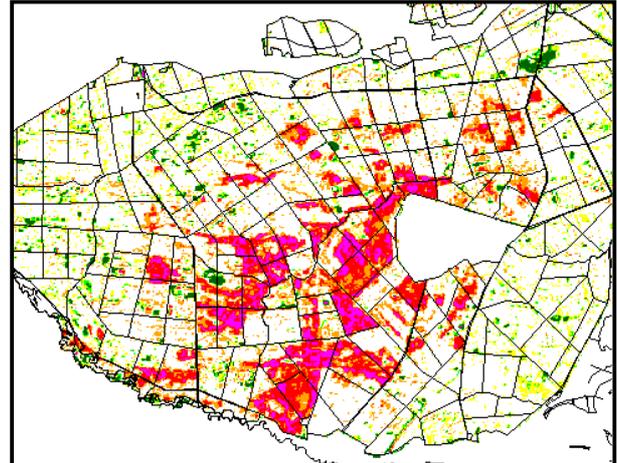
Abb. 54: Vegetationsveränderung innerhalb des Bienwaldes zwischen 1991 und 1994, ermittelt über die Differenz der Vegetationsschätzung zu den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten

Berücksichtigt man zusätzlich auch die Veränderung von Boden und Schatten während des Beobachtungszeitraumes 1991 - 1994, so lässt sich die Klassifizierung der Fraßflächen weiter verbessern. Dazu wurde die euklidische Distanz zwischen den drei Materialkomponenten (Vegetation, Boden, Schatten) ermittelt. Da hierbei keine positiven bzw. negativen Werte für Zu- bzw. Abnahme ermittelt werden, wurde dieser Methode ein Filter vorgeschaltet, der alle Bildelemente, auf denen sich der Anteil der Vegetationsfraktion erhöht hat (=Vegetationszuwachs), auf Null setzt. Das Ergebnis (Abb. 55) ist in Abbildung 56 der terrestrischen Fraßkartierung gegenübergestellt.



Farbkomposit der SMA-geschätzten Vegetationsabundanz aus Landsat-TM-Aufnahmen

RGB = Juni/91 - Juni/94 - Juli/94



Differenz der SMA-geschätzten Vegetationsproportion (6/1991-7/1994)

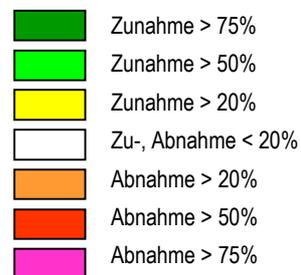


Abb. 55: Darstellung der Vegetationsendmember als Farbkomposite (oben) und prozentuale Abnahme der Vegetationsendmember von Juli 1994 gegenüber Juni 1991

Betrachtet man die unterschiedlichen Fraßstufen, die bei der terrestrischen Kartierung ausgewiesen wurden, getrennt voneinander (Abb. 56), so fällt auf, dass die niedrigste Fraßstufe, Fraß an beigemischten Eichen in Nadelholzbeständen, nur vereinzelt im Satellitenbild wiederzufinden ist. Hierfür ist vor allem der in diesem Fall teilweise sehr geringe Anteil kahlgefressener Bäume verantwortlich, der das Reflexionssignal nur geringfügig verändert (17 Prozent der licht- bzw. kahlgefressenen Flächen lagen in Beständen mit einem Eichenanteil von weniger als 10 Prozent). Die hohe Übereinstimmung in den flächenmäßig weitaus bedeutsameren Klassen Licht- und Kahlfraß verdeutlicht Abbildung 56. Auffällig ist, dass die Fraßflächen auf dem Satellitenbild, bzw. dessen Klassifizierung, deutlich inhomogener erscheinen, als im Gelände kartiert. Dies begründet sich durch die terrestrische Kartierungsmethode, die auf Bestandesebene und somit weniger differenziert als mittels Landsat TM (30x30 Meter Pixel) durchgeführt wurde. Um den Zeitaufwand zu minimieren, erfolgte die terrestrische Erhebung meist von den Forstwegen aus. Dabei kann im Fall weitgehend unbefressener Teilflächen leicht der nicht zutreffende Eindruck entstehen, dass der gesamte Bestand befallen wurde. Umgekehrt werden befallene Teilflächen innerhalb anscheinend unbeeinflusster Bestände leicht übersehen.

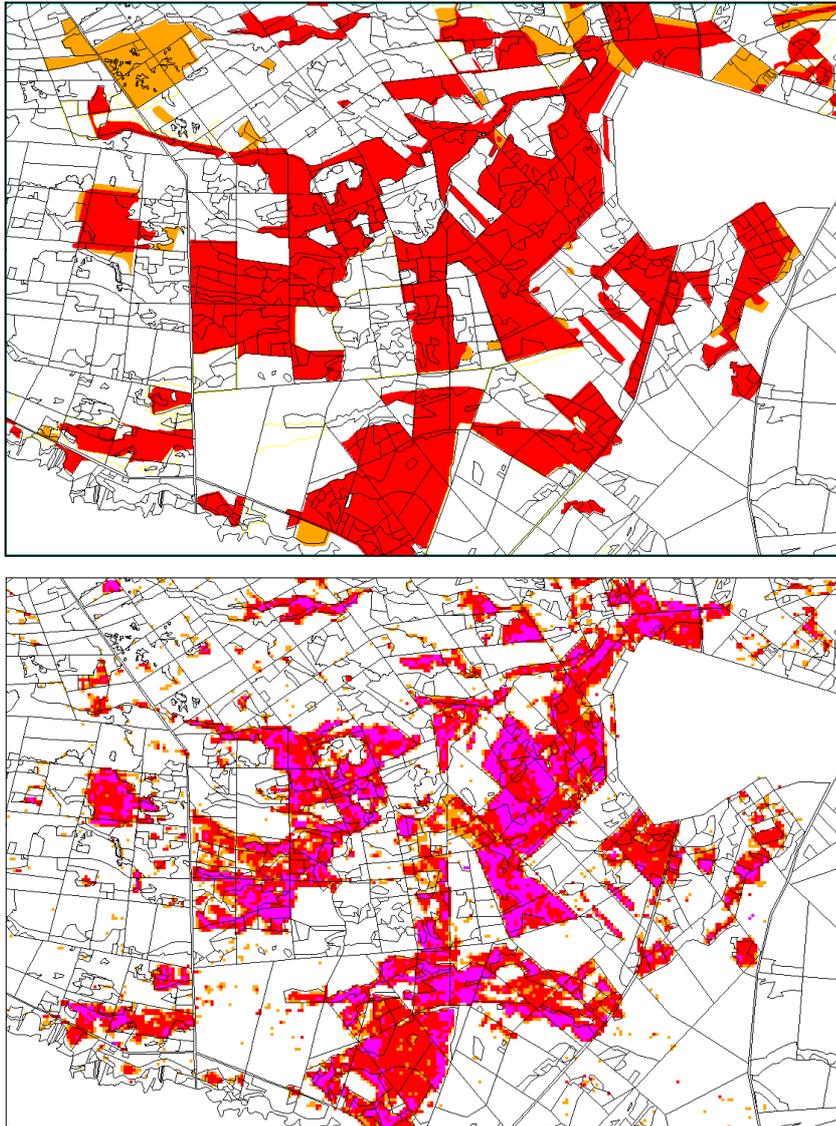


Abb. 56: Vergleich zwischen terrestrischer (oben) und satellitenbildgestützter Auswertung (unten). Auf 90,8 Prozent der mittels Landsat TM erfassten Fraßfläche wurde auch im Gelände Raupenfraß kartiert

Analyse der Folgeschäden

Nach dem bereits erläuterten Bilddifferenzverfahren konnten selbst die Folgeschäden mittels der TM-Daten kartiert werden, wobei eine TM-Szene aus dem Juli 1995 zur Verfügung stand. Zwar gelten für die Folgeschäden prinzipiell die selben Beeinträchtigungen des Reflexionsverhaltens wie für die Fraßflächen, die Unterschiede sind allerdings weniger deutlich ausgeprägt. Durch folgende Faktoren wird die Erfassung der Folgeschäden gegenüber der Erfassung der Fraßflächen zusätzlich erschwert:

1. Es handelt sich bei den Schadflächen um wesentlich kleinere Bereiche,
2. die Blattverluste sind teilweise wesentlich geringer und inhomogener,
3. infolge der fehlenden bzw. stark eingeschränkten Beschattung konnte sich eine üppige, teilweise meterhohe Bodenvegetation einstellen, welche das Reflexionsverhalten des geschädigten Bestandes erheblich beeinflusst.

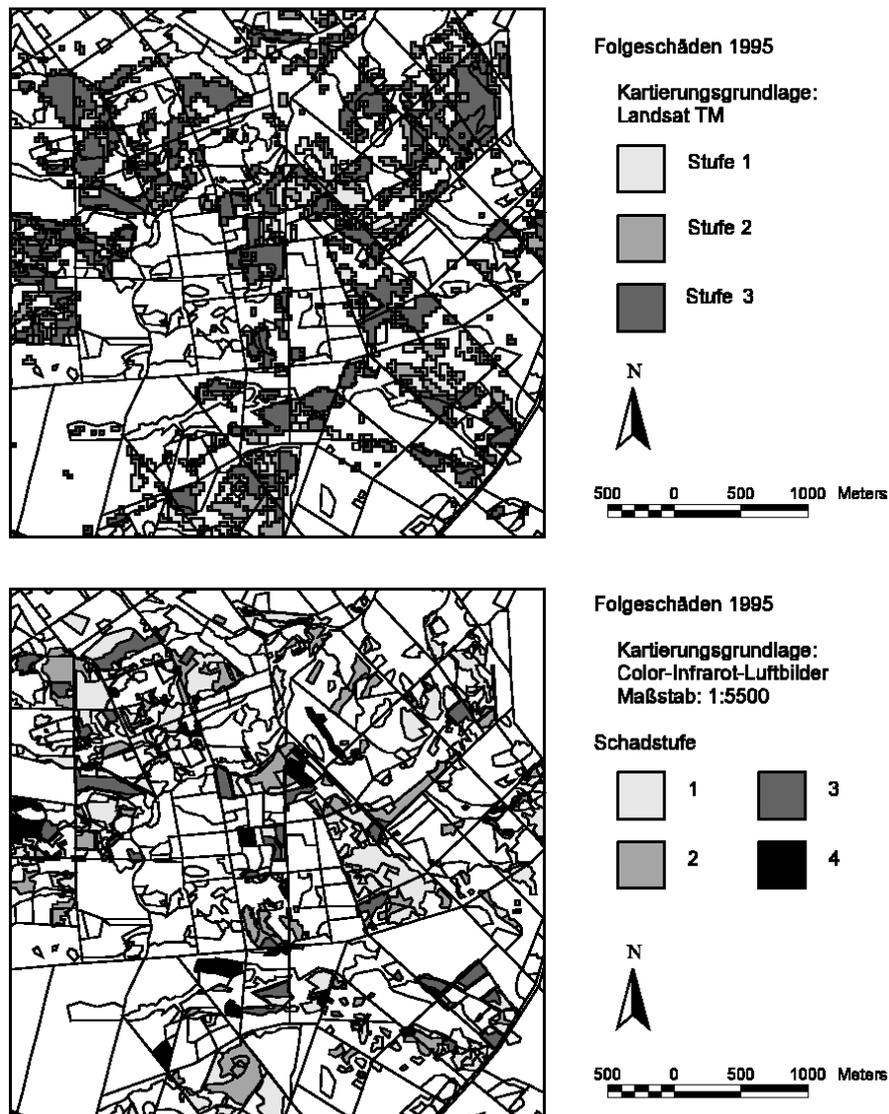


Abb. 57: Kerngebiet der Folgeschäden nach Schwammspinnerfraß im Bienwald. Vergleich von CIR-Luft- und Landsat-TM-Satellitenbilddauswertung

Um auch geringe Unterschiede im Reflexionsverhalten erfassen zu können, wurde die Differenz allerdings nicht über das Gesamtbild errechnet, sondern für einzelne Waldklassen separat untersucht, was durch die Verknüpfung mit dem Forst-Informationssystem möglich ist. So wurden in einzelnen, hintereinander geschalteten Arbeitsschritten die Folgeschäden innerhalb des Laub-Nadel-Mischwaldes und der Laubholzbestände untersucht, wobei letztere nochmals nach dem Alter unterteilt wurden (Jungbestände, Bestände mittleren Alters und Altbestände). Für jedes der Differenzbilder wurden zwei Schwellenwerte festgelegt, welche die Schäden in drei Klassen einteilen. Anschließend wurden diese vier Teilbilder wieder zusammengesetzt, so dass eine zusammenhängende Schadkartierung vorliegt.

Das Ergebnis dieser Kartierung ist für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes in Abbildung 57 dem Ergebnis einer Color-Infrarot-Luftbildkartierung (DELB 1999) gegenübergestellt. Zur Klärung von Differenzen in den Ergebnissen beider Kartierungen muss auf grundsätzliche Unterschiede beider Verfahren hingewiesen werden: Eine ausschließlich auf die Erfassung abgestorbener bzw. absterbender Bäume (Grenzwert 70% Blattverlust) ausgerichtete Schad- bzw. Mortalitätskartierung, wie bei der CIR-Luftbildkartierung durchgeführt, ist mit den TM-Daten nicht durchzuführen, da aufgrund der geometrischen

Auflösung von 30*30 Meter keine kleinflächig differenzierte- oder Einzelbaumansprache möglich ist. Dementsprechend kann das Schadausmaß nur auf eine größere Fläche extrapoliert erfasst werden. Hierbei werden unter Umständen auch Teilflächen, die sich aus Bäumen mit Blattverlusten von weniger als 70% zusammensetzen, als deutlich geschädigt eingestuft. Wenige abgestorbene Bäume (100% Blattverlust) beeinträchtigen das Reflexionsverhalten ähnlich wie eine Vielzahl von Bäumen, die durch Blattverluste von bspw. 50% gekennzeichnet sind.

Neben der visuellen Überprüfung lassen sich die Ergebnisse der beiden Verfahren auch statistisch vergleichen: Auf 86,5% der mittels Satellitenbildern kartierten Licht- und Kahlfraßfläche konnte dieser Befund durch die terrestrische Kartierung bestätigt werden. Auf einigen Flächen ergab die GIS-Analyse Zweifel an der Richtigkeit der terrestrischen Ansprache. So wurden 1995 in einigen Bereichen Folgeschäden kartiert, in denen 1993 und 1994 kein Raupenfraß ausgewiesen war. Lässt man diese Zweifelsflächen außer Acht, werden sogar 90,8% der aus dem Satellitenbild ermittelten Fraßfläche durch die terrestrische Ansprache bestätigt. Die Differenzfläche lässt sich durch Kartierfehler während der terrestrischen Erhebung erklären. Kleinere befallene Flächen sind inmitten nicht befallener Gebiete oft nicht aufgefallen, da der im Satellitenbild gegebene Überblick vom Boden aus nur mit sehr hohem Aufwand erreicht werden kann.

7.3 Die Nutzung von Reflexionsmodellen zur fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Größen

Wälder sind in einem erheblichen Maße am Energieaustausch an der Grenzfläche zwischen Erdboden und Atmosphäre beteiligt (OKE, 1995). Sie bestimmen damit u.a. die Aufteilung der einfallenden Sonnenenergie in sensible und latente Wärmeflüsse. Wälder greifen darüber hinaus in einem starken Maße in hydrologische Prozesse ein, indem sie Interzeption, Infiltration und Oberflächenabfluss modifizieren. Konsequenterweise beeinflussen Änderungen der Vegetationseigenschaften - und dies gilt im besonderen für die flächenbezogen bedeutsamen Forsten und Wälder - lokale und globale Klimate mit entsprechenden Rückkopplungseffekten auf die Vegetation.

Auf Grund ihrer Bedeutung sind Vegetationscharakteristika und ihre raumzeitlichen Verteilungsmuster kritische Inputgrößen in ökologische Modellansätze (BONAN, 1995; RUNNING et al., 1989). Diese beschreiben unter Zuhilfenahme physikalischer Gesetzmäßigkeiten, die Interaktion zwischen Landoberfläche, Klima, Energiebilanz sowie hydrologische und biochemische Kreisläufe. Die interessierenden biophysikalischen Größen können zwar im Prinzip direkt vom Erdboden aus erfasst werden. Sie können jedoch nicht ohne Schwierigkeiten auf größere Untersuchungsräume übertragen werden. Durch ihre großflächige und synoptische Arbeitsweise können hier Fernerkundungsdaten im Prinzip eine deutliche Arbeitserleichterung bringen. Dies setzt allerdings voraus, dass es gelingt, wichtige forstliche Bestandscharakteristika mit ausreichender Genauigkeit aus den aufgezeichneten Spektraldaten abzuleiten. Wichtige Parameter sind in diesem Zusammenhang u.a. der Überschirmungsgrad, die Bestandsdichte, die Belaubung/Benadelung sowie Blattpigmentierung und -turgescenz (PETERSEN, 1991).

In dem Ziel, Forstcharakteristika aus Fernerkundungsdaten abzuleiten, wurde in vielen Studien ein empirischer Ansatz gewählt. So wurden z.B. empirische Relationen zwischen dem aufgezeichneten Reflexionssignal und dem Blattflächenindex (JAKUBAUSKAS, 1996; DANSON & PLUMMER, 1995; CURRAN et al. 1992; SPANNER et al., 1990; BADHWAR et al., 1986), dem Kronenschlussgrad (MCDONALD et al., 1998; DANSON & CURRAN, 1993; BUTERA, 1986), der Bestockungsdichte (COHEN & SPIES, 1992; HORLER & AHERN, 1986), und der Blatt/Nadelzusammensetzung entwickelt (WESSMAN, 1994; PETERSON, 1988; DAWSON et al., 1999; CURRAN et al., 1991). Alles in allem sind die bislang vorliegenden empirischen Untersuchungen jedoch als wenig befriedigend zu bewerten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die spektrale bi-direktionelle Reflexion eines Forstbestandes von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist (GUYOT et al., 1989; PETERSON, 1991). Nur in besonders günstigen Fällen (homogene Altersklassenwälder) variiert nur eine Forstcharakteristik bei ansonsten gleichbleibenden „Randbedingungen“. Dementsprechend ist es nicht verwunderlich, dass keine universellen Relationen ermittelt werden konnten, die für alle Untersuchungsräume und phänologischen Phasen gleichermaßen gut geeignet wären. Im Gegenteil, empirische Relationen sind generell in einem hohen Maße orts- und sensorabhängig und ungeeignet für die Anwendung in größeren Untersuchungsräumen und/oder wechselnden Jahreszeiten.

In Erkenntnis der vorgetragenen Probleme bestehen seit den 70er Jahren Bestrebungen, physikalisch basierte Modelle zu entwickeln, die in der Lage sind, die spektrale bi-direktionelle Reflexion eines Forstbestandes als Funktion der wichtigsten Bestandsparameter zu simulieren. Nach erfolgter Modellbildung und -kalibration ist es dann möglich, das Modell mit Hilfe gemessener Reflexionsspektren zu invertieren, d.h. die gewünschten Parameter aus den Messwerten abzuleiten.

Als erster Schritt in der Umsetzung derartiger Konzepte wurde im Rahmen dieses Projektes ein geometrisch-optisches Modell eingesetzt, das prinzipiell dazu geeignet scheint, offene Vegetationsbestände (z.B. lichte Wälder, Baumkulturen, landwirtschaftliche Kulturen mit großen Anteilen unbedeckten Bodens) adäquat repräsentieren zu können (GOEL 1989, S.213).

7.3.1 Das „Forest Light Interaction Model“ als hybrides Reflexionsmodell. Eine wirklichkeitsnahe Beschreibung des Reflexionsverhaltens von Waldbeständen setzt die Beachtung sowohl von Schattenräumen als auch von Kronentransparenz (Einfluss durchscheinenden Bodens) voraus. Beide Aspekte werden durch sogenannte „hybride“ Modelle wie das von ROSEMA et al. (1992) entwickelte „Forest Light Interaction Model“ (FLIM) berücksichtigt. Dieses Modell fasst Waldbestände als horizontal stark strukturierte Vegetationsbestände mit einer unregelmäßigen Anordnung von schattenwerfenden Baumkronen und Bestandslücken auf. Baumkronen sind nicht opak, der unterlagernde Waldboden kann je nach Kronen-LAI (Leaf Area Index) unterschiedlich stark zur Bestandsreflexion beitragen. Multiple Effekte, die sich vor allem im nIR auswirken, bleiben unberücksichtigt; dementsprechend ist FLIM - entwickelt und erprobt am Beispiel ausgedehnter Kiefern-Altersklassenwälder (vgl. ROSEMA et al. 1992, S.24) - streng genommen nur für Nadelholzbestände gültig (ROSEMA et al. 1992, S.26).

Modellierung

Zur Bestandsreflexion können in der Modellvorstellung sowohl die Baumkronen als auch der Waldboden beitragen - und zwar in Quantitäten, die entscheidend von der jeweiligen Beleuchtungs- bzw. Beobachtungsgeometrie (Sonnenstand, Sensorblickwinkel) bestimmt werden. Der Beobachtungswinkel bestimmt die Einsehbarkeit des Bestands, der jeweils beobachtbare Kronenschlussgrad (c_0)¹ ergibt sich demnach aus:

$$c_0 = 1 - \exp(-kD \cdot \sec \theta_0) \quad (7.3.1)$$

mit D = Baumdichte (Anzahl der Bäume pro Hektar) [$1 / L^2$] mit L = Längeneinheit

k = durchschnittliche horizontale Kronenfläche [L^2]

θ_0 = Sensorzenitwinkel

Vom Sonnenstand hängen die Flächenanteile ab, die durch die Baumkronen beschattet werden (c_s):

$$c_s = 1 - \exp(-kD \cdot \sec \theta_s) \quad (7.3.2)$$

$$= 1 - (1 - c_0) ** (\sec \theta_s / \sec \theta_0) \quad (7.3.3)$$

mit θ_s = Sonnenzenitwinkel

Je nach Sonnenstand, Beobachtungs- und Kronengeometrie korrelieren c_0 und c_s unterschiedlich hoch; der entsprechende Korrelationskoeffizient r errechnet sich nach:

$$r = \exp[-(\tan^2 \theta_0 + \tan^2 \theta_s - 2 \tan \theta_0 \cdot \tan \theta_s \cdot \cos \psi)^{0.5} \cdot h / d] \quad (7.3.4)$$

¹ Bei angenommener Nadirsicht des Satelliten ($\theta_0 = 0^\circ$) entspricht c_0 dem „tatsächlichen“ Kronenschlussgrad (= Anteil der Kronenprojektionsfläche an der gesamten Bestandsfläche).

mit ψ = Differenz zwischen Beobachtungs- und Sonnenazimut
 h = Kronenhöhe über Grund [L]
 d = Kronendurchmesser [L]

Aus der räumlichen Verteilung von besonnten und beschatteten Arealen einerseits, überschirmten und offenen Arealen andererseits ergeben sich vier grundsätzlich zu unterscheidende Bodenfraktionen, deren Anteile mit Hilfe von c_o , c_s und r wie folgt berechnet werden können:

$$F_{cd} = \text{überschirmte und beschattete Areale} = c_o c_s + r [c_o(1 - c_o) c_s(1 - c_s)]^{0,5} \quad (7.3.5)$$

$$F_{cs} = \text{überschirmte und besonnte Areale} = c_o(1 - c_s) - r [c_o(1 - c_o) c_s(1 - c_s)]^{0,5} \quad (7.3.6)$$

$$F_{od} = \text{offene und beschattete Areale} = (1 - c_o) c_s - r [c_o(1 - c_o) c_s(1 - c_s)]^{0,5} \quad (7.3.7)$$

$$F_{os} = \text{offene und besonnte Areale} = (1 - c_o)(1 - c_s) + r [c_o(1 - c_o) c_s(1 - c_s)]^{0,5} \quad (7.3.8)$$

Durch die Kronen findet eine Abschwächung der Strahlung statt, die in ihrem Betrag von der Nadelfläche pro Krone (LAI) und der Weglänge der Strahlung abhängt. Zwei Transmissionssterme müssen unterschieden werden:

$$T_o = \exp(-\alpha \cdot \text{LAI} \cdot \sec \theta_o) \quad (7.3.9)$$

$$T_s = \exp(-\alpha \cdot \text{LAI} \cdot \sec \theta_s) \quad (7.3.10)$$

$$= T_o \cdot \left(\frac{\sec \theta_s}{\sec \theta_o}\right) \quad (7.3.11)$$

mit α = Extinktionskoeffizient² für ein- bzw. ausfallende Strahlung

Ein nach 7.3.9 bzw. 7.3.10 berechneter LAI stellt also einen auf einzelne Baumkronen und nicht auf den Gesamtbestand bezogene Durchschnittsgröße dar.

Unter Berücksichtigung der Transmissionsterme und der unterschiedlichen Bodenfraktionen ergibt sich ein „ground factor“ G (7.3.12), dessen Produkt mit R_g , der spektralen Reflexion des unterlagernden Bodens, den Gesamtbeitrag des Untergrundes zur Bestandsreflexion beschreibt.

$$G = F_{cd} \cdot T_s \cdot T_o + F_{cs} \cdot T_o + F_{od} \cdot T_s + F_{os} \quad (7.3.12)$$

Analog zu G läßt sich ein „crown factor“ C definieren, der bestimmt, in welchem Ausmaß die Baumkronen zur Gesamreflexion beitragen können:

$$C = (1 - T_s - T_o) \cdot c_s \cdot c_o \quad (7.3.13)$$

Die Bestandsreflexion (R) berechnet sich entsprechend nach:

$$R = R_c \cdot C + R_g \cdot G \quad (7.3.14)$$

² Für den Extinktionskoeffizienten α wird vereinfachend ein pauschaler Wert von 0,5 angenommen. Dieser Wert entspricht einer Zufallsorientierung der Nadeln und ist durch verschiedene Messkampagnen als realistischer Wert für Nadelholzbestände abgesichert (vgl. RUITER et al.). Eine Wellenlängenabhängigkeit von α und damit T wird nicht berücksichtigt.

mit R_c = infinite Kronenreflexion ($\rho_{\infty(\lambda)}$) (= Reflexion von Beständen mit vollständig geschlossener Krone)
 R_g = spektrale Reflexion des Untergrundes

(ROSEMA et al. 1992, S.26)

Modellinversion

In Gleichung 7.3.14 wird die Bestandsreflexion durch zwei Unbekannte (C und G) beschrieben. R_c und R_g können aus dem Satellitenbild entnommen werden (s.u.). Zur Berechnung der Unbekannten müssen daher mindestens zwei Reflexionsmessungen vorliegen. Benutzt werden dazu die Reflexionswerte im TM4 und TM5, die eine in Bezug auf Vegetation hohe Dynamik aufweisen und als unabhängig von den jeweiligen Chlorophyllgehalten angesehen werden können. Reflexionswerte des nIR und mIR (R^4 und R^5) können in Gleichung 7.3.14 eingesetzt werden, so dass sich als Gleichungssystem ergibt:

$$R^4 = R_c^4 \cdot C + R_g^4 \cdot G \quad (7.3.15)$$

$$R^5 = R_c^5 \cdot C + R_g^5 \cdot G \quad (7.3.16)$$

Durch Auflösung nach C und G erhält man:

$$C = (R_g^5 \cdot R^4 - R_g^4 \cdot R^5) / (R_g^5 \cdot R_c^4 - R_g^4 \cdot R_c^5) \quad (7.3.17)$$

$$G = -(R_c^5 \cdot R^4 - R_c^4 \cdot R^5) / (R_g^5 \cdot R_c^4 - R_g^4 \cdot R_c^5) \quad (7.3.18)$$

Mit C und G lassen sich iterativ aus 7.3.12 und 7.3.13 - unter Einbeziehung von 7.3.3, 7.3.5-7.3.8 und 7.3.11 - die Bestandsparameter c_o (Kronenschlussgrad) und T_o (Kronentransparenz) berechnen; aus T_o ergibt sich nach 7.9 der Leaf Area Index.

Vergilbung äußert sich in einem Anstieg der Reflexion im Rotbereich. Aus dem Reflexionswert im TM3 (R^3), der ebenso wie R^4 und R^5 schatten- und hintergrundbeeinflusst ist, lässt sich mit Hilfe von R_g^3 und den berechneten Werten für C und G R_c^3 als Vergilbungsparameter ableiten³ (ROSEMA et al. 1992, S.27-28).

Für die Modellinversion werden die folgenden Größen als bekannt vorausgesetzt:

- Beobachtungs- und Beleuchtungskonfiguration (θ_o (= 0° /Nadirsicht des Satelliten), θ_s , ψ)
- Kronenhöhe über Grund (h) und Kronendurchmesser (d) (bzw. das Verhältnis beider Größen zueinander: h/d)
- Extinktionskoeffizient α (s.o.)
- R_g (TM3, TM4, TM5)
- R_c (TM4, TM5)

Für das Verhältnis h/d setzen RUITER et al. einen im Gelände ermittelten pauschalen Wert von 4 ein, wobei sie betonen, dass sich die invertierten Bestandsparameter relativ robust gegenüber abweichenden h/d - Werten (z.B. 3 oder 5) verhalten. Das Einsetzen von höheren h/d-Werten führt zu nur geringfügig erniedrigten Kronentransmissionen (RUITER et al.).

In der vorliegenden Untersuchung wird das Verhältnis h/d im Gelände altersklassenweise geschätzt; als Modell-, „Input“ werden die folgenden Werte verwandt:

Tabelle 3 Altersspezifische h/d-Werte

Alter	h/d
> 10 - 20 Jahre	3,5
> 20 - 40 Jahre	4,5
> 40 - 60 Jahre	5,5
> 60-100 Jahre	6
> 100 Jahre	7

R_c kann näherungsweise über die Reflexion eines sehr dichten Referenzbestandes bestimmt werden; für R_g wird vorgeschlagen, die Reflexionswerte von Kahlschlagsflächen als (konstanten) „Input“ zu übernehmen (ROSEMA et al. 1992, S.27-28).

Der zur Modellinversion benutzte Wert für R_g repräsentiert somit ganz bestimmte, kahlschlagstypische Verhältnisse; bei stärkeren Abweichungen (z.B. streubedeckten Waldböden ohne Krautschicht) kann es entsprechend zu Fehleinschätzungen der Bestandsparameter kommen („the model is not able to quantify forest parameters in forests with a highly variable ground cover“ (RUITER et al.)). Daher ist es unbedingt erforderlich, für extrahierte R_g - bzw. R_c -Werte zu prüfen, ob sich mit ihnen plausible Parameterwerte für die (im Idealfall) gesamte Stichprobe errechnen lassen.

Als praktikable Methode zur Ableitung von R_c und R_g - unter Berücksichtigung der Statistik der Gesamtstichprobe - schlagen ROSEMA et al. (1992) folgende Vorgehensweise vor:

1. alle Bestands- und Blößenpixel werden in einem Scattergramm TM4 gegen TM5 aufgetragen
2. es wird ein Dreieck gebildet, durch dessen Seiten und Grundlinie die Punktwolke eingeschlossen wird; die Seiten des Dreiecks schneiden sich im Nullpunkt
3. die Schnittpunkte der Grundlinie mit den Seiten repräsentieren die Punkte ‘Kahlschlag’ (R_g) bzw. ‘dichter Bestand’ (R_c) (mit $R_c^4 > R_g^4$ bzw. $R_c^5 < R_g^5$; vgl. Abb. 58)

Die Extraktion von R_c und R_g ermöglicht es, Spektren zu simulieren, die bestimmten Parameterkombinationen entsprechen. Aufgrund der jeweils simulierten Verortung im TM4/TM5-Merkmalraum ergibt sich eine typische Nomogramm-Form, wobei das Nomogramm an den R_g - bzw. R_c - Punkten „aufgehängt“ ist.

Die dargestellten Linien des Nomogramms repräsentieren unterschiedlich hohe LAI-Werte, die einzelnen Abschnitte der LAI-Linien unterschiedliche Kronenschlussgrade („clearcut“: $c_0 = 0$, „infinite crown“: $c_0 = 1$). Das „Ausschwingen“ der Linien in Richtung Ursprung ergibt sich aus den jeweils wirksamen Schattenanteilen; dabei wirken sich die Beschattungseffekte besonders bei mittleren Kronenschlussgraden (und damit hohen Kronendachrauigkeiten; vgl. Kap. 5.2) aus, für die die jeweils niedrigsten Reflexionswerte simuliert werden.

Aus der Nomogrammform wird ersichtlich, dass - wie auch in anderen Untersuchungen von Nadelholzbeständen festgestellt wurde (vgl. PETERSON & RUNNING 1989) - eine positive lineare Beziehung zwischen LAI und nIR-Reflexion nur bei hohen Kronenschlussgraden be-

³ Kritisch anzumerken ist, dass zur Berechnung von c_0 , LAI, R_c ³ lediglich TM3-TM5 verwandt werden, die spektrale „Bandbreite“ des TM durch FLIM also nicht ausgenutzt werden kann.

steht. Bei Kronenschlussgraden $< 0,9$ wird die Beziehung LAI-nIR durch Hintergrund- und vor allem Schatteneinfluss „flat and quite variable“ (PETERSON & RUNNING 1989, S.438). Für das Untersuchungsgebiet lässt sich das von ROSEMA et al. vorgeschlagene Verfahren realisieren, indem über GIS-Selektionen alle Fichtenreinbestände (>10 Jahre) und Blößen - zunächst in der '90er-Szene - selektiert und die Gesamtheit ihrer Pixel als zweidimensionale Histogramme (TM4 gegen TM5 und TM4 gegen TM3) ausgegeben werden. Aus diesen Scattergrammen können als Werte (absolute Reflexion in %) für R_g und R_c abgeleitet werden:

Tabelle 4 Extrahierte R_g - und R_c - Werte

	TM3	TM4	TM5
R_g	7,8	23,4	22,8
R_c	2,0	38,9	10,0

Diese Werte können getestet werden, indem ein entsprechendes Nomogramm errechnet und die bestandsweise gemittelten Reflexionswerte (der Fichtenreinbestände) aufgetragen werden. Dabei wird deutlich, dass keine der projizierten Bestandsreflexionen jenseits der R_g - R_c -Linie (und damit in einem Bereich, für den keine Bestandsparameter ermittelt werden können) liegt; andererseits ist jedoch für eine relativ große Zahl von Beständen diesseits des durch das Nomogramm definierten Bereichs keine Parameterschätzung bzw. nur eine Invertierung von unplausiblen Parameterwerten (extrem hohen LAI-Werten) möglich. Eine Kontrolle zeigt, dass es sich bei den außerhalb des Nomogramms liegenden Beständen vor allem um Fichtenalt- bzw. -baumhölzer (>50 Jahre) handelt.

Eine an Fichtenreinbeständen verschiedener absoluter Altersklassen durchgeführte Signaturanalyse verdeutlicht die altersabhängige Veränderung der Reflexionswerte im nIR und mIR (vgl. Abb. 58).

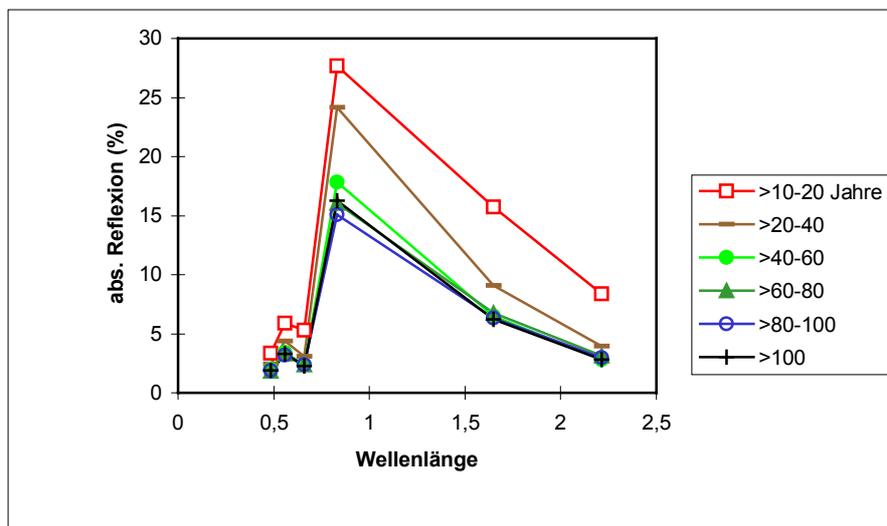


Abb. 58: Reflexionsverhalten von Fichtenreinbeständen verschiedener absoluter Altersklassen

Diese Reflexionsabnahme mit zunehmendem Alter erklärt sich nicht nur durch veränderte Kronendachrauigkeiten, sondern auch durch baualterspezifische physiologische und morphologische Merkmale (der Blattorgane). Somit ergibt sich die Notwendigkeit, altersangepasste infinite Reflexionswerte R_c zu extrahieren.

Die Signaturanalyse zeigt starke Reflexionsunterschiede zwischen Beständen <40 Jahre und älteren Fichtenreinbeständen auf. Daher werden versuchsweise R_c -Werte für diese beiden breit gefassten Altersklassen ermittelt, die entsprechenden Nomogramme berechnet und in sie die jeweiligen Bestandsreflexionen projiziert. Eine nachträgliche Optimierung der Schätzwerte für R_g und R_c kann über eine Modifizierung der Nomogrammform erfolgen, durch die sichergestellt wird, dass möglichst viele Datenpunkte innerhalb des nomogrammdefinierten Ausschnitts des Merkmalsraumes liegen (RUITER et al.). Die optimierten Werte für R_g und R_c sind in Tabelle 5 wiedergegeben.

Tabelle 5 Infinite Boden- und Kronenreflexion (%) (1990)

		R_g			R_c		
		TM3	TM4	TM5	TM3	TM4	TM5
Fichtenreinbestände	<40 Jahre	7	28	20	2	38	8
Fichtenreinbestände	≥40 Jahre	7	28	20	2	20	5

Die mit diesen Werten simulierten Nomogramme sind in Abbildung 59 und 60 dargestellt. Die projizierten Bestandsreflexionen der entsprechenden Altersklassen liegen jeweils innerhalb der berechneten Nomogramme, für sie lassen sich plausible Parameterwerte invertieren.

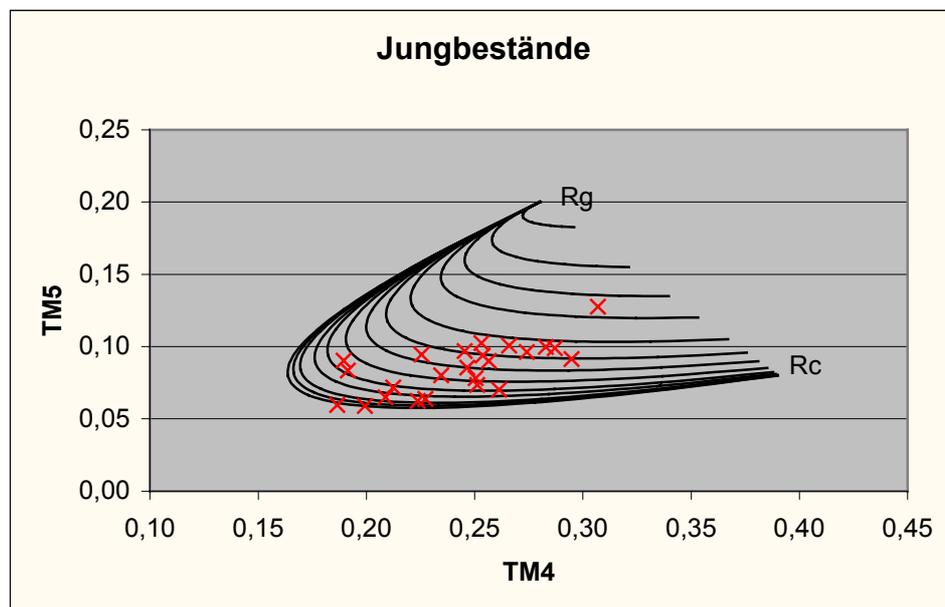


Abb. 59: Simuliertes Nomogramm 1990 für Bestände < 40 Jahre

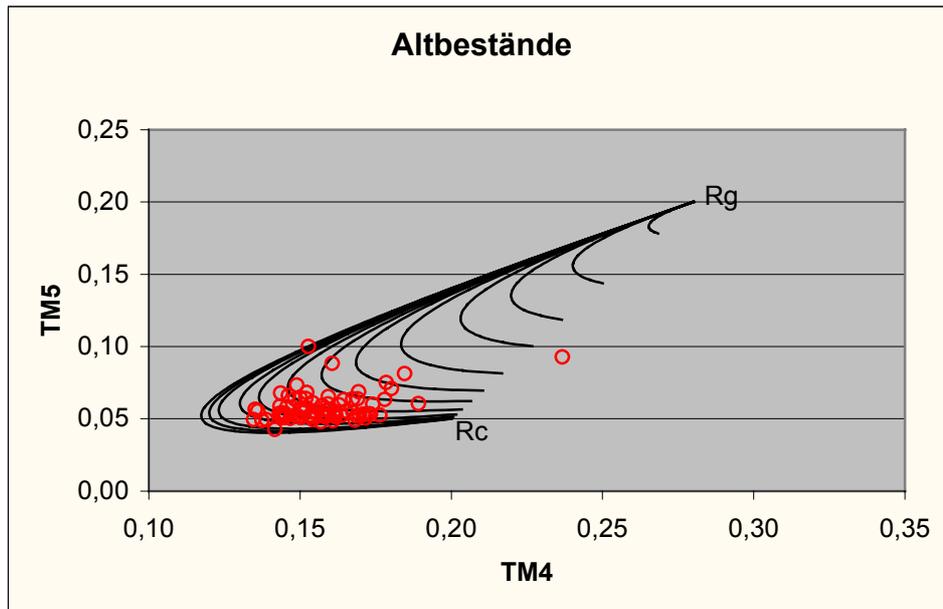


Abb. 60: Simuliertes Nomogramm 1990 für Bestände ≥ 40 Jahre

Zur Optimierung des Modell-„Inputs“ erscheint es denkbar, jeweils R_c -Werte für Altersklassen mit geringeren Klassenbreiten zu extrahieren. Die in die Untersuchung einbezogene Gesamtstichprobe ist jedoch nicht ausreichend groß genug, um z.B. für 20-Jahres-Altersklassen abgesicherte infinite Reflexionswerte zu ermitteln. Die gewählte Aufteilung der Gesamtstichprobe in zwei Teilstichproben stellt einen Kompromiss dar, der sich einerseits aus der notwendigen altersklassenangepassten „Nachführung“ der R_c -Werte und andererseits aus der gegebenen Begrenztheit des Stichprobenumfangs ergibt. Eine eventuelle Übertragbarkeit der für die '90er-Szene ermittelten R_c - und R_g -Werte kann getestet werden, indem die entsprechenden aus der '95er-Szene extrahierten und gemittelten Bestandsreflexionen in die für 1990 berechneten Nomogramme projiziert werden. Die visuelle Kontrolle lässt den Schluss zu, dass die in Tabelle 5 wiedergegebenen Werte auch für 1995 Gültigkeit besitzen, wodurch ein direkter Vergleich der für beide Jahre geschätzten Bestandsparameter vereinfacht wird.

Ergebnisse der Reflexionsmodellierung

In einem ersten Modellierungsdurchgang werden zunächst alle Fichtenreinbestände selektiert; aus der Gesamtheit der jeweiligen Bestandspixel⁴ können durch Mittelwertbildung die jeweiligen Bestandsreflexionswerte für TM3, TM4 und TM5 (sowohl für 1990 als auch 1995) berechnet werden, die als R^3 , R^4 und R^5 in die Modellierung eingehen. Die Streuung der Einzelpixel um den Bestandsmittelwert wird bei dieser Vorgehensweise nicht berücksichtigt.

Als „Output“ liefert FLIM bestandsweise LAI- (pro Krone), c_o - und R_c^3 -Werte, aus dem Produkt von $c_o \cdot LAI$ ergibt sich ein Maß für den Gesamt-LAI des Bestands. Durch den (kumulativen) Blattflächenindex (LAI) wird die Assimilationsfläche in m^2 (einseitiger) Blattfläche pro $1 m^2$ Bodenfläche angegeben. Einfallende Strahlung hat auf ihrem Weg durch

⁴ Benutzt werden dazu nicht die durch die Grenzen der Waldeinteilung definierten Polygone, sondern die durch „buffering“ erzeugten Bestandspolygone, die eine geringere Anzahl von Mischpixeln enthalten.

die Pflanzendecke die hintereinander liegenden Blattschichten zu durchdringen und wird dabei in ihrer Intensität abgeschwächt (vgl. Lambert-Beersches-Extinktionsgesetz; LARCHER 1984, S.33)⁵. Somit kann der LAI - in Abhängigkeit vom Strahlungsangebot - nur ein bestimmtes Maximum erreichen, da sonst die unteren beschatteten Blätter keine positive Stoffbilanz aufweisen würden.

Das Maximum des LAI hängt jedoch nicht nur von der Tageslichtintensität ab, sondern wird wesentlich von den Standortbedingungen (Wasser-, Nährstoffversorgung) bestimmt. Die breite standortsbedingte Spanne des LAI (LARCHER (1984, S.194) gibt z.B. für immergrüne temperate Wälder LAI-Werte von 5-14 an; s.u.) wird wiederum überlagert durch Bestandsalter, Bestandsbehandlung und externe Einflüsse wie Schneebruch, Windwurf oder schadbedingten Nadelverlust (LARCHER 1984, S.32-33, 184-185; ELLENBERG 1995, S.95; WALTER 1990, S.230). Entsprechend schwanken die in einzelnen Untersuchungen ermittelten LAI-Werte für verschiedene Waldtypen relativ stark: LARCHER (1984, S.194) zitiert Untersuchungen mit LAI-Angaben von 5-14 (15) (häufigster Wert: 12) für Nadelwälder sowohl der nemoralen als auch der borealen Zone, REICHLER (1991, S.31) nennt einen LAI von 7,6 als typischen Wert für boreale Nadelwälder, KAZIMIROV & MOROZOVA (1973, nach SCHULTZ 1995, S.176-177) geben für russische Fichtenwälder LAI-Werte von 2,4-3,8 an. Festzuhalten bleibt, dass immergrüne Nadelhölzer mit mehreren gleichzeitig vorhandenen Nadeljahrgängen eine hohe Gesamtoberfläche aufweisen; für sie werden entsprechend höhere LAI-Werte angegeben als für Laubhölzer.

Anzumerken ist, dass sich die angeführten Untersuchungsergebnisse auf den LAI des Gesamtbestandes beziehen, der durch FLIM modellierte Wert aber als LAI pro Baumkrone definiert ist.

Der Kronenschlussgrad (Überschirmungsgrad) wird wesentlich vom Bestandsalter (z.B. einsetzende Auflichtung des Kronendachs bei Althölzern) bzw. von den jeweiligen Maßnahmen der Bestandsbehandlung beeinflusst. Er kann terrestrisch oder auch (stereoskopisch) aus Luftbildern abgeschätzt werden und dient zum Beispiel als Parameter zur Vorratsschätzung oder zur Beurteilung der Durchforstungsnotwendigkeit (HUSS 1984, S.279). In Anbetracht der im Untersuchungsgebiet gängigen Durchforstungsmaßnahmen können für die Altersspezifität von c_0 und LAI von Fichtenbeständen folgende Tendenzen herausgestellt werden: 20-30 Jahre nach Bestandsbegründung werden in der Regel Kronenschlussgrade von annähernd 1,0 erreicht. Danach (Bestandsalter 30-50 Jahre) führen starke Durchforstungsmaßnahmen (verbunden zum Beispiel mit dem Anlegen von Rückegassen) zu einer Abnahme des Überschirmungsgrades, geringe Kronenschlussgrade sind entsprechend bei einem Bestandsalter von etwa 45-50 Jahren zu erwarten. Nach 60-70 Jahren ist mit einem erneuten Anstieg der Überschirmungsgrade zu rechnen, bis - nach Erreichen der Umtriebszeit (>100 Jahre) - Holzentnahmen eine zunehmende Bestandslückigkeit hervorrufen können.

Der LAI pro Einzelkrone ist negativ mit dem jeweiligen Kronenschlussgrad korreliert. Eine Holzentnahme im Rahmen von Durchforstungsmaßnahmen führt zu einer Vitalitätssteigerung der verbleibenden Bäume (ein maximaler Wert ist demnach bei einem Bestandsalter von ca. 50 Jahren zu erwarten), Pflegerückstände wirken dagegen in Richtung LAI-Abnahme.

⁵ Bis zum Erreichen eines bestimmten Grenzwertes bewirkt eine LAI-Zunahme somit auch eine Erhöhung des absorbierten Strahlungsanteils. Es besteht also eine - wenn auch nicht sehr enge - Beziehung zwischen LAI und Netto-Primärproduktion (PP_N) des jeweiligen Waldtyps (in erster Linie wird die PP_N durch das beleuchtungszonenspezifische „solare Wachstumspotential“ bestimmt) (SCHULTZ 1995, S.67; ELLENBERG 1995, S.95).

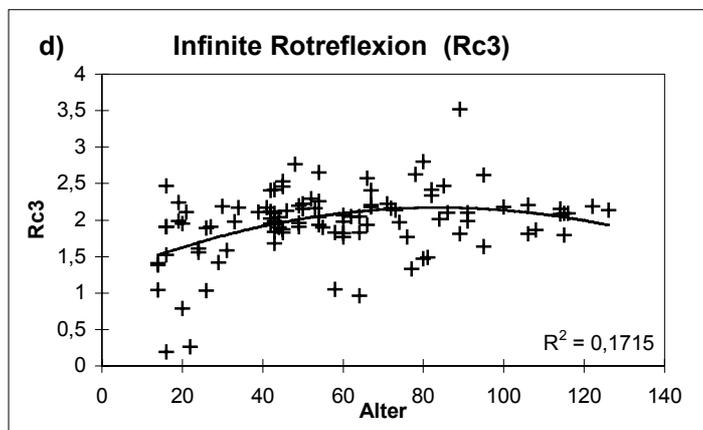
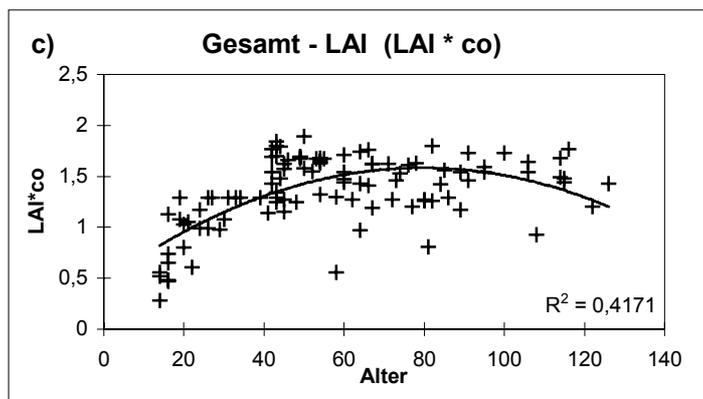
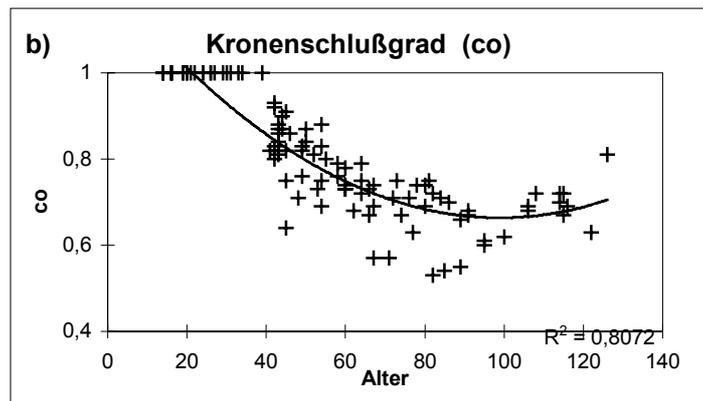
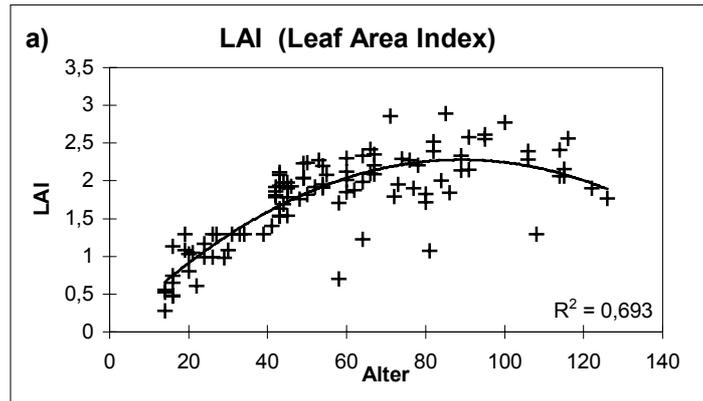


Abb. 61: Modellierte Bestandparameter für Fichtenreinbestände 1990 (invertierte Reflexionswerte: Bestandsmittelwerte)

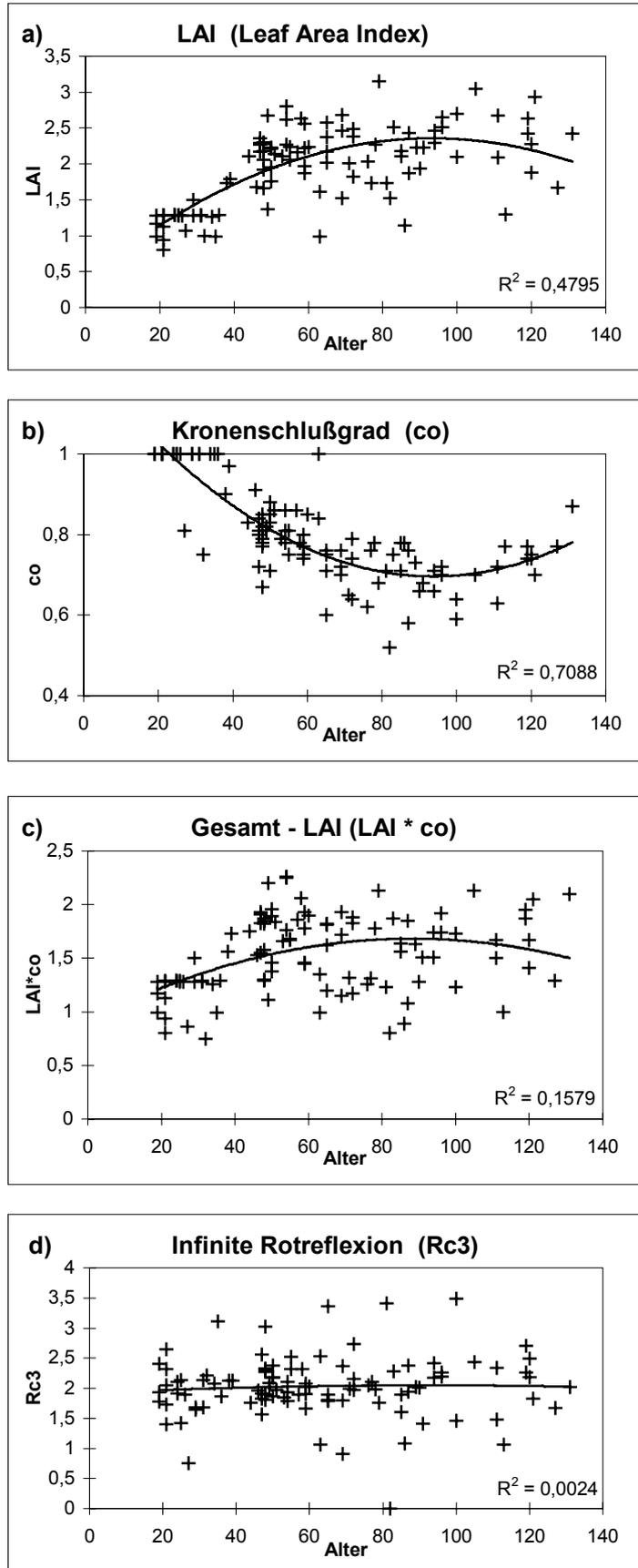


Abb. 62: Modellierte Bestandparameter für Fichtenreinbestände 1995 (invertierte Reflexionswerte: Bestandsmittelwerte)

Schneebruch oder Windwurf können als weitere Faktoren sowohl den Kronenschluss als auch den LAI beeinflussen. Zu beachten ist jedoch, dass eine Revitalisierung - bei einer Freistellung der Krone - nur bis zu einem bestimmten Alter (Richtwert: Hälfte der Umtriebszeit, also 50-60 Jahre) möglich erscheint⁶. Je nach Durchforstungsstand ist somit vor allem für die Altersspanne zwischen 30 und 70 Jahren mit einer starken Streuung sowohl der c_0 - als auch der LAI-Werte zu rechnen (pers. Mitt. WAGNER, WOMELSDORF 1996).

Die modellierten Bestandsparameter LAI, c_0 , $LAI \cdot c_0$ und R_c^3 sind für 1990 und 1995 in den Abbildungen 61 a-d und 62 a-d aufgetragen (zur Berechnung der Trendlinie und des Bestimmtheitsmaßes R^2 werden die beiden Ausreißer von 1995 für beide Jahre nicht berücksichtigt). In die '90er-Modellierung werden alle Fichtenreinbestände mit einem mittleren Bestandsalter >10 Jahre einbezogen; die identische Stichprobe geht in die '95er-Modellierung ein.

ROSEMA et al. (1992) konnten für Kiefernbestände verschiedener Altersklassen LAI-Werte von 0,6 - 2,5 invertieren. Für junge Bestände (< 30 Jahre) wurden höhere LAI-Werte ermittelt als für Bestände > 30 Jahre. Die für die Fichtenbestände des Hunsrücks durchgeführte Modellierung - mit altersangepassten h/d- und R_c -Werten - ergibt LAI-Werte zwischen 0,28 und 2,89 (1990) bzw. 0,75 und 3,15 (1995). Die höheren Werte für Fichte lassen sich durch die größere Zahl der vorhandenen Nadeljahrgänge (6-8 im Vergleich zu 3-4 bei Kiefer) erklären; die modellierten Werte erscheinen jedoch insgesamt - unter Berücksichtigung der Literaturangaben (s.o.) - zu niedrig.

Für junge Bestände werden in beiden Jahren plausiblerweise niedrige LAI-Werte ermittelt; mit zunehmendem Alter zeigt die Trendlinie eine auch zu erwartende Zunahme des LAI an. Ab einem Bestandsalter von ca. 40-50 Jahren nimmt die Streuung der Werte stark zu. Der Scheitelpunkt der Kurve, die insbesondere für 1990 einen hohen Varianzerklärungsanteil der Variable Bestandsalter nachweist, liegt bei ca. 80-90 Jahren und scheint damit zu stark in Richtung Altholz verschoben zu sein. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass - aufgrund des begrenzten Stichprobenumfangs für alle Bestände ≥ 40 Jahre die Modellierung mit identischen R_c -Werten als Eingangsgröße erfolgt. Eine Absenkung der infiniten Kronenreflexionen bei älteren Beständen (>60 Jahre), d.h. eine konsequente altersangepasste „Nachführung“ des Modellinputs, würde bei den gegebenen Reflexionswerten eine Erhöhung der modellierten Kronenschlussgrade und eine Verringerung der LAI-Werte bewirken - als Konsequenz würde sich der Scheitelpunkt der Kurve in Richtung Baumholz verschieben.

Die modellierten Kronenschlussgrade liegen in einem Bereich von 0,53 - 1,0 (1990) bzw. 0,52-1,0 (1995); der Mehrzahl der Bestände werden Überschirmungsgrade von 0,7-0,9 zugeordnet. Auch für die Kronenschlussgrade wird die erwartete Altersentwicklung durch die Trendlinie insgesamt gut nachgezeichnet (hohe Kronenschlussgrade bei jungen Beständen, Abnahme von c_0 und Zunahme der Streuung ab einem Bestandsalter von 40 Jahren). Eine altersangepasste Veränderung der R_c -Werte würde eine plausible Verschiebung des Kurvenminimums bewirken (s.o.). Kritisch sind jedoch die für die Bestände < 40 Jahren modellierten Kronenschlussgrade von konstant 1,0 zu bewerten, die nicht den tatsächlichen Bestockungsverhältnissen entsprechen. Die modellierten R_c^3 -Werte weisen für 1990 (als Jahr mit starken Vergilbungserscheinungen) einen Trend zu höheren Werten mit zunehmendem Alter auf, der für 1995 (Rückgang der Vergilbung) nicht festzustellen ist. Insgesamt ist jedoch

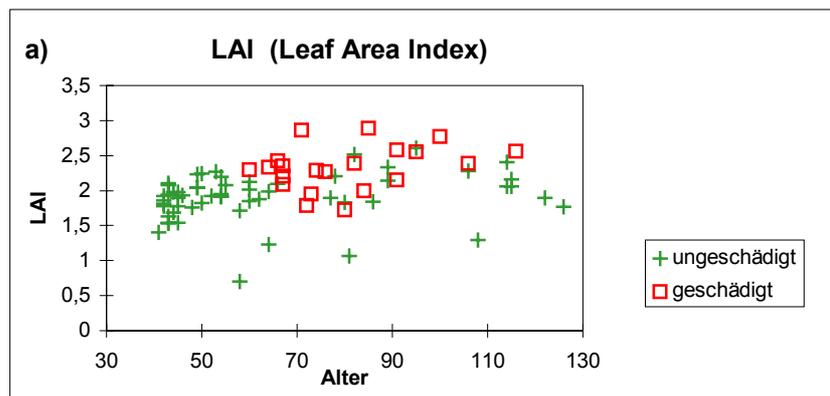
⁶ In den letzten Jahren zeigen jedoch auch ältere Bestände die Fähigkeit zur Revitalisierung; außerdem ist eine allgemeine Zunahme der LAI-Werte festzustellen. Als Ursache dieser Entwicklung wird vor allem die düngende Wirkung erhöhter Stickstoff-Einträge diskutiert.

auch in 1990 der Alterstrend nur sehr schwach ausgeprägt, die Streuung der modellierten R_c^3 -Werte ist enorm.

Für die einzelnen Modell-Parameter wird im folgenden überprüft, inwiefern sie als eventuelle Schadindikatoren geeignet sind. Als Referenzdaten gehen die Ergebnisse der CIR-gestützten Bestandesschadkartierung von 1990 (Flächenflug) und 1995 (Streifenflug) ein, zusätzlich werden Angaben des Forstamtsleiters zu Schadensschwerpunkten und Schadentwicklungen innerhalb der Untersuchungsreviere berücksichtigt.

Die Grenzen der kartierten Schadflächen lassen sich gut mit den Bestandsgrenzen der Forstgrundkarte parallelisieren; somit können den Fichtenreinbeständen relativ problemlos Bestandesschadstufen (BSSt) für 1990 zugeordnet werden. Für einzelne Bestände lässt sich nach den Angaben des Forstamtsleiters und der nicht flächendeckenden Kartierung von 1995 eine partielle Revitalisierung von 1990 bis 1995 annehmen, die bei der Interpretation berücksichtigt wird.

Nach der Bestandesschadkartierung von 1990 weisen insbesondere die Fichtenbestände der Altersklassen >60-80 Jahre bzw. >80-100 Jahre starke Schädigungen auf. Problematisch ist, dass nicht oder nur schwach geschädigte Referenzbestände der entsprechenden Altersklassen in den durch den Flächenflug erfassten Revieren Bischofsdhrn und Hinzerath kaum vorkommen. Nach Angaben des Forstamtsleiters wiesen die Fichtenbestände des Reviers Horath 1990 allenfalls schwache Schädigungen auf; aus diesem Grund werden sie als zusätzliche Referenzbestände der BSSt 0 in die Schadanalyse einbezogen. Die Ergebnisse der Schadanalyse sind in Abbildung 63 a-d dargestellt. „Ungeschädigte“ Bestände entsprechen der BSSt 0 (nicht oder schwach geschädigt), geschädigte Bestände den Schadstufen 1 (mittelstark geschädigt) und 2 (stark geschädigt).



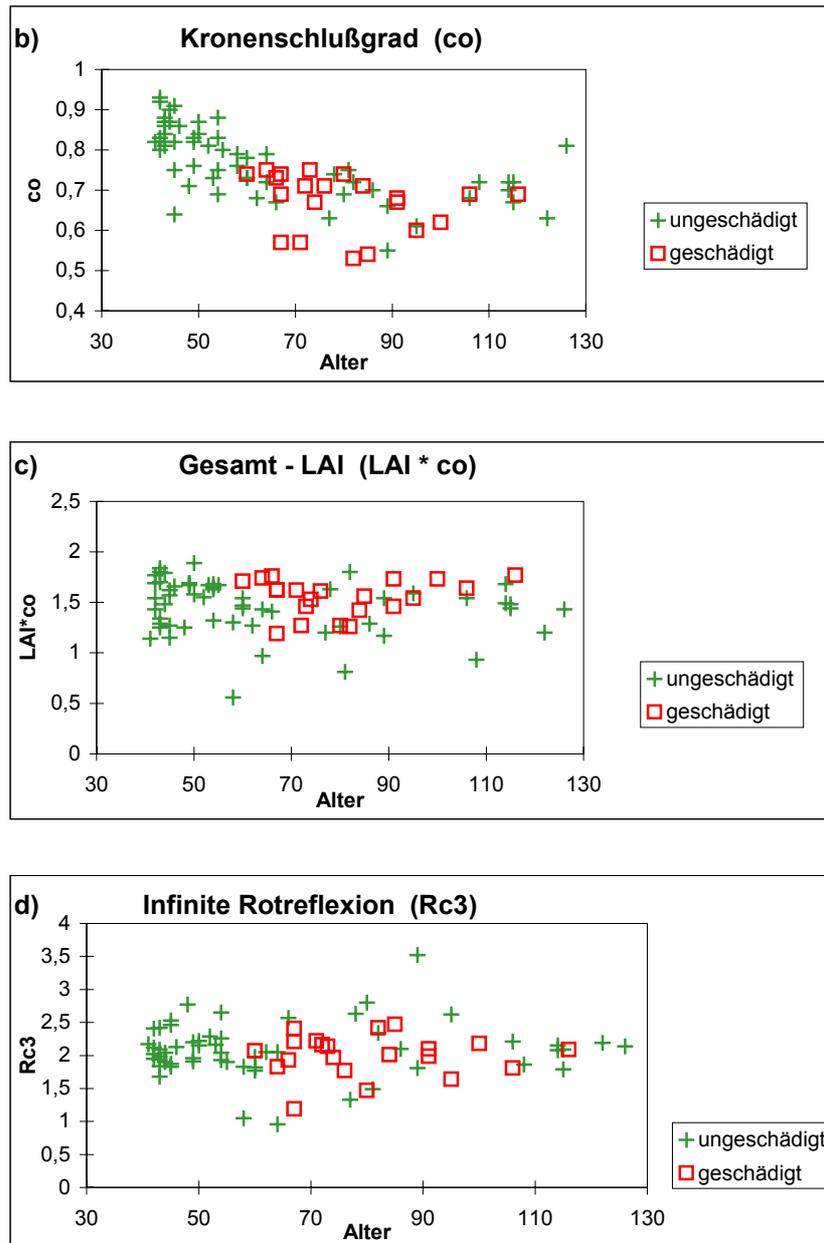


Abb. 63: Modellierte Bestandsparameter als Schadindikatoren

Der Vergleich von geschädigten mit ungeschädigten Beständen macht sowohl für den LAI (als potentiellen Schadindikator bei Nadelverlust) als auch für $LAI * c_0$ deutlich, dass geschädigte Bestände nicht über auffällig abweichende Parameterwerte von den ungeschädigten Referenzen zu trennen sind. Auch der Parameter Kronenschlußgrad lässt keine eindeutige Separierung geschädigter von ungeschädigten Beständen zu - auch wenn vier der geschädigten Bestände auffällig niedrige c_0 -Werte zeigen. Zu erwartende höhere R_{c3} -Werte geschädigter (vergilbter) Bestände können ebenfalls nicht festgestellt werden.

Als zusätzliche Vergilbungsparameter werden Kanalkombinationen geprüft, die aufgrund vorliegender Untersuchungen als potentielle Schadindikatoren in Frage kommen (TM2-TM1; TM3-TM1; TM3) (vgl. Abb. 64 a-c); aber auch bei ihnen lassen sich keine signifikanten schadbedingten Unterschiede ermitteln.

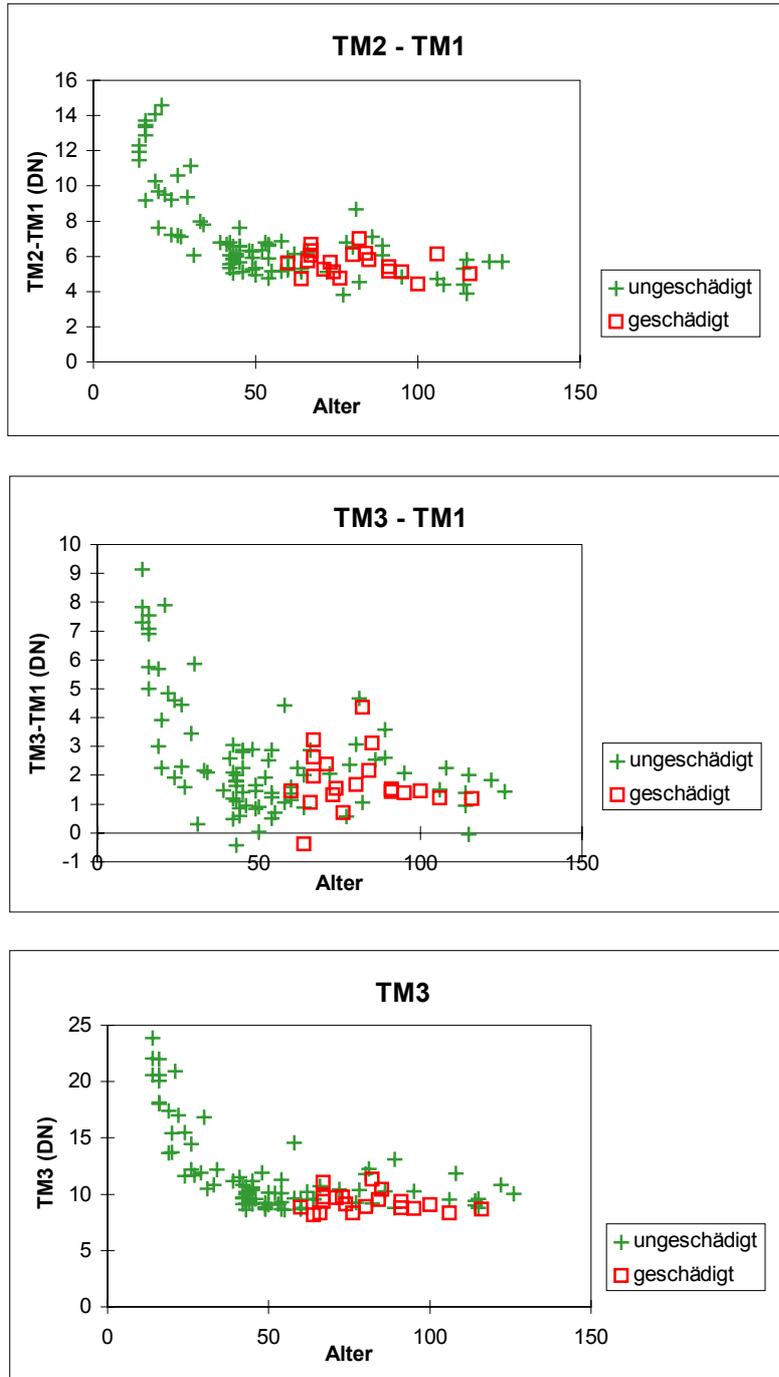


Abb. 64: Verschiedene Kanalkombinationen als Vergilbungsindikatoren

Auffällig ist jedoch, dass im - Gegensatz zum R_c^3 - die getesteten Kanalkombinationen bei jungen Beständen hohe Werte aufweisen, die vermutlich durch den Hintergrundeinfluss des Waldbodens hervorgerufen werden (da keine baualtersspezifischen Reflexionsunterschiede im sichtbaren Bereich zu erwarten sind). Dieser Hintergrundeinfluss wird durch das Modell (bei der Berechnung von R_c^3 mit C und G) offensichtlich gut herausgerechnet.

Bewertung

Angesichts der mit dem hier vorgestellten Modell (FLIM) ermittelten Parameterwerte für die Bestände verschiedener Altersklassen scheinen die angeführten Ergebnisse zunächst darauf hinzuweisen, dass sowohl LAI (als Indikator für Nadelverlust) als auch R_c^3 (als Vergilbungsparameter) keine oder eine nur sehr geringe Sensibilität für „Neuartige Waldschäden“ besitzen. Auch wenn der LAI von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist (s.o.), so müsste sich doch zumindest bei starken Nadelverlusten - annähernd richtige Modellierungsergebnisse vorausgesetzt - ein Trend zu niedrigeren LAI-Werten abzeichnen.

Als ein wichtiger Grund für die (scheinbar) mangelnde Sensibilität der extrahierten Schadindikatoren ist die gewählte Referenz (der Bestandesschadstufen) zu sehen. In der Bestandesschadstufe werden Vergilbung und Nadelverluste gemeinsam erfasst, eine nachträgliche Trennung in Bestände mit hohen Vergilbungsprozenten und Bestände mit starkem Nadelverlust bei schwächer ausgeprägter Vergilbung (die der gleichen Schadstufe zugeordnet werden) ist nicht möglich. Eine Überprüfung der extrahierten Indikatoren kann nur über die Gesamtheit der geschädigten Bestände (unter Vernachlässigung der jeweiligen Schadsymptomatik) erfolgen (außerdem ist zu berücksichtigen, dass die zum Vergleich mit den Schadflächen ausgewählten Bestände der BSSt 0 nicht als absolut ungeschädigt anzusehen sind, sondern definitionsgemäß einen Anteil deutlich geschädigter Bäume von bis zu 30% aufweisen können); eine solche Kontrolle lässt jedoch keine abschließende Bewertung der Parameter als Schadindikatoren zu. Andere eventuell geeignetere Referenzdaten stehen für das Untersuchungsgebiet nicht zur Verfügung.

Pixelweise Parameterschätzung

Bei der oben vorgestellten Invertierungsmethode bilden die gemittelten Bestandsreflexionswerte den Modellierungsinput; die Streuung der Einzelpixel um den Bestandsmittelwert, die vor allem bei jungen Beständen (ohne Bestandsschluss) höhere Beträge aufweist, bleibt dabei unberücksichtigt.

Um die Streuung der Einzelpixel besser berücksichtigen zu können, wird eine Parameterschätzung auf Pixelebene angestrebt. Die pixelbezogenen Einzelwerte lassen sich schließlich zu einer Gesamtcharakterisierung des Bestands zusammenfassen. Unter Verwendung der oben diskutierten R_c - und R_g - Werte werden dazu Spektren im TM4/TM5-Merkmalraum simuliert (für beide Untersuchungsjahre getrennt nach Beständen < 40 Jahren und Beständen \geq 40 Jahren), die bestimmten Parameterkombinationen entsprechen. Unter Berücksichtigung der bereits vorgestellten Modellierungsergebnisse werden insgesamt 48 Spektren simuliert, die sich aus der Kombination folgender Werte für c_0 und LAI ergeben:

Tabelle 6 Verwandte Parameterwerte zur Spektrensimulation

C_0	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0		
LAI	0,2	0,5	1,0	1,5	2	2,5	3	4

Jedes zu klassifizierende Pixel wird anschließend im TM4/TM5-Merkmalraum über die Euklidische Distanz einem der simulierten Spektren (und damit einer bestimmten Parameterkombination) zugeordnet (Abb. 65).

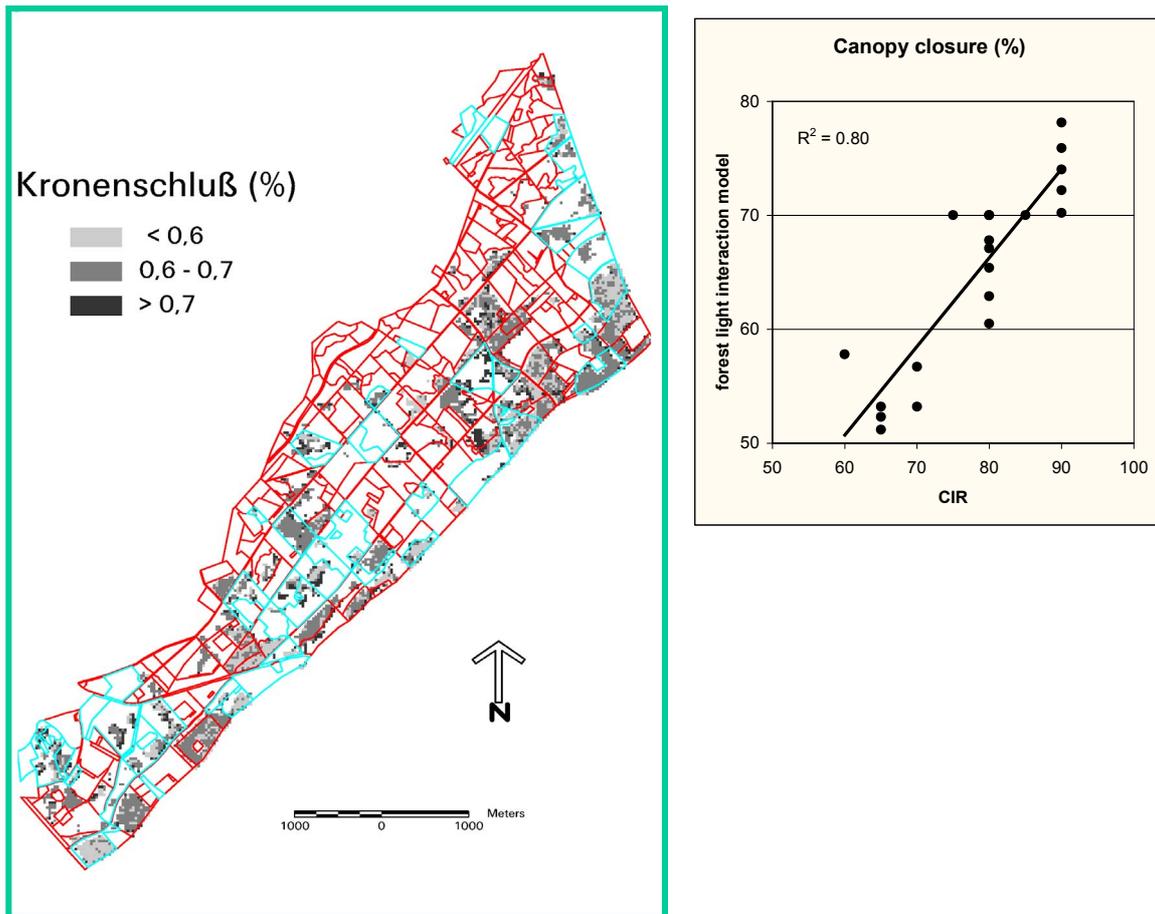


Abb. 65: Über die Zuordnung von Bildpixeln zu mit FLIM simulierten Spektren ermittelte räumlich differenzierte Schätzung des Kronenschlussgrades

Als Input können zum Beispiel alle Pixel der GIS-Waldmaske dienen; nach der Parameterschätzung lassen sich dann über die GIS-selektierten Bestandspolygone aus den resultierenden Grautonbildern c_0 -, LAI-, $c_0 \cdot \text{LAI}$ - Werte als Bestandskenngrößen ableiten. Um Parameterwerte für alle mit Fichte bestockten Flächen - also sowohl Reinbestände als auch Teilflächen - zu erhalten, werden die Pixel der durch Multispektralklassifikation und Bild Differenzverfahren erstellten Fichtenmasken klassifiziert. Eine visuelle Kontrolle, die an einzelnen Luftbildpaaren der CIR-Befliegung von 1990 stereoskopisch durchgeführt wurde, ergibt eine gute Übereinstimmung der modellierten c_0 -Werte mit den visuell abschätzbaren Kronenschlussgraden. Insgesamt dokumentieren die Ergebnisbilder relativ starke strukturelle Differenzierungen innerhalb der klassifizierten Fichtenbestände (im wesentlichen Baum- und Altholz).

Strukturmerkmale stellen eine wesentliche Größe zur Definition bzw. Abgrenzung übergeordneter Inventur- und Planungseinheiten (im Sinne des „Waldökotop-Konzepts“) dar. Die modellgestützte pixelweise Parameterschätzung (= Quantifizierung der Bestandsstruktur) erscheint somit als geeignetes Mittel, um - in Ergänzung zu den Ergebnissen der Multispektralklassifikation - flächendeckend plausible Befundeeinheiten abgrenzen zu können (Abb. 66). Außerdem scheint es denkbar, über eine Integration der Parameterschätzung als zusätzliches Entscheidungskriterium eine Verbesserung der in Multispektralklassifikationen erreichbaren Klassentrennung (z.B. Trennung auch problematischer Blößen von Kulturen bzw. Trennung verschiedener Altersklassen) erzielen zu können.

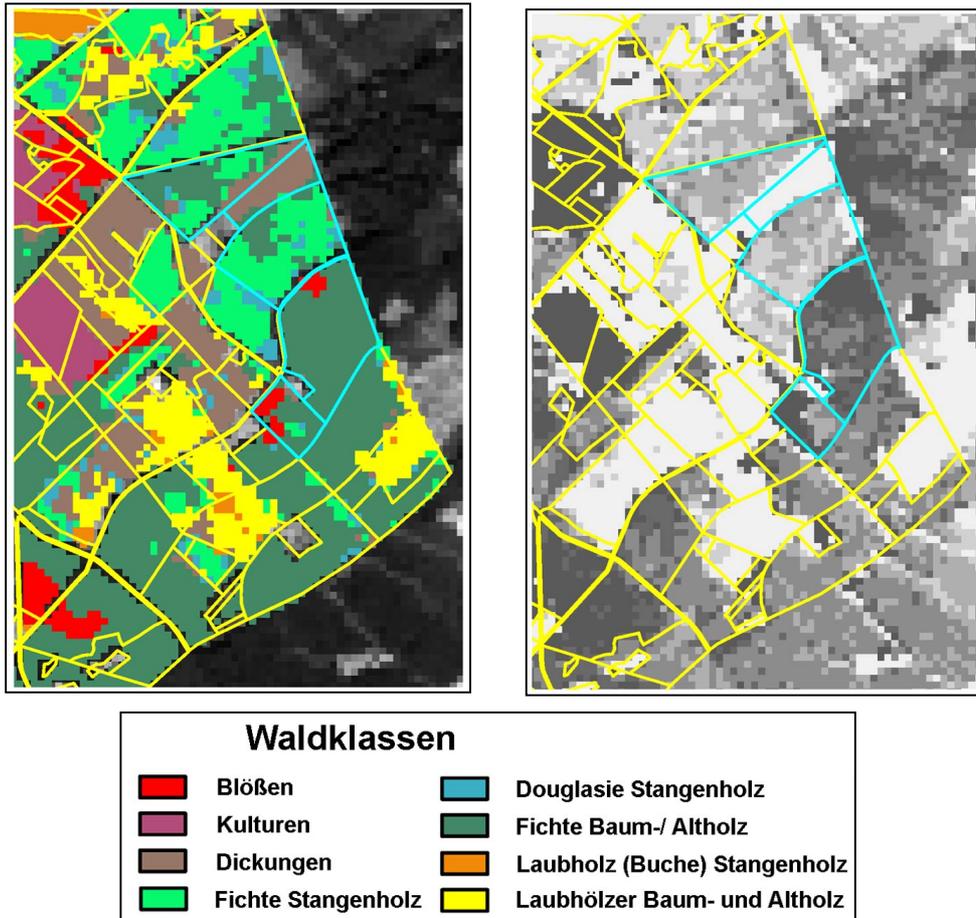


Abb. 66: Überschirmungsgrad c_0 auf der Basis der Reflexionsmodellierung mit FLIM im Vergleich zu einer mit konventioneller Multispektralklassifikation ermittelten Kartierung von Bestandesklassen

Bewertung der Ergebnisse

Durch Mittelwertbildung auf Bestandsebene können nun für die Fichtenreinbestände des Untersuchungsgebiets kennzeichnende Parameterwerte berechnet werden. Die gemittelten LAI- Werte liegen zwischen 0,3 und 3,18 (1990) bzw. 0,72 und 3,39 (1995), die Kronenschlussgrade zwischen 0,56 und 0,98 (1990) bzw. 0,55 und 0,95 (1995).

Die graphische Darstellung (Abb. 67 a-c) der bestandsbezogenen Parameterwerte belegt, dass erwartungsgemäß vor allem die errechneten Werte der jungen Bestände (mit stark streuenden Reflexionswerten bei fehlender Normalverteilung) stark von den Ergebnissen der bestandsweisen Modellinversion abweichen. Ihre Kronenschlussgrade liegen nicht mehr pauschal bei 1,0, sondern weisen eine Spanne von 0,60 - 0,93 auf, durch die die tatsächlichen Bestockungsverhältnisse auch realistischer wiedergegeben werden. Bei den älteren Beständen sind die Unterschiede zwischen beiden Modellierungsdurchgängen schwächer ausgeprägt. Insgesamt werden durch die pixelweise Parameterschätzung für die Mehrzahl der älteren Bestände etwas höhere LAI-Werte ermittelt, die Streuung der Werte nimmt leicht zu.

Insbesondere aus den abgebildeten c_0 -Werten ist ersichtlich, dass die klassenspezifischen R_c -Werte zu einem deutlichen „Datensprung“ der Ergebnisse an der Klassengrenze führen. Die Ergebnisse beider Altersklassen können demnach nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden.

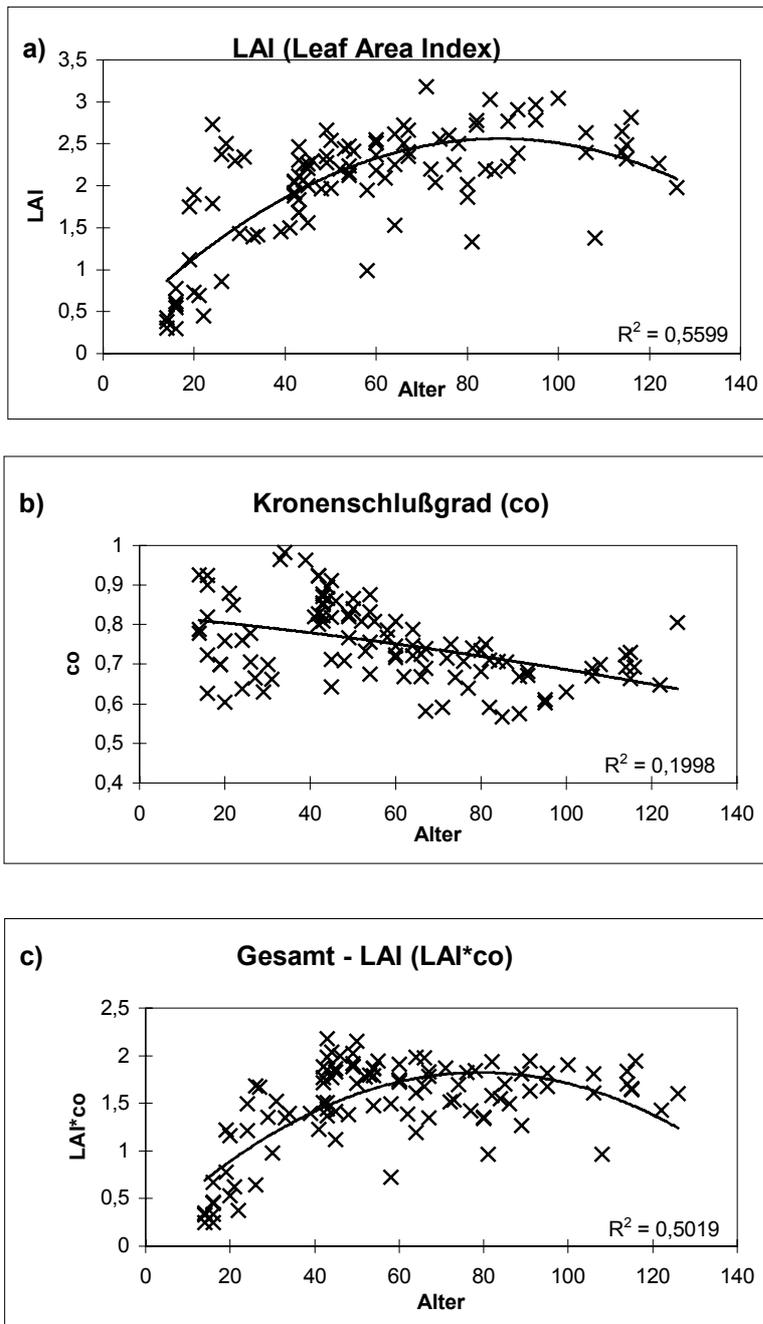


Abb. 67: Modellierte Bestandsparameter auf der Grundlage pixelweiser Parameterschätzung (1990)

In Abbildung 68 a-c werden die Ergebnisse der Parameterschätzung noch einmal separat für die Bestände ≥ 40 Jahre aufgetragen. Insgesamt entsprechen die durch die Trendlinien angegebenen Altersabhängigkeiten den bereits angedeuteten und im Rahmen der durchgeführten Modellierung interpretierten Tendenzen. Insbesondere für die LAI-Werte ist die Altersabhängigkeit jedoch nur sehr schwach ausgeprägt, da die die Bestandsstruktur wesentlich beeinflussenden Faktoren (vor allem Durchforstungsmaßnahmen oder auch Windwurf, Vitalitätsveränderungen, Schneebruch) zeitlich nicht streng an bestimmte absolute Alter gebunden sind. Gerade erfolgte Holzentnahmen oder bestehende Pflögerückstände können auch bei Vergleichsbeständen identischer natürlicher Altersklassen starke Unterschiede in Kronenschlußgrad und LAI hervorrufen. Die erwähnten Alterstendenzen können bei der Abschätzung der Bestandsstruktur lediglich ungefähre Anhaltspunkte liefern.

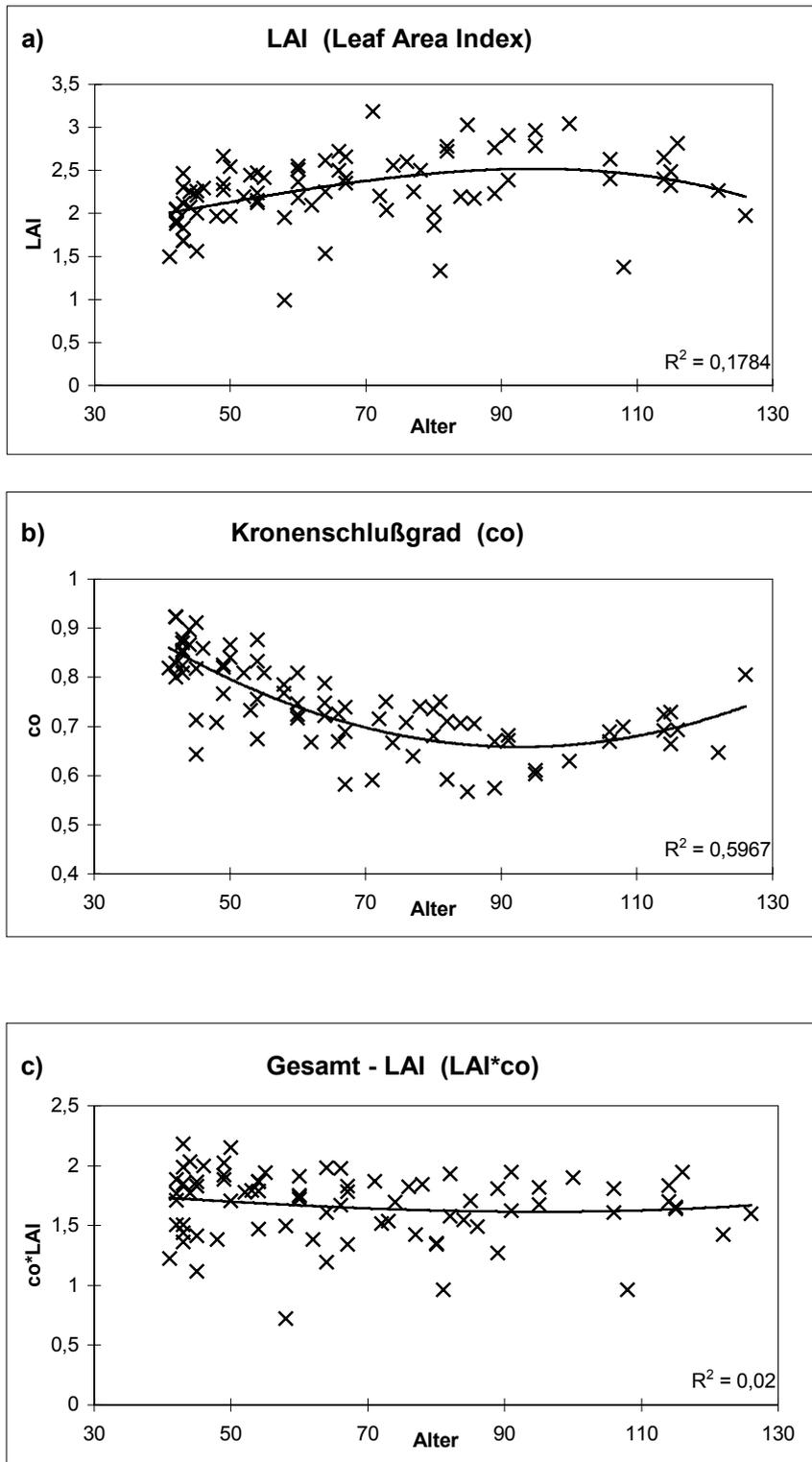


Abb. 68: Modellierte Bestandsparameter (pixelweise Schätzung) für Fichtenreinbestände ≥ 40 Jahre (1990)

Eine für ≥ 40 -jährige Bestände durchgeführte Überprüfung der einzelnen Parameter als Schadindikatoren ergibt keine wesentlich von den Resultaten der bestandsweisen Invertierung abweichenden Ergebnisse. Auch eine zusätzliche Differenzierung der geschädigten Bestände in mittelstarke (BSSt 1) und starke Schädigung (BSSt 2) lässt keinen deutlichen Trend der Separierbarkeit der einzelnen Schadklassen über die modellierten Parameter erkennen. In

Abbildung 69 a-c werden die für 1995 ermittelten Parameterwerte den Ergebnissen von 1990 gegenübergestellt, um eventuelle Veränderungen dokumentieren zu können. Berücksichtigt werden in der Darstellung wiederum nur die ≥ 40 jährigen Bestände.

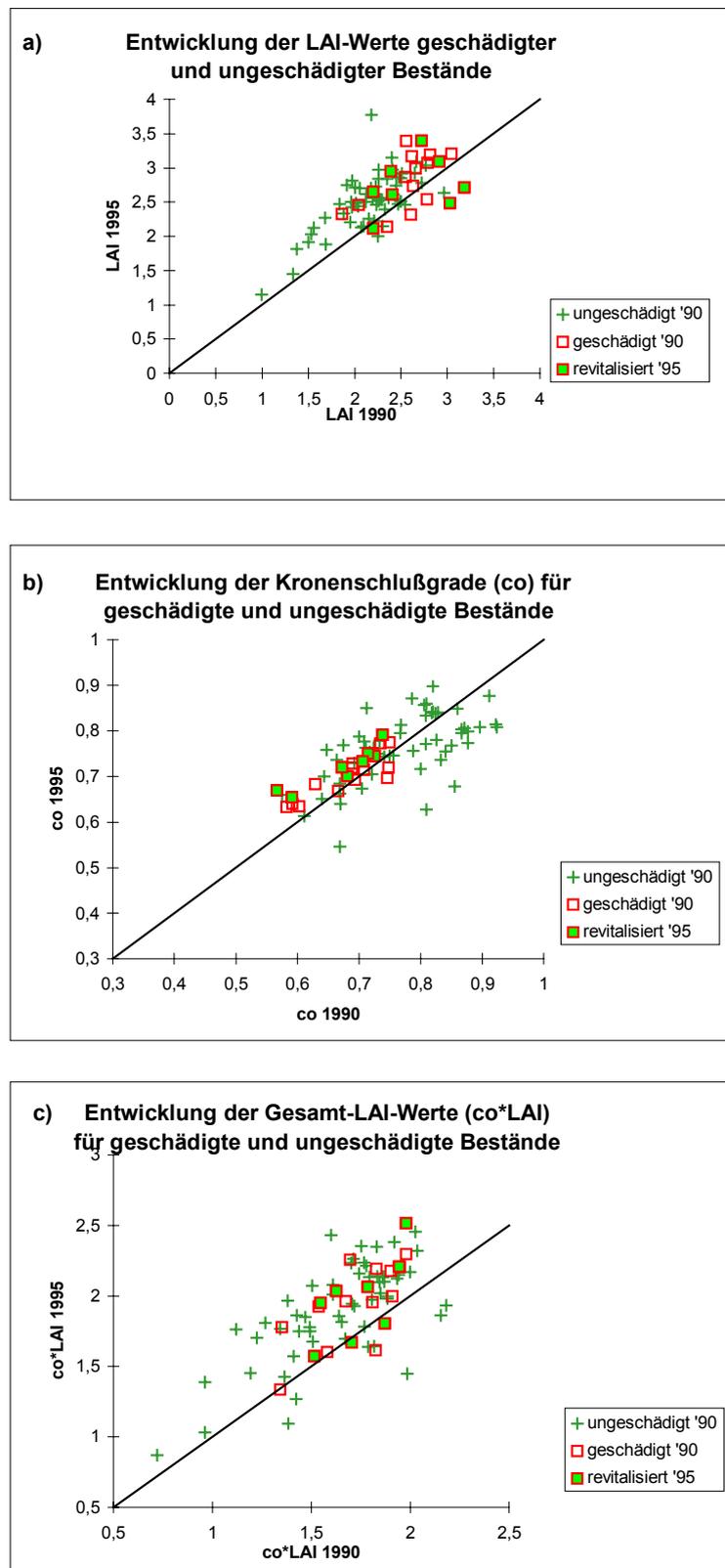


Abb. 69: Vergleich der Bestandsparameter 1990-1995

Die c_0 -Werte gruppieren sich um die 1:1-Linie; in geringem Maß überwiegen die Bestände, die 1995 etwas höhere Kronenschlussgrade als 1990 aufweisen. Diese Unterschiede lassen sich wahrscheinlich - neben der Einflussnahme der jeweiligen Durchforstungsmaßnahmen - auf die Sturmwurfereignisse im Frühjahr 1990 (Entstehen einzelner „Blößenlöcher“ in den untersuchten Beständen) und die in den Folgejahren allmählich durch Jungwuchs wieder zunehmenden Überschirmungsgrade zurückführen. Die modellierten LAI-Werte pro Baumkrone, die - von einzelnen Ausnahmen abgesehen - 1995 über den 1990er-Werten liegen, bestätigen den in den letzten Jahren beobachteten Trend einer allmählichen Zunahme. Auch auf Bestandsebene ($c_0 \cdot \text{LAI}$) wird diese Entwicklung deutlich dokumentiert.

Geschädigte Bestände weisen im Vergleich zu ungeschädigten Beständen keine spezifischen Entwicklungstendenzen auf. Auch die Bestände, für die eine partielle Revitalisierung angenommen werden kann (wobei zumindest für einen Teil dieser Bestände als Grund für die bessere Bewertung in 1995 eine Abnahme der Vergilbung wahrscheinlich ist), lassen sich bei den modellierten LAI-, c_0 - und $\text{LAI} \cdot c_0$ - Werten keine auffälligen Abweichungen vom allgemeingültigen Trend nachweisen. Auch hier macht sich das Problem der nicht genauer zu differenzierenden Schadsymptomatik bemerkbar.

7.3.2 INFORM: Ein hybrides invertierbares Forstreflexionsmodell. Nach der Art der Modellierung unterscheidet man mindestens drei Gruppen von Reflexionsmodellen (GOEL, 1988): (1) geometrisch-optische Modelle, (2) 1-dimensionale Strahlungstransfermodelle, und (3) Ray-Tracing Modelle. Im Fall der geometrisch-optischen Modelle wird der Forst als eine Anordnung opaker (d.h. lichtundurchlässiger) geometrischer Körper über einem homogenen Untergrund approximiert (u.a. STRAHLER & LI, 1981, CAVAYAS & TEILLET, 1985; LI & STRAHLER, 1986; PEDDLE et al., 1999). Sowohl den geometrischen Körpern als auch dem Untergrund werden spezifische Reflexionskoeffizienten zugewiesen. In Abhängigkeit von der geometrischen Form der Körper, ihrer Anzahl pro Flächeneinheit, den Reflexionseigenschaften der Grundelemente und dem Sonnenstand (und damit der Beschattung des Untergrundes) kann das Reflexionssignal für eine gegebene Beobachtungskonfiguration simuliert werden. Die spektrale Variabilität des Signals ergibt sich aus den Wellenlänge für Wellenlänge zu spezifizierenden Reflexionskoeffizienten der Grundelemente (i.e., Vegetationskörper und Untergrund).

Im Fall der 1-dimensionalen Strahlungstransfermodelle wird auf eine mathematische Beschreibung rein geometrischer Aspekte verzichtet. Stattdessen wird der Bestand als eine homogene, planparallele Interaktionsschicht approximiert, in der die zur Gesamtreflexion beitragenden streuenden bzw. absorbierenden Pflanzenelemente (z.B. Laubblätter bzw. Nadeln) zufällig verteilt sind (u.a. SUITS, 1972; VERHOEF, 1984). Es wird weiterhin angenommen, dass die Pflanzenelemente keine bevorzugte Azimutrichtung aufweisen. Die Blatthaltungswinkel im Bezug zur Vertikalen werden mit Hilfe spezifischer Verteilungsfunktionen beschrieben. Die teilweise transparente Interaktionsschicht wird nach unten durch eine opake Grenzfläche (den Boden) begrenzt. Die spektrale Variabilität des Signals ergibt sich aus den wellenlängenabhängig zu spezifizierenden Reflexionskoeffizienten von Blätter/Nadeln und Boden sowie den Transmissionskoeffizienten der Blattelemente (für eine ausführliche Diskussion 1-dimensionaler Strahlungstransfermodelle s.a. ATZBERGER, 1997).

Bedingt durch die stark vereinfachenden Modellhypothesen sind geometrisch-optische und 1-D Strahlungstransfermodelle für sich genommen für forstliche Fragestellungen nur bedingt geeignet. Im Fall der geometrisch-optischen Modelle ist u.a. die fehlende Transmissivität der

geometrischen Körper als grundsätzliche Schwäche zu nennen. Im Fall der Strahlungstransfermodelle bleiben gegenseitige Beschattungseffekte und die Klumpung der Vegetationselemente zu Kronen etc. unberücksichtigt. Es liegt nahe, beide Modelltypen miteinander zu koppeln und zusätzlich die optischen Eigenschaften der Blattelemente bzw. des Bodens durch geeignete Submodelle zu parametrisieren. Damit ist eine realitätsnähere Beschreibung der Strahlungsinteraktion im Forst möglich. Das von ATZBERGER (2000) entwickelte INFORM-Modell (Invertierbares Forst Reflexions Modell) erfüllt diese Anforderungen. Mit seiner Hilfe können aus fernerkundlichen Hyper- und Multispektraldaten sowohl „klassische“ Inventarisierungsgrößen abgeleitet werden (u.a. Kronenschlussgrad und Bestockungsdichte), als auch Parameter, die sich im Hinblick auf eventuelle Schadensereignisse interpretieren lassen (u.a. Blatt-/Nadelpigmentierung und Gesamtblattfläche).

Modellkonzeption

Im Gegensatz zum „geometrischen“ Strahler-Li-Modell weist das Struktur Modul des INFORM Modells eine stochastische Natur auf, in der die spektrale Reflexion des Forstbestandes (R_λ) mit Hilfe von Wahrscheinlichkeiten beschrieben wird, mit der ein Beobachter eine Krone bzw. eine Bestandslücke „sieht“. Es baut damit auf der bereits erörterten Konzeption von ROSEMA et al. (1992) auf:

$$R_\lambda = R_{c_\lambda} C_\lambda + R_{g_\lambda} G_\lambda \quad (7.3.19)$$

R_{c_λ} ist die Reflexion einer (theoretischen) unendlich dichten homogenen Vegetationsschicht, in der sowohl die abwärts gerichtete Transmission (T_{s_λ}) als auch die aufwärts gerichtete Transmission (T_{o_λ}) gleich null sind. R_{g_λ} ist die Reflexion des Untergrundes, der sowohl bewachsen als auch unbedeckt sein kann. C_λ und G_λ sind die sogenannten Kronen- bzw. Bodenfaktoren. Im Vorgriff auf ihre spätere Ableitung sei zunächst davon ausgegangen, dass die unter einem gegebenen Beobachtungszenitwinkel (θ_v) beobachtete Bodenbedeckung (co) von der Bestockungsdichte (D) und der mittleren horizontalen Kronenfläche (k) abhängt:

$$co = 1 - \exp(-kD \cos(\theta_v)) \quad (7.3.20)$$

In einer ähnlichen Weise berechnet sich auch der Beschattungsanteil am Boden (cs) für einen gegebenen Sonnenzenitwinkel (θ_z):

$$cs = 1 - \exp(-kD \cos(\theta_z)) \quad (7.3.21)$$

Damit sind insgesamt vier verschiedene Flächentypen möglich:

vegetationsbestanden	co
offen	$1-co$
beschattet	cs
besonnt	$1-cs$

wobei co und cs untereinander positiv korreliert sind. Die Stärke dieser Korrelation ($corr$) ist für eine gegebene Kronengeometrie (h/d ; h =Baumhöhe; d =Kronendurchmesser) umso stärker, je kleiner der Phasenwinkel zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsrichtung ist. Nach ROSEMA et al. (1992) gilt (ψ =relativer Azimut zwischen Beobachtungs- und Beleuchtungsebene):

$$\text{corr} = \exp(-g \cdot h / d) \quad (7.3.22)$$

$$\text{mit:} \quad g = (\tan^2 \theta_v + \tan^2 \theta_z - 2 \tan \theta_v \tan \theta_z \cos \psi)^{0.5} \quad (7.3.23)$$

Damit lassen sich insgesamt vier verschiedene Flächenanteile definieren, die zu 1 aufsummieren:

$$(1) \text{ Kronen mit beschattetem Hintergrund} \quad F_{cd} = co \cdot cs + \text{corr}[co(1-co)cs(1-cs)]^{0.5} \quad (7.3.24)$$

$$(2) \text{ Kronen mit besonntem Hintergrund} \quad F_{cs} = co(1-cs) - \text{corr}[co(1-co)cs(1-cs)]^{0.5} \quad (7.3.25)$$

$$(3) \text{ beschattete Freifläche} \quad F_{od} = cs(1-co) - \text{corr}[co(1-co)cs(1-cs)]^{0.5} \quad (7.3.26)$$

$$(4) \text{ besonnte Freifläche} \quad F_{os} = (1-co)(1-cs) + \text{corr}[co(1-co)cs(1-cs)]^{0.5} \quad (7.3.27)$$

Unter Hinzuziehung der Kronentransmission (T) in Beobachtungs- und Beleuchtungsrichtung lassen sich damit Kronen- und Bodenfaktor berechnen:

$$C_\lambda = (1 - T_{s_\lambda} T_{o_\lambda}) \cdot cs \cdot co \quad (7.3.28)$$

$$G_\lambda = F_{cd} T_{s_\lambda} T_{o_\lambda} + F_{cs} T_{o_\lambda} + F_{od} T_{s_\lambda} + F_{os} \quad (7.3.29)$$

Für gegebene Blattreflexions- und -transmissionskoeffizienten ($\rho_{\text{Blatt}\lambda}$ und $t_{\text{Blatt}\lambda}$) lassen sich T_{o_λ} und T_{s_λ} mit Hilfe des SAIL-Modells (VERHOEF, 1984) errechnen (LAI=leaf area index; θ_l =mittlerer Blatthaltungswinkel):

$$T_{o_{\text{SAIL}\lambda}} = f_{\text{SAIL}}(\text{LAI}, \rho_{\text{Blatt}\lambda}, t_{\text{Blatt}\lambda}, \theta_l, \theta_v) \quad (7.3.30)$$

$$T_{s_{\text{SAIL}\lambda}} = f_{\text{SAIL}}(\text{LAI}, \rho_{\text{Blatt}\lambda}, t_{\text{Blatt}\lambda}, \theta_l, \theta_z) \quad (7.3.31)$$

Dabei bleibt jedoch unberücksichtigt, dass Wälder einen nicht unerheblichen Holzanteil aufweisen können, der die Transmission im Vergleich zu landwirtschaftlichen Kulturen des selben LAI's z.T. deutlich verringert. Um dies zu berücksichtigen, wird in INFORM die SAIL-Transmissionen um einen sogenannten Holzanteil (holz) reduziert, der dem Holzschattenanteil eines unbelaubten Baumes bei vertikaler Beleuchtung entspricht:

$$T_{o_\lambda} = T_{o_{\text{SAIL}\lambda}} (1 - \text{holz} \cos(\theta_v)) \quad (7.3.32)$$

$$T_{s_\lambda} = T_{s_{\text{SAIL}\lambda}} (1 - \text{holz} \cos(\theta_z)) \quad (7.3.33)$$

Die spektralen Blattreflexions- und -transmissionskoeffizienten lassen sich elegant aus dem PROSPECT-Modell (JACQUEMOUD & BARET, 1990) berechnen. PROSPECT verwendet zur Simulation des Spektralverlaufs zwischen 400 und 2500 nm lediglich 3 Parameter sowie vordefinierte spezifische Chlorophyll- und Wasserabsorptionskoeffizienten und spektrale Refraktionskoeffizienten für das Blattmaterial:

$$\rho_{\text{Blatt}\lambda} = f_{\text{PROSPECT}}(C_{ab}, C_w, N) \quad (7.3.34)$$

$$t_{\text{Blatt}\lambda} = f_{\text{PROSPECT}}(C_{ab}, C_w, N) \quad (7.3.35)$$

N ist dabei ein sogenannter Blattstrukturparameter. Er kann je nach Pflanzentyp auf N=1.5 (Monokotyle) bzw. N=2.5 (Dikotyle) festgesetzt werden (JACQUEMOUD et al., 1996). C_{ab} ist der Blattchlorophyll (a+b) Gehalt (in $\mu\text{g cm}^{-2}$) und C_w der Blattwassergehalt (in cm).

Die infinite Reflexion für $\text{LAI} \rightarrow \infty$ (R_{c_λ}) kann wiederum direkt mit SAIL berechnet werden:

$$R_{c_\lambda} = f_{\text{SAIL}}(\text{LAI}_\infty, \rho_{\text{Blatt}\lambda}, t_{\text{Blatt}\lambda}, \theta_l, \theta_v, \theta_z) \quad (7.3.36)$$

Gleiches gilt für die Reflexion des mehr oder weniger stark bewachsenen Untergrundes ($R_{g\lambda}$):

$$R_{g\lambda} = f_{SAIL}(LAI_U, \rho_{Boden\lambda}, \rho_{BlattU\lambda}, t_{BlattU\lambda}, \theta_U, \theta_v, \theta_z) \quad (7.3.37)$$

wobei LAI_U der Blattflächenindex des Unterwuchses ist, und $\rho_{Boden\lambda}$ die spektrale bi-direktionelle Reflexion des unterliegenden Bodens (zu spezifizieren). Selbstverständlich nimmt der Einfluss von $\rho_{Boden\lambda}$ mit zunehmenden LAI_U ab. $\rho_{BlattU\lambda}$, $t_{BlattU\lambda}$ und θ_U können wegen ihres relativ schwachen Einflusses auf die Gesamtreflexion auf typische Werte einer Waldbodenkrautschicht fixiert werden (z.B.: $Cab_U=30$; $Cw_U=0.015$; $N_U=2.0$; $\theta_U=45$). Somit wird $R_{g\lambda}$ hauptsächlich durch LAI_U modifiziert.

Mit den Gleichungen [7.3.19] bis [7.3.37] ist ein Tool entwickelt, dass die spektrale bi-direktionelle Reflexion eines Forstbestandes als eine mathematische Funktion externer und interner Parameter modelliert. Die wichtigsten intervenierenden Parameter sind zusammenfassend noch einmal in Tabelle 7 aufgeführt. Für eine genaue Ableitung der beiden Teilkomponenten PROSPECT (JACQUEMOUD & BARET, 1990) und SAIL (VERHOEF, 1984) wird der interessierte Leser auf die Originalpublikationen verwiesen.

Tabelle 7 Bedeutung, Einheiten und Standardeinstellungen (SE) der INFORM Parameter

Symbol	Bedeutung	Einheit	SE
θ_z	Beleuchtungszenitwinkel	° Grad	40
θ_v	Beobachtungszenitwinkel	° Grad	0
ψ	relativer Azimut zwischen Sonne und Sensor	° Grad	0
k	mittlere horizontale Kronenfläche	ha Stamm ⁻¹	0.000314
D	Bestockungsdichte	Stämme ha ⁻¹	3000
h/d	Baumhöhe/Kronendurchmesser	m m ⁻¹	2.5
holz	Holzschattenanteil bei vertikaler Beleuchtung	%	0.3
LAI	Blattflächenindex eines einzelnen Baumes	m ² m ⁻²	4
LAI_U	Blattflächenindex des Unterwuchses	m ² m ⁻²	0
θ_l	mittlere Blatthaltungswinkel der Baumschicht	° Grad	55
θ_{l_U}	mittlerer Blatthaltungswinkel des Unterwuchses	° Grad	45
Cab	mittlerer Blatt-Chlorophyll Gehalt in der Baumschicht	µg cm ⁻²	30
Cab_U	mittlerer Blatt-Chlorophyll Gehalt im Unterwuchs	µg cm ⁻²	30
Cw	mittlerer Blatt-Wassergehalt in der Baumschicht	cm	0.015
Cw_U	mittlerer Blatt-Wassergehalt im Unterwuchs	cm	0.015
N	Blattstrukturparameter der Baumschicht	/	1.5
N_U	Blattstrukturparameter des Unterwuchses	/	2.5

Sensitivitätsanalyse

INFORM erlaubt die Simulation der spektralen bi-direktionellen Reflexion von Forstbeständen im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 2500 nm unter Zuhilfenahme einiger weniger bio-physikalischen Größen. Abbildung 70 zeigt die Sensitivität von INFORM als Funktion (a) der Bestockungsdichte, und (b) der Blattchlorophyll- und -wassergehalte. Allen Simulationen liegt dabei ein einheitlicher Standardparametersatz zugrunde (Tabelle 7).

Aus Abbildung 70 ist ersichtlich, dass die Bestockungsdichte (D) das Reflexionssignal sehr stark beeinflusst. Dies gilt für alle Wellenlängenbereiche gleichermaßen. Demgegenüber beeinflussen variable Pigmentierungen und Blattwassergehalte die Gesamtreflexion nur relativ schwach. Dabei ist der Einfluss des Blattchlorophyllgehaltes noch schwächer als der des Blattwassergehaltes.

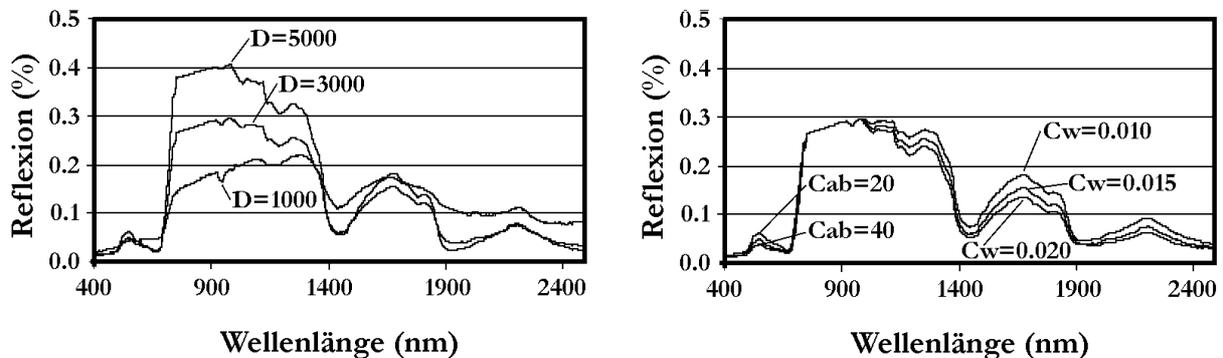


Abb. 70: INFORM Simulationen der spektralen Forstreflexion im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 2500 nm. Dargestellt ist links der Einfluss der Bestockungsdichte und rechts der Einfluss des Blattchlorophyll- und -wassergehaltes. Alle anderen Parameter entsprechen den in Tabelle 7 aufgeführten Standardeinstellungen

Um die Sensitivität der Forstreflexion bei gleichzeitiger Variation mehrerer Parameter zu analysieren, wurden mit einem Zufallsgenerator insgesamt 500 Reflexionsspektren simuliert. Als Ergebnis sind in Abbildung 71 die jeweiligen Mittelwerte \pm Standardabweichungen im oberen (grau) und unterem (weiß) 33%-Perzentilbereich dargestellt. Die dem Zufallsgenerator zugewiesene Wertebereiche der einzelnen unabhängigen Parameter sind dabei ebenfalls in Abbildung 71 aufgeführt. Alle anderen Parameter entsprechen den in Tabelle 7 aufgeführten Standardeinstellungen.

Ein Einflussfaktor wäre demnach relativ gut aus einem Spektralkanal empirisch abzuleiten, wenn (a) die beiden Reflexionsbänder jeweils relativ schmal wären, und (b) sich die beiden Bänder möglichst wenig überdeckten. Dies ist anscheinend im gesamten nIR für die Bestockungsdichte der Fall (Abb. 71 links oben). Dagegen scheinen Blattchlorophyllgehalte (Abb. 71 rechts oben) und Einzelbaumblattflächen (Abb. 71 links unten) nur schwer spektral trennbar. Eine Mittelstellung nimmt der Blattwassergehalt ein (Abb. 71 rechts unten), der zumindest in einzelnen Wellenlängenbereichen des mIR noch eine gewisse spektrale Trennbarkeit signalisiert.

Validierung

Neben einer reinen Sensitivitätsanalyse war es von Interesse, INFORM anhand von geeigneten Referenzmessungen zu verifizieren. Um die Simulationsgenauigkeit von INFORM bei bekannten Eingabeparametern zu untersuchen, wurde auf eigene Bodenerhebungen und einen DAIS-Flugstreifen des Jahres 1998 aus dem südfranzösischen Languedoc zurückgegriffen, bevor das Modell auf erst kürzlich über Forstbeständen des Reviers Morbach (Hunsrück) aufgenommenen Hyperspektraldaten angewendet werden soll.

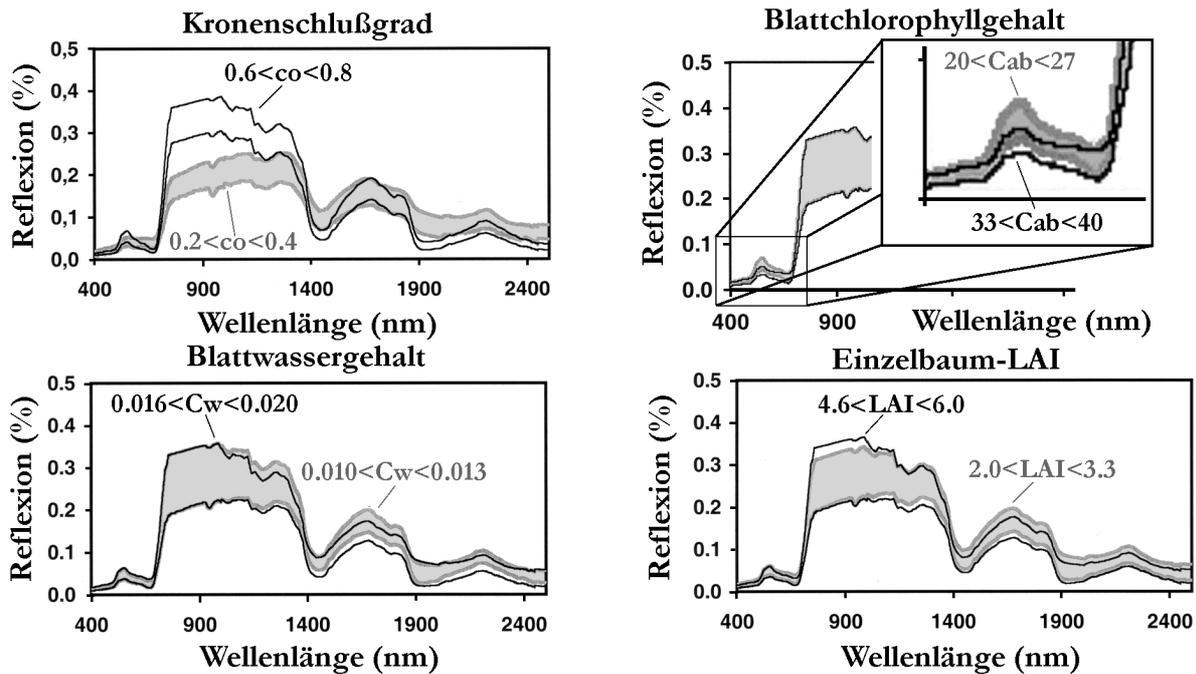


Abb. 71: Mit Hilfe eines Zufallsgenerators simulierte INFORM Spektren zur Untersuchung der Sensitivität der Forstreflexion bei gleichzeitiger Variation mehrerer Modellparameter. Jeweils grau dargestellt sind die Mittelwerte \pm Standardabweichungen im oberen 33%-Perzentilbereich, bzw. im unteren Perzentilbereich (weiß) bei Selektion jeweils eines Modellparameters. Die dem Zufallsgenerator zugewiesenen Wertebereich der einzelnen unabhängigen Modellparameter sind: $0.2 \leq co \leq 0.8$; $20 \leq Cab \leq 40$; $0.01 \leq Cw \leq 0.02$ und $2 \leq LAI \leq 6$

Abbildung 72 zeigt ein über der Testsite Gabriac gemessenes DAIS-Spektrum nach atmosphärischer Korrektur („empirical-line“ Verfahren), gemeinsam mit einer Simulation des INFORM-Modells – parametrisiert mit eigens zu diesem Zwecke am Boden erhobenen Messgrößen (i.e., Bestockungsdichten, LAI, Blattchlorophyll- und -wassergehalte). Die gute Übereinstimmung zwischen beiden Spektren zeigt, das INFORM bei bekannten Parameterwerten eine gute Simulation des forstlichen Reflexionsverhalten ermöglicht.

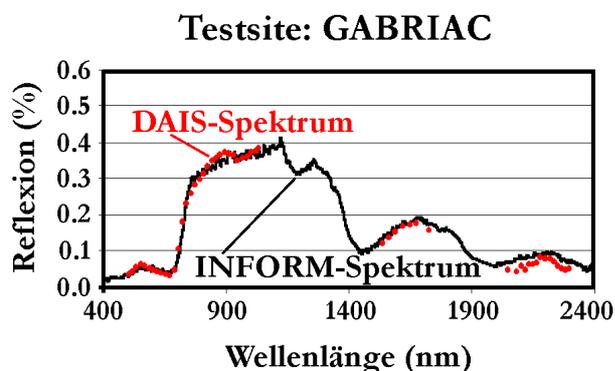


Abb. 72: Vergleich zwischen einem gemessenen DAIS-Spektrum und korrespondierender INFORM-Simulation mit am Boden gemessenen Parametern als Input für die Testsite Gabriac

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, wie gut aus INFORM invertierte Bestockungsdichten und Gesamt-LAI ($LAI \times co$) mit am Boden gemessenen Referenzen übereinstimmen (Abb. 73). Es wurde wiederum auf den DAIS-Flugstreifen des Jahres 1998 zurückgegriffen. Die Inversion selbst erfolgte unter Zuhilfenahme eines numerischen Minimierungsverfahrens (Newton-Marquard) in der Softwareumgebung von MATLAB.

Abbildung 73 zeigt, dass gemessene und geschätzte Bestockungsdichten auch in ihrer absoluten Höhe sehr gut übereinstimmen ($r^2=0.91$; Nobs=8). Weniger gut, aber immer noch zufriedenstellend genau, wird der Gesamt-LAI der acht untersuchten Referenzbestände geschätzt ($r^2=0.57$) (Abb-4b). Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch die bodengestützten LAI-Messungen (LiCOR Plant Canopy Analyzer; LAI-2000) mit einer nicht unerheblichen Ungenauigkeit behaftet sind. Dies gilt im besonderen Maße für Waldbestände (FASSNACHT et al., 1994; STENBERG, 1996; CHEN, 1996; VAN GARDINGEN et al., 1999; WELLES, 1990). Die jeweiligen typischen Unsicherheitsbereiche der Bodenmessungen sind grau hinterlegt.

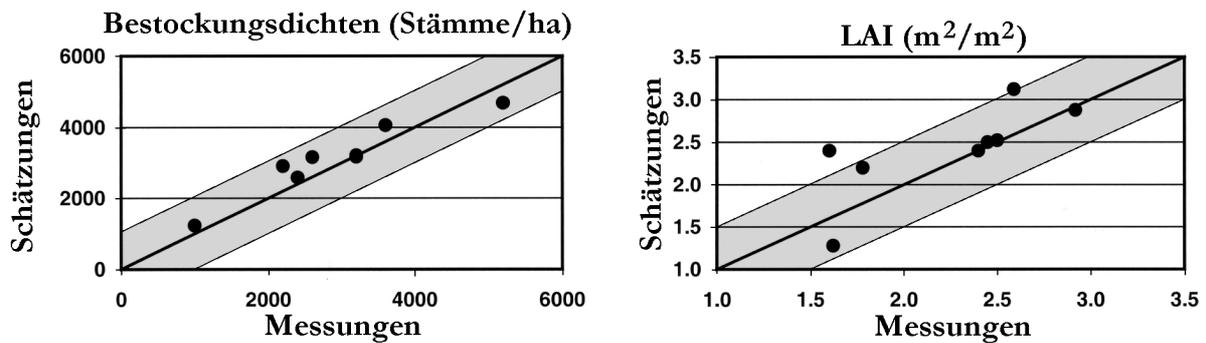


Abb. 73: INFORM-Inversionen von DAIS-Spektren (Languedoc, 1998) im Vergleich zu zeitgleich erhobenen Bodenmessungen. Grau unterlegt sind die jeweiligen Unsicherheitsbereiche der Referenzmessungen: ± 1000 (D) & ± 0.5 (LAI)

INFORM simuliert nicht nur die spektrale, sondern auch die multi-direktionelle Reflexion. Diese ist damit ebenfalls einer Verifizierung zugänglich. Als Referenz wurde auf publizierte Werte von DEERING et al. (1999) zurückgegriffen (Abb. 74 links). Die korrespondierenden Simulationen des INFORM-Modells sind im rechten Teil der Abbildung 74 dargestellt, wobei aus der Originalpublikation nicht alle Größen entnommen werden konnten, die für eine vollständige Parametrisierung von INFORM notwendig gewesen wären.

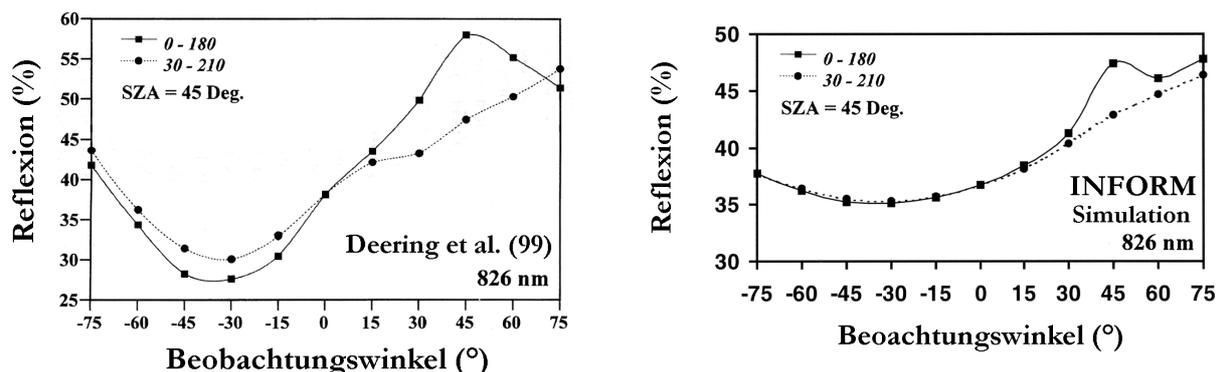


Abb. 74: Links: multi-direktionelle Reflexionsmessungen im nIR über einem Espenbestand mit starkem Haselnuss-Unterwuchs (DEERING et al., 1999) in 2 Azimutebenen: 0-180° und 30-210°. Rechts: Simulationsergebnisse des INFORM-Modells in der gleichen Messgeometrie

Im Vergleich der beiden Teil-Abbildungen sind die folgenden Charakteristika festzuhalten, die die Qualität des INFORM-Modells untermauern:

- der Hot-Spot in der ‚principle plane‘ wird in Lage, Stärke und Breite korrekt simuliert

- INFORM simuliert korrekt das völlige Fehlen des Hot-Spots, in einer Azimut-Ebene nur 30° von der ‚principle plane‘ entfernt
- die INFORM-Simulation weist in Übereinstimmung mit den Messungen ein Minimum der Reflexion bei 30° im Gegenlichtbereich auf
- ausgehend vom Reflexionsminimum bei -30° gibt die INFORM-Simulation korrekt den Reflexionsanstieg zu beiden Seiten des Minimums wieder.

Abgesehen vom absoluten Wertebereich und der reduzierten Dynamik weist die INFORM-Simulation zwei signifikante Abweichungen von den Messungen auf: (1) der Reflexionsabfall nach Überschreitung des Hot-Spots wird nicht korrekt simuliert, und (2) die im Gegenlichtbereich beobachtete Reflexionserhöhung, durch die um 30° gedrehten Azimut-Ebene, fällt zu schwach aus. Zur Aufklärung dieser Abweichungen sind weitere Untersuchungen notwendig.

Bewertung

Es konnte gezeigt werden, dass INFORM sowohl das spektrale als auch das bi-direktionelle Reflexionsverhalten von Waldbeständen gut wiedergibt. Eine Inversion von DAIS-Spektren erbrachte darüber hinaus eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und invertierten Bestockungsdichten ($r^2=0.91$) und eine zufriedenstellende Übereinstimmung bezüglich der Gesamt-LAI's ($r^2=0.57$).

Das INFORM-Modell weist darüber hinaus einige Charakteristika auf, die für seinen Einsatz sprechen:

- durch den modularen Aufbau können einzelne Submodelle bei Bedarf durch verbesserte bzw. konkurrierende Parametrisierungen ersetzt werden
- sämtliche Modellparameter haben eine exakte bio-physikalische Bedeutung und sind damit einer direkten Messung bzw. Verifizierung zugänglich. Entsprechende Studien zur fernerkundlichen Bestimmung von Chlorophyll- und -wassergehalten auf der Basis von DAIS bzw. HyMAP-Spektren sind im Gange
- INFORM ermöglicht die Inversion von beliebigen multi- und hyperspektralen Bilddatensätzen, solange die Spektralkanäle in den Wellenlängenbereich zwischen 400 und 2500 nm fallen. Dabei können nicht nur Nadiraufnahmen ausgewertet werden, sondern auch multidirektionelle Aufnahmen bzw. eine Kombination aus beiden. Die Inversion multidirektioneller Aufnahmen wird in naher Zukunft angestrebt
- INFORM eignet sich hervorragend für Sensordesignstudien. Die Frage, welche Spektralkanäle und/oder Aufnahmerichtungen für forstliche Fragestellungen besonders geeignet sind, lassen sich insbesondere dann beantworten, wenn INFORM mit entsprechenden Sensor- (zur Inkorporation spektral variierender Signal-Rausch-Verhältnisse) und Atmosphärenmodelle gekoppelt wird. Entsprechende Studien sind im Gange.

7.4 Satellitendaten als Unterstützung der Forsteinrichtung

Die Satellitenfernerkundung ist in der Lage, sowohl flächenbezogene als auch aktuelle Informationen von der Erdoberfläche bereitzustellen. Somit erscheint der Einsatz von Satellitendaten als prinzipiell besonders geeignete Methode für forstliche Inventarisierungszwecke. Die hier vorgelegte Teilstudie zielt darauf ab, forstliche Bestandsparameter aus Landsat-5 Thematic Mapper-Daten abzuleiten. Dabei wird folgende Vorgehensweise gewählt:

1. Im Rahmen einer optimierten Vorverarbeitung (Kap. 6) wird durch entsprechende Korrekturverfahren (Atmosphären- und Reliefkorrektur) der Einfluss bestandsexterner Faktoren auf die Spektralsignatur der zu untersuchenden Waldbestände minimiert. Durch die genannten radiometrischen Korrekturen soll zudem die direkte Vergleichbarkeit von Satellitenszenen unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte gewährleistet werden.
2. Bei der Interpretation werden vorliegende Forsteinrichtungsdaten als Zusatzinformationen berücksichtigt, indem sie über ein Geographisches Informationssystem (GIS) mit den Landsat-5 TM-Daten kombiniert werden und somit in direkt abrufbarer Form zur Verfügung stehen.

Als Zielsetzung kann im Detail formuliert werden:

1. eine möglichst exakte Beschreibung der Bestockungsverhältnisse des Untersuchungsgebietes. Insbesondere soll aufgezeigt werden, inwiefern Forsteinrichtungsdaten, deren räumliche Auflösung durch die Größe der Befundeinheiten vorgegeben ist, durch eine satellitenbasierte Bestandsbeschreibung ergänzt werden können.
2. Nachweis und Interpretation von Veränderungen der Bestockungsverhältnisse durch die Auswertung von Satellitenszenen unterschiedlicher Aufnahmejahre. Aus der Multitemporalauswertung („Change Detection“) lassen sich Schlussfolgerungen ziehen, inwieweit Satellitendaten zur Aktualisierung von Forsteinrichtungsdaten eingesetzt werden können.

Als Untersuchungsgebiet werden drei Forstreviere im Staatsforst Morbach (Rheinland-Pfalz, westlicher Hunsrück) ausgewählt, die aufgrund ihrer Bestockungsverhältnisse (Nebeneinander verschiedener Bestandstypen, bedeutender Anteil von Fichtenreinbeständen mit hohen Schädigungsgraden) für die geplanten Auswertungen besonders geeignet erscheinen. Datengrundlage liefern zwei Landsat-5 TM-Szenen vom 15.7.1990 und vom 27.6.1995. Die zeitliche Differenz zwischen den Aufnahmezeitpunkten ermöglicht es, innerhalb der Schadentwicklung der erfassten Fichtenreinbestände zwei unterschiedliche Phasen (Höhepunkt der Schädigung mit starken Vergilbungerscheinungen 1990, teilweise Revitalisierung 1995) auswerten und vergleichen zu können.

7.4.1 Das Untersuchungsgebiet im Satellitenbild. Drei der zur Verfügung stehenden TM-Kanäle (TM1-TM5, TM7) können am Bildschirm farbig übereinandergespielt werden, indem jedem Kanal eine der drei Farbkanonen (rot, grün, blau; RGB) zugeordnet wird. Werden ein oder mehrere Kanäle des nahen bzw. mittleren Infrarot zur Bilddarstellung benutzt (und mit einer der drei Farbkomponenten eingefärbt), entstehen sogenannte Falschfarbenkomposite. TM5 und insbesondere TM4 besitzen bezüglich unterschiedlicher forstlicher Bestandstypen einen hohen Dynamikbereich (vgl. Abb. 75) und sollten daher bei der Bilddarstellung berücksichtigt werden; TM7 hingegen weist einen geringen Dynamikbereich auf und korreliert in hohem Maß mit TM5.

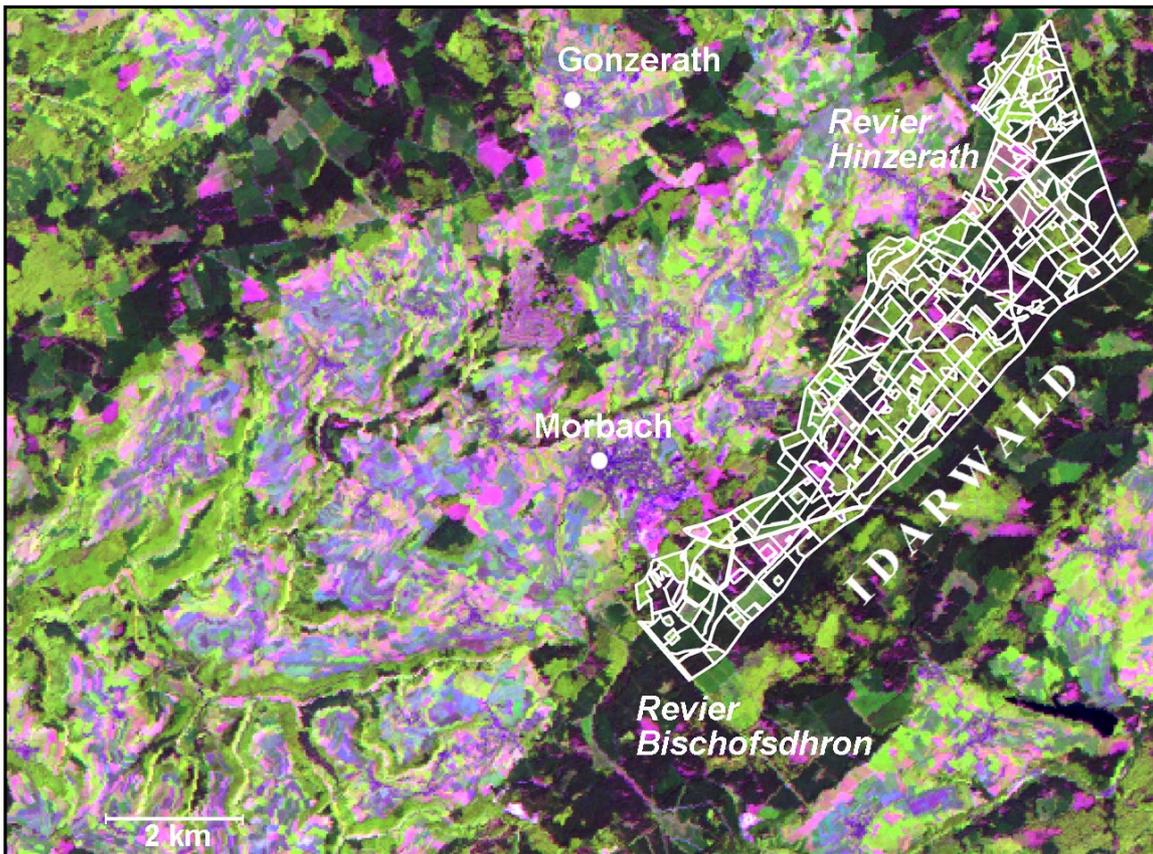


Abb. 75: Ausschnitt der Landsat-TM-Szene vom 15.07.1990 mit den Forstrevieren Hinzerath und Bischofsdhron

Durch eine RGB-Darstellung der 5,4,3-Kanalkombination wird erreicht, dass Vegetation mit ihrer typischen hohen Reflexion im nIR in grünen Farbtönen wiedergegeben wird. Deutlich heben sich im dargestellten Ausschnitt der '90er-Szene die bewaldeten Härtlingsrücken des Idar- und Haardtwaldes als geschlossen wirkende naturräumliche Einheiten von ihrer Umgebung ab. Der stärkere Zerschneidungsgrad der westlichen Hunsrückhochfläche wird durch die auffallenden bewaldeten Talhänge der Dhron und ihrer Nebenflüsse augenscheinlich. Innerhalb der bewaldeten Areale wird Nadelwald in dunklen Grüntönen wiedergegeben. Die typischen hellen Grüntöne des Laubwaldes ähneln dem Grün einzelner landwirtschaftlich genutzter Flächen (insbesondere Grünlandarealen); für die '95er-Szene ergeben sich demnach stärkere Überschneidungen Laubwald-Landwirtschaftliche Nutzfläche (LNF) als in der '90er-Szene. Blößen und zum Teil auch Kulturen, deren Reflexionsverhalten stark vom durchscheinenden Boden bestimmt wird, fallen durch rötliche Farbtöne auf und ähneln somit den rötlich wiedergegebenen Teilen der LNF. Die Interpretation der Holzbodenfläche in den drei Untersuchungsrevieren kann GIS-gestützt erfolgen, da für jedes Polygon der Waldeinteilung die ins GIS integrierten Bestockungsinformationen abgefragt werden können.

Über einfache GIS-Selektionen und eine statistische Auswertung der entsprechenden Polygone können die Reflexionseigenschaften bestimmter Bestandstypen ermittelt werden (Signaturanalyse). Dabei erweist es sich als problematisch, dass bei der Berechnung der Statistik der jeweils ausgewählten Teilfläche sämtliche durch den Polygonzug angeschnittenen Pixel berücksichtigt werden, wodurch vor allem bei kleinen Flächen eine relativ hohe Zahl von Mischpixeln die Spektralsignatur verfälschen kann. Aus diesem Grund werden über die Definition einer Pufferzone von -15 m (= -0,5 Pixel) (mit dem ARC/INFO-

Kommando „buffer“) neue Polygonzüge erzeugt, die es ermöglichen, eine vom Misch- bzw. Grenzpixelinfluss „bereinigte“ Spektralsignatur zu extrahieren (vgl. Tab. 8).

Tabelle 8 Auswirkungen der „Grenzpixelbereinigung“ (Grauwerte/Skalierungsfaktor 425; Mittelwerte und Standardabweichungen)

Signatur	n Pixel	TM 1	s TM1	TM 2	s TM2	TM 3	s TM3	TM 4	s TM4	TM 5	s TM5	TM 7	s TM7
Fichte, alle Reviere, >20-40Jahre													
unbereinigt	705	10,4	2,6	18,5	3,8	13,4	4,2	104,2	22,8	40,6	14,6	17,8	8,2
bereinigt	499	10,3	2,3	18,6	3,7	13,2	3,9	102,7	19,8	38,6	12,9	16,7	7,3
Fichte, alle Reviere, >40-60 Jahre													
unbereinigt	4022	8,7	2,1	15,0	3,0	10,6	3,2	78,7	19,2	29,5	11,5	12,9	6,1
bereinigt	3398	8,5	1,8	14,5	2,4	10,2	2,6	75,5	14,7	27,5	9,0	11,9	5,0
Fichte Einzelbestand, 86 Jahre													
unbereinigt	182	7,7	1,5	13,5	2,1	9,3	1,8	75,4	30,5	29,6	13,3	13,4	6,1
bereinigt	151	7,5	1,4	13,2	1,8	9,1	1,6	69,4	24,2	26,4	9,1	11,9	4,5
Fichte Einzelbestand, 95 Jahre													
unbereinigt	37	7,8	2,2	14,9	2,1	12,2	2,6	68,5	24,4	35,4	13,7	16,9	7,5
bereinigt	25	6,7	1,3	13,9	1,2	11,0	1,5	59,0	12,4	27,8	7,0	13,7	5,5

Besonders im TM4 und TM5 haben sich die Mittelwerte durch die Bereinigung verändert (durch wegfallende Mischpixel mit Anteilen höher reflektierender Oberflächen haben sich insbesondere bei den beiden Fichten-Altholz-Einzelbeständen - als besonders niedrig reflektierenden Forstobjekten - die Mittelwerte deutlich verringert); die Standardabweichungen sind zum Teil erheblich kleiner geworden. Die Ergebnisse einer mit den bereinigten Polygonzügen durchgeführten Signaturanalyse (mit sehr breit gefassten Klassen - z.B. werden alle Nadel-Reinbestände älter als 20 Jahre selektiert und dann statistisch zu einer Klasse zusammengefasst) sind in Abbildung 76 wiedergegeben; kanalweise Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 9 dokumentiert.

Aufgetragen sind die kanalweisen Mittelwerte und die Standardabweichungen in TM4, TM5

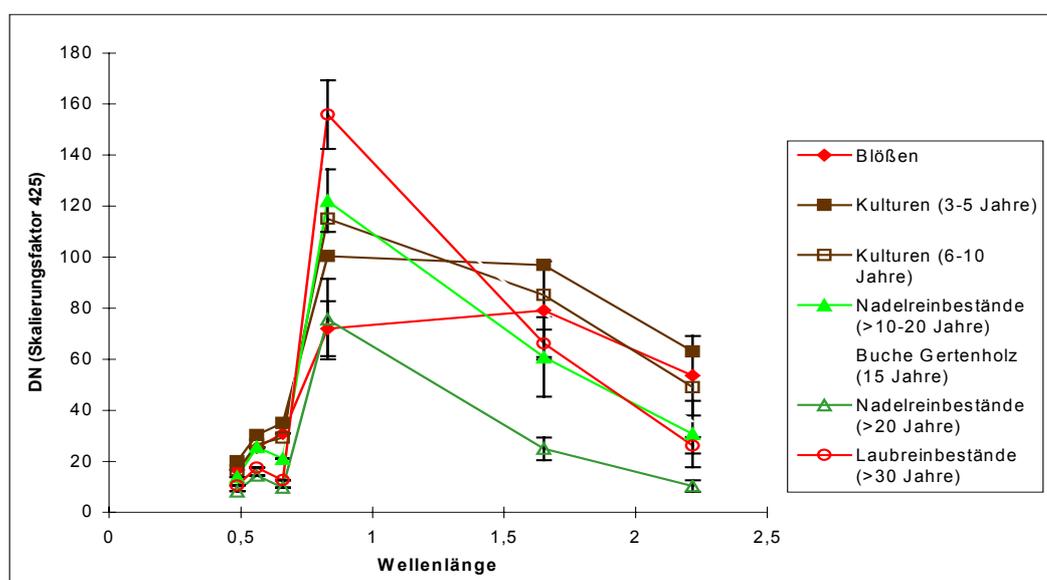


Abb. 76: Signaturanalyse zur Waldmaske

und TM7 für die Objektklassen Blößen, Nadelreinbestände >10-20 Jahre, Nadelreinbestände > 20 Jahre und Laubreinbestände

Tabelle 9 Grauwerte verschiedener Bestandstypen in den TM-Kanälen 1-5,7 (Mittelwerte und Standardabweichungen; Skalierungsfaktor 425)

Bestockung	TM1 s TM1	TM2 s TM2	TM3 s TM3	TM4 s TM4	TM5 s TM5	TM7 s TM7
Blößen	16,8 3,7	25,3 5,2	31,0 9,2	72,0 10,7	79,1 19,2	53,5 15,6
Kulturen (3-5 Jahre)	20,1 4,1	30,2 5,1	35,1 7,8	100,4 19,7	96,9 14,3	63,1 14,8
Kulturen (6-10 Jahre)	16,6 3,9	26,6 4,5	29,2 6,4	115,1 14,4	85,2 11,4	49,0 13,0
Nadelreinbestände (>10-20 Jahre)	13,8 2,9	25,6 3,1	21,0 6,0	122,1 12,3	60,9 15,6	30,7 13,0
Nadelreinbestände (>20 Jahre)	8,3 1,6	14,4 2,1	9,6 1,7	75,8 15,7	24,9 4,4	10,3 2,3
Laubreinbestände (>30 Jahre)	10,5 1,5	17,6 1,7	12,6 1,6	155,9 13,5	66,1 5,4	26,3 3,2

Die Signaturanalyse belegt die bei der visuellen Interpretation deutlich gewordenen Reflexionsunterschiede der einzelnen Objektklassen. Die Spektralkurve von Blößen weist starke Ähnlichkeiten zu der typischen Boden-Spektralkurve auf, die Reflexionswerte im TM5 liegen über den TM4-Werten, für Vegetation hingegen ist der nIR-„peak“ typisch. Laubwald reflektiert vor allem im TM4 wesentlich höher als Nadelwald; junge Nadelreinbestände weisen höhere Reflexionswerte als ältere auf - sie werden entsprechend in Abbildung 75 mit etwas helleren Grüntönen wiedergegeben. Eine Zwischenstellung zwischen Boden- und Vegetationssignatur ist für Kulturen charakteristisch.

7.4.2 Bearbeitungsschritte der Multispektralklassifizierung. Eine der zentralen Zielsetzungen der vorliegenden Untersuchung ist es, die Bestockungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet sowohl für 1990 als auch für 1995 über die Auswertung von Satellitendaten möglichst exakt zu beschreiben. Für die '90er-Szene wird dazu das Verfahren der Multispektralklassifikation gewählt; Veränderungen der Bestockungsverhältnisse im Zeitraum von 1990 bis 1995 können durch Anwendung des „Bildifferenzverfahrens“ erfasst und - ausgehend von den Klassifizierungsergebnissen der '90er-Szene - interpretiert werden.

Prinzip der Multispektralklassifikation / Maximum-Likelihood-Klassifikator

Durch Klassifikationen werden Objekte anhand spezifischer Merkmalsausprägungen zu Ähnlichkeitsklassen zusammengefasst. Im Fall digitaler Fernerkundungsdatensätze erfolgt die Klassenzuordnung der Objekte (= Pixel) im Rahmen rechnergestützter Klassifikationen über das Objektmerkmal 'Spektralsignatur'. Durch eine adäquate Klassenbildung (z.B. Waldklassen oder Waldschadensklassen) besteht die Möglichkeit, thematische Informationen der Fernerkundungsdaten auf das für einen speziellen Anwendungszweck Wesentliche zu konzentrieren. Somit stellen Klassifizierungsergebnisse zum Beispiel für GIS-gestützte Auswertungen optimierte thematische Informationsebenen dar.

Bei „überwachten“ Klassifizierungsstrategien werden Stichproben (Trainingsgebiete) mit bekannten Objekten benutzt, um Objektklassen zu definieren, d.h. ihre Lage im n-dimensionalen spektralen Merkmalsraum (n = Zahl der Spektralkanäle) zu ermitteln. Für die Qualität einer Überwachten Klassifikation ist es daher entscheidend, inwieweit die spektralen Eigenschaften der Objektklassen durch die ausgewählten Stichproben tatsächlich approximiert werden. Im Klassifikationsprozess findet eine Überprüfung statt, ob Bildelemente in ihrer spektralen Charakteristik einer der Stichprobe gleichen und somit der durch sie definierten Objektklasse zugeordnet werden können. Die Zuordnung erfolgt über die Anwendung von Klassifikationsalgorithmen (HABERÄCKER 1987, S.231-237).

Als Klassifikationsverfahren wird die Maximum-Likelihood-Methode verwandt, die - unter Beachtung bestimmter statistischer Voraussetzungen (s.u.) - als die genaueste der Überwachten Klassifizierungsmethoden angesehen wird (ERDAS 1994, S.271). Bei diesem Verfahren werden die Objektklassen statistisch als (Wahrscheinlichkeits-) Dichtefunktionen beschrieben. Für die klassenspezifische Wahrscheinlichkeits-Verteilungsdichte (im Merkmalsraum) wird angenommen, dass sie mit Hilfe von n-dimensionalen Gauß'schen Normalverteilungen angenähert werden kann; zur Approximierung müssen entsprechend Mittelwertvektoren und Kovarianzmatritzen der Trainingsgebiete berechnet werden. Mittelwertvektoren bestimmen die Lage, die Varianzen Form und Ausrichtung der Stichproben-Cluster im Merkmalsraum. Zusätzlich gehen in die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen a-priori-Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Klassen ein. Sie können zum Beispiel aus der visuellen Abschätzung der prozentualen Anteile der Objektklassen an der Untersuchungsfläche abgeleitet werden. In der vorliegenden Untersuchung werden keine a-priori-Wahrscheinlichkeiten definiert, d.h. sie werden pauschal gleich 1,0 gesetzt.

Im Klassifikationsprozess werden für jedes Bildelement (= Merkmalsvektor) die statistischen Zuordnungswahrscheinlichkeiten für die einzelnen Klassen berechnet. Bei gleichgesetzten a-priori-Wahrscheinlichkeiten ist der Mahalanobis-Abstand der Merkmalsvektoren von den Klassenmittelvektoren, der sich aus Mittelwertvektor und Kovarianzmatrix einer Klasse (s.o.) berechnet, entscheidendes Kriterium für die Klassenzuordnung: Ein Pixel wird letztlich der Klasse zugeordnet, zu der die Mahalanobis-Distanz am geringsten ist (HABERÄCKER 1987, S.259-263; ERDAS 1994, S.269-271). Die Verwendung des Maximum-Likelihood-Klassifikators setzt streng genommen eine Normalverteilung der Trainingsgebiets-Daten voraus; er gilt aber auch als robust gegenüber Grauwertverteilungen, die stärker von der Normalverteilung abweichen. Bei der Verwendung von Trainingsgebieten mit zumindest unimodaler Verteilung sind demnach keine wesentlichen Verschlechterungen der Klassifizierungsgenauigkeiten zu erwarten (SWAIN & DAVIS 1978, nach COENRADIE 1992, S.122).

Auswahl der Trainingsgebiete

Bei der Definition von Trainingsgebieten ist - zusätzlich zur notwendigen Erfüllung statistischer Anforderungen - darauf zu achten, dass die gewählten Trainingsgebiete repräsentativ für ihre jeweilige Klasse sind und der spektrale Merkmalsraum vollständig durch sie abgedeckt wird (d.h. alle vorkommenden spektralen Oberflächen durch die definierten Trainingsgebiete beschrieben werden, um Fehlklassifikationen vermeiden zu können). Die Integration der Forsteinrichtungsdaten in ein GIS stellt bei der Trainingsgebiets-Definition eine wesentliche Erleichterung dar. Die Lage der Trainingsgebiete im Merkmalsraum kann über ihre Ellipsenbilder in Scattergrammen, in denen die „File values“ aller Pixel kanalweise gegeneinander aufgetragen werden, überprüft werden.

Stratifizierung

Identische Bestandstypen können aufgrund unterschiedlicher Standortverhältnisse (z.B. Wasserversorgung, Geologie) oder wechselnder atmosphärischer Bedingungen in verschiedenen Teilräumen des Untersuchungsgebiets Variationen in ihrem Reflexionsverhalten aufweisen. Insbesondere „bei einer großflächigen Kartierung ist es wichtig, die regionalen Unterschiede in den Spektralsignaturen zu erfassen. Diese Unterschiede sind teilweise sehr erheblich, vor allem für die Differenzierung innerhalb des Nadelwaldes mit seinem niedrigen Reflexionsniveau“ (KEIL et al. 1989, S.201). Werden Klassifikationen mit einem „allgemeinen“ Set von Trainingsgebieten durchgeführt, das den jeweils spezifischen Reflexions-Verhältnissen nicht Rechnung trägt, kann sich die Zahl der Fehlzugeweisungen

erhöhen. Eventuelle „ortsabhängige“ Reflexionsunterschiede können berücksichtigt werden, indem das Untersuchungsgebiet in Teilräume (Straten) mit homogenen Reflexionsgegebenheiten unterteilt wird und - getrennt nach Straten - Teilklassifizierungen durchgeführt werden, die schließlich zu einem Gesamtklassifikationsergebnis zusammengefügt werden (COENRADIE 1992, S.116-117).

Für die Auswahl von Trainingsgebieten bedeutet eine Stratenbildung eine Aufwandserhöhung, da die statistischen Merkmalsräume aller Teilklassifikationen mit Stichproben abgedeckt sein müssen. Die jeweiligen Reflexionsgegebenheiten verlangen eine „stratenspezifische Zusammenstellung von Trainingsgebiet-Sets“ (COENRADIE 1992, S.117). Im Untersuchungsgebiet kommen vor allem im Bereich des Wuchsbezirks Hoch- und Idarwald Standorte stark unterschiedlicher Wasserversorgung vor (Feuchtestufen: 0-7/ vernässend-trocken; z.T. durch Stauässe und Grundwasser beeinflusste Standorte). Deshalb wird zunächst überprüft, ob diese Unterschiede eine Stratenbildung innerhalb des Wuchsbezirks notwendig machen.

Die räumliche Distanz des Reviers Horath (Wuchsbezirk Moselhunsrück) zu den Revieren Bischofsdhron und Hinzerath (Wuchsbezirk Hoch- und Idarwald) und seine andersartigen Standortbedingungen (z.T. bessere Basenversorgung) machen eine Analyse erforderlich, ob die Reviere der unterschiedlichen Wuchsbezirke in den weiteren Klassifizierungsschritten getrennt zu behandeln sind. Durch die bereits durchgeführte Reliefkorrektur erübrigt sich eine Stratifizierung in verschiedene Beleuchtungsklassen. Eine ausreichend große Stichprobe zur Überprüfung des Faktors ‘Wasserversorgung’ liefern Fichtenreinbestände der absoluten Altersklasse >40-60 Jahre bzw. >60-80 Jahre (vgl. Abb. 78 u. Tabelle 10). Diese Reinbestände können über GIS-Selektionen, in denen sowohl Standorts- als auch Bestockungskriterien berücksichtigt werden, komplett ermittelt und in die Analyse mit- einbezogen werden. Dabei werden Bestände, die das ‘Besondere Zustandsmerkmal’ „lückig“ aufweisen, wegen eventueller modifizierender Einflüsse des Kronenschlussgrades nicht berücksichtigt.

Tabelle 10 Absolute Reflexion (%) von Fichtenreinbeständen unterschiedlicher Feuchtestufe und Altersklasse (Wuchsbezirk Idarwald; Summe von Einzelbeständen, kanalweise Mittelwerte und Standardabweichungen). F 5-7: mäßig frisch-trocken; F 0-4: vernässend- ziemlich frisch

Bestockung	Pixelzahl n	TM1	s TM1	TM2	s TM2	TM3	s TM3
F 5-7; Fichte, >40-60 J. (Summe)	999	1,97	0,43	3,40	0,55	2,42	0,63
F 0-4; Fichte, >40-60 J. (Summe)	390	1,94	0,36	3,38	0,43	2,22	0,43
F 5-7; Fichte, >60-80 J. (Summe)	570	1,77	0,39	3,20	0,51	2,34	0,54
F 0-4; Fichte, >60-80 J. (Summe)	269	1,88	0,47	3,22	0,58	2,33	0,85

	Pixelzahl n	TM4	s TM4	TM5	s TM5	TM7	s TM7
F 5-7; Fichte, >40-60 J. (Summe)	999	17,34	3,41	6,70	2,07	3,00	1,12
F 0-4; Fichte, >40-60 J. (Summe)	390	17,99	2,81	6,05	1,51	2,54	0,84
F 5-7; Fichte, >60-80 J. (Summe)	570	15,15	3,81	6,46	2,04	3,02	1,07
F 0-4; Fichte, >60-80 J. (Summe)	269	16,33	3,91	6,78	2,29	3,14	1,31

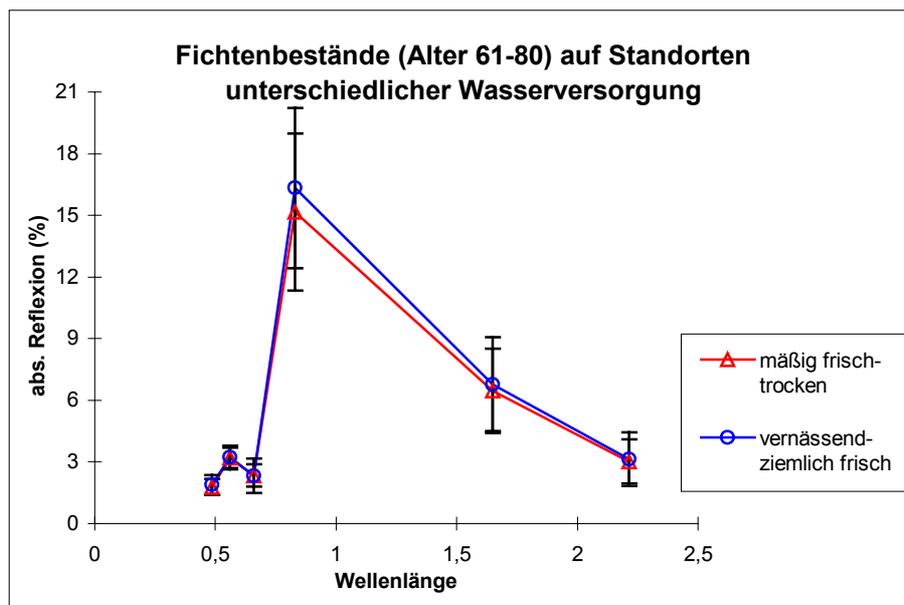
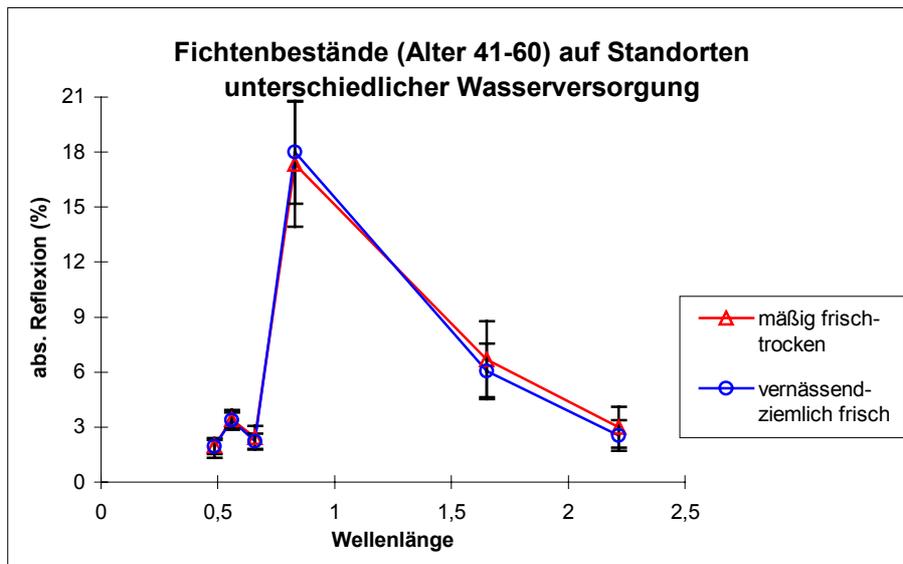


Abb. 77: Reflexionsverhalten von Fichtenreinbeständen (unterschiedliche Altersklassen) auf unterschiedlich wasserversorgten Standorten (Wuchsbezirk Idarwald)

Die Statistik sowohl der Gesamtstichprobe (Abb. 78 u. Tabelle 10) als auch der Einzelbestände lässt keine standorttypische Reflexionsveränderung erkennen. Auch im TM5 (als „Feuchteindikator“) kann keine eventuell zu vermutende Reflexionsverminderung bei hoher Wasserverfügbarkeit festgestellt werden. Während die gemittelten TM5-Reflexionswerte für die >40-60jährigen Fichtenbestände auf eine leichte Minderreflexion auf feuchten Standorten hinweisen, zeigt die Stichprobe der >60-80jährigen Bestände einen schwach ausgeprägten entgegengesetzten Trend. Bei zusätzlicher Betrachtung der Standardabweichungen wird deutlich, dass das Reflexionsverhalten gleichaltriger Fichtenreinbestände bei unterschiedlicher Wasserversorgung nahezu identisch ist (deutlich bemerkbar macht sich jedoch der altersklassenspezifische Reflexionsunterschied im TM4). Ein Vergleich des Reflexionsverhaltens von Fichtenreinbeständen der verschiedenen

Wuchsbezirke (sowohl für die Altersklasse >40-60 als auch für über 80jährige Bestände durchgeführt) ergibt ebenfalls keine auffälligen Reflexionsunterschiede (Abb. 79 und Tabelle 11).

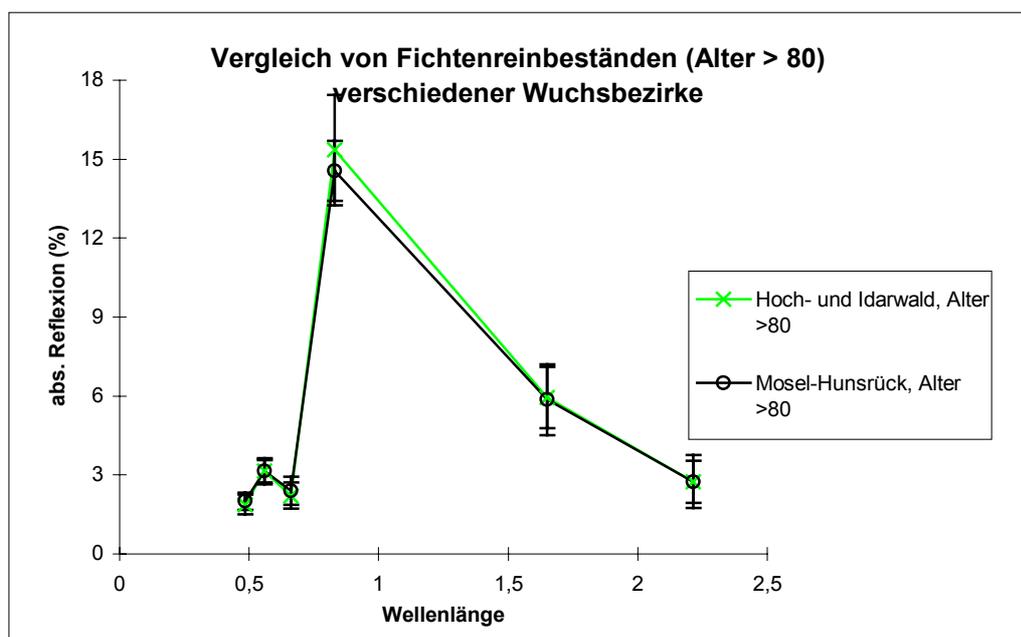
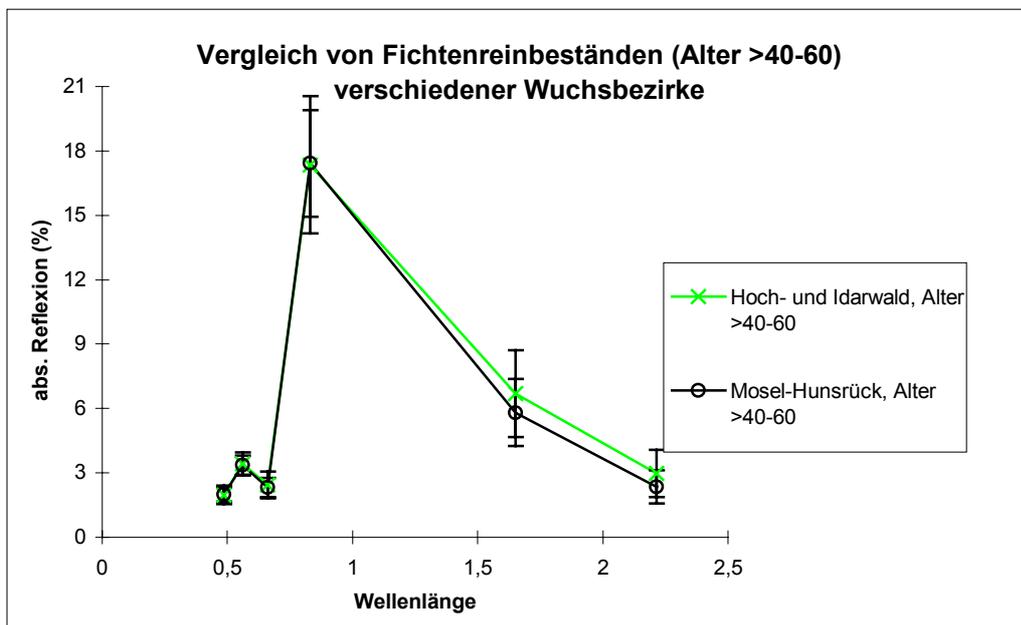


Abb. 78: Reflexionsverhalten von Fichtenreinbeständen (unterschiedliche Altersklassen) verschiedener Wuchsbezirke. (F 4-5: ziemlich-mäßig frisch)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Einflussnahme der Faktoren 'Wasserversorgung' und 'Wuchsbezirk' auf das Reflexionsverhalten für die zu untersuchende Stichprobe nicht festgestellt werden kann. Eine Unterteilung des Untersuchungsgebietes in Straten und eine damit verbundene getrennte Definition von Trainingsgebieten ist somit nicht notwendig. Es deutet sich jedoch an, dass die Altersklasse einen wesentlichen Einfluss auf die spektrale Signatur eines Bestandes hat.

Tabelle 11 Absolute Reflexion (%) von Fichtenreinbeständen unterschiedlicher Wuchsbezirke und Altersklassen (Feuchtestufen: ziemlich-mäßig frisch; Summe von Einzelbeständen, kanalweise Mittelwerte und Standardabweichungen)

Wuchsbezirk / Bestockung	Pixelzahl n	TM1	s TM1	TM2	s TM2	TM3	s TM3
Idarwald; F 4-5; Fichte, >40-60 J. (Summe)	768	1,98	0,44	3,42	0,53	2,43	0,62
Moselhunsrück; F 4-5; Fichte, >40-60 J. (Summe)	498	1,99	0,33	3,37	0,45	2,32	0,45
Idarwald; F4-5; Fichte, >80 J. (Summe)	312	1,88	0,38	3,15	0,50	2,22	0,51
Moselhunsrück; F 4-5; Fichte, >80 J. (Summe)	430	2,00	0,33	3,14	0,42	2,41	0,54

	Pixelzahl n	TM4	s TM4	TM5	s TM5	TM7	s TM7
Idarwald; F 4-5; Fichte, >40-60 J. (Summe)	768	17,35	3,19	6,69	2,03	2,97	1,10
Moselhunsrück; F 4-5; Fichte, >40-60 J. (Summe)	498	17,42	2,49	5,81	1,57	2,35	0,76
Idarwald; F4-5; Fichte, >80 J. (Summe)	312	15,34	2,10	5,94	1,16	2,75	0,80
Moselhunsrück; F 4-5; Fichte, >80 J. (Summe)	430	14,54	1,14	5,86	1,35	2,75	1,01

Trainingsgebietsparameter

Ziel bei der Auswahl von Trainingsgebieten ist es, die Bestockungsverhältnisse des Untersuchungsgebiets in ihrer Gesamtheit durch repräsentative Stichproben möglichst umfassend zu beschreiben. Nach COENRADIE (1992, S.63) sind dabei sowohl Gelände-/Standortparameter als auch Bestandsparameter zu berücksichtigen. Aufgrund der durchgeführten Topographiekorrektur und der Ergebnisse der Signaturanalyse zur Bewertung standörtlicher Einflussfaktoren können Geländeparameter bei der Definition der Trainingsgebiete vernachlässigt werden. Als Bestandsparameter werden berücksichtigt:

- Baumart
- Altersklasse
- Mischungsverhältnisse bzw. Mischungsform
- Kronenschluss- bzw. Bestockungsgrad

Sowohl Baumartenzusammensetzung als auch (absolute) Altersklassen (Flächendurchschnittsalter) stehen als GIS-integrierte Zusatzinformationen der Forsteinrichtung zur Verfügung. GIS-Selektionen ermöglichen es daher, zumindest für die dominierenden Baumarten Fichte und Buche, mit Einschränkung auch für Eiche, die Gesamtheit der natürlichen Altersklassen⁷ abzudecken. Dabei werden Bestände, für die die GIS-gestützte Abfrage der Bestockungsdaten eine große Altersspanne ergibt, nicht berücksichtigt. Reinbestände (über 90% der Fläche werden durch die Hauptwirtschaftsbaumart eingenommen) oder Bestände, innerhalb derer eine Baumart/Altersklasse zumindest wesentliche Anteile besitzt, werden bevorzugt zur Definition von Trainingsgebieten herangezogen. Im letzteren Fall wird als zusätzliche Informationsquelle die Orthofoto-Forstgrundkarte benutzt, um die relevanten Teilflächen innerhalb der Bestände abgrenzen zu können.

Bei der Definition von Trainingsgebieten über GIS-selektierte Reinbestände bzw. Teilflächen wird darauf geachtet, dass keine „überschießende Fläche“ (Jungwuchs, Unterstand, Überhälter) anderer Baumarten vorhanden ist, um ein eventuelles „Verwischen“ der Spektralsignaturen zu vermeiden. Als relativ problematisch erweist sich die Suche nach geeigneten Trainingsgebieten für Mischwald (Laub-, Nadel- bzw. Laub-/Nadelmischwald).

⁷ Natürliche Altersklassen (Kultur, Dickung/Gertenholz, Stangenholz, Baumholz, Altholz) werden über den jeweiligen Entwicklungszustand der bestandsbildenden Baumart (Bestandsschlussgrad, Stammstärke/Brusthöhendurchmesser) definiert, durch den auch die Bestandsreflexion weitgehend bestimmt wird. Im Rahmen von Multispektralklassifikationen können somit auch nur natürliche Altersklassen getrennt werden, die sich jedoch mit „ungefähren“ absoluten Altersklassen in Einklang bringen lassen.

Als potentielle Mischungsformen können einzelbaum-, trupp-, gruppen-, horstweise und kleinflächige Mischung⁸ auftreten. „Homogene“ Mischwaldpixel setzen jeweils gleiche prozentuale Anteile der beteiligten Baumarten bei möglichst einzelbaumweiser (mit Einschränkung auch truppweiser Mischung) voraus. Bereits bei gruppenweiser Mischung z.B. von Laub- und Nadelhölzern ist neben Einzelpixeln mit Mischsignaturen auch mit dem Vorkommen reiner Laub- bzw. Nadelwaldpixel zu rechnen.

Im Untersuchungsgebiet treten geeignete Mischungsverhältnisse allenfalls kleinflächig auf. Anhand der Forsteinrichtungsdaten (Merkmal 'Mischungsform' in der Baumartendatei) werden zunächst Bestände gesucht, in denen einzelbaumweise Mischung flächenmäßig eine Rolle spielt. Mit den Orthofotokarten als zusätzlicher Informationsquelle können schließlich einige (in der Regel jedoch nur relativ wenige Pixel umfassende) Mischwald-Trainingsgebiete abgegrenzt werden.

Für den Bestockungsgrad⁹ der Einzelflächen (ab Altersklasse Stangenholz) weist die Baumartendatei der Forsteinrichtung eine nur geringe Variationsbreite aus (überwiegend 0,8-1,1); Bestockungsgrade unter 0,8, die auf eine Bestandslückigkeit hinweisen, kommen kaum vor. Entsprechend wird die Bestockungsdichte nicht als charakterisierender Trainingsgebiets-Parameter benutzt. Bei der Auswahl der Trainingsgebiete werden jedoch bevorzugt Flächen mit einem Bestockungsgrad von 0,9-1,1 berücksichtigt.

Aufgrund des Ausmaßes der „Neuartigen Waldschäden“ im Untersuchungsgebiet ist zu überprüfen, inwiefern unterschiedliche Schädigungsgrade bei der Definition von Trainingsgebieten zu berücksichtigen sind. Da die Forsteinrichtungsdaten keine detaillierten Aussagen über „Neuartige Waldschäden“ enthalten, werden die Ergebnisse der im Auftrag der FVA Rheinland-Pfalz durchgeführten CIR-luftbildgestützten Bestandesschadstufen-Kartierung (Grundlage: Flächenflug 1990) für eine Signaturanalyse un- bzw. schwach geschädigter Bestände (BSSt 0) und stark geschädigter Bestände (BSSt 2) der Untersuchungsreviere genutzt (Abb. 79 und Tabelle 12). Unter der Annahme, dass die Fichtenreinbestände des Reviers Horath mehrheitlich allenfalls schwach geschädigt sind (BSSt 0) und somit als ungeschädigte Referenz zu den Fichtenbeständen der Kammlagen des Idarwaldes genutzt werden können, bieten die Altersklassen >60-80 Jahre und >80-100 Jahre ausreichend große Stichproben zur Signaturanalyse.

Eine Schadsignatur, wie sie für Hauptschadensgebiete dokumentiert werden konnte (Zunahme der Reflexion im TM5 bei gleichzeitiger Abnahme im TM4), lässt sich mit der gewählten Stichprobe nicht feststellen. Auch eine isolierte Betrachtung des für Nadelverlust potentiell besonders sensiblen TM4 oder der Kanäle im sichtbaren Bereich (als eventuelle Vergilbungsindikatoren) lässt keine eindeutige Separierung der Einflussgröße 'Schädigung' zu (vgl. auch Ergebnisse der Reflexionsmodellierung, Kap. 7.3). Aufgrund dieser Ergebnisse bleibt der Faktor 'Waldschäden' für die Definition von Trainingsgebieten im Rahmen der Bestandstypen-Klassifizierung unberücksichtigt.

⁸ Trupp: 50 m^2; Gruppe: $51\text{-}500\text{ m}^2$; Horst: $501\text{-}5000\text{ m}^2$; Kleinfläche: $>5000\text{ m}^2$ (LFV R-P 1974, S.10).

⁹ Der Bestockungsgrad ist definiert als das Verhältnis der tatsächlichen Derbholzmasse oder Grundfläche je ha zur entsprechenden Ertragstafelangabe; ein Bestockungsgrad von 1,0 ist gleichzusetzen mit einer hinsichtlich des Baumertrages optimalen Baumdichte. Bestockungsgrade korrelieren stark - jeweils modifiziert durch Baumart und Bestandsbehandlung - mit Kronenschlussgraden (= Verhältnis der Kronenprojektionsfläche zur Bestandsfläche) (KRAMER 1976, S.16; HUSS 1984, S.279).

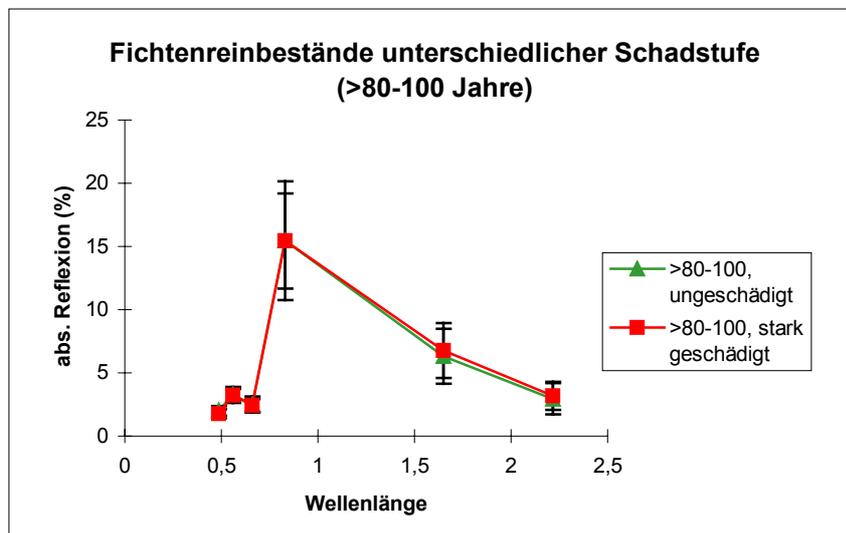
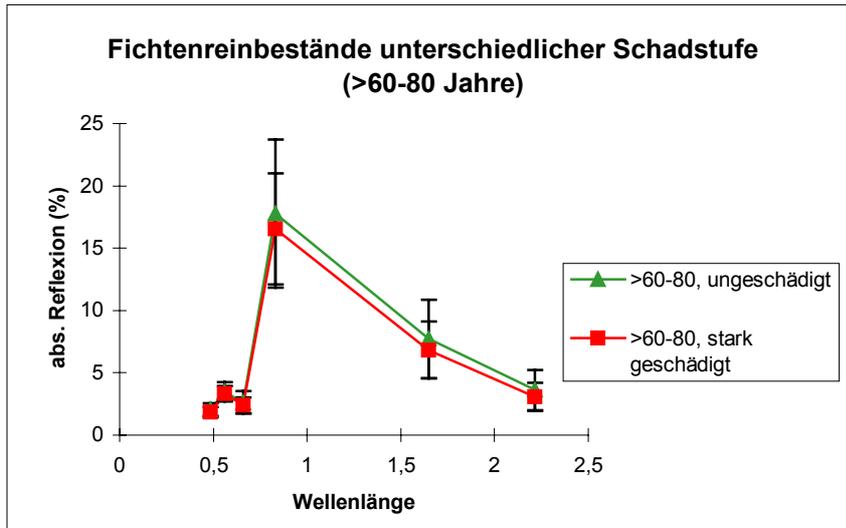


Abb. 79: Reflexionsverhalten von unterschiedlich stark geschädigten Fichtenreinbeständen (unterschiedliche Altersklassen)

Tabelle 12 Absolute Reflexion (%) nicht bzw. schwach und stark geschädigter Fichtenreinbestände unterschiedlicher Altersklassen (Summe von Einzelbeständen, kanalweise Mittelwerte und Standardabweichungen)

Bestockung	Pixel n	TM1	s TM1	TM2	s TM2	TM3	s TM3
Fichte, >60-80 J. ; un- bzw. schwach geschädigt (Summe)	366	2,05	0,51	3,49	0,76	2,62	0,89
Fichte, >60-80 J. ; stark geschädigt (Summe)	425	1,83	0,42	3,35	0,61	2,39	0,65
Fichte, >80-100 J. ; un- bzw. schwach geschädigt (Summe)	419	2,00	0,38	3,27	0,64	2,48	0,63
Fichte, >80-100 J. ; stark geschädigt (Summe)	590	1,77	0,37	3,22	0,51	2,43	0,52

	Pixel n	TM4	s TM4	TM5	s TM5	TM7	s TM7
Fichte, >60-80 J. ; un- bzw. schwach geschädigt (Summe)	366	17,77	5,94	7,72	3,15	3,61	1,62
Fichte, >60-80 J. ; stark geschädigt (Summe)	425	16,55	4,47	6,83	2,29	3,08	1,12
Fichte, >80-100 J. ; un- bzw. schwach geschädigt (Summe)	419	15,45	3,76	6,31	2,18	2,94	1,23
Fichte, >80-100 J. ; stark geschädigt (Summe)	590	15,45	4,70	6,78	2,17	3,18	1,12

Tabelle 13 Durch Trainingsgebiete definierte Bestandstypen

	Altersklasse	Baumart
Blößen		
Laubwald	Kulturen	Buche, Laubmisch (Erle, Birke, Eiche)
	Stangenholz	Buche, (Stiel- u.) Traubeneiche ¹ , Laubmisch (Buche, Eiche)
	geringes-mittleres Baumholz	Buche
	starkes Baumholz	Buche, (Stiel- u.) Traubeneiche, Laubmisch (Buche, Eiche)
	Altholz	Buche, (Stiel- u.) Traubeneiche, Laubmisch (Buche, Eiche), Birkenbrücher (z.T. aufgelichtet, andere Baumarten beigemischt)
Laub-/Nadel-Mischwald	Stangenholz	v.a. aus Fichte und Buche, z.T. auch Eiche, Erle, Birke
	Stangen- /Baumholz	
	Altholz	
Nadelwald	Kulturen	Fichte
	Dickung	Fichte, Douglasie, Tanne
	Altersklasse	Baumart
Nadelwald	Stangenholz	Fichte, Douglasie, Lärche, Nadelmisch (Fichte, Douglasie)
	Altholz	Fichte
	Baumholz	Fichte

¹ Traubeneiche im Untersuchungsgebiet dominierend

Insgesamt ließen sich mit Hilfe von GIS-Selektionen, Forsteinrichtungsdaten und Orthophotos für die folgenden Baumarten und deren natürliche Altersklassen ausreichend viele Trainingsgebiete (in der Regel ≥ 5) definieren: Für Buche/Gertenholz, Roteiche/Stangenholz, Lärche/Dickung und Douglasie/geringes Baumholz konnten jeweils nur 1-2 Trainingsgebiete gefunden werden.

Signaturanalyse

Eine detaillierte Signaturanalyse zeigt trainingsgebiets- bzw. objektklassenspezifische Reflexionswerte in den einzelnen Spektralkanälen auf und ermöglicht somit Aussagen über die spektrale Trennbarkeit einzelner Klassen. Entsprechend kann eine sinnvolle Vorabauswahl von Klassen (in diesem Fall Bestandstypen) getroffen werden, die im „nachgeschalteten“ Klassifikationsvorgang potentiell trennbar erscheinen (die endgültige Klassenfestlegung erfolgt erst nach der Klassifikations-Evaluierung, deren Ergebnis zum Beispiel eine Zusammenlegung mangelhaft getrennter Objektklassen erforderlich machen kann. Daneben ermöglicht eine Signaturanalyse eine Bewertung des Informationsgehaltes der einzelnen Spektralkanäle im Hinblick auf den jeweiligen Klassifizierungszweck. Die Ergebnisse der Signaturanalyse beziehen sich auf die in Tabelle 13 aufgelisteten „Waldklassen“, in deren statistische Beschreibung jeweils mehrere Trainingsgebiete eingehen (vgl. Tabelle 14). Eine Überprüfung der Eignung der einzelnen Trainingsgebiete für den Klassifikationsprozess erfolgt durch eine Kontingenzanalyse.

Blößen und Kulturen können in Abhängigkeit von Bodenbedeckung bzw. Bestandesschlussgrad starke Variationen in ihrem Reflexionsverhalten aufweisen diese spektrale Heterogenität macht sie zu Problemklassen bei Baumarten- bzw. Altersklassifikationen (vgl. COENRADIE 1992, S.124: „erwartungsgemäß erhöhte wechselseitige Fehlzu-

weisung zwischen jungen Kulturen und Blößen“; SCHARDT 1990, S.112-113). Im Untersuchungsgebiet sind zwar für beide Klassen relativ hohe Standardabweichungen festzustellen (vgl. Abb. 81 a und Tabelle 14; insbesondere für Blößen im TM3 und TM5), dennoch scheinen sie sowohl gegenseitig als auch als Folge ihres „bodenbeeinflussten“ Reflexionsverhaltens von anderen Waldklassen gut trennbar zu sein. Die vergleichsweise geringe Standardabweichung von Blößen im TM4, die bedeutsam ist für die Trennungsmöglichkeiten von Kulturen, ist wahrscheinlich die Folge einer relativ einheitlichen Vegetationsbedeckung, die sich wiederum durch einen gemeinsamen Entstehungszeitpunkt (Frühjahr 1990 durch Sturmwurfereignisse) erklären lässt.

Tabelle 14 Signaturanalyse für verschiedene, durch Trainingsgebiete abgesicherte Bestandstypen (absolute Reflexion in %, kanalweise Mittelwerte und Standardabweichungen)

	TG	n	TM1	sTM1	TM2	sTM2	TM3	sTM3	TM4	sTM4	TM5	sTM5	TM7	sTM7
Blößen	7	183	3,99	0,88	6,01	1,24	7,38	2,19	16,98	2,49	18,73	4,51	12,69	3,67
Kulturen	7	224	4,12	0,94	6,48	1,10	7,28	1,56	25,53	2,73	20,96	2,88	12,68	3,30
Fichte Dickung	7	157	3,01	0,47	5,75	0,81	4,41	0,76	30,05	3,08	13,81	2,12	6,57	1,41
Fichte Dickung-Stangenh.	6	165	2,44	0,37	4,27	0,54	2,96	0,46	24,26	2,84	8,00	1,73	3,22	0,89
Fichte Stangenh.	8	418	1,97	0,34	3,38	0,41	2,26	0,39	17,86	1,66	5,72	0,78	2,36	0,58
Fichte-Dougl. Stangenh.	3	132	1,96	0,35	3,35	0,39	2,29	0,41	19,76	1,39	6,67	0,80	2,75	0,71
Fi. ger.-mittl. Baumholz	9	419	1,78	0,38	3,13	0,39	2,15	0,45	14,98	1,24	5,57	0,85	2,50	0,59
Fichte starkes Baumholz	6	147	1,85	0,36	3,15	0,44	2,25	0,45	14,93	1,24	5,81	0,72	2,60	0,59
Fichte Altholz	11	462	1,86	0,33	3,07	0,35	2,18	0,39	14,65	1,07	5,43	0,59	2,42	0,50
Douglasie Dickung	6	209	2,51	0,39	4,80	0,66	3,19	0,55	31,37	2,11	10,36	1,58	4,09	1,03
Douglasie Stangenh.	3	176	2,01	0,31	3,50	0,39	2,28	0,44	21,37	1,87	7,02	1,09	2,68	0,67
Douglasie ger. Baumholz	2	32	2,11	0,36	3,25	0,28	2,05	0,37	18,88	0,84	6,25	0,41	2,47	0,35
Lärche Dickung	1	12	2,61	0,42	4,33	0,55	2,94	0,24	30,65	2,31	12,35	0,91	5,04	0,55
Lärche Stangenh.	3	44	2,42	0,29	4,31	0,32	3,01	0,31	26,02	2,33	11,09	0,83	4,67	0,50
Tanne Dickung	5	91	2,81	0,41	5,06	0,50	3,35	0,34	30,54	3,19	11,09	1,70	4,66	0,93
Laub-Nadel Stangenh.	6	61	2,31	0,33	4,00	0,40	2,65	0,50	30,00	3,17	12,29	1,78	4,99	0,89
LN Stangenh.-Baumholz	4	39	2,46	0,41	4,05	0,43	2,81	0,33	27,81	2,97	10,80	2,14	4,57	1,09
Laub-Nadel Altholz	4	42	1,99	0,33	3,58	0,37	2,59	0,31	24,16	3,60	10,16	1,77	4,37	0,82
Buche Gertenholz	2	55	3,01	0,32	5,41	0,33	4,28	0,41	34,20	2,84	18,33	1,06	8,37	0,69
Buche Stangenh.	7	219	2,61	0,36	4,50	0,41	3,06	0,29	42,82	1,87	17,87	0,94	7,03	0,56
Buche ger. Baumholz	4	72	2,44	0,33	4,48	0,46	3,07	0,39	40,17	1,80	16,89	1,09	6,84	0,55
Buche mittl. Baumholz	4	98	2,25	0,29	4,10	0,36	2,92	0,28	37,56	1,56	15,84	0,93	6,34	0,48
Buche starkes Baumholz	7	195	2,61	0,39	4,38	0,39	3,14	0,33	38,95	1,71	17,13	0,95	6,94	0,55
Buche Altholz (<190 J.)	5	122	2,46	0,36	4,23	0,56	3,17	0,51	35,09	2,95	15,25	1,65	6,60	0,85
Buche Altholz (>190 J.)	5	126	2,16	0,36	4,08	0,36	2,90	0,37	32,82	2,34	14,92	1,20	6,48	0,77
Summe Buche Altholz	10	248	2,29	0,39	4,15	0,47	3,02	0,46	33,85	2,87	15,07	1,43	6,54	0,81
Traubeneiche Stangenh.	3	48	2,27	0,31	3,77	0,28	2,53	0,28	38,00	1,05	14,10	0,46	5,14	0,56
Roteiche Stangenh.	1	13	2,28	0,32	3,82	0,36	2,61	0,24	38,30	2,66	13,85	0,81	5,25	0,47
Tr.-Eiche starkes Baumh.	3	68	2,37	0,31	4,10	0,21	2,95	0,29	36,17	1,82	15,48	0,66	6,12	0,48
Traubeneiche Altholz	3	65	2,36	0,42	3,66	0,33	2,55	0,41	33,57	1,85	14,30	0,78	5,61	0,59
Laubmisch Stangenh.	4	71	2,30	0,35	3,80	0,31	2,61	0,30	37,95	1,83	14,14	0,63	5,19	0,53
Lmisch starkes Baumholz	5	72	2,58	0,37	4,43	0,41	3,16	0,34	38,06	1,68	16,90	0,87	6,83	0,56
Laubmisch Altholz	3	83	2,31	0,39	3,79	0,48	2,71	0,49	33,16	2,19	14,48	1,08	5,95	0,89
Birkenbrücher	10	155	2,33	0,31	4,13	0,38	2,94	0,34	31,99	2,64	13,45	1,13	5,49	0,73

TG: Zahl der in die Signaturanalyse eingehenden Trainingsgebiete; n: Pixelzahl

Die Spektralsignaturen der Dickungen von Fichte, Douglasie und Tanne (vgl. Abb. 80 a) weisen nur geringe Unterschiede auf, die Zusammenlegung zu einer gemeinsamen Klasse 'Dickung' erscheint sinnvoll.

Die Signaturanalyse für die verschiedenen Altersklassen der Fichte (vgl. Abb. 80 b) ergibt eine starke Reflexionsabnahme mit zunehmendem Alter. Fichtendickungen weisen in allen

Spektralkanälen signifikant höhere Reflexionswerte auf als die anderen Altersklassen; Stangenholz ist über eine höhere nIR-Reflexion von Baum- und Altholz zu trennen. Baum- und Altholz unterscheiden sich in ihrem Reflexionsverhalten kaum, ab der Altersklasse 'geringes Baumholz' zeigen die Reflexionswerte offensichtlich auch im TM4 nur noch eine geringe Dynamik. Die altersabhängige Reflexionsabnahme besitzt für alle Baumarten Gültigkeit (vgl. Abb. 80 c, Douglasie; f, Rotbuche; g, Eiche); sie erklärt sich - neben einem baualterabhängigen Reflexionsverhalten der Blattoorgane - vor allem durch eine mit dem Baumalter zunehmende Kronendachrauhigkeit.

Im Vergleich zu anderen Nadelbaumarten der gleichen Altersklasse zeigt die Fichte die jeweils niedrigsten Reflexionswerte (sowohl im TM5 als auch im TM4) (vgl. Abb. 80 c). So liegen die Reflexionsmittelwerte von Fichten-Stangenhölzern nur bei 17,7% (TM4) bzw. 5,7% (TM5), während die Mittelwerte von Douglasie-Stangenholz im nIR 21,4%, im mIR 7% betragen. Mischbestände von beiden Baumarten im Stangenholzalter weisen entsprechend mit 19,8% bzw. 6,7% zwischen den Reinbeständen liegende Werte auf. Deutlich höhere Reflexionswerte zeigen Lärchen-Stangenhölzer (26,02% im TM4), für die jedoch nur eine sehr begrenzte Stichprobe vorliegt.

Aus dem beschriebenen sowohl durch Baumart als auch Altersklasse bestimmten Reflexionsverhalten ergeben sich u.a. die folgenden Trennungsprobleme:

- In geringem Maße sind Fehlzuzuweisungen zwischen Douglasie- und Fichten-Stangenholz zu erwarten; die zusätzliche Berücksichtigung einer „gemischten“ Stangenholzklasse führt zu starken spektralen Überlappungen.
- Die Statistik des einzigen für 'Douglasie/geringes Baumholz' gefundenen Trainingsgebiets weist auf eine starke Überschneidung mit der Klasse 'Fichte Stangenholz' hin; aufgrund der zu geringen Stichprobe (die keine Berücksichtigung einer eigenen Klasse 'Douglasie Baumholz' zulässt) hat diese wahrscheinlich geringe Trennbarkeit der beiden Klassen für die Klassifikation des Untersuchungsgebiets jedoch keine Konsequenzen.

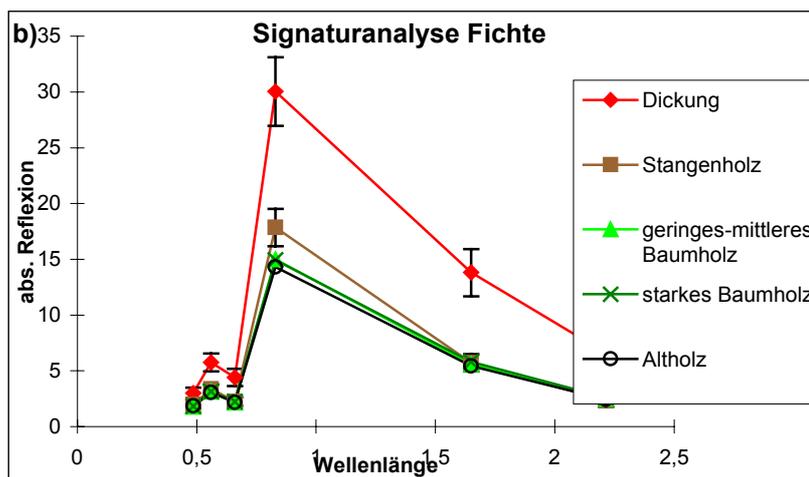
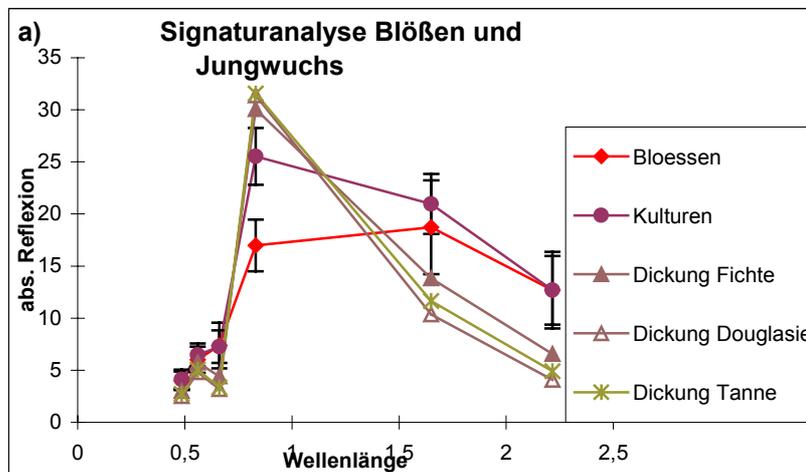
Die für die Altersklasse 'Altholz' durchgeführte Signaturanalyse (vgl. Abb. 80 d) belegt die bereits diskutierten Reflexionsunterschiede zwischen Laub- und Nadelholzbeständen; Laubholzbestände weisen aufgrund der Reflexionseigenschaften ihrer Blattoorgane bzw. ihrer geringen Kronendachrauhigkeit wesentlich höhere Werte im TM5 und vor allem im TM4 auf. Für Laub-/Nadelmischwald ergibt sich eine „Mittelstellung“ bei vergleichsweise hohen Standardabweichungen vor allem im TM4. Deutlich wird außerdem, dass sich die Klassen 'Buche Altholz' und 'Eiche (Traubeneiche) Altholz' nicht voneinander trennen lassen. Die geringsten Reflexionswerte aller Laubwaldklassen - sowohl im TM4 als auch im TM5 - weisen Birkenbrücher auf. Die spektralen Überlappungen mit Eichen-Altholz und Buchen-Altholz (>190 Jahre) sind jedoch relativ groß; am ehesten scheint eine Trennung über die mIR-Reflexion möglich.

Ein Vergleich der Baumarten Buche und (Trauben-)Eiche/Altersklasse Baumholz (Abb. 80 e) zeigt einen schwachen Trend zu höherer nIR-Reflexion der Buche (Buche, starkes Baumholz: TM4 38,9%; Eiche, starkes Baumholz: 36,2%; aus Eichen und Buchen aufgebaute Mischwälder: 38,1%). Insgesamt sind die artbedingten Unterschiede innerhalb dieser Altersklassen aber sehr gering und für eine eventuelle Trennung nicht ausreichend.

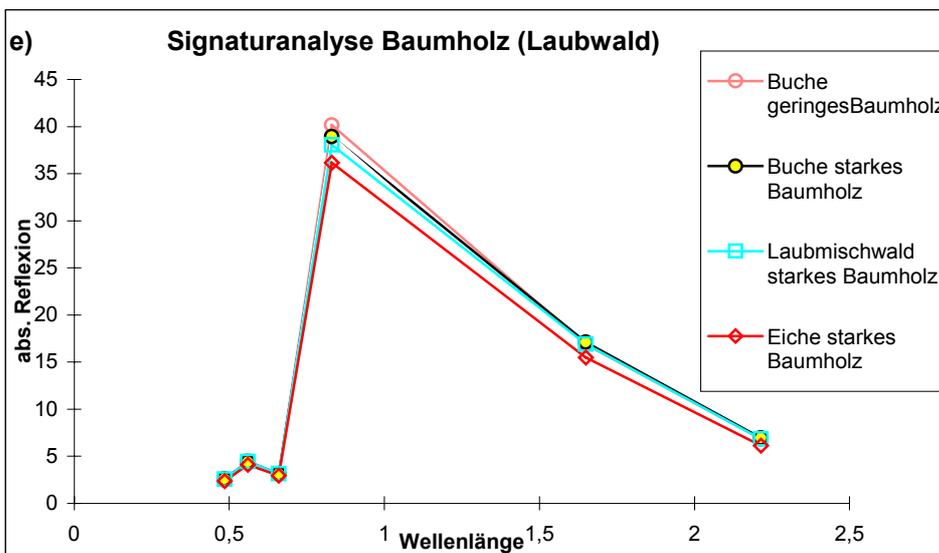
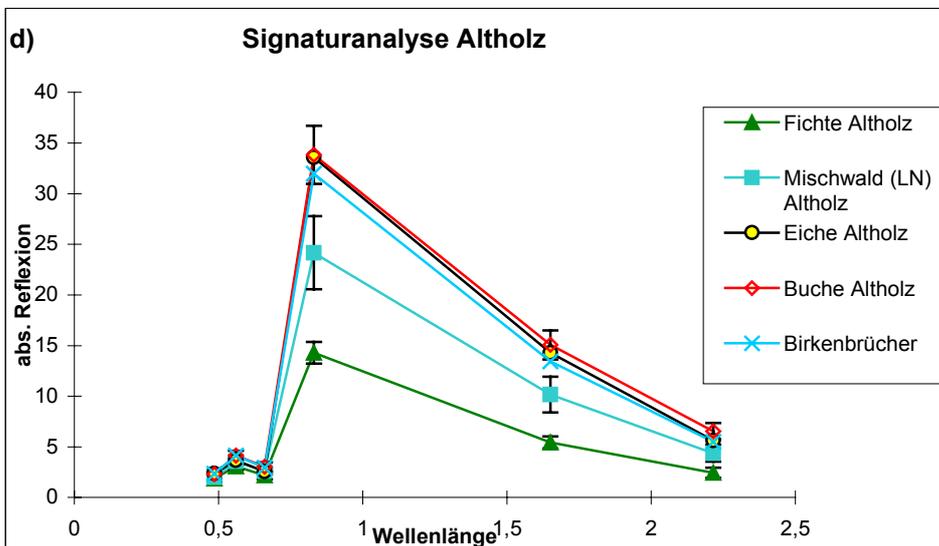
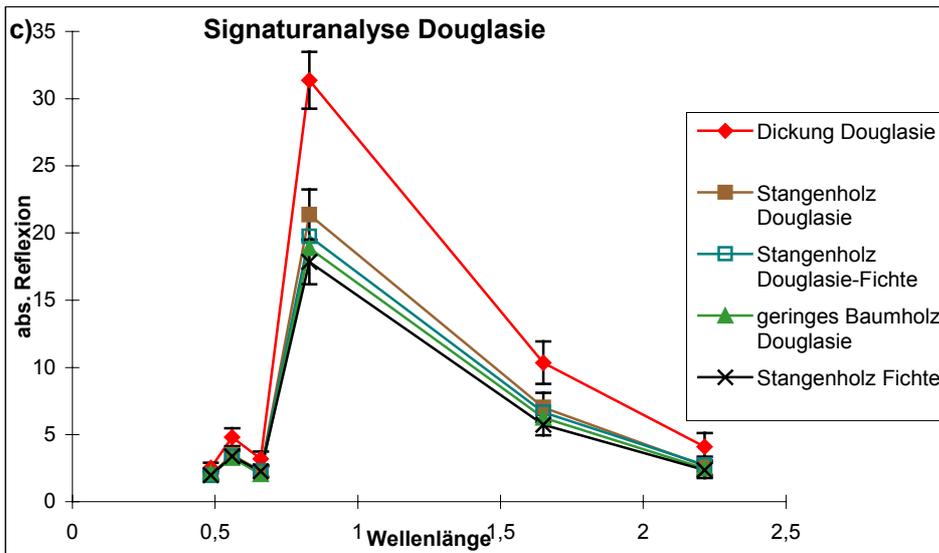
Im Vergleich zu Eiche (Abb. 80 g) zeigt die Buche eine starke altersbedingte Veränderung der Reflexionswerte (Abb. 81 f mit aufgetragenen Standardabweichungen für Stangenholz, starkes Baumholz und Altholz >190 Jahre). Von 'Buche Stangenholz' bis 'Buche Altholz' nimmt die nIR-Reflexion (über Baumholz und Altholz <190 Jahre) von 42,8% auf 32,8% ab. Für die Buche scheint eine Trennung der Altersklassen Stangenholz, Baumholz und Altholz

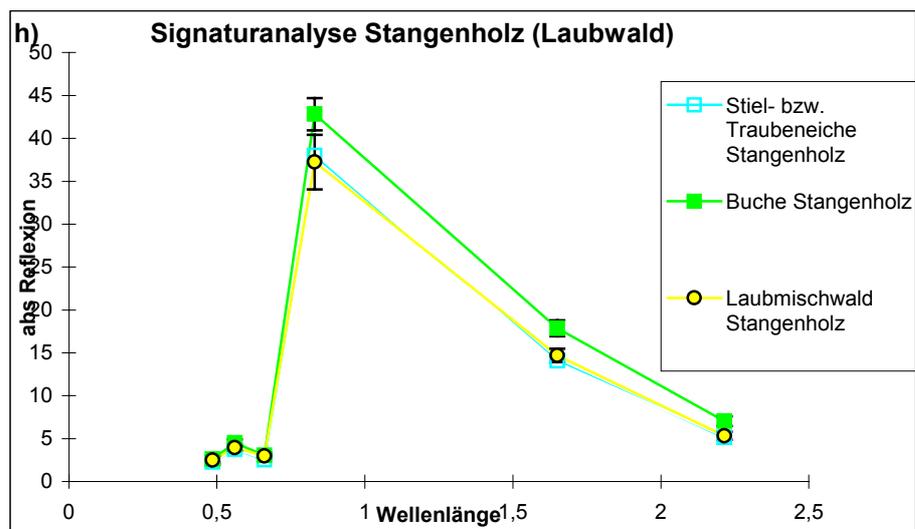
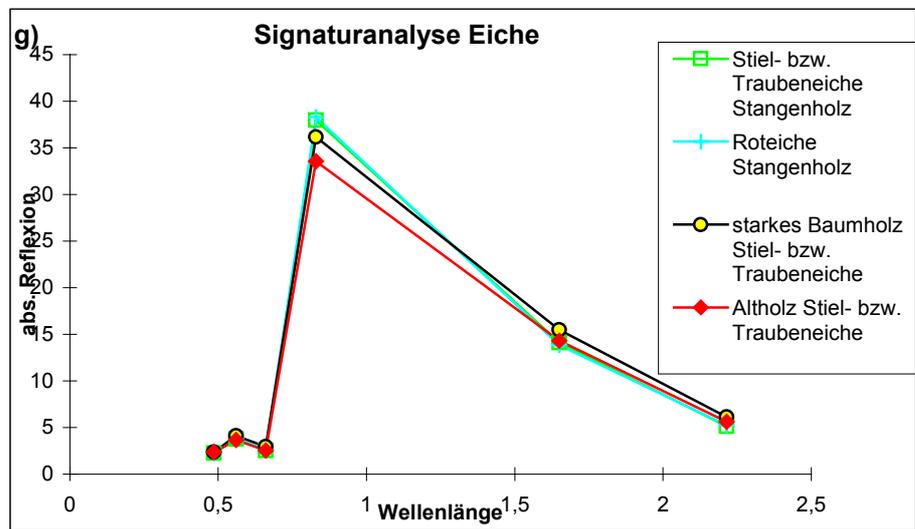
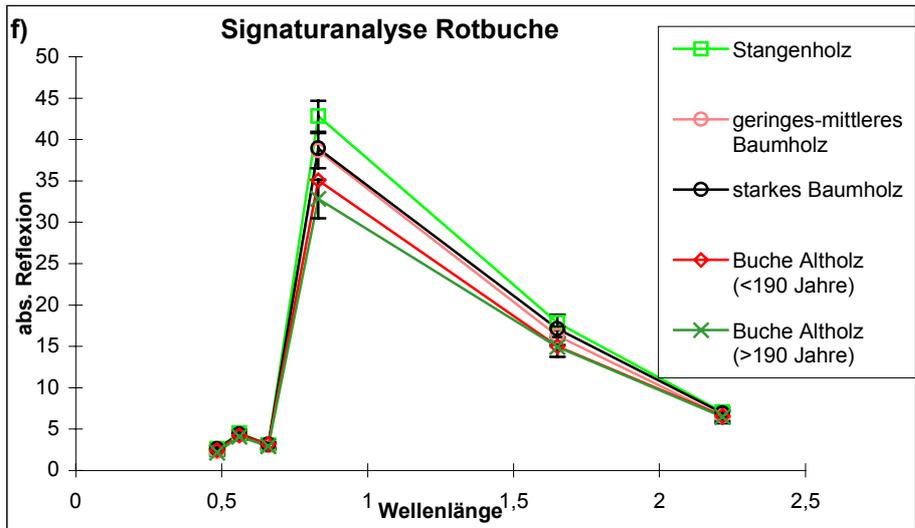
möglich; allerdings überschneidet sich 'Buche Altholz <190 Jahre' stark mit 'starkem Baumholz Eiche', so dass insgesamt nur eine Klasse 'Laubwald Baumholz-Altholz' möglich erscheint. Für Eiche ergibt sich von Stangenholz bis Altholz eine nIR-Reflexionsabnahme von 38% auf 33,6%. Dabei scheint 'Stangenholz Roteiche' (1 Trainingsgebiet!) spektral nahezu identisch zu sein mit 'Stangenholz Trauben-/Stieleiche', so dass keine spezielle Roteichen-Klasse einzuführen ist. Aufgrund der - im Vergleich zur Buche (vgl. Abb. 81 h) - niedrigeren Reflexion von Eiche im Stangenholzalter sind Fehlzuweisungen zwischen 'Laubwald Baumholz-Altholz' und 'Eiche Stangenholz' zu erwarten. Gut zu trennen und daher als eigene Klasse sinnvoll ist 'Buche Stangenholz'.

Ebenso wie Reinbestände zeigen auch die untersuchten Laub-/Nadelmischbestände altersspezifische Reflexionsveränderungen (vgl. Abb. 81 i; Stangenholz: 30% im nIR, Altholz 24,2%). Aus ihren relativ hohen Standardabweichungen ergeben sich zahlreiche Überschneidungen mit anderen Waldklassen - zum Beispiel Birkenbrüchern (als niedrig reflektierender Laubwaldklasse), Nadelholz-Dickungen, Lärche Stangenholz oder Douglasie Stangenholz (als relativ hoch reflektierenden Nadelwald-Klassen)¹⁰.



¹⁰ Probeweise durchgeführte Maximum-Likelihood-Klassifikationen, in denen Laub-/Nadelmischwald-Musterklassen berücksichtigt werden, zeigen die aufgrund der Signaturanalyse zu erwartenden Fehlklassifikationen; aufgrund ihrer hohen Standardabweichungen erweisen sich die Mischwald-Trainingsgebiete im Klassifizierungsprozess als dominant, d.h. sie „ziehen viele Pixel zu sich herein“; entsprechend sind die Mischwald-Klassen im Ergebnisbild stark überrepräsentiert. Im Rahmen dieser Untersuchung wird deshalb auf die Berücksichtigung von Laub-/Nadelmischwaldklassen, die im Untersuchungsgebiet nur kleinflächig auftreten, verzichtet (ihre Trainingsgebiete werden entsprechend verworfen). Für sie kann jedoch bei Verwendung einer weiteren Szene mit phänologisch günstigem Aufnahmezeitpunkt eine gute Trennbarkeit von Laubholz- bzw. Nadelholzreinbeständen erwartet werden.





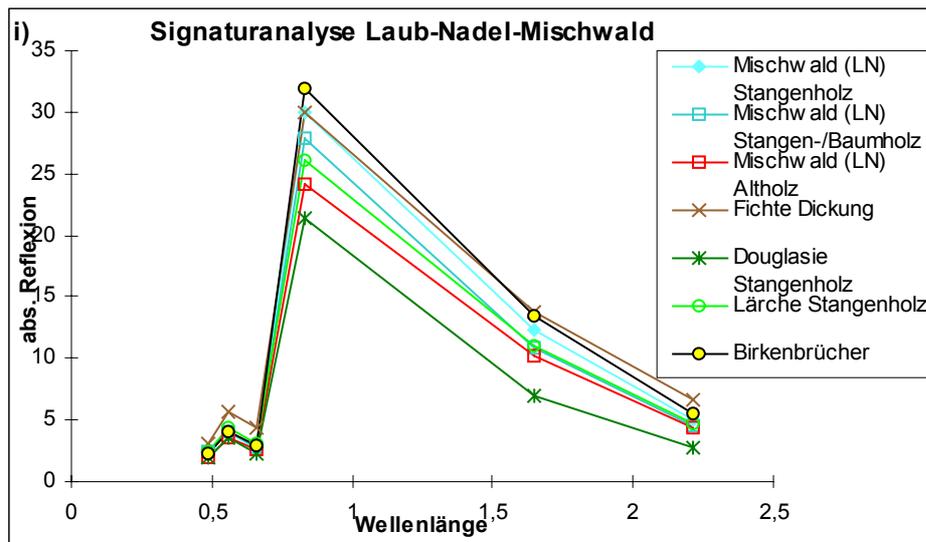


Abb. 80: Ergebnisse der Signaturanalyse

Aufgrund der Signaturanalyse ergeben sich die folgenden Waldklassen, die potentiell trennbar erscheinen und durch ein entsprechendes „Set“ an Trainingsgebieten im Klassifizierungsprozess repräsentiert werden:

- Blößen
- Kulturen
- Dickungen (Fichte, Douglasie, Tanne)
- Fichte Stangenholz
- Douglasie Stangenholz
- Lärche Stangenholz
- Fichte Baumholz - Altholz
- Laubwald Stangenholz
- Laubwald Baumholz-Altholz
- Birkenbrücher¹¹

Die Signaturanalyse belegt, dass die Kanäle TM4 und TM5 den weitaus höchsten forstlichen Informationsgehalt besitzen. TM3 zeigt zum Beispiel für Dickungen, Kulturen und Blößen im Vergleich zu anderen Bestandstypen charakteristisch hohe Werte, TM2 weist einen etwas höheren Dynamikbereich auf als TM1. Bei den folgenden Auswertungen (Kontingenzanalyse und Klassifikationsdurchführung) finden die Kanäle TM2, TM3, TM4 und TM5 Berücksichtigung.

Kontingenzanalyse

Nicht sämtliche der in die Signaturanalyse eingehenden Trainingsgebiete (vgl. Tabelle 14) müssen im Klassifizierungsprozess berücksichtigt werden; zum Beispiel werden die „neu definierten“ Klassen ‘Laubwald Baumholz-Altholz’ oder ‘Dickung’ durch eine Vielzahl von Trainingsgebieten repräsentiert, deren Daten zum Teil nahezu identisch sind. Redundante Testflächen können nach eingehender Signaturanalyse verworfen bzw. zusammengefasst werden. Die Gesamtzahl der Trainingsgebiete lässt sich somit verringern, ohne dass zur Klassentrennung notwendige Informationen verloren gehen.

¹¹ eventuell noch mit der Klasse ‘Laubwald Baumholz-Altholz’ zusammenzulegen.

Insgesamt 67 Trainingsgebiete werden in die Kontingenztabelle einbezogen, in der überprüft wird, mit welchen Genauigkeiten die Daten der Trainingsgebiete - unter Verwendung des Maximum-Likelihood-Klassifikators - klassifiziert werden. Die Ergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Trennbarkeit der einzelnen durch die Trainingsgebiete definierten Klassen und somit auf die zu erwartende Qualität der Gesamt-Klassifizierung zu. Die Ergebnisse der Kontingenztabelle werden in einer Konfusionsmatrix ausgegeben, die für alle Trainingsgebiete die einzelnen Klassifizierungsgenauigkeiten und eventuelle Fehlzuweisungen enthält. Zur Darstellung werden die auf der Ebene der Trainingsgebiete berechneten Ergebnisse auf die übergeordneten Klassen bezogen und jeweils nach Pixelzahl gewichtet zusammengefasst (Tabelle 15).

Tabelle 15 Ergebnisse der Kontingenztabelle (in der Diagonalen sind die korrekt klassifizierten Pixel der jeweiligen Trainingsgebiete (in %) angegeben)

klassifizierte Daten	Referenz-Daten									
	Blößen	Kulturen	Dickung	Fi Stan	Dou Stan	Lä Stan	Fi Baum	Bu Stan	LW Baum	Birke
Blößen	97,3									
Kulturen	2,7	98,6								
Dickung		1,4	98,0	1,4					0,5	
Fichte Stangenholz			0,7	91,5	13,0		1,5			
Douglasie Stangenh.				7,1	86,4	6,2				
Lärche Stangenholz					0,6	93,8				
Fichte Baum/Altholz							98,5			
Buche/Laubw. Stange								90,9	3,0	6,4
Laubw. Baum/Altholz			0,7					9,1	93,0	34,0
Birkenbrücher			0,7						3,5	59,6

Die Eigenklassifizierungswerte liegen (mit Ausnahme der Klassen 'Birkenbrücher' und 'Douglasie Stangenholz') über 90%. Gegenseitige Fehlzuweisungen zwischen 'Douglasie Stangenholz' und 'Fichte Stangenholz' bestätigen die Ergebnisse der Signaturanalyse, die für beide Klassen (geringfügige) spektrale Überschneidungen nachweist. Die Klasse 'Birkenbrücher' ist - wie ja auch die Signaturanalyse andeutete - nicht von der Klasse 'Laubwald Baumholz-Altholz' zu trennen (insbesondere zwischen Birken- und 'Laubwald Altholz'-Trainingsgebieten kommt es zu starken Fehlzuweisungen). Fasst man beide Klassen zusammen, ergibt sich eine Klassifikationsgenauigkeit von insgesamt 96,7%; 3,3% werden der Klasse 'Laubwald Stangenholz' zugewiesen. Die Birkenbrücher-Trainingsgebiete, die keine Fehlzuweisungen zu 'Laubwald Stangenholz' in der Kontingenztabelle zeigen, werden als zusätzliche Trainingsgebiete für die neue, die Birkenbrücher einschließende 'Laubwald Baum-/Altholz'-Klasse in den Klassifizierungsprozess miteinbezogen.

Ergebnisse der Klassifikation und Verifizierung

Die Klassifikation der '90er-Szene erfolgt mit dem Maximum Likelihood-Klassifikator unter Verwendung der Kanäle TM2, TM3, TM4, TM5; a-priori-Wahrscheinlichkeiten werden nicht vergeben, Zurückweisungsschwellen werden vor dem Klassifikationsprozess nicht gesetzt. Zusätzlich zum thematischen Ergebnis-File, der die räumliche Verteilung der Bestandstypen wiedergibt, wird ein „distance image file“ mit den Mahalanobis-Distanzen aller einer Musterklasse zugewiesenen Pixel zum jeweiligen Klassenschwerpunkt erstellt. Er erlaubt die Bewer-

tung der jeweiligen Klassifikationssicherheiten und bildet die statistische Grundlage zur Festlegung nachträglicher Zurückweisungsschwellen, durch die in jeder Klasse die jeweils unsichersten Pixel eliminiert werden können. Das Setzen nachträglicher Zurückweisungsschwellen wird vor allem für die Klasse 'Lärche Stangenholz' notwendig, die - wie eine visuelle Kontrolle der klassifizierten Bilder (GIS-gestützt und unter Zuhilfenahme der Orthophotokarten) ergibt - überrepräsentiert ist. Insgesamt erscheint die Klasse als vergleichsweise unsicher, weshalb die in ihr verbleibenden Pixel im Ergebnisbild einer breiter gefassten Klasse 'Douglasie/Lärche Stangenholz' zugeordnet werden.

Das Vorherrschen relativ großer Reinbestände im Untersuchungsgebiet rechtfertigt die Anwendung eines 3x3 Majority-Filters, durch den ein insgesamt glättender Effekt hervorgerufen wird. Abbildung 81 und 82 geben das endgültige Klassifikationsergebnis für die Untersuchungsreviere wieder.

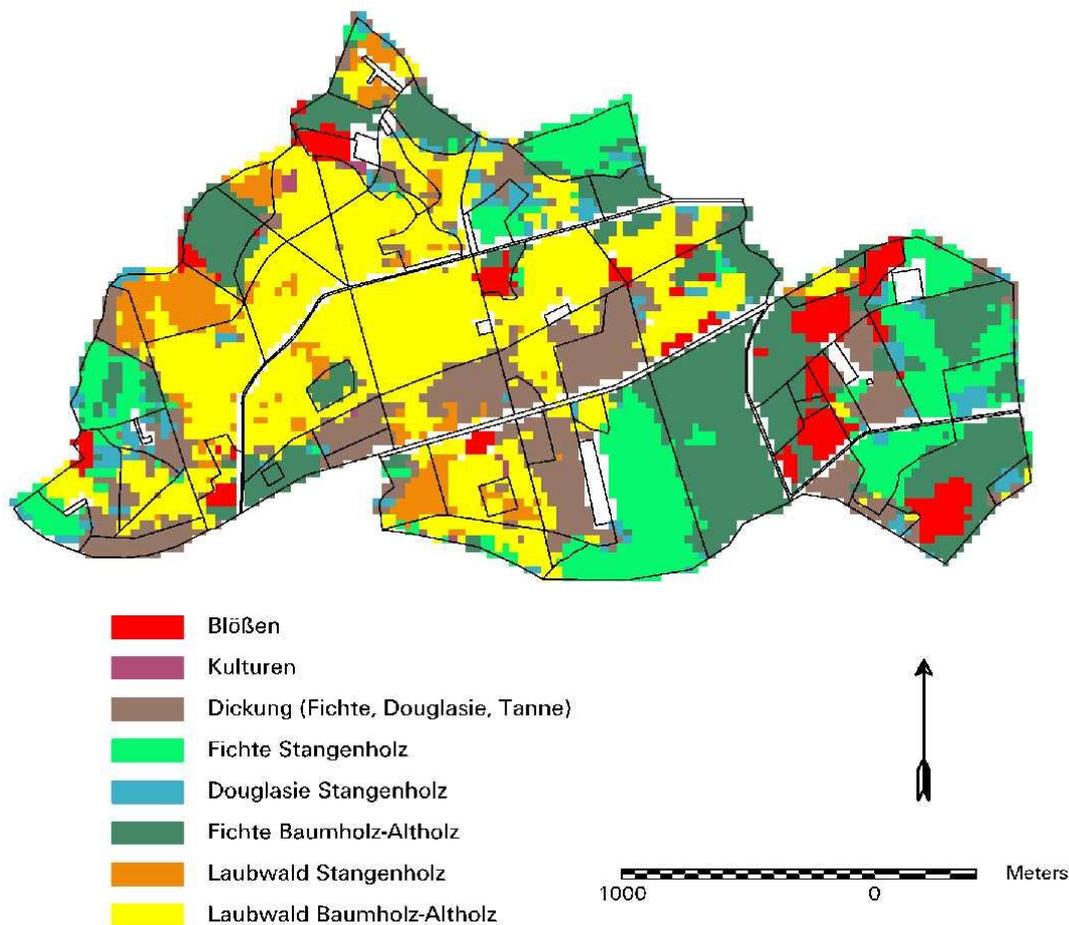


Abb. 81: Ergebnisbild der Multispektralklassifikation - Revier Horath (1990)

Bei den in den Ergebnisbildern weiß wiedergegebenen Flächen innerhalb der Forstreviere handelt es sich um (über GIS-Selektionen) ausmaskierte, also unklassifizierte Nichtholzboden- bzw. Nebenflächen. Deutlich tritt die Dominanz der Fichte als bestandsbildende Baumart im Untersuchungsgebiet hervor; so werden zum Beispiel die Kammlagen des Reviers Hinzerath fast vollständig von Fichtenreinbeständen der Altersklasse Baumholz-Altholz eingenommen. Als Folge der Sturmwurfereignisse im Frühjahr 1990 sind Blößen mit relativ hohen Flächenanteilen vertreten.

Neben einer visuellen Kontrolle besteht die Möglichkeit, die Klassifizierungsgüte über „unabhängige“ Verifizierungsgebiete zu beurteilen. Als solche Verifizierungsgebiete stehen die Trainingsgebiete zur Verfügung, die weder zur Signaturanalyse noch zur späteren Klassifikation verwandt worden sind. Für einzelne Klassen können auch zusätzlich neue Testgebiete definiert werden.

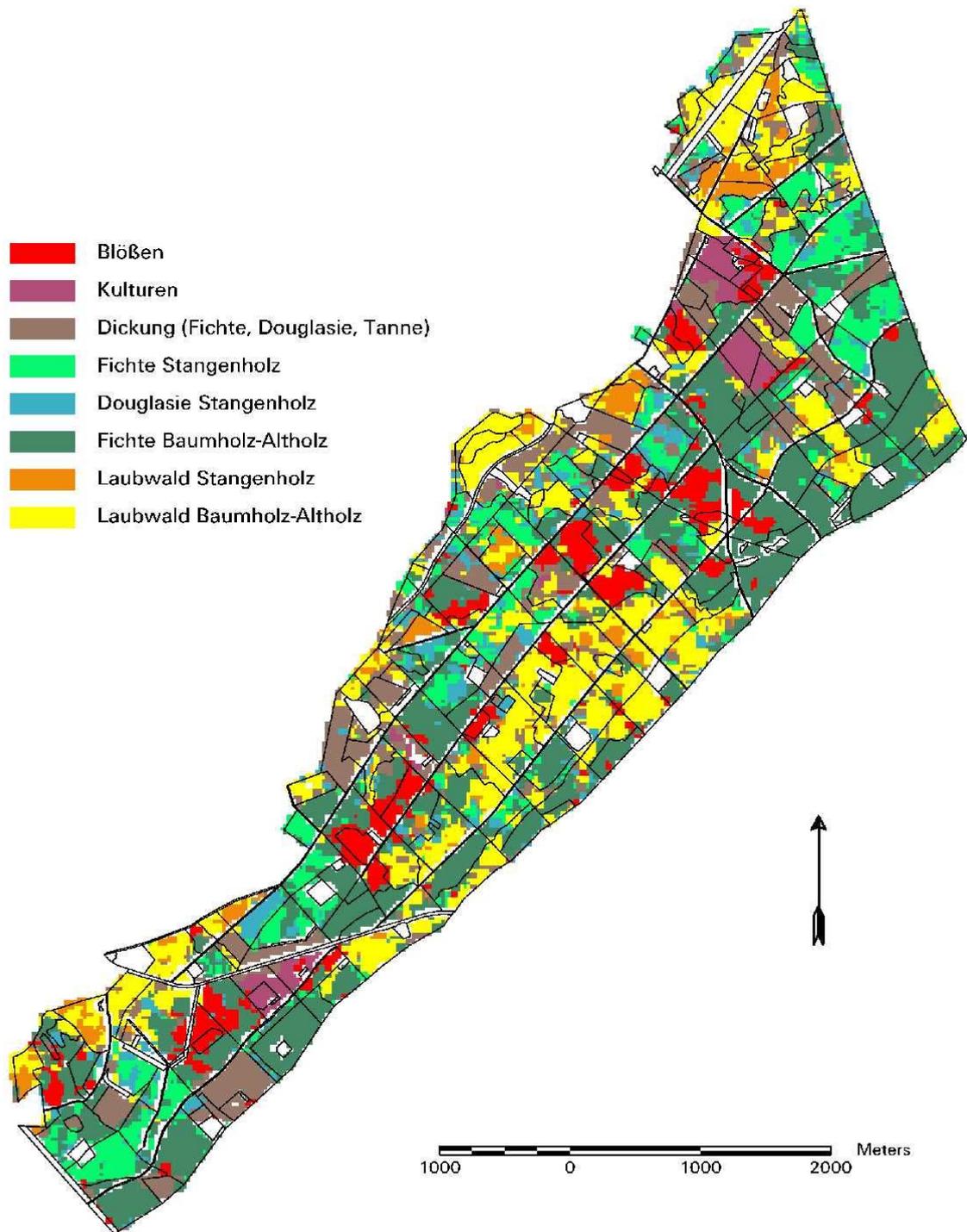


Abb. 82: Ergebnis der Multispektralklassifikation: Reviere Hinzerath und Bischofsdhron (1990)

Für einige Klassen - insbesondere 'Douglasie Stangenholz' - ist die Gesamtpixelzahl der gefundenen Verifizierungsgebiete aufgrund der Kleinräumigkeit des Untersuchungsgebiets relativ gering (vgl. Tabelle 16). Die Stichprobengrößen der für die einzelnen Bestockungsklassen zur Verfügung stehenden Verifizierungsgebiete entsprechen jedoch insgesamt gut den tatsächlichen Bestockungsverhältnissen im Untersuchungsgebiet, die ermittelte Gesamt-Klassifikationsgenauigkeit von 88,14% (vgl. Tabelle 16) kann daher als repräsentatives Gütemaß angesehen werden.

Tabelle 16 Fehlermatrix / Klassifizierungsgenauigkeiten (in Pixeln und %)

klassifizierte Daten	Referenz-Daten der Verifizierungsgebiete								Summe	Nutzer genauigkeiten
	Blößen	Kulturen	Dickung	Fi Stan	Dou Stan	Fi Baum	Bu Stan	LW Baum		
Blößen	102 99%	9 7,8%						2 0,3%	113	90,3%
Kulturen		98 84,5%							98	100%
Dickung	1 1%		441 95,7%	4 0,9%	6 6,3%	4 0,5%		33 5,1%	489	90,2%
Fichte Stangenh.				357 77,3%	19 20,0%	43 4,9%		4 0,6%	423	84,4%
Douglasie, Lärche Stangenholz			1 0,2%	22 4,8%	64 67,4%	3 0,3%		8 1,2%	98	65,3%
Fichte Baum/Altholz		1 0,9%	1 0,2%	75 16,2%	1 1,1%	810 92,7%	1 0,6%	4 0,6%	893	90,7%
Buche/Laubwald Stangenholz					1 1,1%		138 80,7%	19 2,9%	158	87,3%
Laubwald Baum/Altholz			11 2,4%		3 3,2%	3 0,3%	32 18,7%	576 88,3%	625	92,2%
unklassifiziert		8 6,9%	7 1,5%	4 0,9%	1 1,1%	11 1,3%			37	
Summe	103	116	461	462	95	874	171	652	2934	

Gesamt-Klassifikationsgenauigkeit: $2586/2934 = 88,14\%$

In der Diagonalen der Fehlermatrix sind die Pixel der Verifizierungsgebiete aufgetragen, die jeweils korrekt klassifiziert wurden (absolute Angabe und prozentuale „Hersteller-Genauigkeit“¹²). Spaltenweise ist darüber hinaus abzulesen, welchen anderen Klassen die Verifizierungs-Pixel fehlzugewiesen wurden. Zusätzlich zu den Herstellergenauigkeiten sind in der letzten Spalte die Nutzergenauigkeiten für jede Objektklasse aufgetragen¹³.

¹² = (Anzahl der korrekt klassifizierten Pixel der Klasse / Gesamtzahl der Klassen-Referenzpixel) 100%.

¹³ = (Anzahl der korrekt klassifizierten Pixel der Klasse / Gesamtzahl der dieser Klasse zugewiesenen Pixel) 100%.

Die feststellbaren Fehlzuzuweisungen entsprechen den spektralen Überschneidungen, die sich sowohl bei der Signatur- als auch der Kontingenzanalyse andeuteten:

- Dickungen (Fichte, Douglasie, Tanne) - also die Nadelholz-Bestandstypen mit den höchsten Reflexionswerten - werden mit hoher Genauigkeit klassifiziert (95,7%); in geringem Ausmaß ergeben sich wechselseitige Fehlzuzuweisungen zur Klasse 'Laubwald Baumholz-Altholz' (als der Laubwaldklasse mit relativ niedrigen Reflexionswerten)
- Überschneidungen und Fehlzuzuweisungen ergeben sich zwischen 'Fichte Stangenholz' und 'Douglasie Stangenholz'
- zu gegenseitigen Fehlzuzuweisungen kommt es auch zwischen verschiedenen Altersklassen eines Bestandstyps ('Fichte Stangenholz' und 'Fichte Baumholz-Altholz' sowie 'Laubwald Stangenholz' und 'Laubwald Baumholz-Altholz'); sie können jedoch teilweise dadurch erklärt werden, dass sich die im wesentlichen über GIS-Selektionen ermittelten Verifizierungsgebiete auf absolute Altersklassen beziehen, durch die Multispektralklassifikation jedoch natürliche Altersklassen getrennt werden

Neben 'Dickung' werden auch für die Klassen 'Blößen', 'Kulturen', 'Fichte Baumholz-Altholz' und 'Laubwald Baumholz-Altholz' hohe Klassifizierungsgenauigkeiten erzielt; letztere tragen durch ihren großen Anteil an den Verifizierungsgebieten (und damit auch an der Bestockung des Untersuchungsgebiets) wesentlich zu der erzielten hohen Gesamtklassifizierungsgenauigkeit bei.

7.4.3 Möglichkeiten der Integration der Satellitenbilddauswertung in Forsteinrichtungsverfahren. Das klassifizierte Ergebnisbild liefert für die drei Untersuchungsreviere einen flächendeckenden Überblick über die zum Aufnahmezeitpunkt bestehenden Bestockungsverhältnisse. Die Verifizierungsergebnisse belegen für die berücksichtigten Waldklassen hohe Hersteller- und Nutzergenauigkeiten (vgl. Tab. 12). Für den Fall einer möglichen Einbeziehung weiterer Satellitenszenen, durch die jeweils andere phänologische Stadien erfasst werden, kann eine Erhöhung der Zahl der trennbaren Waldklassen und eine Verbesserung der Trennungsgenauigkeiten unterstellt werden (vgl. SCHARDT 1990, S.88) - zum Beispiel ist durch das Hinzuziehen von Frühjahrsszenen eine verbesserte Trennung von Nadelwald, Laub-/Nadelmischwald und Laubwald (vor der Belaubung) oder - aufgrund unterschiedlicher Belaubungszeitpunkte - eine mögliche Trennung von Eiche und Buche zu erwarten.

Für die Baumart Fichte ist die sich aus der Multispektralklassifikation ergebende Verteilung der natürlichen Altersklassen Stangenholz bzw. Baum- und Altholz unter Berücksichtigung der Waldeinteilung der Forstgrundkarte in den Abbildungen 84 und 85 wiedergegeben. Um diese „Fichten-Karte“ zu erhalten, wird zunächst für die beiden Klassen des Ergebnisfiles der Klassifikation eine Raster-/Vektordaten - Konvertierung unter Einbeziehung aller Fichten-„Klumpungen“ > 5 Pixel durchgeführt; die so erhaltenen Fichten-Polygone werden mit den Vektordaten der Forstgrundkarte verschnitten.

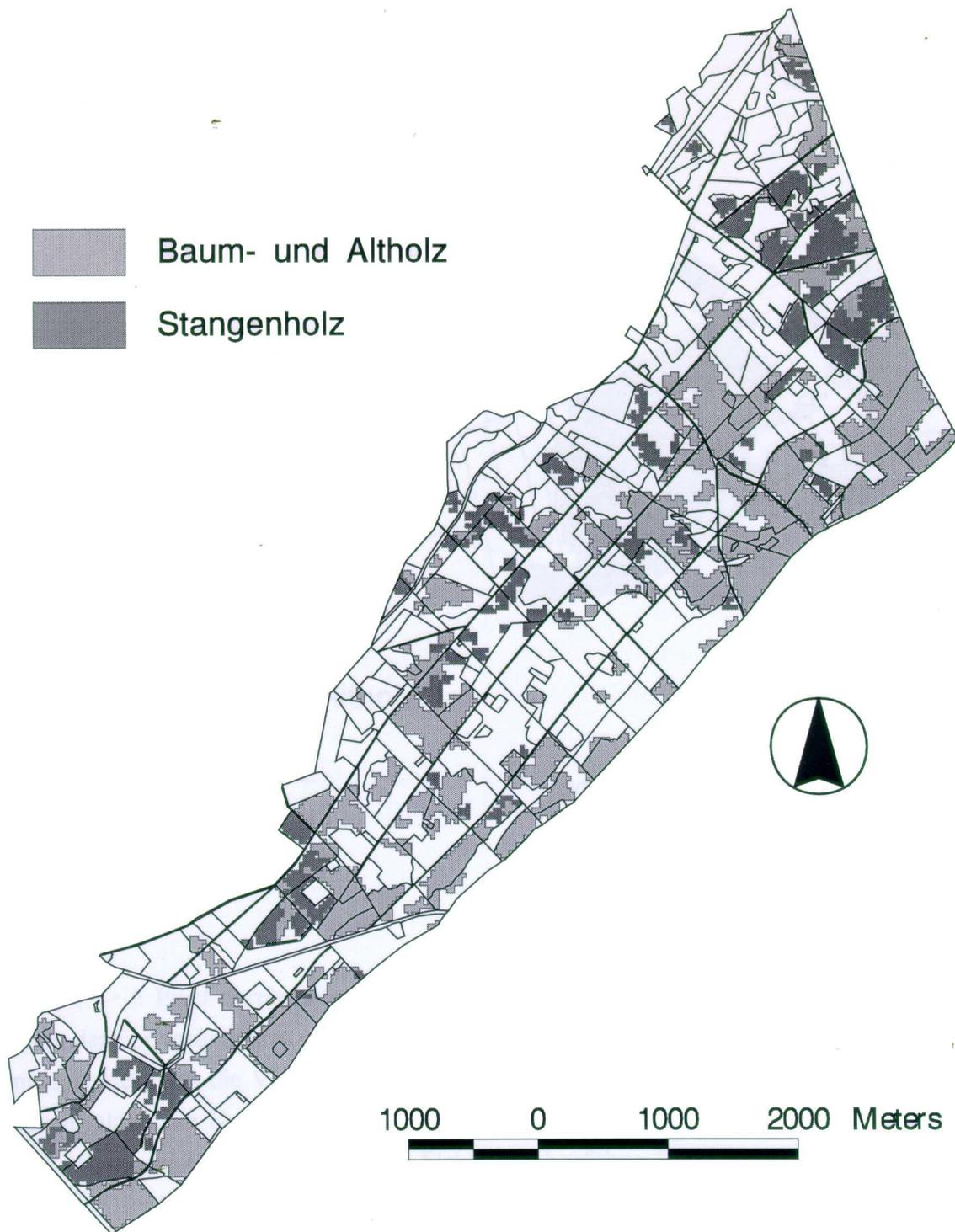


Abb. 83: Fichtenbestockte Flächen (1990) - Reviere Bischofsdhron und Hinzerath

Insgesamt orientiert sich die Verteilung der Fichte als Folge des großen Anteils von Fichten-Altersklassenwäldern im Untersuchungsgebiet relativ eng an den Bestandsgrenzen der Forsteinrichtung. Aber sowohl die explizit für die Fichte durchgeführte Flächenabgrenzung als auch das Ergebnisbild der Multispektralklassifikation dokumentieren, dass neben Reinbeständen auch zahlreiche Bestände mit deutlichen Bestockungsunterschieden (sowohl hinsichtlich der natürlichen Altersklassen (vgl. Beispiel Fichte) als auch der auftretenden Baumarten) vorkommen. Diese Unterschiede können demnach über die

Multispektralklassifikation aufgedeckt und bis zu einem bestimmten Grad beschrieben werden; die räumliche „Auflösung“ der Forsteinrichtung kann über die Lokalisierung der getrennten Teilflächen innerhalb der Bestandspolygone verbessert werden.

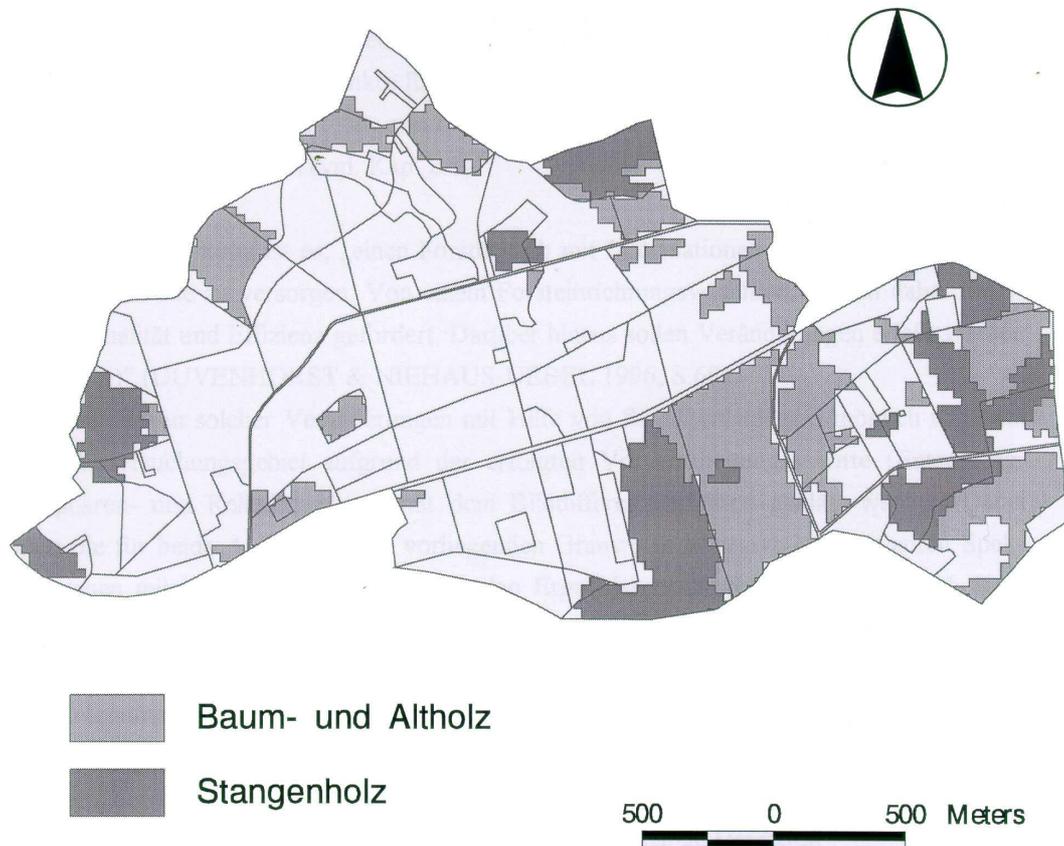


Abb. 84: Fichtenbestockte Flächen (1990) - Revier Horath

Die über die Raster-/Vektordaten-Konvertierung gewonnenen Polygone (relativ) einheitlicher Bestockung können bei terrestrischen Inventuren das Auffinden von Kleinflächen bzw. Horsten „eingesprenkter“ Baumarten oder Altersklassen erleichtern. Außerdem bieten die abgegrenzten Teilflächen Anhaltspunkte für eventuell notwendige Veränderungen der bisherigen Waldeinteilung - insbesondere dann, wenn auf Waldentwicklungsstufen basierende Befundeinheiten ermittelt werden sollen¹⁴.

Ziel der Forsteinrichtung ist es, „einen Forstbetrieb mit Informationen zur Steuerung, Anpassung und Kontrolle zu versorgen. Von einem Forsteinrichtungsverfahren werden daher Flexibilität, Aktualität und Effizienz gefordert. Darüber hinaus sollen Veränderungen erfasst werden (Monitoring)“ (DUVENHORST & NIEHAUS-UEBEL 1996, S.68). Ob ein Aufdecken solcher Veränderungen mit Hilfe von Satellitenbilddaten möglich ist, kann für das Untersuchungsgebiet aufgrund der erfolgten Vorverarbeitungsschritte (Entzerrung, Atmosphären- und Reliefkorrektur) mit dem Bilddifferenzverfahren geklärt werden. Dabei

¹⁴ Weiterer Vorteil der aus Klassifikationsergebnissen abgeleiteten Waldeinteilungskarte ist es, dass sie unmittelbar als digitale Forstkarte vorliegt und somit eine direkte Verschneidung mit anderen Daten innerhalb eines GIS zulässt.

werden die für beide Aufnahmejahre vorliegenden Grauwerte in vegetationsrelevanten Spektralbereichen miteinander verrechnet. Nach den Ergebnissen der Signaturanalyse erscheint es sinnvoll, sowohl TM4 als auch TM5 in die Differenzbildung mit einzubeziehen (durch eine lediglich im nIR-Bereich erfolgende Differenzbildung scheinen zum Beispiel durch Holzentnahmen bedingte Entwicklungen von Fichten-Baumholz bzw. Altholz zu Blößen nicht nachweisbar).

Angesichts der Grauwerte Verteilung in den Szenen der beiden Aufnahmejahre erweist sich die folgende Differenz als besonders geeignet zur forstlichen „Change Detection“:

$$[((TM4/95 - TM5/95) + 100) - ((TM4/90 - TM5/90) + 100)] + 127^{15}$$

Ein Ergebnisgrauwert von 127 zeigt demnach unveränderte Bestockungsverhältnisse an. In die Differenzbildung werden zur Veranschaulichung alle den Klassen ‘Blößen’, ‘Kulturen’, ‘Dickung’, ‘Fichte Stangenholz’, ‘Douglasie Stangenholz’ und ‘Fichte Baumholz-Altholz’ zugewiesenen Pixel einbezogen.

Nach den Ergebnissen der Signaturanalyse nimmt die Differenz TM4-TM5 für Dickungen maximale positive Werte an; bei Weiterentwicklung der Dickung in Richtung Stangenholz nimmt diese Differenz ab, es errechnen sich demnach durch die oben angegebene Formel Werte von deutlich unter 127. Diese Tendenz gilt grundsätzlich - wenn auch weit weniger deutlich ausgeprägt - für sich in Richtung Baumholz weiterentwickelndes Stangenholz. Für Baum- und Althölzer konnten bereits in der Signaturanalyse kaum voneinander abweichende Reflexionswerte festgestellt werden; diese ab dem Baumholz charakteristische geringe zeitliche Dynamik des Reflexionsverhaltens wird auch im Differenzbild durch einen mittleren Grauwert des Beispielbestandes von 130,3 dokumentiert. Für Blößen ist ein Grauwert im TM5 typisch, der über dem TM4-Wert liegt. Mit Bestandsbegründung und nachfolgender Weiterentwicklung verschieben sich die Reflexionswerte, bis schließlich die Werte im nIR über denen des mIR liegen. Diese Entwicklung wird entsprechend durch hohe Differenzwerte für ‘90er-Blößen „nachgezeichnet“.

Die beschriebenen Veränderungen treten im Differenzbild für Bischofsdhron und Hinzerath deutlich hervor (Abb. 86). Dickungen und Stangenhölzer von 1990 werden in der Regel mit dunkleren Grautönen (= Differenzwerte zum Teil deutlich unter 127) als Baum- und Althölzer wiedergegeben; sowohl ‘90er Blößen als auch Kulturen treten infolge ihrer „dynamischen“ Entwicklung als weiß dargestellte Flächen deutlich hervor. Außerdem fallen in einigen Abteilungen Pixel-„Klumpungen“ mit Grauwerten deutlich unter 100 auf, bei denen von 1990 bis 1995 eine Entwicklung zu „blößentypischeren“ Reflexionswerten zu konstatieren ist. Sie weisen auf Holzentnahmen größeren flächenhaften Ausmaßes hin, die in den aufgeführten Abteilungen in diesem Fünfjahreszeitraum stattgefunden haben (pers. Mitt. WOMELSDORF 1997). Durch das Bilddifferenzverfahren ist es möglich, Veränderungen der Bestockungsverhältnisse (bis auf Pixelniveau) zu erfassen und inhaltlich weitgehend zu interpretieren. Im Rahmen terrestrischer Erhebungen scheint es somit möglich, das Differenzbild zur Effizienzsteigerung (Zeit- und damit Kostenersparnis) einzusetzen, da in ihm ja bereits die neu aufzunehmenden Areale, die sich im Vergleich zum letzten Inventurzeitpunkt stark verändert haben, verortet sind.

¹⁵ Der theoretisch denkbare Fall, dass trotz Veränderungen in TM4 und TM5 (gleichgerichtet und mit identischen Beträgen) durch die Differenz konstante Verhältnisse angezeigt werden, kann aufgrund der unterschiedlichen Dynamik der beiden Spektralkanäle bezüglich Vegetation vernachlässigt werden.

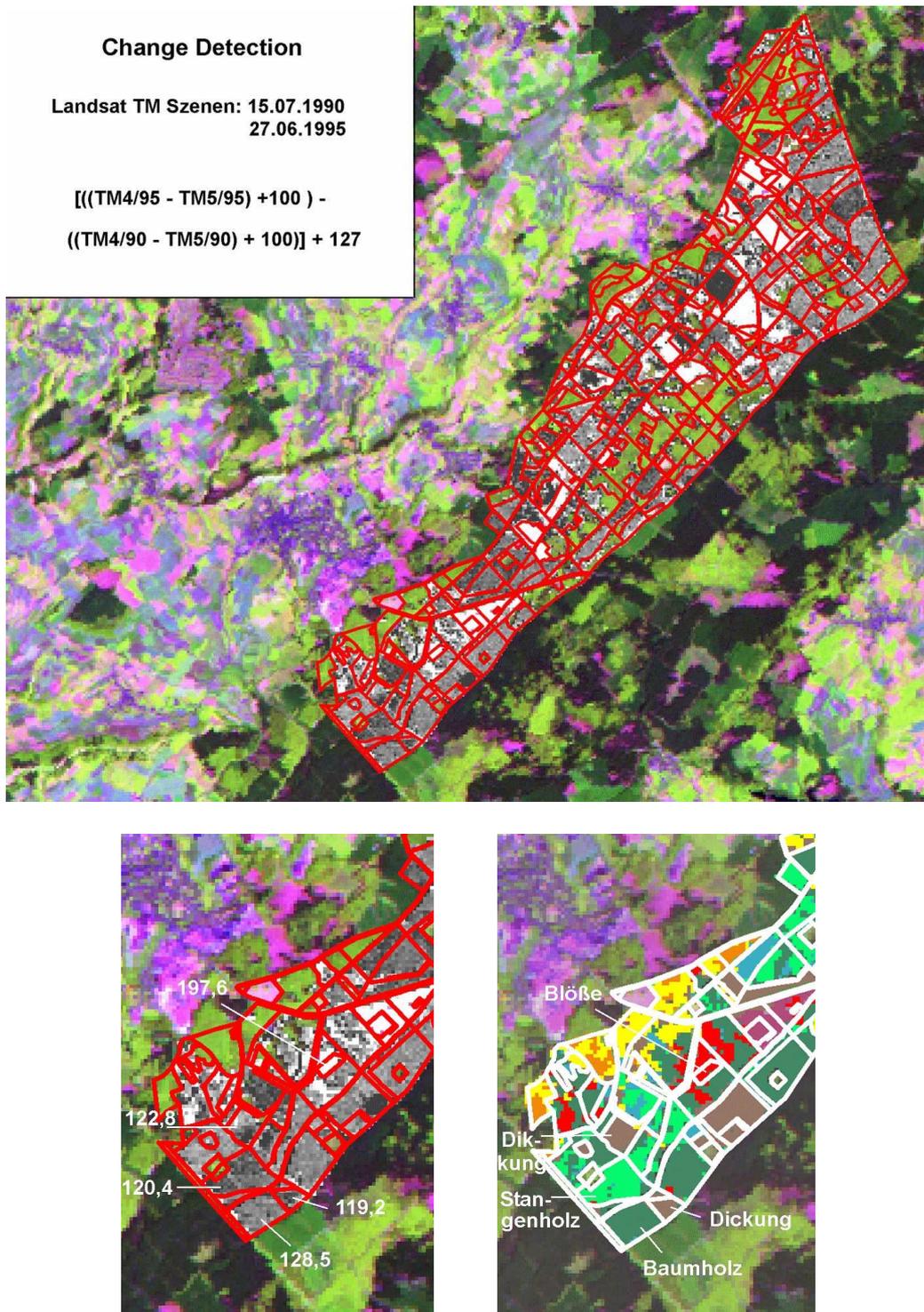


Abb. 85: Differenzbild 1995-1990 für Bischofsdhrn und Hinzerath

Aus den Klassifikationsergebnissen von 1990 lässt sich eine Fichtenmaske mit allen Fichtenpixeln erstellen (s.o.). Durch das Bilddifferenzverfahren ist es möglich, diese Fichtenmaske für 1995 zu aktualisieren, indem alle auffällig nach oben (Grauwerte >155) bzw. nach unten (Grauwerte <100) abweichenden Differenz-Pixel eliminiert werden und anschließend eine Fichten-Binärmaske erstellt wird. Die erstellten Fichtenmasken können als „Input“ für eine pixelweise Analyse bzw. Schätzung von Strukturparametern (im Rahmen der Reflexionsmodellierung) verwandt werden.

9. Anhang

FOGIS Prototyp „Hillesheim“: Technische Beschreibung

Im Rahmen des MOMS-2P-Projektes wurde anhand des Untersuchungsgebietes Hillesheim überprüft inwiefern die vorliegenden digitalen Karten der Forstdirektion Koblenz sich in das Geographische Informationssystem ArcView/ARCINFO transferieren lassen und wie dort bestmöglich eine Verknüpfung mit den ebenfalls digital bereitstehenden Sachinformationen, in Form der Forsteinrichtungsdaten aus dem Programmpaket „Forsteinrichtung im Dialog (FERDI)“ verknüpfen lassen.

Die Geometrie steht in Form eines AUTOCAD 14 Layers (DXF) zur Verfügung.

Nachfolgend wird der Datentransfer von AUTOCAD (DXF) nach ArcInfo/ARCVIEW (e00/Shape) beschrieben:

Der DXF File lässt sich sowohl nach ArcView in ein Shape-File als auch nach ArcInfo in eine Coverage transferieren. Gewählt wurde die ArcView Alternative, da in diesem Format die Daten im GIS bereitgestellt werden sollen. Der spätere Transfer nach ArcInfo ist problemlos möglich.

Aus dem DXF File lassen sich getrennt Linien, Polygone, Text und Annotations importieren. Hierfür ist das Laden der zugehörigen Extension (CAD-Reader) erforderlich.

Linien:

Zunächst FILE als DXF (line) laden.

Zur Darstellung der Waldeinteilung sind unten aufgeführte Layer auszuwählen. Sie geben einerseits alle die Waldeinteilung charakterisierenden Linienelemente wieder und enthalten andererseits möglichst wenig zusätzliche Linien, welche die Bestände weiter untergliedern. (Thema⇒Eigenschaften⇒Zeichnen):

K-FG-ABT
K-FG-BESITZ
K-FG-BST
K-FG-GGRENZEN
K-FG-UABT
K-WE-BLAU
K-WE-BRAUN
K-WE-GRUEN
K-WE-ROT

Der Layer K-FG-BESITZ enthält die in Form von kleinen Kreisen dargestellten Grenzsteine. Diese sind später für die Festlegung der Polygone sehr hinderlich, da sie geschlossenen Linienzüge darstellen und somit Polygone bilden. Sie können „gesperrt“ werden (Thema⇒Eigenschaften⇒Definition: Entity <>”Insert”), so dass nur noch die Grenzlinie erscheint.

Den so dargestellten File in eine Shapefile umwandeln (Thema⇒in Shapefile umwandeln).

Nun liegt die Waldeinteilung in der gewünschten Art vor. Zur Kennzeichnung der Flächen können die Abteilungs-, Unterabteilungs- und Bestandeskennziffern als Text überlagert werden.

Text

Die Beschriftung kann direkt übernommen werden. Die gewünschten TEXT-Layer sind über die in den Annotations abgelegte Information auswählbar. Die Annotations werden eingelesen (ADD THEME, Datei Icon ganz rechts anklicken und Annotations wählen) und anschließend die Layer

T-FG ABT
T-FG UABT
T-FG BST

ausgewählt.

Die Verknüpfung zwischen Attribut

Punkte (Label):

Zur Bestandeskennung sind die folgenden Layer auszuwählen:

T-FG-BST
T-FG-UABT

Einzelne Flächen sind zusätzlich mit einem kleinen „s“ gekennzeichnet. In den betreffenden Flächen werden so zusätzliche Punkte angezeigt. D.h. sie besitzen zwei zukünftige Labelpunkte. Diese Punkte können ausgeblendet werden über Thema Eigenschaften

Definition: [btr]="BE"

Diese sind ebenfalls als Shape abzuspeichern, so dass sie nach ArcInfo eingelesen werden können.

Einlesen von Shape-Files nach ARC/INFO (über die ArcTools):

Command Tools auswählen⇒Menü Conversion⇒ShapeTo ARC⇒Quell- und Zieldatei angeben und mit OK bestätigen

Die Berechnung der Topologie und somit auch die Flächenberechnung wird in ARCINFO durchgeführt. Es ist hier auch erforderlich, fehlende Labelpunkte zu kopieren. Jeder Bestand hat ursprünglich nur einen Labelpunkt. Häufig setzt sich ein Bestand jedoch aus mehreren Teilflächen zusammen, die durch Linien (Wege, Gewässer etc.) getrennt sind. Durch die Überhaken ist erkennbar, zu welchem Bestand die betreffende Fläche gehört. Der entsprechende Label muss in alle zu dem Bestand gehörenden Teilflächen (manuell) kopiert werden. Des Weiteren sind die Beschriftungen bei kleinen Flächen außerhalb des Polygons gesetzt. Verbindungslinien, die ebenfalls unter dem Layer HAKEN abgelegt sind, lassen die Flächen jedoch zuweisen. Das Kopieren der Labels kann sowohl in ArcView als auch in ARCINFO durchgeführt werden.

Bemerkung: Diese manuelle Überarbeitung lässt sich umgehen. Hierfür muss ein File aus dem Linien-DXF File erstellt werden, der nur die Überhaken enthält. Die Haken erhalten das

Linienattribut Haken und werden mit dem oben beschriebenen Linien-Shapefile bzw. Coverage verschnitten. Alle Linien die sich mit einer der Haken schneiden erhalten so das Attribut „Haken“ und können gelöscht werden. Allerdings werden dann die Flächen später vielfach zu groß angegeben, da sie Fläche des Weges mit zu dem Bestand gezählt wird.

Sind alle Polygone mit einem Label versehen muss für das Coverage die Topologie berechnet werden. Hierbei wird automatisch jeder Fläche die noch keinen Labelpunkt besitzt ein solcher zugewiesen.

Die Labelpunkte sind nun den Flächen, deren Umfang und Flächengröße mittels des ArcInfo Befehls „CLEAN“ berechnet wurde, zugeordnet.

Um die Verknüpfung mit den Sachinformationen aus dem Programmpaket FERDI der Forstdirektion Koblenz verknüpfen zu können muss aus den vorhandenen Informationen eine dem Feld „Wo“ der dBASE Datenbank entsprechende Kennung gebildet werden. Diese setzt sich zusammen aus:

```
[Fbgrd_gk].AsString+[ABT].AsString+[uabteil].AsString+[Bestand].AsString+0.AsString
```

Mittels der Funktionen „TABEL-LINK“ lassen sich nun die Geometriedaten mit den verschiedenen Forstdatenbanken verknüpfen.

Hierfür sind folgende Schritte erforderlich:

Fahill_04 Informationen zum Bestand

In beiden Tabellen das Feld „WO“ markieren. Da es sich hierbei um eine one-to-one Verbindung handelt, ist sowohl ein „join“ (beide Tabellen werden zu einer zusammengeführt) als auch ein „link“ (Tabellen werden nur Verknüpft) möglich. Aktivieren der Geometrietabelle, anschließen über das Menü TABELLE⇒join/link

Fahill_01 Informationen zur Unterabteilung

Verknüpfung über Feld „Wu“

In beiden Tabellen (Fahill_01 und Fahill_04) Feld „Wu“ markieren. Tabelle Fahill_01 aktivieren und über das Menü TABELLE⇒link beide Tabellen verknüpfen.

Fahill_06 Informationen zu den Baumarten

Verknüpfung der Tabellen Fahill_04 und Fahill_06 über das Feld „Wo“. Feld „Wo“ in beiden Tabellen markieren, Tabelle Fahill_04 aktivieren und über das Menü TABELLE⇒link.

Nun können für jeden Bestand die vorkommenden Baumarten abgefragt werden. Dabei werden automatisch auch Teilflächen von Beständen selektiert.

8. Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, J., OHLHOFF, R. & FUCHS, H. et al. (1996): Großflächige Erfassung von Bestandesverlichtungen und -auflösungen durch Luftbilder. - AFZ / Der Wald, 51. Jg., H.2, S 62-65
- AID/AUSWERTUNGS- und INFORMATIONSDIENST für ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT und FORSTEN, (Hrsg.) (1993): Neuartige Waldschäden. - (=AID-Veröffentlichung 1125), Bonn
- AKCA, A. & KENNEWEG, H. (1983): Zur Bedeutung der Fernerkundung bei Waldinventuren in Mitteleuropa.- AFZ / Der Wald, 38. Jg., H.46/47, S.1244-1246H.2, S 62-65
- ALBERTZ, J., (1991): Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern - Eine Einführung in die Fernerkundung. - Darmstadt
- ALBERTZ, J., BRAUERS, J., HARTERMANN, W., SCHOLTEN, F. (1991): Digitale geometrische Aufbereitung multisensoraler und multitemporaler Fernerkundungsdaten für die Waldschadensforschung (= Verbundprojekt Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung, Teil B2), Berlin
- AMMER, U., FRANKEN, W., HERRMANN, K., MOGGART, J., REINARTZ, P. (1989): Interpretation von Flugzeugscannerdaten zur Beurteilung der Vitalität von Kiefern. - In: Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung, LANDAUER, G. & VOSS, H.-H. (Hrsg.), DLR Abschlussdokumentation, Teil A, 92-105. Oberpfaffenhofen
- APLIN, P.; ATKINSON, P.M. & CURRAN, P.J. (1997): Fine Spatial Resolution Satellite Sensors for the Next Decade.- International Journal of Remote Sensing, vol.18, no.18, pp.3873-3881
- ARANUVACHAPUN, S. (1983): Variation of Atmospheric Optical Depth for Remote Sensing Radiance Calculation. - Remote Sensing of Environment, vol. 13, 131-147
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1985): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland. - Münster
- ATZBERGER, C. (1997): Estimates of winter wheat production through remote sensing and crop growth modelling. A case study on the Camargue region.- Akademische Abhandlungen zu den Geowissenschaften im Verlag für Wissenschaft und Forschung, Berlin, 261 S.
- ATZBERGER, C. (2000): INFORM: Ein invertierbares Forstreflexionsmodell zur fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Größen, in: Albertz, J. (Hrsg.), Photogrammetrie und Fernerkundung. Neue Sensoren - Neue Anwendungen, Vorträge 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. 13.-15. Oktober 1999 Universität Gesamthochschule Essen (Publ. der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 8), 163-173
- BADHWAR, G.D. et al. (1986): Satellite-derived leaf-area-index and vegetation maps as input to global carbon cycle models - A hierarchical approach.- in: Int. J. Remote Sens., 7(2): 265-281

- BÄHR H.-P. & BEHR, F.-J. (1991): Aufbau eines GIS als Datenbasis für Waldschadensforschung. - In: Fernerkundung in der Forstwirtschaft: Stand und Entwicklung, OESTEN, J. (Hrsg.), 43-57. Karlsruhe
- BÄHR, H.-P., SAUER, H., BEHR F.-J., GOßMANN, H. (1991): Aufbau eines Geographischen Informationssystems zur Ermittlung von Waldschäden und ihrer Veränderung. – Abschlußbericht, KfK-PEF.
- BAHRENBERG, G., GIESE, E. & NIPPER, J. (1990): Statistische Methoden in der Geographie I.- Stuttgart
- BEZIRKSREGIERUNG RHEINHESSEN-PFALZ (1982): Forsteinrichtungswerk für den Forstamtsbezirk Hagenbach. Neustadt
- BEZIRKSREGIERUNG RHEINHESSEN-PFALZ (1987^a): Erläuterungsbericht zur Standortskartierung im Forstamtsbezirk Hagenbach. Neustadt
- BEZIRKSREGIERUNG RHEINHESSEN-PFALZ (1987^b): Erläuterungsbericht zur Standortskartierung im Forstamtsbezirk Schaidt. Neustadt
- BEZIRKSREGIERUNG RHEINHESSEN-PFALZ (1994): Forsteinrichtungswerk für den Forstamtsbezirk Schaidt. Neustadt
- BIBERSTEIN, K. & KRANZ, K. (1995): Forstliches Geographisches Informationssystem Sachsen. Geo-Information-Systeme, vol. 7, no. 5, S. 2-7.
- BLANCHARD, L.E. & WEINSTEIN, O. (1980): Design challenges of the Thematic Mapper.- IEEE Trans. Geoscience & Remote Sensing, vol. GE-18, no. 2, 146-160
- BLOCK, J. (1990): Ergebnisse der Stoffdepositionsmessungen in rheinland-pfälzischen Waldgebieten 1984-1989. - (= Mitteilungen aus der FVA Rh.-Pf., 14), Trippstadt
- BLOCK, J. (1993^a): Entwicklung der Schadstoffeinträge in Wäldern. - In: Waldschäden, Boden- und Wasserversauerung durch Luftschadstoffe in Rheinland-Pfalz (Beiträge der Fachtagung vom 8. Dez. 1992), Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (Hrsg.), 22-26. Mainz
- BLOCK, J. (1993^b) Bodenzustand und Nährstoffversorgung der Waldökosysteme. - In: Waldschäden, Boden- und Wasserversauerung durch Luftschadstoffe in Rheinland-Pfalz (Beiträge der Fachtagung vom 8. Dez. 1992), Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (Hrsg.), 31-40. Mainz
- BLOCK, J., BOPP, O., GATTI, M., HEINDINGSFELD, N., ZOTH, R. (1991): Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz. - (= Mitteilungen aus der FVA Rh.-Pf., 17), Trippstadt
- BLOCK, J., DELB, H., HARTMANN, G., SEEMANN, D. & SCHRÖCK, H. W. (1995): Schwere Folgeschäden nach Kahlfraß durch Schwammspinner im Bienwald. AFZ/Der Wald, 50 Jg., N. 23, S. 1278-1281.
- BML/BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.) (1994^a): Waldzustandsbericht der Bundesregierung 1994 - Ergebnisse der Waldschadenserhebung. - Bonn

- BML/BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.) (1994^b): Nationaler Waldbericht der Bundesrepublik Deutschland. - Bonn
- BONAN, G.B. (1995): Land-Atmosphere Interactions for climate system models: Coupling biophysical, biogeochemical, and ecosystem dynamical processes.- in: RSE, 51: 57-73
- BUSCHMANN, C. & NAGEL, E. (1992): Reflexionsspektren von Blättern und Nadeln als Basis für physiologische Beurteilung von Waldschäden. - (= Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung, KfK-PEF 90), Karlsruhe
- BUTERA, K. (1986): A correlation and regression analysis of percent canopy closure versus TMS spectral response for selected forest sites in the San Juan National Forest, Colorado.- in: IEEE Trans. Geosc. Remote Sens., GE-24: 122-129
- CARLSON, G. R. & PATEL, B. (1997): A New Era Dawns for Geospatial Imagery. GIS World 2/1997, Seite 36-40
- CARPER, W.J.; LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. (1990): The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.56, no.4, pp.459-467
- CAVAYAS, F. & TEILLET, P.M. (1985): Geometric model simulations of conifer canopy reflectance.- in: ESA (Hrsg.): Proc. of the 3rd International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing Les Arcs, France, ESA SP-247, 183-189
- CHAVEZ, P.S. (1984): Digital Processing Techniques for Image Mapping with Landsat TM and SPOT Simulator Data.- Proceedings of the 18th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol.2, 1-5 October 1984, Paris, France, pp.101-116
- CHAVEZ, P.S. (1986): Digital Merging of Landsat TM and Digitized NHAP Data for 1:24000-Scale Image Mapping.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.52, no.10, pp.1637-1646
- CHAVEZ, P.S.; BERLIN, G.L. & TARABZOUNI, M.A. (1983): Discriminating Lithologies and Surficial Deposits in the Al Hisma Plateau Region of Saudi Arabia with Digitally Combined Landsat MSS and SIR-A Images.- Proceedings, National Conference on Resources Management Applications, Energy and Environment, Vol. 4, San Francisco, California, pp.22-34
- CHAVEZ, P.S. & BOWELL, J.A. (1988): Comparison of the Spectral Information Content of Landsat Thematic Mapper and SPOT for Three Different Sites in Phoenix, Arizona Region.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.54, no.12, pp.1699-1708
- CHAVEZ, P.S.; SIDES, S.C. & ANDERSON, J.A. (1991): Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.57, no.3, pp.295-303
- CHEN, J.M. (1996): Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands.- in: Agric. For. Met., 80: 135-163

- CLICHE, G., BONN, F. & TEILLET, P. (1985): Integration of the SPOT Panchromatic Channel into its Multispectral Mode for Image Sharpness Enhancement.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.51, no.3, pp.311-316
- COENRADIE, B. (1992): Waldklassifizierung und Totholzkartierung im Nationalpark Bayerischer Wald unter Verwendung von Landsat-TM- und digitalen Zusatzdaten. - (= DLR-FB 92-10), Oberpfaffenhofen
- COENRADIE, B.; HOFFMANN, K.; KENNEWEG, H.; SAGISCHEWSKI, H. (1999): Nutzung moderner Satellitendaten in der sächsischen Forstwirtschaft. Forst und Holz 4/99, S. 99-102.
- COHEN, W.B. & SPIES, T.A. (1992): Estimating structural attributes of Douglas-Fir/Western Hemlock forest stands from LANDSAT and SPOT imagery. - in: RSE, 41: 1-17
- COLVOCORESSES, A.P. (1977): Proposed Parameters for an Operational Landsat.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.43, no.9, pp.1139-1145
- CONESE, C., GILABERT, M.A., MASELLI, F., BOTTAI, L. (1993): Topographic Normalization of TM Scenes through the Use of an Atmospheric Correction Method and Digital Terrain Models. - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 59, 1745-1753
- CONESE, C., MASELLI, M. & DE FILIPPIS, T. (1993): A New Method for the Integration of Landsat TM and SPOT Panchromatic Data.- International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS Commission 3, 29 (PartB3), pp.892-895
- COPPIN, P.R.; BAUER, M.E.; GULINCK, H. et al. (1997): Forest Ecosystem Monitoring from Space: State of the Art.- Proceedings International Workshop Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring, Vienna, Austria, 14-16 October 1996, pp.263-292
- CURRAN, P.J. et al. (1991): The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration.- in: RSE, 35: 69-76
- CURRAN, P.J. et al. (1992): Seasonal LAI in Slash Pine estimated with Landsat TM.- in: RSE, 39: 3-13
- DAILY, M.I., FARR, T., ELACHI, C. et al. (1979): Geologic Interpretation from Composited Radar and Landsat Imagery.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.45, no.8, pp.1109-1116
- DANSON, F.M. & CURRAN, P.J. (1993): Factors affecting the remotely sensed response of coniferous forest plantations.- in: RSE, 43: 55-65
- DANSON, F.M. & PLUMMER, S.E. (1995): Red-edge response to forest leaf area index.- in: Int. J. Remote Sens., 16(1): 183-188
- DAUBECHIES, I. (1990): The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis.- IEEE Transactions on Information Theory, vol.36, no.5, pp.961-1005
- DAWSON, T.P. et al. (1999): The propagation of foliar biochemical absorption features in forest canopy reflectance: A theoretical analysis.- in: RSE, 67: 147-159
- DEERING, D.W. et al. (1999): Characterization of the reflectance anisotropy of three boreal forest canopies in spring-summer.- in: RSE, 67: 205-229

- DELB, H. & BLOCK, J. (1999): Untersuchungen zur Schwammspinner-Kalamität von 1992 bis 1994 in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 45/99.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.): Beilage zur Wetterkarte. - 78 (1990), Offenbach
- DIEMER, C. (1998): Vergleichende Analyse von Datenfusionstechniken zur Verbesserung der geometrischen Auflösung von Satellitenbilddaten. Diplomarbeit Universität Trier, unveröffentlicht.
- DLR-DFD (1997): MOMS User Guide Version 1.0 .- Neustrelitz / Friedland
- DREISER, C. (1989): Abschätzung des Weidepotentials in ariden Gebieten Kenias mit Hilfe von LANDSAT-TM-Daten. - Geographische Rundschau, 41, 690-695
- DUVENHORST, J. & NIEHAUS-UEBEL, G. (1996): Zeitgemäße Forsteinrichtung mit Fernerkundung und GIS. - AFZ/Der Wald, 52, 68-70
- EGIDI, H. (1996): Praktische Anwendung der Inventurverfahren in Rheinland-Pfalz. - (= Vortrag anlässlich Jahrestagung 1996 des Arbeitskreises Zustandserfassung und Planung der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung am 10./11. Oktober 1996 in Weingarten/Ravensburg-Baden-Württemberg)
- EHLERS, M. & WELCH, R. (1988): Kartographische Leistungsfähigkeit von Landsat-TM-Aufnahmen. - BuL/Bildmessung und Luftbildwesen, 56, 138-148
- EHLERS, M. (1991): Multisensor Image Fusion Techniques in Remote Sensing. - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.46, no.3, pp.19-30
- ELLENBERG, H. (1986): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. - Stuttgart
- ELLENBERG, H. (1995): Allgemeines Waldsterben - ein Konstrukt?. - Naturwissenschaftliche Rundschau, 48, 93-96
- ELLING, W. & KNOPPIK, D. (1986): Spektrales Reflexionsverhalten von Fichtenzweigen mit Chlorosen und Nekrosen der Nadeln. - AFZ/Der Wald, 42, 431-432
- ERDAS Inc. (1994): ERDAS Field Guide. - Atlanta
- ESRI Inc. (1994): Understanding GIS - The ARC/INFO Method. - Redlands
- FASSNACHT, K.S. et al. (1994): A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. - in: Agric. For. Met., 71: 183-207
- FEA/Forsteinrichtungsamt Koblenz (Hrsg.) (1957): Erläuterungsbericht der Standortskartierung im staatlichen Forstamt Morbach. - Koblenz
- FILBERTI, D.P., MARSH, S.E. & SCHOWENGERDT, R.A. (1994): Synthesis of Imagery with High Spatial and Spectral Resolution from Multiple Image Sources. - Optical Engineering, vol.33, no.8, pp.2520-2528
- FORSTDIREKTION KOBLENZ (1997): Forsteinrichtung Gemeindewald Hillesheim, Schlussbesprechung am 15. Dezember 1997.- Unterlagensammlung, Koblenz (unveröffentlicht)

- FÖRSTER, B. (1989): Untersuchung der Verwendbarkeit von Satellitenbilddaten (Thematic Mapper) zur Kartierung von Waldschäden. - (= DFVLR-FB 89-06), Oberpfaffenhofen
- FRITSCH, D. & SCHILCHER, M. (1989): Geo-Informationssysteme - Anwendungen - neue Entwicklungen. - Karlsruhe
- FRITZ, L.W. (1996): The Era of Commercial Earth Observation Satellites. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.62, no.1, pp.39-45
- GARGUET-DUPOINT, B., GIREL, J., CHASSERY, J.-M. et al. (1996): The Use of Multiresolution Analysis and Wavelets Transform for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.62, no.9, pp.1057-1066
- GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P. et al. (1996): Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. - in: RSE, 58: 131-156
- GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P. et al. (1999): Modeling BRDF and radiation regime of boreal and tropical forests: I. BRDF. - in: RSE, 68: 281-316
- GAUSMANN, H.W., ESCOBAR, D.E., RODRIGUEZ, R.R. (1978): Effects of stress and pubescence on plant leaf and canopy reflectance. - I. Arch. Ph. XXII-7, 719-750
- GILLESPIE, A.R., KAHLE, A.B. & WALKER, R.E. (1986): Color Enhancement of Highly Correlated Images. Decorrelation and HSI Contrast Stretches. - Remote Sensing of Environment, no. 20, pp. 209-235
- GOEL, N.S. (1988): Models of vegetation canopy reflectance, their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. - in: Rem. Sens. Rev., 4: 1-212
- GOEL, N.S. (1989): Inversion of Canopy Reflectance Models for Estimation of Biophysical Parameters from Reflectance Data. - In: Theory and Applications of Optical Remote Sensing, ASRAR, G. (ed.), 205-251. New York/Chichester/Brisbane
- GRASSO, D.N. (1993): Applications of the IHS Color Transformation for 1:24000-Scale Geologic Mapping: A Low Cost SPOT Alternative.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.59, no.1, pp.73-80
- GROSS, H.N. & SCHOTT, J.R. (1996): Application of Spectral Mixing to Image Fusion.- Proceedings of the 26th International Symposium on Remote Sensing of Environment and the 18th Symposium of the Canadian Remote Sensing Society, Information Tools for Sustainable Development, Vancouver, British Columbia, Canada, pp.428-431
- GROSS, H.N. & SCHOTT, J.R. (1998): Application of Spectral Mixture Analysis and Image Fusion Techniques for Image Sharpening.- Remote Sensing of Environment, no.63, pp.85-94
- GUYOT, G. (1990): Optical Properties of Vegetation Canopies. - In: Applications of remote sensing in agriculture, STEVEN, M.D. & CLARK, J.A. (ed.), 19-43. London
- GUYOT, G. et al. (1989): Factors affecting the spectral response of forest canopies: A review.- in: Geocarto International, 3: 43-60
- HABERÄCKER, P. (1987): Digitale Bildverarbeitung. - München/Wien

- HALLADA, W.A. & COX, S. (1983): Image Sharpening for Mixed Spatial and Spectral Resolution Satellite Systems.- Proceedings of the 17th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol. 3, 9-13 May, 1983 Ann Arbor, Michigan, pp.1023-1032
- HARRIS, J.R., MURRAY, R. & HIROSE, T. (1990): IHS Transform for the Integration of Radar Imagery with other Remotely Sensed Data.- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.56, no.12, pp.1631-1641
- HAY, J.E. & MCKAY, D.C. (1985): Estimating solar irradiance on inclined surfaces: A review and assessment of methodologies. - Int. J. Solar Energy, vol. 3, 203-240
- HAYDN, R.; DALKE, G.W. & HENKEL, J. (1982): Application of the IHS Color Transform to the Processing of Multisensor Data and Image Enhancement. - Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semiarid Lands, Cairo, Egypt, pp.599-616
- HAYDN, R., BÄTZ, W. HÄUSLER, T. (1989): Entwicklung eines praxisgerechten Instrumentariums für aktualisierte Waldschadenserhebungen unter besonderer Berücksichtigung von hochauflösenden Satellitendaten und IR-Bildern. - In: Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung, LANDAUER, G. & VOSS, H.-H. (Hrsg.), DLR Abschlussdokumentation, Teil A, 106-120. Oberpfaffenhofen
- HEINDINGSFELD, N. 1989: Verfahren zur Luftbildgestützten Intensiv-Waldschadenserhebung in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 10. Trippstadt.
- HEINDINGSFELD, N. (1993): Neue Konzepte zum Luftbildeinsatz für großräumig permanente Waldzustandserhebungen und zur bestandesbezogenen Kartierung flächenhafter Waldschäden. - (= Mitteilungen aus der FVA Rh.-Pf., 23), Trippstadt
- HENNINGSEN, D. & KATZUNG, G. (1992): Einführung in die Geologie Deutschlands. - Stuttgart
- HERTEL, D., PELZ, E. & WIENHOLD, C. (1992): Standardisierung von Farbinfrarot-Luftbildern als Grundlage für das Monitoring von Waldschäden. - Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 60.Jg., H.6, S.181-189
- HERTEL, D., PELZ, E. & WIENHOLD, C. (1992): Standardisierung von Farbinfrarot-Luftbildern als Grundlage für das Monitoring von Waldschäden. - Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 60.Jg., H.6, S.181-189
- HILDEBRANDT, G. (1976): Die spektralen Reflexionseigenschaften der Vegetation. - In: Remote Sensing in Forestry (= Proc. Symp. XVI. IUFRO World Congress), 9-22. Oslo
- HILDEBRANDT, G. (1984): Fernerkundung im Dienste forstwirtschaftlicher Planungsarbeit.- In: SCHNEIDER, S.(Hrsg.): Angewandte Fernerkundung – Methoden und Beispiele. Hannover
- HILDEBRANDT, G. (1993): Fernerkundung in der Forstwirtschaft. - ZPF/Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 61, 135-138
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung - Für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. - Heidelberg

- HILDEBRANDT, G., BAUMGARTEN, R., KADRO, A. KUNTZ, S. (1990): Untersuchung zur Methodik großräumiger Waldschadensinventuren und der Beobachtung der Schadentwicklung durch Fernerkundung und kombinierter Feld- Fernerkundungsverfahren. - (= Verbundprojekt Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung, Teil B5), Freiburg
- HILDEBRANDT, G. & GROSS, C.-P. (1996): Neue Impulse für forstliche Luftbildanwendungen. - AFZ / Der Wald, 51.Jg., H.2, S.60-61
- HILL, J. (1993): High precision land cover mapping and inventory with multi-temporal earth observation satellite data - The Ardèche Experiment. - Luxembourg
- HILL, J. (Hrsg.) (1996): DeMon - Integrated Approaches to Desertification Mapping and Monitoring in the Mediterranean Basin. - (= Final Report of the DeMon-1 Project), Brüssel/Luxemburg
- HILL, J. (1997): A Short User's Guide for Image Enhancement Software of the Remote Sensing Department, University of Trier, Germany.- (= FEUT Image Processing Software, Vol.3), Trier (unveröffentlicht)
- HILL, J. & STURM, B. (1991): Radiometric Correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. - Int. J. Remote Sensing, 12, 1471-1491
- HILL, J., MEHL, W., RADELOFF, V. (1995): Improved forest mapping by combining corrections of atmospheric and topographic effects in Landsat-TM imagery. - In: Sensors and Environmental Applications of Remote Sensing, ASKNE, J. (ed.) (= Proc. 14th EARSeL Symp., Göteborg 6-8- June), 143-151. Rotterdam
- HILL, J.; DIEMER, C.; STÖVER, O. et al. (1998): A Local Correlation Approach for the Fusion of Remote Sensing Data with Different Spatial Resolutions in Forestry Applications.- Proceedings of the ISPRS Workshop: Expert Meeting on Data Fusion Techniques, 8-9 December 1997, Freiburg, Germany, pp.35-46
- HILL, J.; SOMMER, S., MEHL, W. et al. (1996): A Conceptual Framework for Mapping and Monitoring the Degradation of Mediterranean Ecosystems with Remote Sensing.- In: HILL, J. & PETER, D.[eds.], The Use of Remote Sensing for Land Degradation and Desertification Monitoring in the Mediterranean Basin. State of the Art and Future Research, Proceedings of a Workshop, 13-15 June 1994, Valencia, Spain, pp.23-43
- HÖHNE, A. (1996): Entwicklung und Aufbau des Geographischen Informationssystems der LFV Baden-Württemberg (FOGIS). - AFZ/Der Wald, 52, 535-538
- HOLUBA, K.-H. 1995: Forstvermessung und Forstkartographie in Baden-Württemberg. AFZ 22/1995, Seite 1198-1200.
- HORLER, D.N. & AHERN, F.J. (1986): Forestry information content of Thematic Mapper data. - in: Int. J. Remote Sens., 7(3): 405-428
- HOWARD, J.A. (1991): Remote Sensing of Forest Resources. - London
- HUSS, J. (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. - Karlsruhe

- ITTEN, K.I., MEYER, P., KELLENBERGER, T., LEU, R., SANDMEIER, S., BITTER, P., SEIDEL, K. (1992): Correction of the Impact of Topography and Atmosphere on Landsat-TM Forest Mapping of Alpine Regions. - (= Remote Sensing Series, 18), Zürich
- IVERSON, A.E. & LERSCH, J.R. (1994): Adaptive Image Sharpening Using Multiresolution Representations. - Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, Optical Engineering in Aerospace Sensing (ohne Ortsangabe), pp.72-83
- JACQUEMOUD, S. & BARET, F. (1990): PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. - in: RSE, 34: 75-91
- JACQUEMOUD, S. et al. (1996): Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. - in: RSE, 56: 194-202
- JAKUBAUSKAS, M.E. (1996): Canonical correlation analysis of coniferous forest spectral and biotic relations. - in: Int. J. Remote Sens., 17(12): 2323:2332
- JORIA, P. E. & AHEARN, S. C. (1991): A Comparison of the SPOT and Landsat Thematic Mapper Satellite Systems for Detecting Gypsy Moth Defoliation in Michigan. *PE&RS* 57 (12): 1605-1612.
- JUNIUS, H. (1987): ARC-INFO - Ein Geographisches Informationssystem. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, 101, S. 47-59.
- JUSTICE, C.A., MARKHAM, B.L., TOWNSHEND, J.R.G. et al. (1989): Spatial Degradation of Satellite Data. - International Journal of Remote Sensing, vol.10, no.10, pp.1539-1561
- KALYANARAMAN, S., RAJANGAM, R.K. & RATTAN, R. (1995): Indian Remote Spacecraft - 1C/1D.- International Journal of Remote Sensing, vol.16, no.5, pp.791-799
- KAZIMIROV, N. I. & MOROZOVA, R.N. (1973): Biological cycling of matter in spruce forest of Karelia. - Leningrad
- KEIL, M. et al. (1989^a): Waldkartierung mittels Satellitenbilddaten in Bayern. „Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung“, DLR Abschlussdokumentation Teil A, S. 194-212. Oberpfaffenhofen.
- KEIL, M. et al. (1989^b): Waldkartierung mit Satellitenbilddaten. DLR-Nachrichten, Heft 58, S. 38-42. Oberpfaffenhofen.
- KENNEWEG, H., SCHARDT, M. & SAGISCHEWSKI, H. (1993): Fernerkundung und GIS als kombiniertes Instrumentarium der Waldzustandserfassung, Proc. of the Int. Symposium „Application of Remote Sensing in Forestry“, Sept. 22-24.
- KNEIZYS, F.X., SHETTLE, E.P., ABREU, J.H., CHETWYND, J.H., ANDERSON, G.P., GALLERY, W.O., SELBY, J.E.A., CLOUGH, S.A. (1988): User's guide to LOW-TRAN-7. - (= Air Force Geophysics Laboratory, AFGL-TR-88-0177), Bedford/Massachusetts
- KNIPLING, E.B. (1970): Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. - Remote Sensing of Environment, vol. 1, 155-159
- KOCH, B. (1987): Untersuchungen zur Reflexion von Waldbäumen auf der Grundlage von Labor- und Geländemessungen. - Dissertation, Universität München

- KOCH, B. & FRITZ, R. (1998): Satelliten-Fernerkundung im Rahmen forstlicher Kartographie. - AFZ / Der Wald, 53.Jg., H.4, S.164-166
- KOCH, B.; FRITZ, R. & KREMMERS, Th. (1997): Possibilities to Integrate High Resolution Satellite Data in Forest Inventories. - Proceedings of the International Workshop, Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring, 14-16 October 1996, Vienna, Austria, pp.27-32
- KONECNY, G. (1996): Hochauflösende Fernerkundungssensoren für kartographische Anwendung in Entwicklungsländern. ZPF, 64(2): 39-51
- KONECNY, G., SCHUHR, W. & WU, J. (1982): Investigations of Interpretability of Images by Different Sensors and Plattformen for Small Scale Mapping. - Proceedings of the International Symposium, Commission I, Advances in the Quality of Image Data (=International Archives of Photogrammetry. Vol. 24, Part 1), Konsington, Australia, pp.11-22
- KRAMER, H. (1976): Begriffe der Forsteinrichtung. - (= Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, 48), Göttingen
- KRAUS, K. (1990): Fernerkundung. Band 2: Auswertung photographischer und digitaler Bilder. - Bonn
- KRAUS, K. & SCHNEIDER, W. (1988): Fernerkundung - Band1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. - Bonn
- KUBELKA, V.P. & MUNK, F. (1931): Ein Beitrag zur Optik - Farbenstriche. - Z. Techn. Physik., 11, 593-601
- KÜSTER, H. (1995): Geschichte der Landschaft in Mitteleuropa von der Eiszeit bis zur Gegenwart. - München
- LANDAUER, G. & VOSS, H.-H. (Hrsg.) (1989): Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung. - (= DLR Abschlussdokumentation, Teil A), Oberpfaffenhofen
- LANDESVERMESSUNGSAMT RHEINLAND-PFALZ (HRSG.) (1991): ATKIS - Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem im Landesvermessungsamt. - Koblenz
- LARCHER, W. (1984): Ökologie der Pflanzen. - Stuttgart
- LARCHER, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen. - Stuttgart
- LAUER, D.T. & TODD, W.J. (1981): Landcover Mapping with Merged Landsat RBV and MSS Steroscopic Images. - Proceedings, ASP Fall Technical Conference, San Francisco, California, pp.68-69
- LFK-LENKFLUGKÖRPERSYSTEME GMBH (1997): DPA Digitale Photogrammetrie-Ausstattung. - Informationsblatt, München
- LFV R-P / Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz (1974): Forsteinrichtungsanweisung für Staats- und Körperschaftswald in Rheinland-Pfalz (FA 72). - Mainz
- LI, X. & STRAHLER, A.H. (1986): Geometric-optical bi-directional reflectance modelling of a conifer forest canopy. - in: IEEE 24(6): 906-919

- LI, H.; MANJUNATH, B.S. & MITRA, S.K. (1995): Multisensor Image Fusion Using the Wavelet Transform. - *Graphical Models and Image Processing*, vol.57, no.3, pp.235-245
- LIEBHOLD, A. M. et al. (1992): Gypsy Moth Invasion in North America: a Quantitativ Analysis. *Journal of Biogeography* 12 (5): 513-520
- LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. (1994): Remote Sensing and Image Interpretation. - New York
- LÖFFLER, E. (1985): Geographie und Fernerkundung - Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten. - Stuttgart
- LUCASCHEWSKI, I. (1996): Waldflächeninventur mit Luftbildkarten. - *AFZ / Der Wald*, 51.Jg., H.2, S.86-87
- MALLAT, S. (1989): A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Representation. - *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.11, no.7, pp.674-693
- MARKHAM, B.L. & BARKER, J.L. (1987): Thematic Mapper bandpass solar exatmospheric irradiances. - *Int. J. Remote Sensing*, 8, 517-523
- MATZNER, E. (1988): Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling. - (= Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Reihe A, 40), Göttingen
- MC DONALD, P. et al. (1998): Investigation of the utility of spectral vegetation indices for determining information on coniferous forests. - in: *RSE*, 66: 250-272
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, WEINBAU UND FORSTEN (HRSG.) (1987): Rheinland-Pfalz - Waldreiches Land- Mainz
- MORAN, M.S. (1990): A Window-Based Technique for Combining Landsat Thematic Mapper Thermal Data with Higher-Resolution Multispectral Data over Agricultural Lands. - *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.56, no.3, pp.337-342
- MUCHONEY, D.M. & HAACK, B.N. (1994): Change Detection for Monitoring Forest Defoliation. *PE&RS* 60 (10): 1243-1251
- MUNECHIKA, C.K., WARNICK, J.S., SALVAGGIO, C. et al. (1993): Resolution Enhancement of Multispectral Image Data to Improve Classification Accuracy. - *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.59, no.1, pp.67-72
- NAITHANI, K.K. (1990): Can Satellite Images replace Aerial Photographs? A Photogrammetrist's View. - *ITC Journal*, no.1, pp.29-31
- NEGENDANK, J.F.W. (1983): Trier und Umgebung. - (= Sammlung geologischer Führer, 60), Berlin/Stuttgart
- OESTEN, G., KUNTZ, S. & GROSS, C.P. (Hrsg.) (1991): Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Stand und Entwicklungen. - Karlsruhe
- OESTER, B. & KÖHL, M. (1996): Luftbilder als Mittel zur Steigerung der Kosteneffizienz. - *AFZ / Der Wald*, 51. Jg., H.2, S.81-83
- OKE, J. (1995): Boundary layer climates. - Routledge, London, New York, 435 S.

- PEDDLE, D.R. et al. (1999): Spectral mixture analysis and geometrical-optical reflectance modeling of boreal forest biophysical structure. - in: RSE, 67: 288-297
- PEERENBOOM, H.-G. & HILL, J. (1996): Die Nutzung von MOMS-2P-Daten zur Waldzustandserfassung und Aktualisierung von Forsteinrichtungsdaten in Rheinland-Pfalz. - Projektbeschreibung, Trier (unveröffentlicht)
- PELLEMANS, A.H.J.M., JORDANS, R.W.L. & ALLEWIJN, R. (1993): Merging Multispectral and Panchromatic SPOT Images with Respect to the Radiometric Properties of the Sensor. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.59, no.1, pp.81-87
- PETERSON, D.L. (1988): Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents. - in: RSE, 24: 85-108
- PETERSON, D.L. & RUNNING, S.W. (1989): Applications in Forest Science and Management. - In: Theory and Applications of Optical Remote Sensing, ASRAR, G. (ed.), 429-473. New York/Chichester/Brisbane
- PETERSON, D.L., WESTMAN, W.E., STEPHENSON, N.J., AMBROSIA, V.G., BRASS, J.A., SPANNER, M.A. (1986): Analysis of Forest Structure Using Thematic Mapper Simulator Data. - IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-24, no.1, 113-120
- PRADINES, D. (1986): Improving Spot Images Size and Multispectral Resolution. - Proceedings of the SPIE Vol. 660 Earth Remote Sensing Using the Landsat Thematic Mapper and SPOT Sensor Systems, 15-17 April 1986, Innsbruck, Austria, pp.98-102
- PRICE, J.C. (1987): Combining Panchromatic and Multispectral Imagery from Dual Resolution Satellite Instruments.- Remote Sensing of Environment, no.21, pp.119-128
- PROY, C., TANRE, D., DESHAMPS, P.Y. (1989): Evaluation of Topographic Effects in Remotely Sensed Data.- Remote Sensing of Environment, vol. 30, 21-32
- RAINES, G.L. (1977): Digital Color Analysis of Color-Ratio Composite Landsat Scenes. - Proceedings of the 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 25-29 April 1977, Ann Arbor, Michigan, pp.1463-1472
- RANCHIN, T. & WALD, L. (1996^a): Benefits of Fusion of High Spatial and Spectral Resolutions Images for Urban Mapping. - Proceedings of the 26th International Symposium on Remote Sensing of Environment and the 18th Symposium of the Canadian Remote Sensing Society, Information Tools for Sustainable Development, Vancouver, British Columbia, Canada, pp.262-265
- RANCHIN, T. & WALD, L. (1996^b): Merging SPOT-P and KRV-1000 Images for Updating Urban Maps. - Proceedings of the 26th International Symposium on Remote Sensing of Environment and the 18th Symposium of the Canadian Remote Sensing Society, Information Tools for Sustainable Development, Vancouver, British Columbia, Canada, pp.401-404
- RANCHIN, T., WALD, L. & MANGOLINI, M. (1994): Efficient Data Fusion Using Wavelet Transform: the Case of SPOT Satellite Images. - Proceedings of the SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging and Instrumentation, 11-16 Jly 1993, San Diego, California, pp.171-178

- RANCHIN, T., WALD, L. & MANGOLINI, M. (1996): Fusion of SPOT Panchromatic and Multispectral Images and Computation of the Normalized Difference Vegetation Index at the Spatial Resolution of 10m. - Proceedings of the 15th Symposium of EARSeL, Progress in Environmental Research and Applications, 4-6 September 1995, Basel, Switzerland, pp.147-153
- REEMTSMA, J.B. (1986): Der Magnesiumgehalt von Nadeln niedersächsischer Fichtenbestände und seine Beurteilung. - Allg. Forst- und Jagdzeitung, 157, 196-203
- REHFUESS, K.E. (1990): Waldboden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. - Hamburg/Berlin
- REICHERT, H. & STETS, J. (1980): Der südwestliche Hunsrück - Hochwald und Idarwald. - (= Rheinische Landschaften, Heft 17), Köln
- REICHLER (Hrsg.) (1981): Dynamic properties of forest ecosystems. - Cambridge
- REINARTZ, P. (1989): Untersuchungen zur multispektralen Klassifizierung von schwer trennbaren Klassen mit Beispielen aus Waldschadensgebieten. - (= DLR-FB 89-55), Oberpfaffenhofen
- RICHARDS, J.A. (1993): Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. - Berlin, Heidelberg, New York
- RICHARDS, J.A. (1986): Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction. - Berlin/Heidelberg/New York
- RICHTER, G. (1978): Bodengeographie. - In: Trier und Umgebung (= Sammlung Geographischer Führer, 11), WERLE, O. (Hrsg.), 34-43. Berlin/Stuttgart
- ROESLER, R.-U. (Hrsg.) 1982: Das Landschaftsschutzgebiet Bienwald in der Südpfalz, Pollichia-Buch Nr. 3. Bad Dürkheim.
- ROLLER, N.E.G. & COX, S. (1980): Comparison of Landsat MSS and Merged MSS/RBV Data for Analysis of Natural Vegetation. - Proceedings of the 14th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol.2, 23-30 April 1980, San Jose, Costa Rica, pp.1001-1007
- ROSEMA, A., VERHOEF, W., NOORBERGEN, H., BORGESIOUS, J.J. (1992): A New Forest Light Interaction Model in Support of Forest Monitoring. - Remote Sensing of Environment, vol. 42, 23-41
- RUITER, J.F., PETERS, S.W.M., GRIEND, A.A., ROSEMA, A.: Monitoring Boreal Forest with Landsat TM: A Validation of the Forest Light Interaction Model FLIM. - (in Bearbeitung)
- RUNNING, S.W. et al. (1989): Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation. - in: Ecology, 70(4): 1090-1101
- SAGISCHEWSKY, H., FABER, L., KENNEWEG, H., SCHARDT, M. (1995): Einsatz eines Waldinformationssystems für den niedersächsischen Harz. - GIS/Geo-Informationssysteme, 7, H. 5, 15-17

- SAUER, H. (1989): Rasterorientierte Informationssysteme in der Geographie - Konzepte und Erfahrungen bei der Realisierung eines GIS für die Waldschadensforschung. - (= Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 74), Würzburg
- SCHARDT, M. (1990): Verwendbarkeit von Thematic Mapper-Daten zur Klassifizierung von Baumarten und natürlichen Altersklassen. - (= DLR-FB 90-44), Oberpfaffenhofen
- SCHIERMEIER, R. (1995): Aufbau eines Informationssystems für Forstzwecke in Bayern am Beispiel Fichtelgebirge. - GIS/Geo-Informationssysteme, 7, H.5, 8-14
- SCHLÜTER, W., HOLUBA, K.-H. (1996): Kartenfertigung mit FOGIS bei den Forstdirektionen. AFZ/Der Wald 10/1996, S. 544-549.
- SCHOWENGERDT, R.A. (1980): Reconstruction of Multispatial, Multispectral Image Data Using Spatial Frequency Content. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.46, no.10, pp.1325-1334
- SCHULTZ, J. (1995): Die Ökozonen der Erde. - Stuttgart
- SCHULZE, E.-D. (1992): Waldschäden - Die Erforschung ihrer Ursachen und Auswirkungen. - In: Mannheimer Forum 91/92 - Ein Panorama der Naturwissenschaften, FISCHER, E.P. (Hrsg.), 129-176. Mannheim
- SCHWARZ, G. & DATCU, M. (1997): Wavelets - ein neues leistungsfähiges Werkzeug für die Verarbeitung von Bilddaten in der Fernerkundung.- Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Jg., H.3, S.189-202
- SCHWIND, W. (1986): Wald und Waldentwicklung in der Vulkaneifel. - AFZ / Der Wald, 41.Jg., H.34/35, S.843-846
- SHETTIGARA, V.K. (1989): A Linear Transformation Technique for Spatial Enhancement of Multispectral Images Using a Higher Resolution Data Set. - International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'89), Vancouver, Canada. pp. 2615-2618
- SHETTIGARA, V.K. (1992): A Generalized Component Substitution Technique for Spatial Enhancement of Multispectral Images Using a Higher Resolution Data Set. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.58, no.5, pp.561-567
- SIEDE, W. (1991): Einsatz eines Forstlichen Informationssystems - Kartierung und Auswertung von Sturmschäden. - AFZ/Der Wald, 47, 126-129
- SOBOLEV, V.V. (1963): A treatise on radiative transfer. - Princeton
- SPANNER, M.A. et al. (1990): The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forests: Relationship with leaf area index. - in: RSE, 33: 97-112
- SPRICH, L. & WALDENSPUHL, T. (1991): Ökologie und Ökonomie. - AFZ/Der Wald, 47, 14-15
- STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND FORSTEN DES LANDES RHEINLAND PFALZ (1995): Waldzustandsbericht 1995 für Rheinland-Pfalz. - Mainz
- STENBERG, P. (1996): Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers. - in: Agric. For. Met., 79: 1-8

- STIBIG, H.J. (1988): Untersuchung zum Anwendungspotential von SPOT- und TM-Daten für die digitale land- und forstwirtschaftliche Landnutzungs-Klassifikation anhand von Simulations- und Originalaufnahmen. - (= Mitteilungen der Abteilung für Forstliche Biometrie und der Abteilung für Luftbildmessung und Fernerkundung der Universität Freiburg i.Br., 88-2), Freiburg
- STOLITZKA, G. (1991): Forstkartierung, Forsteinrichtung und geographische Informationssysteme. - In: OESTEN, G.; KUNTZ, S. & GROSS, C.P. (Hrsg.), Fernerkundung in der Forstwirtschaft - Stand und Entwicklungen.- Karlsruhe
- STÖVER, O. (1997): Aufbau eines GIS und Einsatz von Satellitenbilddaten (Landsat-TM) zur Erfassung und Analyse einer Schwammspinnerkalamität im rheinland-pfälzischen Bienwald. Diplomarbeit Universität Trier, unveröffentlicht.
- STÖVER, O., DELB, H., ENGELS, F., HILL, J., ATZBERGER, C. (1998): An Assessment of Forest Areas damaged by a Gypsy Moth Infestation through Satellite Remote Sensing and GIS. Proceedings of the International Workshop: Application of Remote Sensing in European Forest Monitoring. EUR 17685 EN, pp. 359-374.
- STRAHLER, A.H. & LI, X. (1981): An invertible forest canopy reflectance model. - In: Proc. 15th Int. Symp. Rem. Sensing of Environment. Ann Arbor
- STRATHMANN, F.-W. (1993): Taschenbuch zur Fernerkundung. - Karlsruhe
- SUITS, G.H. (1972): The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. - in: RSE, 2: 117-125
- SUNAR, F. & MUSAOGU, N. (1998): Merging Multiresolution SPOT P and Landsat TM Data: The Effects and Advantages. - International Journal of Remote Sensing, vol.19, no.2, pp.219-224
- SWAIN, P.H. & DAVIS, S.M. (1978): Remote Sensing - The Quantitative Approach. - New York/Toronto
- TANRE, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMANN M., MOCRETTE, J.J., PERBOS, J., DESHAMPS, P.Y. (1985): Effets atmosphériques en télédétection, logiciel de simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire. - In: Proc. 3rd Int. Coll. On Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, 16-20 Dec. (= ESA SP-247), 315-318. Les Arcs
- TANRE, D., DEROO, C., DUHAUT, P., HERMANN M., MOCRETTE, J.J., PERBOS, J., DESHAMPS, P.Y. (1990): Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum - the 5 S code. - Int. J. Remote Sensing, 11, 659-668
- THIELEN, J. (1995): Thesen zur aktuellen Forsteinrichtung. AFZ 20/1995. Seite 1078-1082.
- THOME, K.J., GELLMAN, D.I., PARADA, R.J., BIGGAR, S.F., SLATTER P.N., MORAN, M.S. (1993): In-flight radiometric calibration of Landsat-5 Thematic Mapper from 1984 to present. - In: Proc. SPIE Symp., 12-14. April, 126-130. Orlando
- TOM, V.T. (1986): A Synergistic Approach for Multispectral Image Restoration Using Reference Imagery. - International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'86), 8-11 September 1986, Zürich, pp.559-564

- TOM, V.T. & CARLOTTO, M.J. (1985): Adaptive Least-Squares Technique for Multi-Band Image Enhancement.-IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 26-29 March 1985, Tampa, Florida, pp.704-707
- TOM, V.T., CARLOTTO, M.J. & SCHOLTEN, D.K. (1984): Spatial Resolution Improvement of TM Thermal Band Data. - Proceedings SPIE, Vol. 504, Applications of Digital Image Processing VII, Bellingham, Washington, pp.384-390
- TOM, V.T., CARLOTTO, M.J. & SCHOLTEN, D.K. (1985): Spatial Sharpening of Thematic Mapper Data Using a Multiband Approach. - Optical Engineering, vol.24, no.6, pp.1026-1029
- TZSCHUPKE, W. (1983): Die Fernerkundung in der forstlichen Praxis Mitteleuropas. - AFZ / Der Wald, 38.Jg., H.46/47, S.1239-1240
- ULRICH, B. (1986): Natural and anthropogeny components of soil acidification. - Zeitschrift für Pflanzenernährung & Bodenkunde, 149, 702-717
- UVE FERNERKUNDUNGSZENTRUM POTSDAM GMBH (1998): DPA97 Information. - <http://www.fez.uve.de>
- VAN GARDINGEN, P.R. et al. (1999): Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography. - in: Agric. For. Met., 94: 243-257
- VERHOEF, W. (1984): Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model. - Remote Sensing of Environment, vol. 16, 125-141
- VOHLAND, M. (1997): Einsatz von Satellitenbilddaten (Landsat-TM) zur Ableitung forstlicher Bestandsparameter und Waldschadensindikatoren. Diplomarbeit Universität Trier, unveröffentlicht.
- VRABEL, J. (1996): Multispectral Imagery Band Sharpening Study. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.62, no.9, pp.1075-1083
- WALD, L. (1998): Data Fusion. - Lecture notes, June 1998, Paris (unveröffentlicht)
- WALD, L., RANCHIN, T. & MANGOLINI, M. (1997): Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.63, no.6, pp.691-699
- WALTER, H. (1986): Allgemeine Geobotanik. - Stuttgart
- WALTER, H. (1990): Vegetation und Klimazonen. - Stuttgart
- WARNECKE, G. (1991): Meteorologie und Umwelt - Eine Einführung. - Berlin/Heidelberg
- WEISCHET, W. (1988): Einführung in die Allgemeine Klimatologie - Physikalische und meteorologische Grundlagen. - Stuttgart
- WELCH, R. & EHLERS, M. (1987): Merging Multiresolution SPOT HRV and Landsat TM Data. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.53, no.3, pp.301-303
- WELLES, J.M. (1990): Some indirect methods of estimating canopy structure. - in: Rem. Sens. Rev., 5(1): 31-43

- WERLE, O. (1978): Die naturräumliche Gliederung des Trierer Raumes. - In: Trier und Umgebung (= Sammlung Geographischer Führer, 11), WERLE, O. (Hrsg.), 4-9. Berlin/Stuttgart
- WESSMAN, C.A. (1994): Estimating canopy biochemistry through imaging spectrometry.- in: Hill & Mégier (Hrsg.): Imaging Spectrometry - A Tool for Environmental Observations, Brussel und Luxemburg, 57-69
- WIECZOREK, J. (1990): Erfassung von Sturmwurfschäden im östlichen Hunsrück mit Hilfe von Landsat-TM-Daten - Eine landschaftsökologische Analyse für die forstliche Praxis. - (= DLR-FB 90-31), Oberpfaffenhofen
- WILLIAMS, D.L. & NELSON, R.F. (1986): Use of Remotely Sensed Data for Assessing Forest Stand Conditions in the Eastern United States. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sens.* 24 (1).
- WILLIAMS, D.L., NELSON, R.F. & DOTTAVIO, C.L. (1985): A Georeferenced Landsat Digital Database for Forest Insect-Damage-Assessment, *International Journal of Remote Sensing.* 6 (5): 643-656.
- WINTER, R. & KEIL, M. (1991): Methodik kleinmaßstäbiger Wald- und Waldschadensinventuren mit Satellitenbildern. - In: Fernerkundung in der Forstwirtschaft: Stand und Entwicklung, OESTEN, J. (Hrsg.), 116-123. Karlsruhe
- WISS, H. (1988): Das Digitale Höhenmodell des Landes Rheinland-Pfalz - Zur Fertigstellung der ersten Ausbaustufe. - Nachrichtenblatt der Vermessungs- und Katasterverwaltung Rheinland-Pfalz, H.2, 132-139
- WOHLGEMUTH, D. (1990): Luftbildkarten für den Forstbetrieb. - AFZ / Der Wald, 45.Jg., H.42, S.1079-1081
- WOODCOCK, C.E. & STRAHLER, A.H. (1987): The Factor Scale in Remote Sensing.- Remote Sensing of Environment, no.21, pp.311-332
- WRIGLEY, R.C., ACEVEDO, W., ALEXANDER, D. et al. (1984): The Effect of Spatial, Spectral and Radiometric Factors on Classification Accuracy Using Thematic Mapper Data. - Proceedings International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'84), Strasbourg, France, pp.93-100
- YOCKY, D.A. (1995): Image Merging and Data Fusion Using the Discrete Two-Dimensional Wavelet Transform. - Journal of the Optical Society of America, vol.12, no.9, pp.1834-1841
- YOCKY, D.A. (1996): Multiresolution Wavelet Decomposition Image Merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT Panchromatic Data. - Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.62, no.9, pp.1067-1074
- ZELLER, M. (1994): Flinkes Wellenspiel - Signalverarbeitung mit Wavelets. - c't, H.11, S.258-264
- ZHUKOV, B., OERTEL, D. & LANZL, F. (1995): A Multi-Sensor Multi-Resolution Technique for Satellite Remote Sensing. - Proceedings International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'95), 10-14 July 1995, Vol.1, Firenze, Italy, pp.51-53

- ZHUKOV, B. & OERTEL, D. (1996): Multi-Sensor Multi-Resolution Technique and its Simulation. - Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 64.Jg., H.1, S.11-21
- ZÖHRER, F. (1980): Forstinventur: Ein Leitfaden für Studium und Praxis. - Hamburg/Berlin
- ZUNDEL, R. (1990): Einführung in die Forstwirtschaft. - Stuttgart