

E I N S A T Z V O N F E R N E R K U N D U N G S V E R F A H R E N I N D E R F O R S T W I R T S C H A F T

G. Hildebrandt
Universität Freiburg
Bundesrepublik Deutschland |N|

Anwendungsgebiete für Fernerkundung in der Forstwirtschaft

Am Anfang dieses Beitrages soll mit Abb. 1 ein Bilddokument stehen, ein Luftbild des Dorfes Zehdenik bei Berlin, das vor nicht weniger als 93 Jahren im Jahre 1887 aus einem Ballon heraus aufgenommen wurde. Das photographisch schon erstaunlich gute Bild lässt auch noch in der hier gezeigten Reproduktion der Reproduktion jene Landnutzungsformen, die für land- und forstwirtschaftliche Zwecke von Interesse sind, erkennen und im Detail ansprechen (1).

Am 10. September des gleichen Jahres erschien im Berliner Tageblatt ein Artikel mit dem Titel: "Verwendung der Ballonphotographie für forstwirtschaftliche Zwecke" aus dem die folgende Passage stammt: "Ein angehender Jünger des Waldes hatte die mühsame Aufgabe, eine... Bestandeskarte zu kopieren und dabei hörte er schaudernd von den Arbeiten, welche zur Herstellung der Originalkarte notwendig gewesen waren; er sann nach, auf bequemere Weise ein Bestandesbild zu gewinnen... . Sein Plan ist schnell gefaßt, und da ihm seine Mittel es erlauben, verschafft er sich leihweise einen Luftballon. Ausgerüstet mit den besten photographischen Apparaten der Neuzeit, besteigt er sein Luftschiß. In einer Höhe, in welcher er das ganze Revier übersehen kann, gibt er den Befehl, den Ballon an starken Eichen mittels der Seile zu befestigen, und sogleich beginnt die Aufnahme... ein tüchtiger Photograph übernahm die Herstellung der Bilder. Herrlich! dieses hier ist der Bestand mit den hundertjährigen Fichten, jene Fläche ist mit Buchen bestanden, hier sind vorwiegend Eichen eingesprengt nebst einigen Ahorn, dort am Eselsbach haben wir den ganz gemischten Bestand..." (2). Dies ist die Schilderung der ersten forstlichen Luftbildinterpretation.

Eine andere Möglichkeit der Fernerkundung hatten sich in den neunziger Jahren des vorigen Jahrhundert österreichische Forstvermesser zunutze gemacht. Durch photographische Stereoaufnahmen von einem Berghang aus auf den gegenüberliegenden Hang und deren Auswertung mittels der von Laussedat bzw. Meydenbauer damals schon

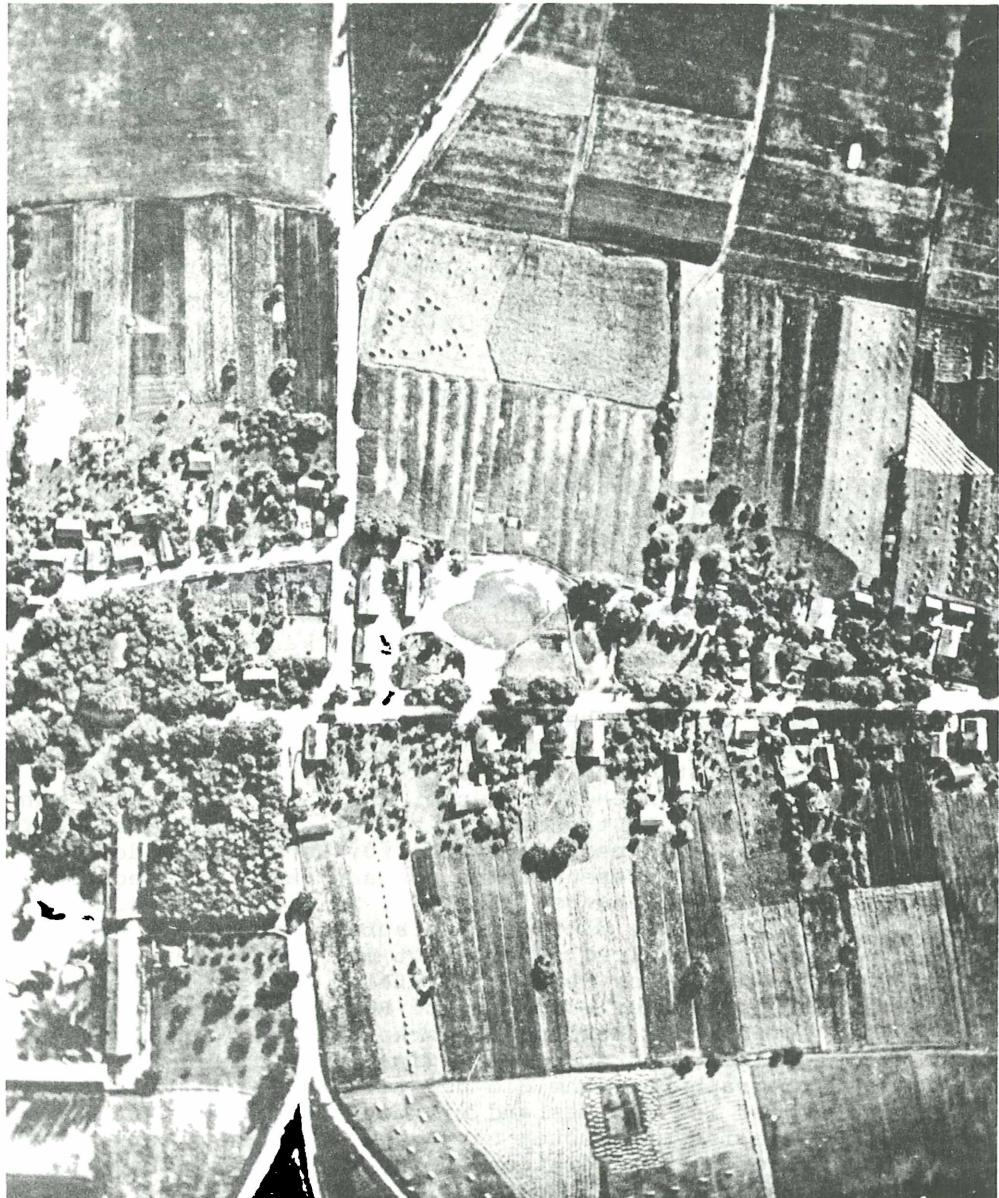


Abb. 1 Luftbild (Ballonaufnahme) aus dem Jahr 1887 Ort: Zehdenick bei Berlin (1)

entwickelten terrestrischen "Meßtischphotogrammetrie" wurden Forstkarten schwer zugänglicher oder noch nicht begehbarer Alpenreviere hergestellt (3)

Bereits 1890 übernahm Wang an der Hochschule für Bodenkultur in Wien eine Dozentur für Photogrammetrie und 1911 hielt an der Sächsischen Forstakademie in Tharandt der als Professor neuberufene Reinhardt Hugershoff seine Antrittsvorlesung über "Die Photogrammetrie und ihre Bedeutung für das Forstwesen".

Schließlich setzten in Deutschland unmittelbar nach dem ersten Weltkrieg flächendeckende Luftbildaufnahmen ganzer Reviere zum Zwecke der Forstvermessung und der Zustandserfassung im Zuge der Forsteinrichtung ein. In Bayern wurden 1921 der Roggenburger Forst, 1922 der Nürnberger Reichswald, sowie bald danach der Forstenrieder Park aufgenommen. In Sachsen waren es das Forstamt Weißer Hirsch und der Tharandter Wald und in Preußen das v. Keudell'sche Revier Bärenthoren. Schon 1923 und 1924 beschäftigte sich die Hauptversammlung des Deutschen Forstvereins mit den neuen Techniken. Rebel resümierte dabei 1924: "Das Luftbild trägt und zeigt den Stempel der Wirtschaft anschaulicher, als es der längsten Erörterung mit dicksten Tabelienwerk gelingen könnte" (4).

Diese historische Einleitung soll in Erinnerung bringen, daß Fernerkundung für forstwirtschaftliche Zwecke nichts Neues ist, daß man hier nicht am Anfang, sondern mitten in einer Entwicklung steht, auch wenn technologische Fortschritte und neue methodische Wege der Auswertung von Bildern und Daten in den letzten zwei Jahrzehnten die Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung erheblich erweitert haben.

Welche forstwirtschaftliche Aufgaben kommen für den Einsatz von Fernerkundungsmethoden besonders in Frage? Es geht dabei nicht um einzelne wissenschaftliche Fragestellungen, um die Erforschung dieses oder jenes Phänomens des Waldwachstums, sondern um die Frage nach den Einsatzmöglichkeiten in der Praxis der Forstwirtschaft zur Lösung ständig im Forstwirtschaftsbetrieb auftretender Aufgaben.

Die auf die Sicherung nachhaltiger Holzerträge und Erfüllung von Schutz- und Wohlfahrtsfunktionen der Wälder ausgerichtete intensive Forstwirtschaft, aber auch die in großräumigen Ländern üblichen extensiveren Waldbewirtschaftungsformen erfordern - neben manchen anderen Tätigkeiten - periodisch wiederkehrende mittel- und langfristige Planungen auf Bestandes-, Betriebs- und Landesebene sowie eine ständige Überwachung der ausgedehnten Produktionsflächen

Ein wesentlicher Teil des für diese Planungs- und Überwachungsaufgaben regelmäßig wiederkehrenden Informationsbedarfs - der natürlich je nach Intensitätsstufe der Waldwirtschaft nach Umfang und geforderter Genauigkeit sehr verschieden sein kann -

läßt sich durch Fernerkundung beschaffen. Dies gilt für die Erfassung von Zuständen wie für die Aufdeckung von Entwicklungen und Veränderungen und zwar vor allem wenn es um die Beschaffung von Informationen geht über:

- die Größe von Flächen oder die Flächenanteile verschiedener Flächen- oder Bestockungskategorien;
- die Lage bestimmter Flächen oder Flächenkategorien sowie die räumliche Ordnung im Walde, in der Landschaft oder einer Region,
- die Art und den Grad an Zugänglichkeit und Erschließung der Wälder
- die Waldaufbauform und den Waldzustand, die Bewirtschaftungs- oder Nutzungsformen
- die Höhe, Struktur und Zuwachsleistung des Holzvorrats
- die Standortseigenschaften der Waldflächen als Holzproduktionsflächen oder Wildhabitatem

Die wesentlichsten Anwendungsgebiete für Fernerkundungsverfahren sind daher

- die Herstellung und Fortführung von Forstkarten
- die Zustandserfassung und -beurteilung der Waldbestände als Grundlage für betriebliche Wirtschaftsplanung (Forstseinrichtung) und regionale Planungsaufgaben
- die vorwiegend forst- und entwicklungspolitischen Zwecken dienende Großrauminventuren
- eine Anzahl von Wald- und Landschaftsschutzmaßnahmen zur Entdeckung, Bekämpfung oder Abschätzung von Landschafts-, Wald- und Baumschäden.
- aber auch andere auf Zustandserfassungen angewiesene forstliche Aufgaben wie z.B. die Landschaftsplanung, die Walderschließungsplanung, die Wildbewirtschaftung usw.

Welche Fernerkundungsverfahren werden zur Lösung dieser Aufgaben in der forstwirtschaftlichen Praxis eingesetzt?

Abb. 2 gibt dazu einen generalisierenden Überblick der Entwicklung der Anwendung von Fernerkundungsverfahren für forstwirtschaftliche Zwecke in den letzten zwei Jahrzehnten bis zum Stand im Jahre 1980. Dieser Überblick möge bei den folgenden detaillierteren Ausführungen jeweils im Auge behalten werden.

Einsatz von	60er Jahre		70er Jahre		1980
Photographischen Aufnahmen					
S-W Luftbilder (Flugzeug)					
Farb- u. IR-Farbluftbilder Flugzeug	U/V	U/V	S	R	R
Raumstation			U	U	?
Orthophotokarten	V		V	R	R
MSS - Flugzeugaufnahmen	U		U	U/V	V/S
MSS - Landdataufnahmen			U	U/V	V/S
Thermal - IR-Aufnahmen (Flugzeug)	U	V	S	S	S
Flächenradaraufnahmen					
(Slar, SAR) Flugzeug					V/S
Satellit (Seasat)				U	U

R= (weltweite) Routine

S= operationeller Einsatz in Sonderfällen

V= versuchswise Einsätze

U= Untersuchungen und Entwicklung von Einsatzmöglichkeiten

Abb. 2 Übersicht über den Einsatz von Fernerkundungsverfahren für forstwirtschaftliche Zwecke 1960 - 1980

Waldfläche Satellit
in ha

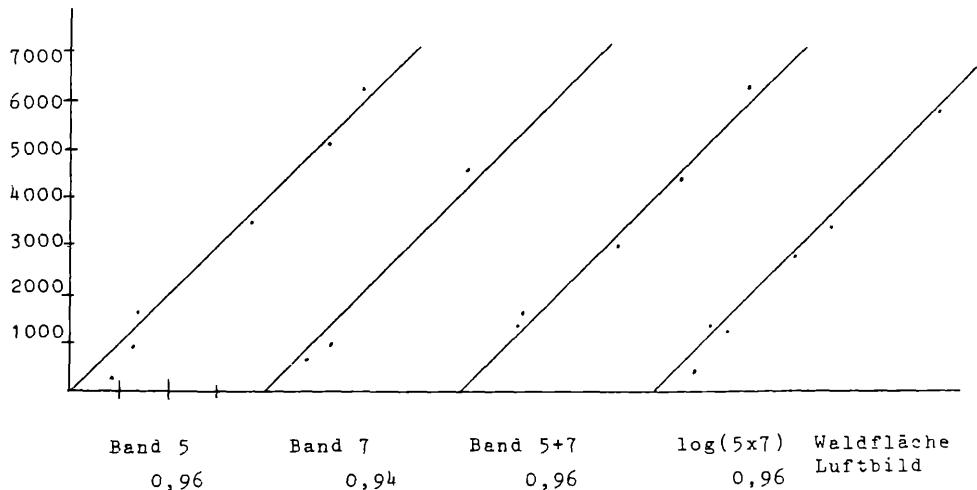


Abbildung 3: Vergleich der auf Satellitenaufzeichnungen und Luftbildern ermittelten Waldflächen von 12 Testgebieten (14)

Photographische Schwarz-Weiß-Luftbildaufnahmen

Nach den eingangs beschriebenen Anfängen forstlicher Luftbildauswertung ist der Einsatz von pachromatischen oder infraroten Schwarz-Weiß-Luftbildern für die Forstkartenherstellung, für Zustandserfassungen im Rahmen von Forsteinrichtungen (mittelfristige Betriebsplanungen) und von Großrauminventuren bereits seit Jahrzehnten weltweit bewährte Routine (Abb. 2 1. Zeile). Art und Umfang des Einsatzes der Luftbilder für diese Zwecke variieren dabei selbstverständlich nach dem Intensitätsgrad der Forstwirtschaft, örtlichen Erfahrungen und gegebenen Waldverhältnissen.

Für intensiv bewirtschaftete Wälder Mitteleuropas gilt bezüglich der Forstkartierung und ihrer Fortführung, daß nahezu alle Waldbestandesgrenzen, Einteilungslinien und das forstliche Walderschließungsnetz sowie topographische Details und Höhenschichtlinien - soweit die beiden letztgenannten nicht aus Top-Karten übernommen werden - durch photogrammetrische Verfahren aus Luftbildern kartiert werden. Soweit möglich geschieht dies in Revieren des Flach- und Hügellandes durch einfache, facettenweise Umzeichenverfahren. In Hochgebirgsrevieren sind stereophotogrammetrische Auswertungen erforderlich. Eigentumsgrenzen - dies ist zur Vervollständigung anzuführen - werden in Ländern mit intensiver Forstwirtschaft i.d.R. aus Kataster- bzw. Flurkarten übernommen oder terrestrisch eingemessen.

Nach versuchsweisen Einsätzen Ende der 60er Jahre (vgl. Abb. 2, Zeile 3) werden in vielen Ländern - so auch in Deutschland und Österreich - in zunehmendem Maße Orthophotokarten als Forstbetriebskarten anstelle oder neben den herkömmlichen Strichkarten verwendet. Sie haben sich inzwischen für Betriebsplanung und Betriebsführung als Wirtschaftskarten bestens bewährt.

In Entwicklung sind Methoden digitaler Bestandeskartierung. Durch Luftbildauswertung an einem Stereokartiergerät werden die zu kartierenden, zuvor nach fachmännischer Interpretation in die Luftbilder eingezeichneten Linien durch eine diskrete Punktfolge approximiert und die Punktkoordinaten registriert. Nach Transformation in das Koordinatennetz der Landesvermessung erfolgen automatische Kartierung und Flächenberechnung (5,6).

Das Gegenstück zu europäischen Forstkarten sind in großräumigen Waldländern mit weniger intensiv bewirtschafteten Wäldern Forest Cover Type Maps. Deren Informationsgehalt unterscheidet sich entsprechend anderen Bedürfnissen für dort praktizierte Waldwirtschaft, anderen Waldaufbauformen und der zumeist wesentlich großräumigeren Verhältnissen von den mitteleuropäischen Forstkarten. Luftbildkarten verdrängen dabei mehr und mehr die photogrammetrisch hergestellte Strichkarte. Dies gilt besonders für Nordamerika. Im Gegensatz zu Mitteleuropa finden sich hier auch Ansätze zur Einführung vom Komputerkarten, die aus Landsat-MSS-Daten hergestellt werden.

In nachhaltig bewirtschafteten Wäldern und solchen, die einer nachhaltigen Bewirtschaftung zugeführt werden sollen, werden

turnusmäßig mittelfristige, d.h. 5 - 20-jährige Planungen der Holznutzung, der Verjüngung u.a. betriebliche Maßnahmen durchgeführt. Im deutschen Sprachgebrauch wird diese Betriebsplanung "Forsteinrichtung" genannt. Auch hier überwiegt noch der Einsatz von schwarz-weiß-Luftbildern u.zw. im Maßstab 1:10 000 bis 1:30 000

Im einzelnen dienen die Luftbilder dabei neben den schon besprochenen Kartierungsarbeiten (7)

- zur sofortigen Beschaffung synoptischer Informationen über Topographie, Wald-, Feld-, Siedlungsverteilung und Verkehrsnetz im Planungsgebiet
- zur eingehenden Erfassung des Zustandes des Gesamtbetriebes, seiner Einbettung in die Landschaft und der räumlichen Ordnung im einzurichtenden Waldrevier.
- zur Orientierung im Revier und als Grundlage für die Planung und Organisation der Forsteinrichtungsarbeiten;
- zur Ansprache einiger standörtlicher Merkmale
- zur Beschreibung des Bestandeszustandes einschl. quantitativer Bestockungsdaten (z.B. Schlußgrad, Flächenanteil von Mischholzarten, Baumhöhen) oder des Holzvorrats selbst;
- als Entscheidungshilfe bei der Wahl der Holzvorratsaufnahmeverfahren, ggf. zur Stratifizierung der Waldflächen für nachfolgende terr. Stichprobeaufnahmen des Vorrats;
- als Erinnerungsstütze und nachträgliche Informationsquelle beim Auftreten von Informationslücken während der häuslichen Verarbeitung der Aufnahmeergebnisse;
- als Dokument der Bestandes- und Reviergeschichte.
- als Entscheidungshilfe für die Waldeinteilung

Das Luftbild ersetzt dabei nicht die terrestrische Arbeit. Es kommt vielmehr unter Anpassung an die örtlichen Verhältnisse und die Intensitätsstufe der Forstwirtschaft auf eine geeignete Kombination von terrestrischer Aufnahme und Luftbildauswertung an. Aus einer vergleichenden Zeitstudie (8) und praktischen Erfahrungen ist bekannt, daß unter deutschen Verhältnissen für Orientierung im Revier, für die Planung der Waldeinteilung und die Bestandesbeschreibungen je nach Bestockungs- und Geländebedingungen sowie je nach Qualität der Luftbilder 30 - 60% der Zeit erspart wird, wenn Luftbilder als zusätzliche Informationsquelle sinnvoll genutzt werden.

Ein spezielles und schon seit den zwanziger Jahren diskutiertes Problem der forstlichen Luftbildauswertung ist die Holzvorratsschätzung. Die Bestimmung des Holzvorrats aus Luftbildern ist möglich durch korrelative Zusammenhänge zwischen der Menge des Vorrats und im Luftbild meß-, schätz- oderzählbarer Bestockungsparameter wie Baumhöhe, Bestandesdichte, Stammmzahl oder Altersklasse. Entsprechende Regressions- und daraus ableitbare Luftbildmassentafeln und -formeln müssen getrennt nach Waldtypen und Wuchsgebiet entwickelt werden. Gegebenenfalls sind sie mit Erfolg auch nur für ein bestimmtes Luftbildmaterial (Maßstab, Filmtyp) anwendbar. Bei "passenden" Formeln können die Schätzfehler innerhalb $\pm 10\%$ liegen. Dennoch werden

bei Forsteinrichtungen Vorratsermittlungen aus Luftbildern selten angewandt. Dort wo der Vorrat des ganzen Betriebes durch eine terrestrische Stichprobemessung erhoben wird, wird jedoch oft das aufzunehmende Gesamtkollektiv nach den Informationen aus den Luftbildern nach Vorratsklassen stratifiziert. Die Stichprobeflächen können dann optimal verteilt werden.

Farb- und Infrarotfarb-Luftbildaufnahmen

Farb- und IR-Farbluftbildaufnahmen haben die Palette der Anwendungsmöglichkeiten der Fernerkundung für forstwirtschaftliche Zwecke erheblich erweitert. War es mit Schwarz-Weiß-Bildern nur möglich Wald- und Vegetationsschäden zu erkennen bei denen "Flächenschäden" vorlagen, also ganze Bestände oder große Bestandesteile vernichtet oder schwerstgeschädigt waren (Sturm, Feuer, Lawinen), so lassen Farb- und insbesondere IR-Farbluftbilder auch Schäden und Vitalitätsveränderungen an Einzelbäumen erkennen und dies oft schon in frühen Stadien oder mit der Möglichkeit einer Klassifizierung nach dem Grad der Veränderungen.

Abb. 2 Zeile 2 zeigt, daß in den 60er Jahren Untersuchungen und versuchsweise Einsätze stattfanden (mit Anfängen in den USA Ende der 50er Jahre (z.B. 9)). Dies gilt auch für Europa wo Wolff (10) auf die diesbezüglichen Interpretationsmöglichkeiten mit dem russischen Spektrozonalfilm hinwies und Pollanschütz (11), Hildebrandt und Kenneweg (12) sowie Stellingwerf (13) Ergebnisse erster einschlägiger europäischer Untersuchungen mit dem Kodak IR-Farbfilm veröffentlichten. Inzwischen ist auch der Einsatz des IR-Farbfilms für Zwecke der forstlichen Schadensinventuren weltweit bewährte Routine.

Einige neuere Ergebnisse werden in anderen Beiträgen dieses Heftes vorgestellt.

Seit einigen Jahren entwickelt sich ein anderes, wichtiges forstwirtschaftliches Anwendungsgebiet für IR-Farbluftbilder u.zw. kleiner und kleinster Bildmaßstäbe. Bilder dieser Art gewinnen - wiederum von Nordamerika ausgehend aber inzwischen auch für europäische Verhältnisse versuchsweise erprobt - für forstliche Großrauminventuren mehr und mehr an Bedeutung.

Seit langem schon haben sich, zunächst unter Verwendung von Schwarz-Weiß-Luftbildern, verschiedenartige Inventurverfahren in der Praxis der Großrauminventur herausgebildet. Sie reichen von rein terrestrischen Stichprobeverfahren, bei denen Luftbilder allenfalls als Orientierungshilfen im Gelände benutzt werden, bis zu nahezu reinen Fernerkundungsinventuren, bei denen lediglich zur Vorbereitung der Interpretation oder Klassifizierung und ggf. später zur Kontrolle etwas Geländearbeit einbezogen wird.

Die Mehrzahl der Verfahren sind jedoch kombinierte Inventuren, die sowohl auf Fernerkundungsinformationen als auch auf terrestrisch aufgenommene Daten aufbauen. Dabei werden i.d.R. die zur Flächeninventur und ggf. zur Stratifizierung des Inventurgebietes für die nachfolgende terrestrische Holzvorratsinventur

benötigten Informationen durch Fernerkundung gewonnen. Es geht dabei um die Feststellung und Quantifizierung von Anteilen, Flächengrößen und örtliches Vorkommen verschiedener abgrenzbarer Flächenarten, z.B. Vegetations- oder Waldtypen, Waldzustandsklassen, Vorratsklassen, das flächenmäßige Vorkommen bestimmter Baumarten u.a. Die erforderliche Klassifizierung erfolgt entweder für den gesamten Inventurraum oder auf Stichprobeflächen (Streifen, Kleinflächen, Punkte). Die für die Holzvorrats- und Zuwachsinventur benötigten Daten werden dagegen auf kleinen Stichprobeflächen oder mehreren Stichprobeständen (Listenstichprobe) im Wald gemessen.

Ein Inventurmodell, das Schade (14) nach Erprobung auf einer Fläche von 100 000 ha im Schwarzwald gerade vorstellte und das methodische Elemente von Langley(15) Poso (16) und Kölbl (17) einbezieht, sieht z.B. so aus:

- flächendeckende Landsat-Aufzeichnungen
- IRC-Luftbilder 1:50 000 von 8 km-breiten Stichprobestreifen, die in einem orthogonalen Raster ausgewertet werden
- terrestrische Stichprobeflächen auf den Luftbildstichprobestreifen
- Zusatzinformationen zu jedem Luftbildrasterpunkt über topographische, geologische u.a. Fakten, Waldbesitzart Waldfunktionen aus vorhandenen top. und thematischen Karten.

Aufnahmen mit Multispektral-Scannern (MSS)

Mit dem zuletzt genannten Inventurmodell ist der Übergang zur Besprechung des Einsatzes von MSS-Aufzeichnungen für forstwirtschaftliche Zwecke gegeben. MSS-Aufzeichnungen der LANDSAT-Satelliten sind in den letzten Jahren schon oft für großräumige Erkundungs- und Inventuraufgaben ausgewertet worden. Es liegen Berichte dazu aus allen Erdteilen vor. Dennoch darf die große Zahl von Berichten nicht darüber hinwegtäuschen, daß es sich dabei in vielen Fällen noch um versuchsweisen Einsatz handelt.

Aufgrund der relativ geringen Grundauflösung von ca. 50 x 80 m der von Landsat 1-3 aufgenommenen Daten und den bisher gegebenen Bandbereichen der 4 bzw. 5 Kanäle sind die forstlichen Interpretationsmöglichkeiten beschränkt.

Was kann tatsächlich von den bis heute verfügbaren Daten erwartet werden?

Bei analoger Landsat-Bildinterpretation und bei digitaler Klassifizierung, die sich allein auf spektrale Merkmale stützt, ist die Trennung von Wald gegenüber "Nichtwald" mit einer Genauigkeit von 90 - 95% möglich. Größere Fehler treten auf, wenn Übergangsformen wie Buschland, Plantagen ggf. auch Savanne vorkommen. Abb. 3 zeigt das Ergebnis eines Vergleichs der auf Landaufzeichnungen mittels analoger Auswertung an einem Bildanalysator und aus Luftbildern ermittelter Waldflächen von 12 Testgebieten im Schwarzwald und Rheintal (14).

Die Korrelationskoeffizienten um 0,96 genügen für eine Verwendung bei Großrauminventuren, wenn aus den Landsatbildern als erste Stufe eines mehrstufigen Waldinventursystems nur nach dem Waldflächenanteil im Inventurraum gefragt wird.

Das Ergebnis einer digitalen Klassifizierung mit Hilfe des Maximum-Likelihood Algorithmus brachte im gleichen Raum bei einem Testgebiet von 46 000 ha ein Bewaldungsprozent von 33,2% gegenüber dem wirklichen Wert von 29,9%, d.h. eine Überschätzung der Waldfläche um 3,3 Prozentpunkten = 11%. In einem zweiten Prüfverfahren wurden von 300 je 25 ha Waldtestflächen 278 = 93% als Wald richtig klassifiziert (18). Diese Ergebnisse stehen für viele ähnliche aus aller Welt, insbesondere auch amerikanischer und kanadischer Autoren.

Die Klassifizierung nach Nadel- und Laubholzbeständen ist aus Landsat MSS-Daten mit Genauigkeiten zwischen 80% und 95% für die Nadelholzbestände und zwischen 60% und 90% für Laubholzbestände möglich. Das erreichbare Ergebnis ist dabei einerseits abhängig von objektbedingten Faktoren wie Art und Anteil von Beimischungen anderer Baumarten, unterschiedlicher Bestandesdichte, Altersklasse usw. und andererseits von angewandten Klassifizierungsverfahren. Neben der Grobklassifizierung der Waldfläche ist auch wiederholt über weitergehende Waldtypisierung durch digitale Klassifizierung nach Landsatdaten berichtet worden. Dabei sind z.T. ähnlich gute z.T. jedoch auch deutlich schlechtere Klassifizierungsergebnisse erzielt worden. Interessanter sind vielleicht Berichte über Untersuchungen mit denen es um die Inventarisierung bestimmter örtlich wichtiger Bestandestypen geht. So konnten z.B. Lapietra und Megier (19) in Oberitalien die dort wichtigen Pappelwälder eines Testgebiets mit einer 83% und 95%igen Treffergenauigkeit erfassen und Keech et. al. berichten über erfolgreiche Interpretation der gefährdeten, forstlich wichtigen Auracarienbestände in Brasilien (20).

Offensichtlich ist, daß zu verschiedenen Jahreszeiten aufgenommene Landsat-Daten unterschiedlich gute Ergebnisse liefern. Unterschiede in der phänologischen Entwicklung der Wälder zu einem bestimmten Zeitpunkt - z.B. in Abhängigkeit von der Höhenlage des Standorts - können zu Fehlklassifizierungen führen, wenn nicht durch interaktives Eingreifen der Interpreten eine sachgerechte Stratifizierung des Inventurraumes vorgegeben wird. Es hat sich andererseits gezeigt, daß eine gut ausgewählte multitemporale Auswertung von Landsat-Daten bei der Klassifizierung die Trefferquote für bestimmte Waldtypen um 2 - 5 Prozentpunkte erhöhen kann (z.B. 21).

Erfolgreich wurden Landsataufnahmen eingesetzt, wo Veränderungen der Waldflächen durch großflächige Wirtschaftsmaßnahmen, Raubbau oder Naturereignisse laufend zu beobachten sind und zur Devastation ursprünglicher Waldgebiete führen. Anschauliche Beispiele hierzu finden sich in der Literatur (z.B. 22) und wurden auch im Vortrag vorgeführt. Auch von der Entdeckung bzw. Erkennung von Schadflächen größerer Ausmaße ist wiederholt berichtet worden. Operationeller Einsatz von Landsat-Daten zur Überwachung von Waldgebieten ist jedoch noch in den Anfängen.

Es besteht angesichts dieser noch begrenzten forstlichen Interpretationsmöglichkeiten Übereinstimmung, daß MSS-Daten der jetzigen Landsat-Generation im wesentlichen für das Beschaffen von orientierenden Informationen in großen Entwicklungs- oder Wirtschaftsgebieten und für Erkundungsinventuren geeignet bzw. bei anspruchsvolleren Großrauminventuren nur im Rahmen mehrstufiger Verfahren in Verbindung mit Luftbildern einzusetzen sind.

Als Auswertemethoden von Landsatdaten für forstliche Inventuraufgaben werden sowohl unaufwendige analoge Methoden - also Bildinterpretationen wie sie von der Luftbildinterpretation her bekannt sind zumeist unter Verwendung von Colorcompositen als auch digitale Klassifizierungen angewandt.

Bei digitalen Verfahren setzt man nach entsprechender Datenvorverarbeitung am häufigsten noch allein auf die Spektraldaten der Aufzeichnung. Bei relativ homogenen großflächigen Waldverhältnissen und bei landwirtschaftlichen Flächen haben sich dabei Trainingsstatistiken nach den "supervised" Verfahren und das Maximum Likelihood als Klassifikationsalgoritmus überlegen gezeigt. Bei heterogenen Vegetationsverhältnissen erwiesen sich dagegen häufig Clustermethoden bzw. hybride Verfahren wie das von Hoffer (23) empfohlene Multi-Cluster-Block-Verfahren für die Trainingsstatistik als vorteilhaft.

Im übrigen zeigt die Entwicklung eindeutige Tendenzen sich bei der Klassifizierung nicht allein auf die Spektraldaten von Landsat zu verlassen, sondern diese entweder mit Texturmerkmalen oder topographischen Hilfsdaten zu verbinden.

In nordamerikanischen Versuchen - solche sind es im wesentlichen noch - hat sich für Wald- und Vegetationsklassifizierungen der Algorithmus ECHO (=Extraction and Classification of Homogenous Objects), der Textur- und Spektralinformationen gemeinsam verwendet, bewährt.

Sehr weitgehende Wald+Vegetationstypen-Klassifizierung waren ferner möglich mit einem stufigen System bei welchem man die standörtliche Zuordnung bestimmter Waldtypen zu Höhenlage, Exposition und Hangneigung nutzte. In einem ersten Klassifizierungsschritt klassifiziert man nach herkömmlichen Spektralparametern und bildet Spektralklassen.

Im zweiten Klassifizierungsschritt werden jedem Pixel der einzelnen Spektralklasse aus einem Geländemodell Höhenlage, Exposition und Neigungsgrad zugeordnet. Diese Zuordnung führt - als Vorgabe des sachkundigen Auswerters - zur Untergliederung der Spektralklassen, in speziellere Klassen und zur ggf. notwendigen Berichtigung der Klassenzuordnung der ersten Stufe. Hoffer (23) beschreibt diese in Abb. 4 schematisch dargestellte Methode als "Layered Classification Technique".

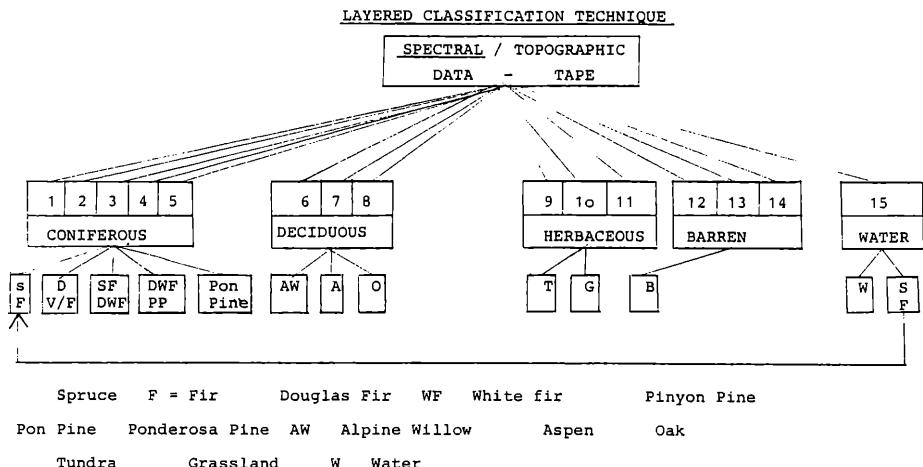


Abb. 4 Schema der "Layered Classification Technique nach Swain und Hauska 1977 zit. nach Hoffer (23)

Bereits vor dem Start des Landsat 1 im Jahre 1972 wurden in den USA MSS-Aufnahmen von Flugzeugen aus versuchsweise eingesetzt. Ein breit angelegtes interdisziplinäres Forschungsprogramm, das sog. erdwissenschaftliche Flugzeugmessprogramm (FMP) wurde 1974-76 in der Bundesrepublik Deutschland hierzu durchgeführt. Weltweit haben Flugzeug-MSS-Daten für operationellen Einsatz bisher jedoch keine so große Bedeutung für forstwirtschaftliche Inventuraufgaben erlangt, wie die zuvor diskutierten Landsataufnahmen. Umso bemerkenswerter ist es, daß solche Aufnahmen in jüngster Zeit in Österreich und Deutschland versuchsweise für Zwecke der Regionalplanung und für die Erfassung von regional (24) oder örtlich (25) auftretende Waldschäden durch Industrieemissionen erfolgreich eingesetzt wurden. Über die Ergebnisse einer solchen Untersuchung berichtet Zirm in diesem Heft.

Man wird auf diesem Gebiet noch interessante Entwicklungen erwarten dürfen. Bemerkenswert ist im übrigen auch, daß der Einsatz von 11-Kanal-Scannern als Spektroradiometer vom Flugzeug aus so wie es Reichert (26) entwickelt hat - wesentliche Beiträge und neue Möglichkeiten der spektralen Signaturforschung von Vegetations- und anderen Oberflächen eröffnet hat.

Thermal-Infrarot-Aufnahmen

Fernerkundung durch Thermalauzeichnungen haben in der Forstwirtschaft praktische Bedeutung für die Waldbrandüberwachung, -bekämpfung und -nachkontrolle erhalten. Bei heute verfügbaren Scannern beträgt die Temperaturauflösung bei 20°C $0,05\text{-}0,10^{\circ}$. Damit ist jedoch noch nichts gesagt über die tatsächliche Möglichkeit, Waldbrände zu entdecken oder bereits bekannte Waldbrände zu beobachten. Die Aufzeichnung und Erkennung kleiner Brandstellen oder von schwelenden Bodenfeuern unter dem Schirm von geschlossenen Baumbeständen ist zwar sehr oft, jedoch nicht immer möglich. Gründliche Untersuchungen von Wilson et.al. (27) brachten hierzu weitgehende prinzipielle Aufklärung und führten zu operationellem Einsatz dieses Fernerkundungssystems in die nordamerikanische Forstwirtschaft.

Die IR-Strahlung kann zwar keine Regenwolken, wohl aber trockene Rauchschwaden durchdringen. Waldbrände die bereits größere Flächen ergriffen oder sich gar schon als Kronen- und Stammfeuer entwickelt haben, können daher auch bei starker Rauchentwicklung beobachtet werden. Die Entwicklung und der Verlauf der Feuerfront, die Laufrichtung und -geschwindigkeit des sich ausbreitenden Feuers, das Entstehen neuer Brände durch Überspringen jenseits der Feuerfront ist gut und in Echtzeit möglich. Der U.S. Forest Service hat seit 1974 mehrere Flugzeuge, die mit einem speziell für Waldbrandbeobachtungen hergerichteten 2-Kanal-IR-Scanner ($3\text{-}6\mu\text{m}$, $8\text{-}14\mu\text{m}$) ausgerüstet sind, im ständigen operationalen Einsatz.

Für 1974 und 1975 weisen die offiziellen Berichte des U.S. Forest Service (28) z.B. folgende Einsätze der speziell für diesen Zweck ausgestatteten Flugzeuge des Forest-Service aus:

Flugzeug	1974			1975		
	Anzahl der Missi- onen	Anzahl der Wald- brände	Flug- stun- den	Anzahl der Missi- onen	Anzahl der Wald- brände	Flug- stun- den
Merlin III	26	13	105	53	17	117
King Air	133	30	428	80	25	238
Queen Air	51	16	227	13	7	83

Nach drei Jahren voll operationellen Einsatzes urteilt 1976 der National Fire Report (28):

"although comparatively new, IR detection has proved its usefulness... Accurate and timely intelligence on location of the fire perimeter is a vital component to success in campaign fire management. During critical periods of a fire, perimeter and spot fire locations must not only be accurately known, but the means of obtaining this information must be rapid and

timely. With this intelligence, the fire boss and his staff can plan their strategy with respect to tactical emloyment of fire resources and logistical support.

IR Scanning is not meant to solve all the fire boss's problems, but is intended to supplement the present method of ground and air reconnaissance. Fire intelligence requirements can be met with airborne infraredscanners that can rapidly and accurately map fires either day or night and through dense smoke. Fire perimeter and spot fire information resulting from IR Scanning should remove one of the fire boss's problems."

Für die Wandbrandnachkontrolle erscheint ein Echtzeit-Thermovisionssystem (z.B. der AGAOptronic THV 750 Supervisor) geeignet. Auf einem Kleinbildmonitor kann der beim Überfliegen anvisierte Geländeausschnitt in Echtzeit beobachtet werden.

Flächenradar-Aufzeichnungen (SLAR,SAR)

Im letzten Jahrzehnt wurden Millionen von Quadratkilometern Waldfläche in Zentral- und Südamerika, Afrika und Asien für Erkundungsinventuren mit flächenabbildenden Radarsystem vom Flugzeug aus aufgenommen. Überall in den feuchten Tropengebieten wo fast ständige Wolkenbildung Luftbildaufnahmen oder MSS-Aufzeichnungen als Fernerkundungssystem für Großrauminventuren ausschließen, hat die Flächenradaraufzeichnung Bedeutung erlangt. Am bekanntesten ist bisher das RADAM-Projekt geworden, mit dem erstmals eine vollständige, wenn auch grobklassige Erkundung und Kartierung des Amazonasgebietes möglich wurde. Die dabei erarbeiteten Wald- und Vegetationskarten sind das Ergebnis einer sinnvoll durchdachten Kombination von visuellen Radarbildinterpretationen, vorangegangener und begleitender Geländeerkundung, stellenweiser Luftbildauswertung und Folgerungen aus den Beziehungen zwischen einigen im Radarbild gut interpretierbaren physiographischen Verhältnissen (Geomorphologie, Gewässernetz) und zu erwartender Vegetationsform.

Die Auswertung der Radarbilder erfolgt heute noch i.d.R. visuell. Man bedient sich dabei ähnlicher Techniken wie bei der Luftbildinterpretation. Identifizierbar sind auf diesem Wege in Bezug auf Landnutzung und Vegetationsformen nur grobe Klassen, so auch bestimmte auf größeren Flächen einheitlich vorkommende Waldtypen. Die vorwiegend noch geübte Art der Bildinterpretation wird ergänzt, wenn nicht ersetzt werden müssen durch Interpretationsmethoden die den Eigenarten der Radaraufzeichnung gemäß sind. Das Verständnis für den völlig anderen Informationsgehalt der Radaraufzeichnungen muß zweifellos noch stärker entwickelt und der Informationsgehalt der erkennbaren Signaturen erforscht werden. Dies gilt insbesondere auch im Hinblick auf die sehr unterschiedlichen Informationen, die bei Aufnahme in verschiedenen Bandbereichen und mit verschiedenen Polarisationen in der Radaraufzeichnung enthalten sind.

Anstelle einer Zusammenfassung

Anstelle einer Zusammenfassung soll mit Abb. 5 eine Modellvorstellung darüber wiederholt werden (29) in welchem Maße Informationen durch Fernerkundung aus Flugzeugen und Satelliten zur Deckung des Informationsbedarfs für forstwirtschaftliche Zwecke beitragen können. Das Modell nimmt Rücksicht auf die unterschiedlichen Planungsebenen (Abszisse) und den i.d.R. gegebenen Zusammenhang zwischen Intensität der Waldwirtschaft und Größe des Inventur- bzw. Planungsraumes einerseits und Art des Informationsbedarfs bzw. Verfügbarkeit vorhandener Informationen andererseits. Es handelt sich um ein reines auf Erfahrung und Überlegung gestütztes Denkmodell.

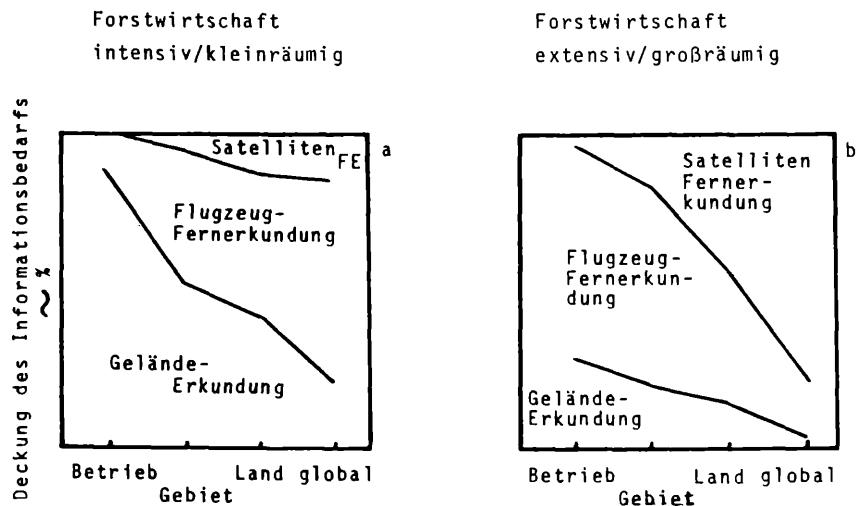


Abb. 5 Mögliche Deckung des Informationsbedarfs (Modell)

Literatur

- 1) Anon., 1887: Zeitschrift f. Luftschaftfahrt und Physik der Atmosphäre 1887
- 2) Anon., 1887: Verwendung der Ballonphotographie zu forstwirtschaftlichen Zwecken. Zeitschr.f.Luftschaftfahrt u. Physik d.Athmosphäre 1887, S.285-287 und Berliner Tagblatt vom 10.9.1887
- 3) Pollack,V.1891: Die photographische Terrainaufnahme (Photogrammetrie oder Bildmeßkunst). Centralbl.d.ges.Forstwesen Jg.17,1891,S.289-303
- 4) Rebel,K.,1924: Das Flugbild im Dienste der Forsteinrichtung.Ber. 21.Hauptversamml.d.Dtsch.Forstvereins, Bamberg 1924 S. 180
- 5) Kölbl,O., 1976: Photogrammetrische Bestandeskartierung mit automatisierter Flächenberechnung und Kartenzeichnung. Eidgen.Anst.f.d. forstl.Versuchs. 1976,S.49-81

- 6) Akca,A.,1978: Verfahrensverbesserungen bei der Waldkartierung durch EDV-unterstützte Luftbildauswertung. Proc. Symp. on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources. Freiburg 1978 S.1865-1880
- 7) Hildebrandt,G.,1970: Luftbilder für die Zustandserfassung und Planung. Allg. Forstzeitschr.1970, S.726-728
- 8) Hildebrandt,G.,1957: Forsteinrichtungsarbeiten mit Hilfe von Luftbildern. Forst und Jagd 1957, S. 1-7
- 9) Aldrich,R.C., Bailly,W.F.Heller,R.D.1958: Large scale 70 mm aerial color photography useful in forest insect damage appraisals. Photogramm.Engineering 1958
- 10) Wolff,G.1966: Schwarz-weiße und falschfarbige Luftbilder als diagnostische Hilfsmittel für operative Arbeiten beim Forstschutz (Rauchschaden)... Int. Arch. Photogrammetrie Vol XVI 1966 II S.85-95
- 11) Pollanschütz,J.,1968: Erste Ergebnisse über die Verwendung eines Infrarot-Farbfils in Österreich für die Zwecke der Rauchschadenfeststellung Centralbl.f.d.ges. Forstwesen, 1968, S.65-79
- 12) Hildebrandt,G.,Kenneweg,H.1968: Einige Anwendungsmöglichkeiten der Falschfarbenphotographie im forstlichen Luftbildwesen. Allg.Forst-Jagdztg.1968, S.205-212
- 13) Stellingwerf,D.A.1968: The usefulness of Kodak Ektachrome Infrared Aero Film for forestry purposes. Int.Arch. Photogrammetry Vol XVII 1966
- 14) Schade,J. 1980: Ein mehrphasiges Stichprobensystem für forstliche Großrauminventuren, gestützt auf Landsat MSS Daten, Luftbilder 1:50 000 und ergänzende terrestrische Messungen. Diss. Freiburg 1980, 130 S.
- 15) Langley, P.G.,1975: Multistage variable probability sampling: Theory and use in estimating timber resource from space and aerial photography. Ph.D.Diss. Ann Arbor 1975
- 16) Poso,S.1972:A method of combining photo and field samples in forest inventory. Com. Inst. For. Fenn. Nr. 76.1 Helsinki 1972
- 17) Kölbl,O.1978: Realistische Landnutzungserhebungen. Bildm. und Luftbildwesen 1978 S. 4-11
- 18) Carneiro C.M.1978: Forest cover mapping from Landsat MSS data by analogue and computer assisted techniques in the Fed. Rep. of Germany Diss. Freiburg 1978
- 19) Lapietra,G. Megier,J.1976: Acreage estimation of poplar planted areas from Landsat satellite data in Northern Italy Proc. Symp. Remote Sensing in Forestry Oslo 1976 S. 157-170
- 20) Keech, M.A., Disperati A.A.1978: The delineation of *Auracaria angustifolia* in the forests of southern Brazil using satellite imagery. Proc. Symp. Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources...Freiburg 1978, S.1805-1812

- 21) Kalensky,Z. Wightman, J.M.1976: Automatic forest mapping using remotely sensed data. Proc. Symp. Remote Sensing in Forestry. Oslo 1976 S. 115-136
- 22) Miller,LD.,Williams,D.C.1978: Monitoring forest canopy alteratioar around the world with digital analysis of Landsat imagery. Proc. Symp. Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources.....Freiburg 1978 S. 1721-1762
- 23) Hoffer,R.M., Swain,P.H.1980: Computer processing of satellite data for assessing agricultural, forest and range land resources. Int. Arch. f. Photogrammetry Vol. XXIII B.7,S.437-446
- 24) Spacetec Datengewinnung,1976: Erstellung einer vegetationsspezifischen Immissionszonenkarte für den Zentralraum Oberösterreich durch Auswertung multispektraler Scannerdaten.Wien 1976 (Ber.über eine Auftragsforschung) 44.S
- 25) Zirm, K.1980: Erfahrungen bei der Klassifikation geschädigter Vegetation mit Hilfe von multispektralen Scannerbildern. Int. Arch. Photogrammetriy VolXXIII 13.8. S.979-987
- 26) Reichert,P.G.,1978: The multispectral scanner as a research tool for signature measurements. Proc. Symp. Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources... Freiburg 1978 S.695-704
- 27) Wilson,R.A., Hirsch,S.N., Madden F.H., Lasensky J.1971: Airborne Infrared Forest Fire Detection System. USDA For. Serv. Res. Paper Int.-93,1971
- 28) USDA Forest Service,1974/75: Airborne Thermal Infrared Report 1974,1975 Fire Season.
- 29) Hildebrandt,G.1977: Die Bedeutung der Fernerkundung für die Forstwirtschaft. Photogramm. Woche Stuttgart 1977 S. 187 -