

Operationalisierungs- und Akzeptanzprobleme der Fernerkundung in der Agrarstatistik

Seit Jahren wird europaweit versucht, die Fernerkundung der Agrarstatistik nutzbar zu machen. Im September 1992 berichteten in Bad Neuenahr zahlreiche EU-Länder über die Auswirkungen der Fernerkundung auf das Europäische Statistische System, und erst kürzlich hat die Kommission der Europäischen Gemeinschaften eine Bilanz der Phase 1 (1989 bis 1993) ihres einschlägigen Pilotvorhabens vorgelegt, dessen Weiterführung vom Rat der EU am 14. November 1994 beschlossen wurde.¹ Die Zwischenbilanz hat gezeigt, daß die Fernerkundung für einige Länder bzw. Gebiete im Süden der Europäischen Gemeinschaft bemerkenswerte Möglichkeiten zur Verbesserung der Schätzung von Anbauflächen und Erträgen eröffnet, weniger aber für Länder, die schon bisher über ein fortgeschrittenes statistisches Instrumentarium zur Feststellung von Anbauflächen und Erträgen auf terrestrischer Grundlage verfügen. Im nachfolgenden Beitrag zeigt Abt. Dir. Dr. Rudolf Stadler, Ständiger Vertreter des Präsidenten und Abteilungsleiter für Wirtschafts- und Sozialanalysen, Umwelt und Agrarwirtschaft, anhand einschlägiger Erfahrungen mit einem mehrjährigen Pilotprojekt die bestehenden technischen und organisatorischen Schwachstellen auf, die zu beseitigen sind, damit die Fernerkundung künftig einen festen Platz in der Agrar- und Umweltstatistik einnehmen kann.

Das vom Ministerium für ländlichen Raum in Auftrag gegebene und in den Jahren 1990 bis 1993 gemeinsam vom Institut für Navigation der Universität Stuttgart und dem Statistischen Landesamt Baden-Württemberg durchgeführte Projekt zum Einsatz der Fernerkundung in der Agrar- und Umweltstatistik – kurz „BaWü-Projekt“ – war bereits wiederholt Gegenstand ausführlicher Berichte im vorliegenden Monatsheft „Baden-Württemberg in Wort und Zahl“.² Ausgehend von der Überlegung, daß eine erfolgreiche operationale Nutzung der Fernerkundung nur in Verbindung mit korrespondierenden terrestrischen Beobachtungen möglich ist und zur Vermeidung zusätzlicher Erhebungsarbeiten auf bereits vorhandenen statistischen Verfahren aufbauen sollte, wurde als geeignetes Bindeglied zwischen traditioneller Statistik und Fernerkundung die Besondere Erntermittlung (BEE) herangezogen, ein

bundesweit alljährlich durchgeführtes, mehrstufiges und mehrschichtiges Stichprobenverfahren zur objektiven Ertragsermittlung von Getreide und Kartoffeln.



Der Autor: Dr. Rudolf Stadler ist Direktor der Abteilung „Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Analysen, Umweltbeobachtung, Agrarwirtschaft“ des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg.

Die Verknüpfung mit der Fernerkundung erfolgte in der Weise, daß man die im Rahmen der BEE nach strengen Zufallskriterien ausgelosten Volldruschfelder zugleich als Trainingsparzellen für die Satellitenbilddauswertung heranzog. Da bei der BEE für jede einzelne Fruchtart eine selbstgewichtende Zufallsstichprobe proportional zur effektiven Anbaufläche im Erhebungsjahr gezogen wird, sind die Stichprobenfelder im Hinblick auf die Nutzungsart und die Hektarerträge räumlich über das Land nahezu ideal verteilt. Nutzungsart und durchschnittlicher Hektarertrag der BEE-Volldruschfelder sind

durch Begehung bzw. Beprobung mittels Maß und Waage genau bekannt und können daher gezielt mit den optischen Informationen der Satellitenbilder in Beziehung gebracht werden.

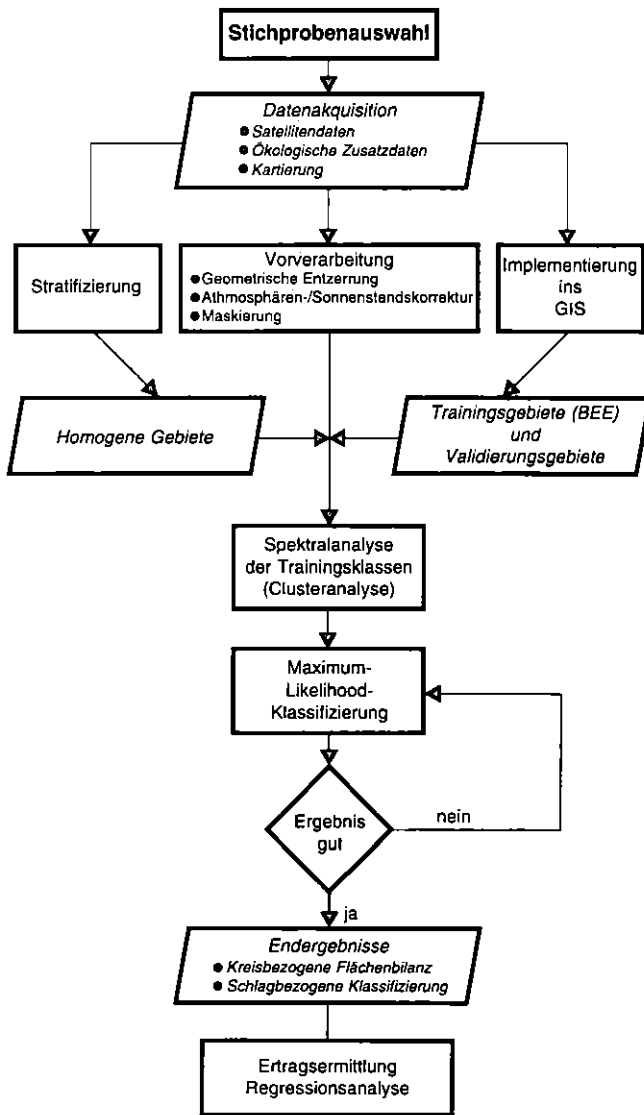
Zur unabhängigen Prüfung dieses Verfahrensansatzes wurden zusätzlich zu den Stichprobenfeldern der BEE 29 größere Validierungsgebiete ausgewählt und anhand von Orthophotos im Maßstab 1:10000 kartiert. Es handelt sich dabei um größere Betriebe bzw. Domänen, deren Eigentümer oder Pächter die Nutzungsarten, und zwar alle im Validierungsgebiet vorkommenden, selbst in die Orthophotos eintragen. Die Validierungsgebiete wurden anhand menügeführter Arc-Info-Module in ein geographisches Informationssystem (GIS) übernommen und für mehrjährige Dauerbeobachtung vorgesehen.

¹ EUROSTAT: Die Auswirkungen der Fernerkundung auf das Europäische Statistische Informationssystem, Beiträge zum Seminar, Bad Neuenahr, 22. bis 24. September 1992, Brüssel – Luxemburg 1993.

Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Erste Bilanz der Phase 1 (1989 bis 1993) des Pilotvorhabens für den Einsatz der Fernerkundung in der Agrarstatistik, Dok.Kom.(94) 332 endg., Brüssel, 19. September 1994.

Beschluß des Rates vom 14. November 1994 zur Weiterführung des Einsatzes der Fernerkundung in der Agrarstatistik im Zeitraum 1994 bis 1998 (94/757/EG), AB1 EG Nr. L 299, S. 27.

² Vgl. Stadler, Rudolf: Satellitenfernerkundung und amtliche Statistik, in: Baden-Württemberg in Wort und Zahl, Heft 3/1991, S. 127-141. – Stadler, R.: Fortschritte bei der Flächen- und Ertragsermittlung via Satellitenfernerkundung, in: Baden-Württemberg in Wort und Zahl, Heft 9/1992, S. 431-441.

Schematischer Überblick über den Verfahrensablauf

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg/Institut für Navigation der Universität Stuttgart

187 95

Gemeinschaftsaufgabe für Wissenschaft und Statistik

Der praktischen Umsetzung des Projekts liegt das in *Übersicht 1* dargestellte Verfahrensschema zugrunde. Das Statistische Landesamt und das Institut für Navigation (INS) teilten sich in die Aufgabe dergestalt, daß die Auswahl der repräsentativen Trainingsparzellen (BEE-Felder) und die Feststellung ihrer Koordinateneckpunkte zur Lagebestimmung sowie die Ertragsermittlung, Ergebniskontrolle und Verknüpfung mit anderen statistischen Eckdaten dem Statistischen Landesamt oblag, während das Institut für Navigation für die Beschaffung, Aufbereitung und Auswertung der Satellitenbilder (einschließlich Klassifizierung) verantwortlich zeichnete.

Diese Aufgabenteilung hat sich prinzipiell bewährt, wenn auch im Hinblick auf die Operationalisierung des Verfahrens gewisse Schwierigkeiten aus der unterschiedlichen Kapazitätsausstattung und Aufgabenstellung der beteiligten Institutionen erwuchsen, so daß die Auswertungsergebnisse der Satellitenbilder des Jahres 1993 gegenwärtig

noch nicht flächendeckend für ganz Baden-Württemberg vorliegen.

Der gegenwärtige Stand der Auswertungen gestattet es gleichwohl, die beim Einsatz der Fernerkundung für Zwecke der Flächen- und Ertragsstatistik bestehenden wichtigsten technischen und organisatorischen Schwachpunkte mit dem Ziel aufzuzeigen, aus der Schwachstellenanalyse heraus Folgerungen für eine durchgreifende Verfahrensverbesserung abzuleiten.

Mit dem Übergang auf große Räume entstanden neue Schwierigkeiten

Nachdem in den Untersuchungsjahren 1990 und 1991 das Projekt auf 1 bis 3 Landkreise beschränkt war und für diese verhältnismäßig kleinen Gebiete recht erfreuliche Ergebnisse erbrachte, wurde in den Folgejahren der Untersuchungsraum schrittweise vergrößert: Im Jahr 1992 wurde der sogenannte „Schnitt“, das heißt ein 70 x 210 km breiter Streifen Baden-Württembergs von ca. 14 700 km² entlang des 9-Grad-Meridians als Bezugsraum zugrunde gelegt, im Jahr 1993 wurde das ganze Land Baden-Württemberg mit einer Fläche von rund 35 000 km² einbezogen.

Um dieses Gebiet ganz abzudecken, bedurfte es allerdings beim LANDSAT-5-TM zweier Umläufe, nämlich für den Orbit 194 und 195 (*Schaubild 1*), und damit stellte sich bereits ein Problem: Da die beiden Umlaufpfade zeitlich auseinanderfallen und somit unterschiedliche Aufnahmebedingungen und Beobachtungsstadien repräsentieren, war eine gemeinsame Auswertung nicht ohne weiteres möglich, allenfalls ein Abgleich von separat gewonnenen Klassifikationsergebnissen. Zwar ist vorgesehen, die beiden Bilder unter Verwendung der gemeinsam überdeckten Teilfläche zu verknüpfen, doch ist fraglich, ob die jeweiligen Spektralinformationen so aufeinander abgestimmt werden können, daß sie sich gemeinsam auswerten lassen. Natürlich wäre es deshalb aus baden-württembergischer Sicht günstiger, wenn die Umlaufbahn durch die Mitte des Landes führte. Das Problem der operationalen Verknüpfung von Satellitenbildern wäre damit freilich nicht vom Tisch; es stellt sich umso dringlicher, je höher die Ansprüche an die Bildgenauigkeit und das Auflösungsvermögen sind. Bei Verwendung von SPOT-Aufnahmen (von denen zur Abdeckung des Landes ca. 25 Bilder erforderlich sind) erfährt das Problem eine noch höhere Dringlichkeit.

Zur Problematik der Stratifizierung

Mit der Größe des Untersuchungsgebiets wurden entsprechend große regionale Unterschiede bezüglich Bodenverhältnisse, Höhenlage, Klima, Landbaustrukturen, Anbauformen, Phänologie der Kulturarten, Sortenspektren und Reifezeiten in Kauf genommen. Baden-Württemberg ist geradezu ein Musterbeispiel für Kleinbetriebstruktur, Flursplittler und Vielfalt der natürlichen Produktionsbedingungen.

Die Gliederung nach Teillandschaften, wie sie aus dem *Schaubild 2* ersichtlich ist, entstand in Anlehnung an die Naturraumgliederung des Landes und stellt bereits den Versuch einer gewissen Standardisierung der Produktions-

vielfalt dar. Zur Stratifizierung des Bezugsraums war aber eine weitere Vereinheitlichung notwendig, denn die noch verbleibende Erscheinungsvielfalt ermöglichte keine handhabbare Strukturierung des Landes. Vergleichende Gegenüberstellungen vorhandener Stratifikationen, wie der Landwirtschaftlichen Vergleichsgebiete (MLR – 1981), der Wuchsklimakarte (Ellenberg – 1955), der ökologischen Standorteignungskarte für den Landbau (Weller – 1978/90), bzw. eine Auswertung phänologischer Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD – 1980 bis 1990) haben jedoch gezeigt, daß es keine optimale Stratifizierung gibt.³

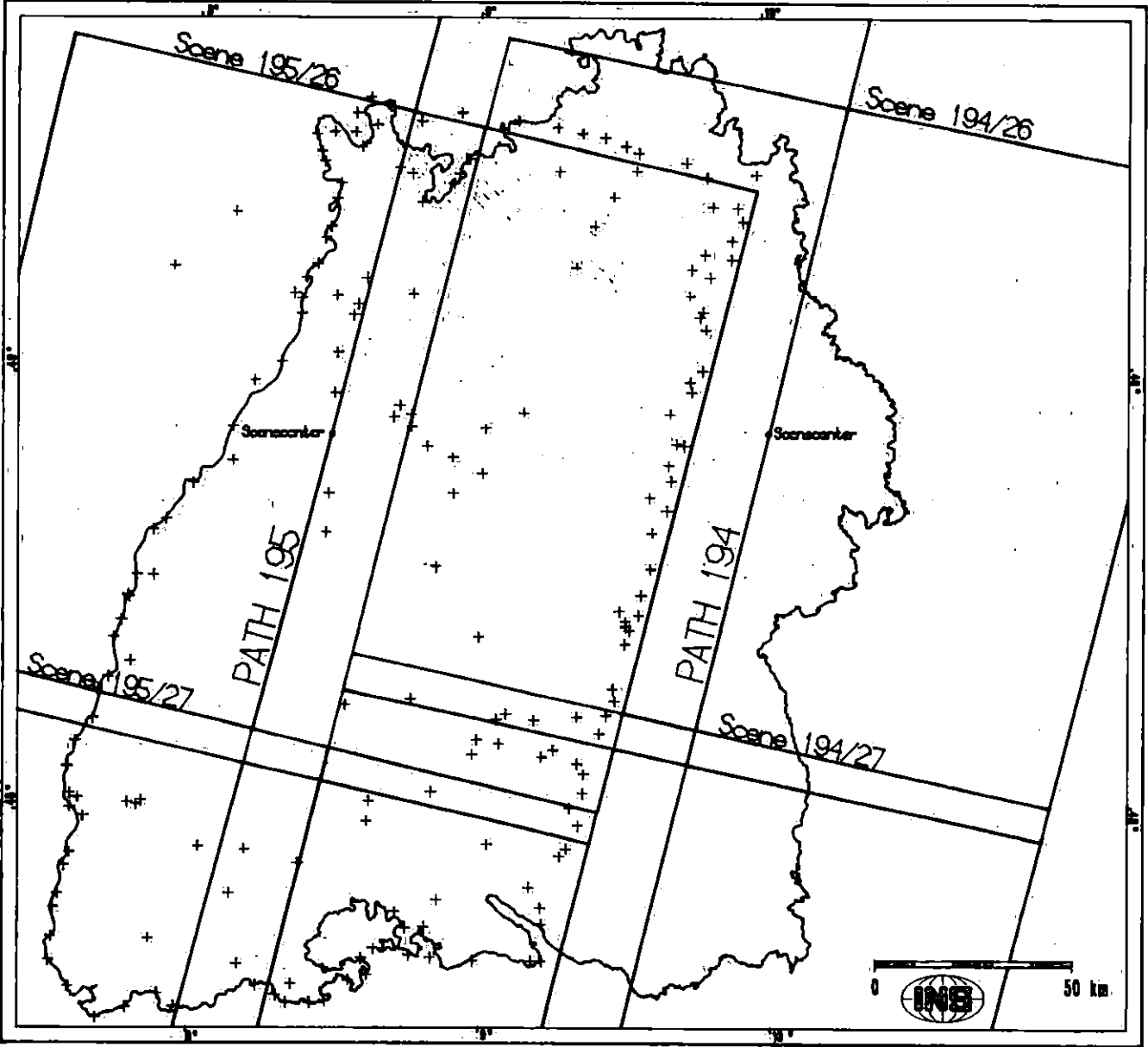
³ Hartl, Philipp; Stadler, Rudolf: Einsatz von Satellitendaten zur Bestimmung der Bodennutzung und Ertragsermittlung in Baden-Württemberg, Bericht 1992, Stuttgart, Juli 1994, S. 35 ff.

Die vom Deutschen Wetterdienst erstellten fruchtartspezifischen phänologischen Daten (Mähdruschbeginn, Beginn der Gelbreife, des Schossens und Ährenschiebens) ließen immerhin einen brauchbaren Zusammenhang zur generalisierten Wuchsklimakarte nach Wärmestufen erkennen. Auch die agrarökologische Standortkarte nach Weller oder eine Abstufung nach Höhenlinien des digitalen Geländemodells ergaben ähnliche Differenzierungen. Da die erstgenannte bei Flußniederungen noch feiner unterscheidet, wurde sie schließlich zur Stratifizierung herangezogen (Schaubild 3), doch wurden zur Vereinfachung die Wärmestufen nochmals paarweise zusammengefaßt. Man muß sich allerdings darüber im klaren sein, daß regionale phänologische Übergänge nicht in Stufen, sondern kontinuierlich erfolgen.

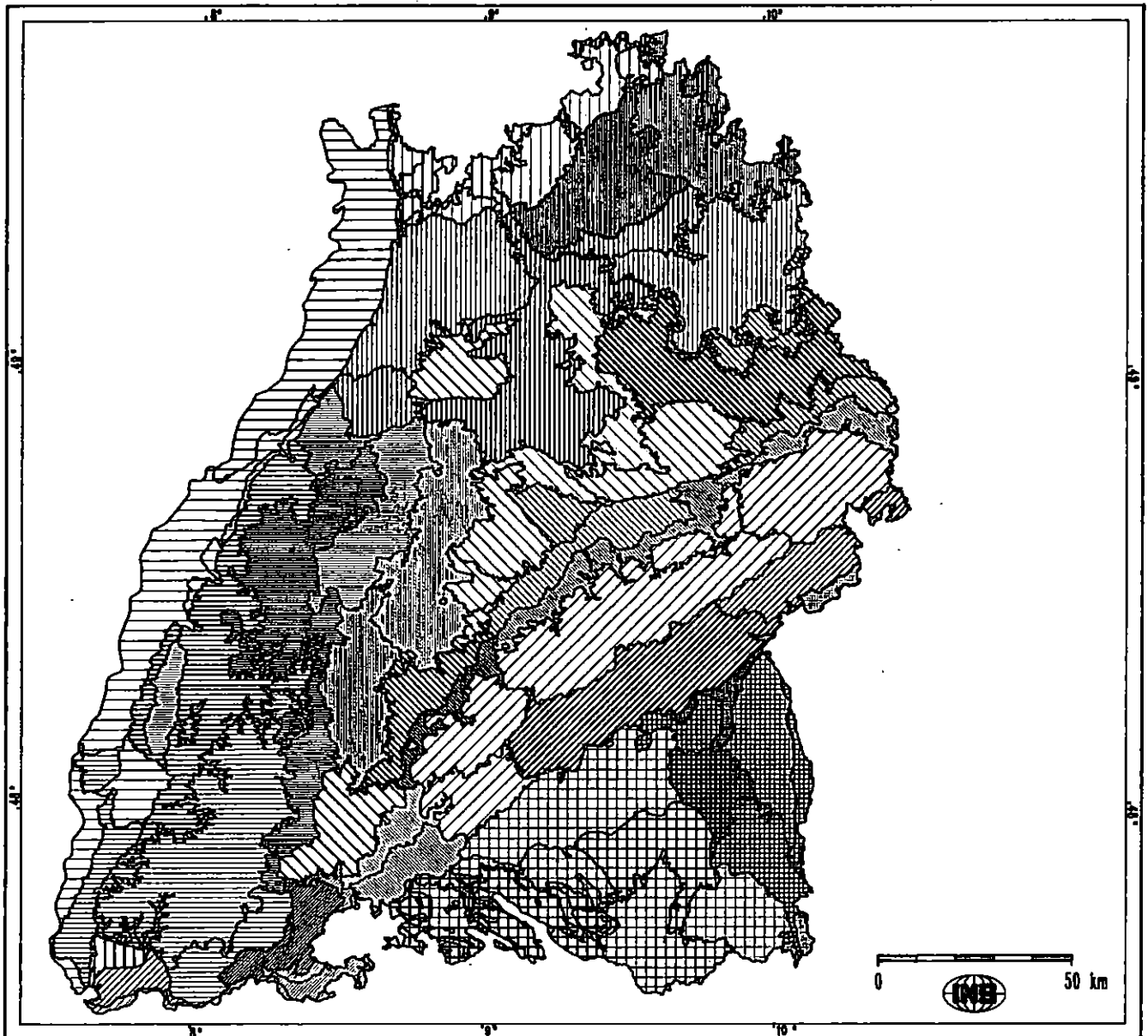
Schaubild 1

Landsat TM 5 über Baden-Württemberg

Überflugstreifen 194 und 195, Szenen 26 und 27, mit jeweiligen Szenenmittelpunkten sowie den 190 Passpunkten für die geometrische Entzerrung der 93er Szenen



Teillandschaften in Baden-Württemberg nach WELLER (1990)



Statistisches Landesamt Baden-Württemberg

158 95

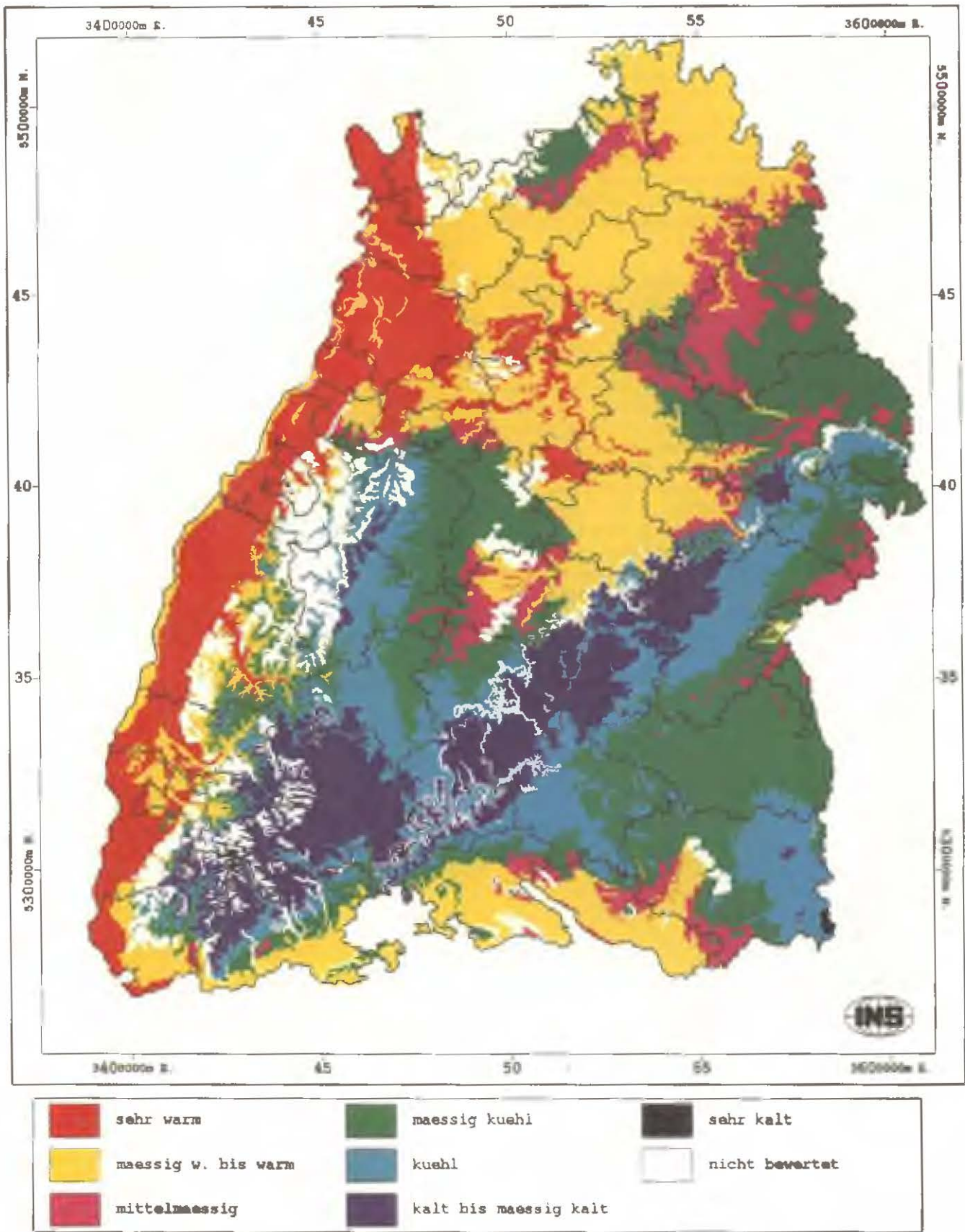
Das Bewölkungsproblem

Die Wahrscheinlichkeit, daß der Satellitenüberflug zu einem Zeitpunkt erfolgt, zu dem einwandfreie Sichtverhältnisse herrschen, ist geringer, als man vermuten möchte: LANDSAT-TM-Bildszenen mit geringem Bewölkungsgrad standen im Jahr 1992 für Path 195 nur aus den Überflügen vom 8. bzw. 24. April und vom 27. Juni, im Jahr 1993 nur vom 27. April und 30. Juni zur Verfügung. Path 194 lieferte 1992 nur eine einzige Aufnahme, noch dazu mit über 25% Überdeckung, 1993 lediglich je eine Aufnahme Ende April und Ende Juni. Schon in den beiden Vorjahren waren für den Orbit 194 im Jahr 1990 nur zwei, in 1991 nur vier Szenen, für den Orbit 195 im Jahr 1990 ebenso wie 1991 jeweils nur zwei Szenen mit einer mittleren Bewölkung

unter 5% verfügbar. SPOT-Bildszenen waren für Baden-Württemberg flächendeckend in den Jahren 1992 und 1993 überhaupt nicht verfügbar.

Offensichtlich sind hierzulande die Nutzungsmöglichkeiten optischer Satellitenbilddaten stark eingeeengt, weil ihre Gewinnung nicht planbar und damit auch nur bedingt operationalisierbar ist. Besonders im Hinblick auf die Ertrags-schätzung sollten die Aufnahmen weniger Mitte/Ende Juni als zu dem pflanzenbaulich relevanteren Termin Mitte Juli vorliegen. Und wenn dies – wie etwa bei SPOT – nur für einzelne Teilgebiete, aber nicht flächendeckend der Fall ist, muß offen bleiben, ob die Klassifizierungsergebnisse dieser Teilräume auf die wolkenüberdeckten Gebiete übertragbar sind.

Schaubild 3
Wuchsklimakarte nach Wärmestufen in Baden-Württemberg aus WELLER (1990)
sowie Landkreisgrenzen



Mangelnde Aktualität von Bildakquisition und -verarbeitung

Für die Bildakquisition müssen derzeit immer noch günstigenfalls vier bis sechs Wochen veranschlagt werden. Gemessen an der Tatsache, daß die amtliche Statistik bisher erste Stichprobenergebnisse der Bodennutzung und Schätzungen der voraussichtlichen Jahresproduktion von Getreide, Ölfrüchten und Frühkartoffeln aus terrestrischen Erhebungsdaten bereits zum 25. Juli jeden Jahres bereitstellt, ist diese Zeitvorgabe zu lang. Sie bedeutet nämlich, daß beispielsweise frühestens Anfang August eine Aufnahme von Ende Juni/Anfang Juli angefordert werden kann. In der Regel muß sie dann noch geocodiert und pixelgerecht entzerrt werden, was bei manueller Bearbeitung ebenfalls mehrere Wochen in Anspruch nimmt.

Das BaWü-Projekt wurde beispielsweise einer „Bild zu Bild-Feinentzerrung“ nach dem Nearest-Neighbourhood-Verfahren anhand von 193 Paßpunkten unterworfen, wobei auch die für LANDSAT-5-TM typische Zeilenverdoppelung (65. Zeile), und der störende Spaltenversatz beseitigt werden mußten, damit schließlich eine mittlere Genauigkeit von 0,7 Pixel erzielt werden konnte. Nutzer, die eine operationale Anwendung der Fernerkundung anstreben, fordern daher, daß die Bildszenen geocodiert und radiometrisch entzerrt binnen ein bis zwei Wochen nach dem Überflug verfügbar sind. Immerhin werden gegenwärtig noch mindestens 60% der Bearbeitungszeit für die Vorverarbeitung der Szenen benötigt; die Entzerrung sollte daher kommerzialisiert werden und über eine Paßpunktdatei großflächig, mit verbürgten Genauigkeiten im Subpixelbereich erfolgen, so daß die Szenen weitgehend vorverarbeitet und kostengünstig zur thematischen Auswertung an die Nutzer weitergegeben werden können. Auch die in der Regel noch notwendige Atmosphärenkorrektur, Sonnenstands- und Geländekorrektur ist eine aufwendige Prozedur und sollte im Hinblick auf die Operationalisierung des Verfahrens automatisierbar sein.

Übersicht 2

Katalog der Bodennutzungshaupterhebung Betriebsprinzip

1. Hauptnutzungsarten

Landwirtschaftlich genutzte Fläche

davon: Ackerland
Haus- und Nutzgärten
Obstanlagen
Baumschulen
Dauergrünland
davon: Wiesen
Mähweiden
Dauerweiden
Hutungen
Rebland
Korbweidenanlagen und
Weihnachtsbaumkulturen

Nicht mehr genutzte landwirtschaftliche Fläche

Waldfläche
Gewässer, Öd- und Unland
Gebäude- und Hofflächen
Wirtschaftsfläche insgesamt

Übersicht 3

Katalog der Bodennutzungshaupterhebung Betriebsprinzip

2. Anbau auf dem Ackerland

Getreide	Gartengewächse
davon	davon
Winterweizen	Gemüse, Spargel, Erdbeeren
Dinkel	Blumen und Zierpflanzen
Sommerweizen	Gartenbausämereien
Hartweizen	
Roggen	Handelsgewächse
Wintermengengetreide	davon
Wintergerste	Winterraps
Sommergerste	Sommerraps
Hafer	Winter- und Sommerrüben
Sommermengengetreide	Körnersonnenblumen
Triticale	Flachs
Körnermais	Sonstige Ölfrüchte
Corn-Cob-Mix	Hopfen
	Tabak
Hülsenfrüchte	Grassamen- und Rüben zur
davon	Samengewinnung
Körnerfuttererbsen	Heil- und Gewürzpflanzen
Ackerbohnen	Sonstige Handelsgewächse
Sonstige Hülsenfrüchte	
Hackfrüchte	Futterpflanzen
davon	davon
Frühkartoffeln	Klee und Klee gras
Mittelfrühe und Spätkartoffeln	Luzerne
Zuckerrüben	Gras als Hauptfrucht
Futterrüben	Silomais
Kohlrüben	Sonstige Futterpflanzen
Sonstige Hackfrüchte	Brache und Stillungsflächen mit Prämie

Das Problem der Nutzungsvielfalt

Die landwirtschaftlichen Nutzungsformen sind für sich allein außerordentlich vielfältig. Dies wird deutlich, wenn man sich den Statistik-katalog der Hauptnutzungsarten und noch mehr den der Fruchtarten auf dem Ackerland vergegenwärtigt (*Übersichten 2 und 3*). In dieser Differenziertheit stellen beide Kataloge zweifellos eine erhebliche Herausforderung an die Fernerkundung dar, doch würde es bereits von großem Nutzen sein, wenn wenigstens einige der flächenmäßig wichtigsten Hauptfrucht- und Kulturarten über die Fernerkundung zuverlässig ermittelt werden könnten.

Über die Nutzungsarten der Landwirtschaft hinaus gibt es zahlreiche außerlandwirtschaftliche Nutzungen, wie sie etwa in den wichtigsten Kategorien der Flächenerhebung dargestellt sind (*Übersicht 4*). In den Satellitenbildern treten auch sie durch charakteristische optische Signale hervor und stören dadurch den Nachweis der landwirtschaftlichen Nutzungsarten. Um dies auszuschließen, werden die außerlandwirtschaftlichen Nutzungsarten durch sogenannte Masken ausgeblendet. Die Erstellung solcher Masken ist allerdings eine anspruchsvolle Aufgabe, weil die außerlandwirtschaftlichen Nutzungen in der Regel in digitaler Form nicht verfügbar sind.

Für das BaWü-Projekt wurden digitale Masken für die Waldfläche und die offene Wasserfläche aus der analogen topographischen Karte 1:50000 (TK 50) durch Abscannen gewonnen, für Flächen von extremer Hangneigung (mehr als 30%) aus dem digitalen Höhenmodell übernommen

Katalog der Flächenerhebung 1993

Realnutzung – Belegenheitsprinzip

Gebäude- und Freifläche

davon: GF-Wohnen
GF-Gewerbe und Industrie
Sonstige GF-Fläche

Betriebsfläche

davon: BF-Abbauland
Sonstige Betriebsfläche

Erholungsfläche

davon: Grünanlagen
Sonstige Erholungsfläche

Verkehrsfläche

davon: Straße
Weg
Platz
Sonstige Verkehrsfläche

Landwirtschaftsfläche

davon: Moor
Heide
Sonstige Landwirtschaftsfläche

Waldfläche**Wasserfläche****Flächen anderer Nutzung**

davon: Friedhof
Unland
Sonstige Flächen anderer Nutzung

Gemarkungsflächen insgesamt

und für die versiegelten Flächen (dichte Bebauung) aus multitemporalen Fernerkundungsbildern durch Klassifikation nach dem Maximum-Likelihood-Verfahren abgeleitet und mittels Filter generalisiert. Die im Satellitenbild nach Subtraktion der Masken von der Gesamtfläche verbleibende Restfläche sollte etwa der Landwirtschaftsfläche der terrestrischen Flächenerhebung entsprechen, doch verblieb eine deutlich größere Restfläche, weil offensichtlich die diffizile, aufwendige und definitorisch nicht unproblematische Maskenbildung aus der TK 50 ebenso wie aus dem Satellitenbild heraus nicht völlig gelang. Eine Teilverbesserung dürfte eine zusätzliche „Biotop“-Maske für Feuchtgebiete, Moore, Trockenrasen und dergleichen bringen, doch ist eine durchgreifende Verbesserung wohl erst zu erwarten, wenn die automatisierte Liegenschaftskarte der Vermessungsverwaltung für alle Gemeinden des Landes erstellt, aktualisiert und als Maskengrundlage verfügbar ist. Dann sollte es auch möglich sein, für die Darstellung von Acker-nutzungen innerhalb der Landwirtschaftsfläche das Grünland durch eine spezielle Grünlandmaske auszuschließen. Gegenwärtig wird vom Statistischen Landesamt und INS bereits im Rahmen des „DAMUSI“-Projekts der Europäischen Gemeinschaft modellhaft versucht, auf der Grundla-

ge des automatisierten Liegenschaftsbuchs bzw. der Liegenschaftskarte die Erstellung einer solchen Grünlandmaske zu operationalisieren.⁴

Die Größenproblematik und Lagebestimmung der Trainingsflächen

Gemäß dem theoretischen Ansatz wurden im BaWü-Projekt 1992 und 1993 landesweit die Volldruschfelder der Besonderen Erntermittlung als Trainingsfelder herangezogen; im Jahr 1992 waren das für den Landesteil Baden-Württemberg, der durch den sogenannten „Schnitt“ abgedeckt wurde, rund 160 Felder. Im Jahr 1993 waren es für das ganze Land gut 340 Felder, deren räumliche Verteilung sich aus *Schaubild 4* ergibt: Die systematische Zufallsauswahl der Stichprobenfelder der BEE ergab eine nahezu optimale geographische Verteilung proportional zum Anbauumfang der einzelnen Fruchtarten.

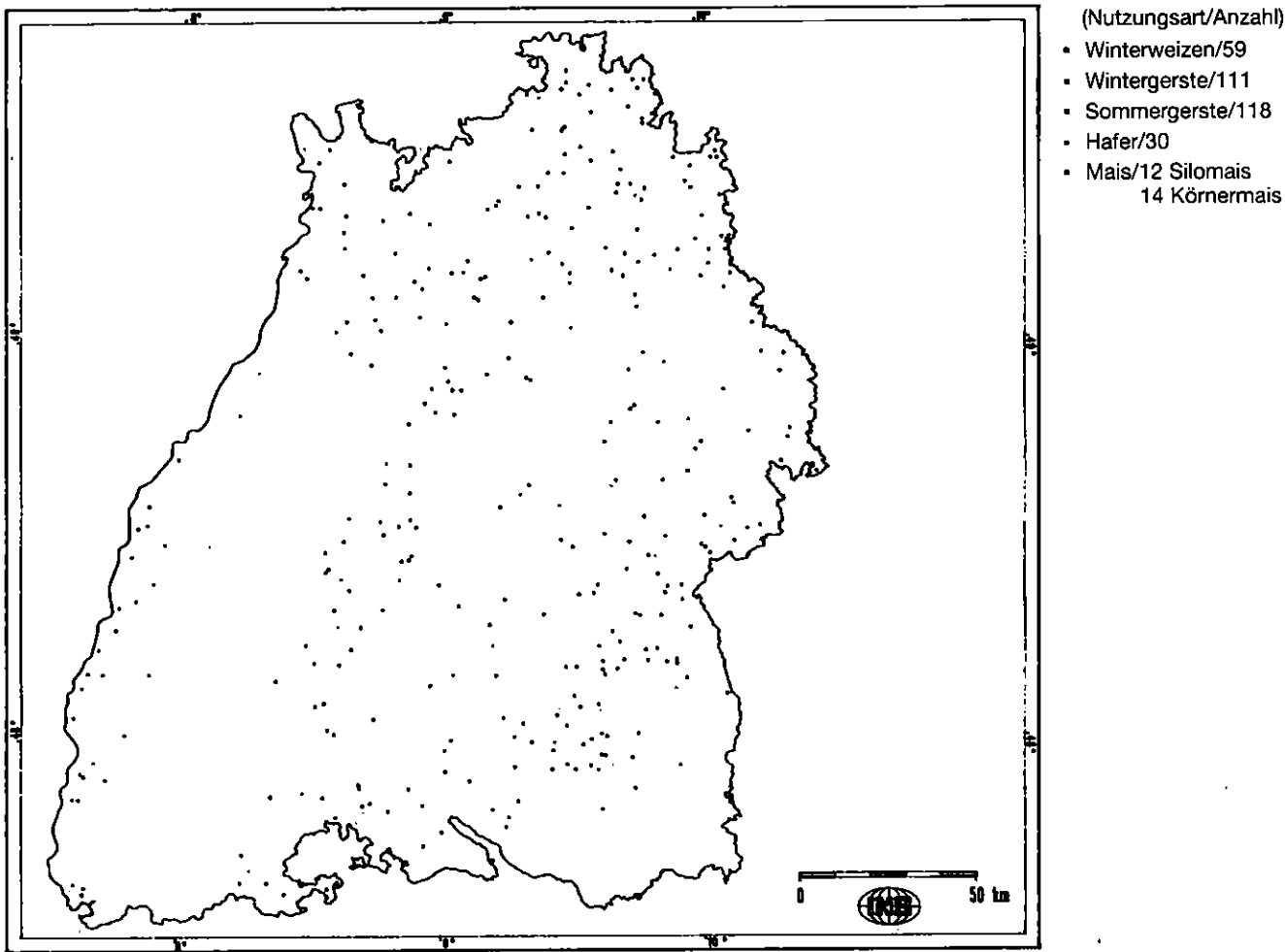
Nun war bei dem vergleichsweise geringeren geometrischen und spektralen Auflösungsvermögen der leider nur verfügbaren LANDSAT-5-TM Aufnahmen (30km² Pixelgröße) von vornherein bekannt, daß sehr kleine Felder im Satellitenbild nicht darstellbar sind. Bei der Auswahl der Stichprobenfelder vor Ort waren daher die zuständigen Ämter für Landwirtschaft, Landschafts- und Bodenkultur angewiesen worden, bei Feldern, die nicht mindestens 0,3ha groß und 50m breit sind, ein größeres Ersatzfeld speziell für Zwecke der Fernerkundung auszuwählen. Diese Anweisung konnte offenkundig nur teilweise umgesetzt werden, denn effektiv entsprach schließlich ein bescheidener Prozentsatz der einbezogenen Stichprobenfelder diesen Bedingungen (*Tabelle 1*).

Aufgrund der enormen Flurzersplitterung und Parzellierung war es in manchen Gebieten des Landes überhaupt nicht möglich, größere Schläge zu finden. Bei solchen Voraussetzungen, denen das verfügbare Bildmaterial offensichtlich nicht gerecht werden kann, standen letztendlich für die Auswertung nur sehr kleine Fallzahlen je Fruchtart zur Verfügung, was die Aussagefähigkeit der Trainingsfelder für die Klassifikation und Ertragschätzung von vornherein einschränkte.

Für die ausgeschiedenen Stichprobenfelder erwiesen sich damit auch die geleisteten Arbeiten zur Bestimmung ihrer geographischen Lage im nachhinein als illusorisch. Die Lage der einzelnen Felder mußte nämlich im Zusammenhang mit der Auswahl vor Ort in der Weise bestimmt werden, daß bei ihrer Begehung anhand einschlägiger Flurkarten Anfahrts- und Lageskizzen erstellt und aus diesen im Statistischen Landesamt manuell die Koordinateneckwerte nach *Gauß-Krüger* errechnet wurden. Leider sind die modernen GPS-Handgeräte derzeit noch zu ungenau bzw. beim Differenzverfahren in der Anwendung zu aufwendig, als daß sie dafür hätten in Frage kommen können. Da für das manuelle Errechnen der Höch- und Rechtswerte eines Stichprobenfeldes im Mittel etwa 45 Minuten benötigt werden, ist zur Operationalisierung der Fernerkundung ein Alternativverfahren vordringlich. Vorerst läßt es sich möglicherweise aus der jüngsten Weiterentwicklung des GPS-Differenz-Verfahrens (das allerdings noch zu teuer ist)

⁴ Projekt DAMUSI; Pilotprojekt zur Erfassung von Hauptnutzungsarten aus Satellitenaufnahmen; Unterauftrag der Universität Stuttgart (Institut für Navigation) des gleichnamigen Forschungsprojekts von EUROSTAT.

Schaubild 4
Verteilung der 344 BEE-Trainingsfelder in Baden-Württemberg für die Klassifizierung 1993



Statistisches Landesamt Baden-Württemberg 164 95

Tabelle 1
Satellitenfernerkundung 1990 bis 1994
Anzahl der BEE-Trainingsfelder

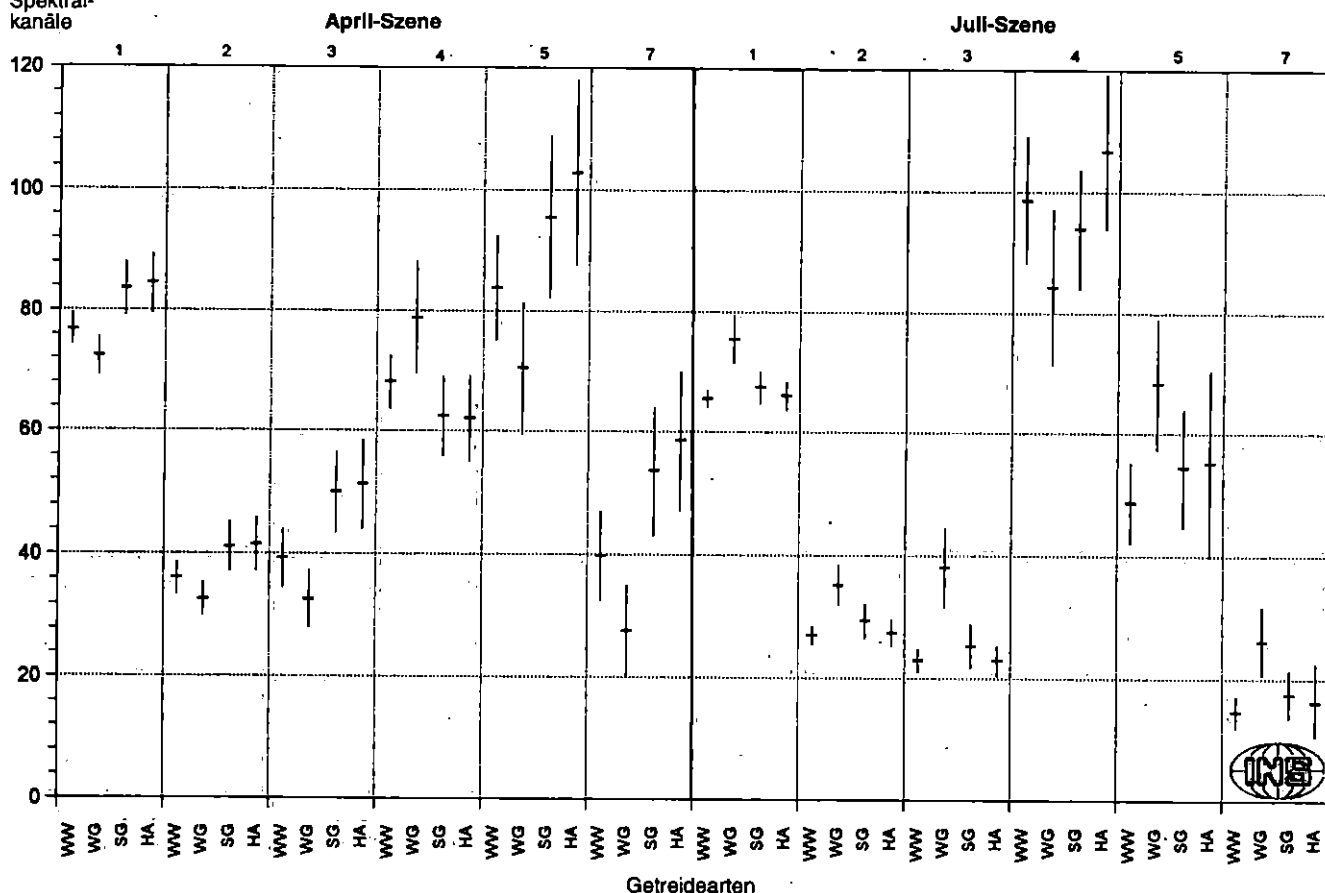
Fruchtart Untersuchungsraum	Jahr	BEE- Stichprobenfelder (Land Baden- Württemberg)	Darunter			
			ausgewählt für Projekt	im Satellitenbild sichtbar	> 50 m Breite und > 0,3 ha groß	
					Anzahl	% ausgewählt
Winterweizen						
Landkreis Ludwigsburg	1990	318	150	143	51	34,0
Landkreis Böblingen u. Tübingen	1991	319	80	76	75	93,8
„Schnitt“ Baden-Württemberg	1992	315	28	19	9	32,1
Orbit 195	1993	317	58	30	24	41,4
Land Baden-Württemberg	1994	318	144	–	131	91,0
Sommergerste						
„Schnitt“ Baden-Württemberg	1992	120	66	41	25	37,9
Orbit 195	1993	118	118	59	48	40,7
Land Baden-Württemberg	1994	117	97	–	87	89,7
Wintergerste						
„Schnitt“ Baden-Württemberg	1992	106	47	33	24	51,1
Orbit 195	1993	110	110	53	38	34,5
Land Baden-Württemberg	1994	109	98	–	84	85,7
Hafer						
„Schnitt“ Baden-Württemberg	1992	177	14	13	11	78,6
Orbit 195	1993	175	30	13	7	23,3
Land Baden-Württemberg	1994	149	64	–	60	93,8

Spektralsignatur ausgewählter Getreidearten

(Datengrundlage: BEE Trainingsfelder 1992 der Wärmestufen sehr warm und warm bis mäßig warm)

Getreidearten:

WW= Winterweizen WG= Wintergerste SG= Sommergerste HA= Hafer

Spektral-
kanäle

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg

185 95

gewinnen. Auf Dauer sollte jedoch die Lage der Stichprobenfelder anhand der Parzellennummern unmittelbar aus der automatisierten Liegenschaftskarte digital übernommen werden können.

Probleme der spektralen Überlagerung

Der Bestimmung von Art und Anbauumfang landwirtschaftlicher Feldfrüchte aus einem Satellitenbild liegt der Gedanke zugrunde, daß diese sich in ihrem Spektralverhalten in charakteristischer Weise unterscheiden, so daß die spektralen Mittelwerte der Trainingsfelder (bzw. ihre Streuung) sich auf alle übrigen Felder der jeweils gleichen Fruchtart übertragen lassen und somit gleichartige Nutzungsklassen gebildet werden können.

Nachdem 1990 und 1991 eine Klassifikation nach dem Maximum-Likelihood-Verfahren, teilweise auch nach neuronalen Netzen, für die Kreise Ludwigsburg bzw. Tübingen und Böblingen mit recht gutem Erfolg für Weizen durchgeführt werden konnte, standen 1992 und 1993 für mehrere Fruchtarten verschiedene Klassifizierungsvarianten an.

So wurde 1992 zunächst für das Untersuchungsgebiet des sogenannten „Schnitts“ innerhalb der Nordszene klassifiziert, dann für eine ausgewählte Wärmestufe als Teil des Untersuchungsraums. Um Grünland besser vom Getreide zu unterscheiden und andere Nicht-BEE-Fruchtarten als Gegenklassen zur Eingrenzung der Maximum-Likelihood-Klassifikation einzubeziehen, wurden deren Spektralwerte zusätzlich aus den Validierungsgebieten als Trainingsflächen herangezogen, löcherige Klassifizierungen mittels Majoritätsfilterung aufgefüllt und teilweise Clusteranalysen durchgeführt. Dennoch brachte diese Klassifikation im Vergleich zu den terrestrischen Daten der amtlichen Statistik ein zunächst sehr unbefriedigendes Ergebnis, das sich allerdings dadurch verbessern ließ, daß der Untersuchungsraum auf das Gebiet der Wärmestufe „warm und sehr warm“ eingeschränkt wurde; für Wintergerste verblieb dann lediglich noch eine Abweichung von $\pm 3,0\%$, für Winterweizen von $\pm 8,3\%$.

Bei Sommergerste und Hafer zeigten erheblich größere Differenzen (-26% bzw. -35%) an, daß offensichtlich nicht nur die sehr kleine Zahl von Trainingsfeldern, sondern vor allem auch Zielkonflikte bei den Spektralsignaturen zwischen den Getreidearten das unbefriedigende Klassifizie-

Tabelle 2
Klassifizierung anhand der BEE-Trainingsfelder (Wärmestufe 6/7)¹⁾
 Erweitert um Raps, Zuckerrüben und Dauergrünland der Validierungsgebiete

Fruchtarten	Winterweizen	Wintergerste	Sommergerste	Hafer	Mais	Raps	Zuckerrüben	Dauergrünland
	%							
Winterweizen	72,19	15,84	3,83	15,09	0,68	0,79	0,56	1,47
Wintergerste	8,28	64,16	7,08	0,00	2,03	0,53	0,48	2,45
Sommergerste	0,59	5,19	56,05	1,89	5,41	0,00	1,75	1,04
Hafer	9,47	2,08	8,55	67,92	2,03	0,39	0,24	3,99
Mais	1,18	1,04	9,73	1,89	79,05	0,79	3,66	0,86
Raps	0,59	0,52	0,88	1,89	0,68	85,66	0,08	1,66
Zuckerrüben	0,00	0,03	4,13	1,89	3,38	0,00	86,41	0,06
Grünland	0,59	0,78	1,18	5,66	1,35	2,89	0,72	81,04
Sonstiges	7,10	10,13	8,55	3,77	5,41	8,95	6,12	7,42

¹⁾ LANDSAT-TM vom 27. April 1993 und 30. Juni 1993, Spektralkanäle 3, 4 und 5.

rungsergebnis verursachten: Wie *Schaubild 5* verdeutlicht, überdecken sich sowohl in der April- als auch in der Juli-Aufnahme in fast allen Kanälen die durchschnittlichen Spektralinformationen von Sommergerste und Hafer zu großen Teilen.

Im Jahr 1993 ergab die multitemporale und multispektrale Klassifikation aus den BEE-Feldern für die Westszene (Orbit 194) ebenfalls entsprechend unbefriedigende Ergebnisse: Beim Weizen wurden in erheblichem Umfang Hafer und Wintergerste, bei Sommergerste Hafer und Mais aufgrund teilweise ähnlicher Spektralinformationen mitklassifiziert. Auch hier verbesserte sich indessen die innere und äußere Konfusionsmatrix ganz erheblich, wenn man die Klassifikation auf einzelne Wärmestufen beschränkte (*Tabelle 2*). Da sich die Vegetation im Jahr 1993 zum Aufnahmezeitpunkt in einem etwas anderen phänologischen Entwicklungsstand befand als 1992, läßt die Tatsache, daß die spektrale Überlagerung in den beiden Jahren jeweils unterschiedliche Fruchtarten betraf, vermuten, daß ihre optische Trennbarkeit nicht nur von der Homogenität der untersuchten Räume, sondern auch vom Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahmen abhängt.

Autokorrelationsprobleme

Wenn sich die fruchtartsspezifischen Spektralwerte im Satellitenbild abbilden, spricht einiges dafür, daß sich korrespondierend auch ertragspezifische Merkmale in charakteristischer Weise dort widerspiegeln. Die Spektralwerte der Trainingsfelder im Satellitenbild können dann als Klassifikatoren für alle Felder einer bestimmten Fruchtart von vergleichbarer Ertragshöhe dienen. Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen den Erträgen landwirtschaftlicher Fruchtarten und den Reflektionswerten der Fernerkundung war von besonderem Vorteil, daß die effektiven Hektarerträge der BEE-Felder ohnehin bekannt waren, so daß lineare Mehrfachkorrelationen zwischen den terrestrisch ermittelten Durchschnittserträgen und den einzelnen Reflektionswerten der LANDSAT-Spektralkanäle errechnet werden konnten. Als unabhängige Variablen dienten die sechs Farbkanäle, als Maß für die über die multiple Regression gelieferte Erklärung der Variation des jeweiligen Durchschnittsertrags aus der Variation der Reflektionswerte im Satellitenbild das multiple Bestimmtheitsmaß R². Zur Darstellung des Signifikanzniveaus bzw. zur Überprüfung des statistischen Zusammenhangs zwischen

Tabelle 3 a
Winterweizen 1993: Korrelationsmatrix der Spektralwerte¹⁾
 24 Felder > 50 m Breite

Regressor	Blau	Grün	Rot	Infrarot I	Infrarot II	Infrarot III
Abhängige Variable	Bestimmtheitsmaß R ²					
Blau	–	***0,87	***0,82	*0,20	*0,25	***0,43
Grün		–		*0,18	**0,38	***0,58
Rot			–	**0,35	**0,38	***0,64
Infrarot I				–	0,01	0,13
Infrarot II					–	***0,89
Infrarot III						–
Ertrag (66,03 dt/ha)	0,03	0,00	0,00	0,04	0,01	0,00

Tabelle 3 b
Winterweizen 1993: Korrelationsmatrix des Durchschnittsertrags mit Spektralwerten¹⁾
 24 Felder > 50 m Breite

Regressor	Blau	Grün	Rot	Infrarot I	Infrarot II	Infrarot III	Bestimmtheitsmaß R ²
Abhängige Variable	Ertrag korreliert mit markierten Spektralwerten ¹⁾						
Ertrag (66,03 dt/ha)				x	x		0,05
		x		x			0,07
			x			x	0,05
			(x)	(x)	(x)		0,07
	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	0,19

¹⁾ LANDSAT-TM, Aufnahme vom 30. Juni 1993. – ¹⁾ (x) = Regressoren linear abhängig, das heißt: Bestimmtheitsmaß R² ist erhöht; Signifikanzniveau P: * = 5%, ** = 1%, *** = 0,1%.

Tabelle 4 a
Sommergerste 1993: Korrelationsmatrix der Spektralwerte¹⁾
48 Felder > 50 m Breite

Regressor	Blau	Grün	Rot	Infrarot I	Infrarot II	Infrarot III
Abhängige Variable	Bestimmtheitsmaß R ² ¹⁾					
Blau	—	***0,89	***0,88	0,00	***0,60	***0,67
Grün		—	***0,90	0,01	***0,61	***0,66
Rot			—	0,02	***0,63	***0,76
Infrarot I				—	0,00	0,02
Infrarot II					—	***0,90
Infrarot III						—
Ertrag (51,19 dt/ha)	0,03	0,06	0,01	**0,14	0,01	0,02

Tabelle 4 b
Sommergerste 1993: Korrelationsmatrix des Durchschnittsertrags mit Spektralwerten¹⁾
48 Felder > 50 m Breite

Regressor	Blau	Grün	Rot	Infrarot I	Infrarot II	Infrarot III	Bestimmtheitsmaß R ²
Abhängige Variable	Ertrag korreliert mit markierten Spektralwerten ¹⁾						
Ertrag (51,19 dt/ha)				x	x		*0,15
		x		x			**0,19
x				x			*0,17
			x	x			*0,17
				x		x	*0,15
		(x)	x	(x)			**0,30
(x)	(x)	(x)	x	(x)	(x)	(x)	***0,42

¹⁾ LANDSAT-TM, Aufnahme vom 30. Juni 1993. – ¹⁾ (x) = Regressoren linear abhängig, das heißt: Bestimmtheitsmaß R² ist erhöht; Signifikanzniveau P: * = 5%, ** = 1%, *** = 0,1%.

abhängigen und unabhängigen Variablen wurde die der „F-Verteilung“ folgende Wertprüfgröße der Regressionsrechnung herangezogen.

Tatsächlich erbrachten die ersten Regressionsanalysen für Weizen in den Landkreisen Ludwigsburg, Tübingen und Böblingen Bestimmtheitsmaße in der Größenordnung von R²=0,6, so daß 60% der Variationen des Durchschnittsertrags durch die „multiple Regressionsfunktion“ erklärt werden konnten. Bei einer Gruppierung der Trainingsfelder nach aufsteigender Feldgröße von etwa 1, 2 oder 3 ha konnte das multiple Bestimmtheitsmaß R² sogar auf 0,85 bis 0,94 gesteigert werden. Eine Prüfung der einzelnen Spektralkanäle auf Autokorrelation ergab jedoch, daß fast

Tabelle 5
Winterweizen 1993: Regressionsergebnisse¹⁾ nach Feldgrößenklassen und Wärmestufen²⁾

Merkmale	Insgesamt	Von Satellitenbildszenen abgedeckt					
		zusammen	und zwar				
			> 50 m Breite	> 1 ha Fläche	Wärmestufe ¹⁾		
					6/7	4/5	2/3
BEE-Trainingsfelder (Anzahl)	54	30	24	16	13	9	2
Fläche (ha)	1,18	1,38	1,54	1,95	1,68	1,47	—
Ertrag (dt/ha) ²⁾	64,97	64,09	66,03	67,14	63,54	67,92	—
Relativer Standardfehler (%)		3,71	3,88	4,46	3,76	8,27	—
Regression Ertrag/Spektralwerte Nahes und mittleres Infrarot: Bestimmtheitsmaß (R ²) ³⁾			0,05	0,34	0,10	0,34	—

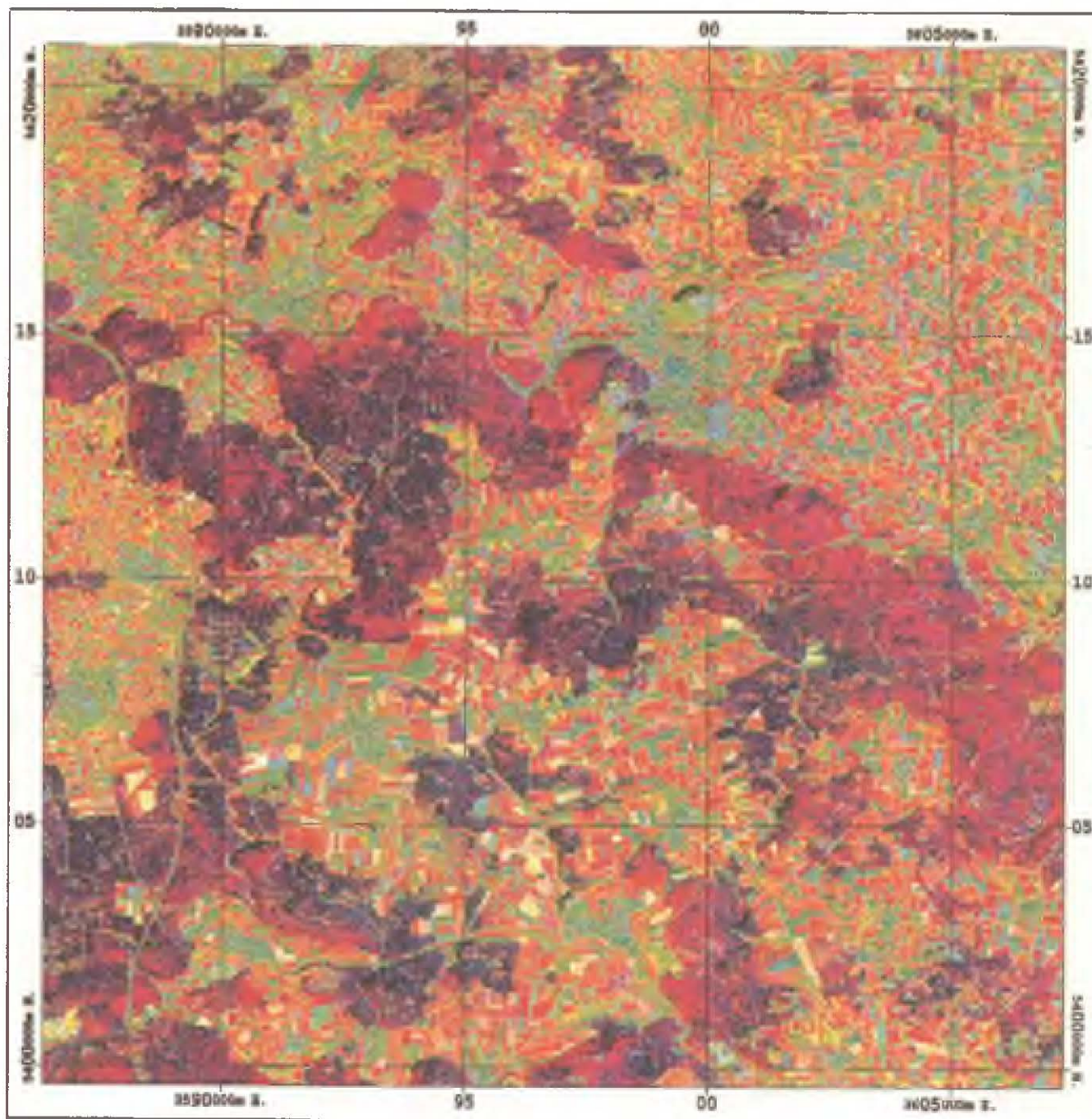
¹⁾ LANDSAT-TM, Aufnahme vom 30. Juni 1993. – ²⁾ Wärmestufen nach Weller (1978/90). – ³⁾ 2/3 = mäßig kalt bis kalt/kühl; 4/5 = mäßig kühl/mittelmäßig; 6/7 = warm bis mäßig warm/sehr warm. – ²⁾ Trockensubstanzgehalt (86%). – ³⁾ Signifikanzniveau P: * = 5%, ** = 1%, *** = 0,1%.

Tabelle 6
Sommergerste 1993: Regressionsergebnisse¹⁾ nach Feldgrößenklassen und Wärmestufen²⁾

Merkmale	Insgesamt	Von Satellitenbildszenen abgedeckt					
		zusammen	und zwar				
			> 50 m Breite	> 1 ha Fläche	Wärmestufe ¹⁾		
					6/7	4/5	2/3
BEE-Trainingsfelder (Anzahl)	118	59	48	34	25	7	16
Fläche (ha)	1,46	1,52	1,70	2,07	1,89	1,82	1,35
Ertrag (dt/ha) ²⁾	52,91	51,00	51,19	53,39	53,63	47,67	48,91
Relativer Standardfehler (%)		3,22	3,68	4,21	5,45	7,71	5,88
Regression Ertrag/Spektralwerte Nahes und mittleres Infrarot: Bestimmtheitsmaß (R ²) ³⁾			*0,15	*0,20	*0,34	0,06	0,26

¹⁾ LANDSAT-TM, Aufnahme vom 30. Juni 1993. – ²⁾ Wärmestufen nach Weller (1978/90). – ³⁾ 2/3 = mäßig kalt bis kalt/kühl; 4/5 = mäßig kühl/mittelmäßig; 6/7 = warm bis mäßig warm/sehr warm. – ²⁾ Trockensubstanzgehalt (86%). – ³⁾ Signifikanzniveau P: * = 5%, ** = 1%, *** = 0,1%.

Spot- und Radarkombinationsbild Untersuchungsgebiet "Ostalb"



RGB: SPOT 3 24.05.93, SPOT 2 24.05.93 SAR 24.06.93



Statistisches Landesamt Baden-Württemberg

159 95

alle Farbkanäle, insbesondere blau/grün, grün/rot, blau/rot, Infrarot 2/Infrarot 3, untereinander teilweise hoch autokorreliert sind, während die Einzelkanäle mit dem Ertrag – mit Ausnahme der Infrarotkanäle – nur relativ wenig korrelieren (Tabellen 3 und 4). Die weiteren Regressionsrechnungen zur Ertragsabhängigkeit wurden daher auf die Spektralwerte für nahes und mittleres Infrarot beschränkt.

Die Ergebnisse stellten sich zum Beispiel für 1993 wie in den Tabellen 5 und 6 dar. Danach ergab sich für die Gesamtheit des zum Orbit 195 gehörenden Untersuchungsraums nur dann ein wahrzunehmender Zusammenhang zwischen dem Ertrag und den gewählten Infrarot-Spektralkanälen, wenn man auf die Trainingsfelder von mindestens 1 ha Größe rekursierte. Aber erst bei einer Stra-

tifizierung nach Wärmestufen oder nach Clusterung ließen sich teilweise engere, wenn auch aufgrund der geringen Fallzahlen nur bescheidene Zusammenhänge feststellen.

Ansätze zur technischen und organisatorischen Verbesserung

Läßt man rückblickend die aufgelisteten Schwachpunkte Revue passieren, so scheint die Fernerkundung derzeit in der Tat noch wenig geeignet, die konventionellen statistischen Verfahren der Flächen- und Ertragsermittlung zu ergänzen oder zu ersetzen. Zwar hat sich der Verfahrensansatz grundsätzlich bewährt, doch sind Technik und Organisation verbesserungsbedürftig. Insoweit besteht ein wesentliches Ergebnis des BaWü-Projekts darin, daß die Schwachpunkte im Hinblick auf die Entwicklung eines operationalen Verfahrens klar aufgedeckt werden konnten und damit die Möglichkeit besteht, Verbesserungen gezielt anzusetzen:

1. Eine Grundvoraussetzung ist die Anpassung des Auflösungsvermögens der Satellitensensoren an die Größenstrukturen der baden-württembergischen Feldflur. Wenn mehr als 50% der Felder kleiner als 1 ha und nur rund 20% größer als 2 ha sind, kann nur über Aufnahmesysteme mit geometrischen und spektralen Auflösungen im Bereich von 5 bis 10 m² operationalisiert werden. Solche Systeme sind inzwischen entwickelt und noch in 1995/96 einsetzbar. Als Zwischenlösung können auch SPOT-Aufnahmen dienen, wenn sie flächendeckend zur Verfügung stehen.

Bei entsprechend verbesserter optischer Auflösung wird der weitaus größte Teil der jetzt ausgefallenen BEE-Trainingsfelder in die Bildauswertung einbezogen werden können, so daß sich die Mittelwert- und Streuungsrechnungen künftig auf eine ausreichend große Fallzahl stützen können. Die Erhöhung der Fallzahl ist ohnehin kein grundsätzliches Problem, da bisher mit dem Voll- und Teilschneefeldverfahren nur ca. 15% aller Stichprobenflächen der Besonderen Erntermittlung einbezogen wurden und zudem auch noch die benachbarten Schläge berücksichtigt werden können. Die Nachbarschaftsfelder wurden für das BaWü-Projekt ohnehin bereits erfaßt, konnten aber aus Kapazitätsgründen bisher bei der Bildauswertung noch nicht berücksichtigt werden. So standen für die Weiterführung des Projekts für 1994 bereits 427 BEE-Probefelder und zusätzlich 251 Nachbarfelder zur Verfügung.

2. Auch das Bewölkungsproblem hat seinen Schrecken weitgehend verloren, seitdem die Fernerkundung auch aktive Bildaufnahmesysteme entwickelt und der erste europäische Radarsatellit ERS-1 hervorragende Radar-

bilder geliefert hat. Im Rahmen eines speziellen Forschungsprojekts (PASTA)⁵ konnte bereits für ein Gebiet im Ostalbkreis gezeigt werden, daß die wetterunabhängige Radartechnik, auch in Verbindung mit optischen Aufnahmen, hervorragend geeignet ist, die Parzellenstrukturen der Feldflur und die unterschiedlichen Nutzungsarten kleinräumig sichtbar zu machen (*Schaubild 6*).

3. Damit wird auch das spektrale Überlagerungsproblem lösbar. Wenn die Satellitenbildaufnahmen nämlich wetterunabhängig gewonnen werden können, ist es auch möglich, die Fernerkundung auf den jeweils sensiblen Vegetationszustand der Fruchtarten abzustimmen. Sensible, in besonderer Weise zur Separierung der Fruchtarten geeignete Zeitpunkte sind zum Beispiel im Frühjahr der Beginn der Vegetation oder auffällige Blüh- und Wachstumsstadien oder der Übergang von der Grün- zur Reifephase. Statt einer Aufnahme mit einer Vielzahl von Spektralkanälen zum nicht planbaren Zeitpunkt können dann kurzfristig mehrere Aufnahmen zum optimalen Zeitpunkt mit relativ wenigen, vorwiegend Infrarotkanälen, vorgenommen werden. Ein begrenzt multispektrales, vermehrt multitemporales Vorgehen ist angesagt, das heißt, neben ein bis zwei optischen Grundaufnahmen (etwa vom SPOT- oder LANDSAT-Typ) sollten mehrere, kurzfristig abrufbare Radaraufnahmen herangezogen werden.
4. Die für eine landesweite Auswertung notwendige räumliche Verknüpfung der Satellitenbilder kann, wenn keine integrierte Auswertung möglich ist, im Wege der Mosaikbildung erfolgen. Für die notwendige Geocodierung, Gelände-, Sonnenstands- und Atmosphärenkorrektur sollten bereits vorhandene kommerzielle Verfahren eingesetzt werden. Die Stratifizierung und Maskenerstellung ist durch weiteren Ausbau des geografischen Informationssystems (GIS) zu verfeinern, für die Verortung der Stichprobenfelder stehen in Kürze die Daten der Vermessungsverwaltung zur Verfügung, und bei der Klassifizierung eröffnet die systematische Verwendung neuronaler Netze und die Einbindung von a-priori-Kenntnissen neue Dimensionen.

So gesehen bietet die erreichte Ausgangsposition doch eine gute Voraussetzung für eine operationale Einbindung der Fernerkundung in die amtliche Agrarstatistik. Auf dem Hintergrund des inzwischen durch Einbeziehung der Radartechnologie erfolgten Quantensprungs in der Fernerkundung sollte man den noch notwendigen kurz- bis mittelfristigen Forschungs- und Entwicklungsaufwand nicht scheuen, wenn daraus für die amtliche Statistik und die Auskunftspflichtigen erhebliche Arbeits- und Kostenentlastungen auf Dauer entwickelt werden können. Über die mit der neuen Verfahrenstechnik erzielten Fortschritte im einzelnen und die möglichen Auswirkungen auf das Gesamtkonzept der Agrarstatistik wird im Zusammenhang mit den derzeit laufenden Projekten PASTA und DAMUSI gesondert berichtet.

Dr. Rudolf Stadler

⁵ Projekt PASTA; Pilotprojekt für die Anwendung der Technik der Satelliten-Radarfernerkundung zum Zwecke der landwirtschaftlichen Statistik und der Überprüfung der Landnutzung. Unterauftrag zum ERS-1 Pilotprojekt PASTA der Universität Stuttgart (Institut für Navigation) des gleichnamigen Forschungsprojekts des DARA.