

Gütebewertung für die Klassifizierung landwirtschaftlicher Fruchtarten aus spektralen Normkurven

SIBYLLE ITZEROTT & KLAUS KADEN, Potsdam

Keywords: Accuracy assessment, satellite data, spectral standard curve, crop classification, multi-temporal

Zusammenfassung: Die Notwendigkeit der Einbindung der Flächennutzungsdynamik in prozessorientierte geowissenschaftliche Untersuchungen ist unumstritten. In ITZEROTT & KADEN 2006 wurde gezeigt, dass der Einsatz spektraler Normkurven in einem hierarchisch strukturierten Klassifikationsalgorithmus das Potenzial der Fernerkundungsdaten diesbezüglich erheblich erweitert. Der folgende Beitrag verdeutlicht die Anwendung der neuen Entscheidungsvorschrift bei der Erkennung der typischen Feldkulturen des Landes Brandenburg. Am Beispiel der 1600 ha umfassenden Anbaufläche eines Agrarbetriebes wird die Tragfähigkeit der Verwendung dieses neuen Ansatzes im Vergleich mit einer herkömmlichen Maximum Likelihood Klassifizierung demonstriert. Der Landwirtschaftsbetrieb besitzt ein für das Land Brandenburg typisches Anbauspektrum und stellte die notwendigen Daten zur Validierung der Klassifizierungsergebnisse bereit. Die Ergebnisse beider Verfahren weisen nach einer Bewertung mittels Konfusionsmatrizen eine vergleichbare Güte auf. Daraus kann gefolgert werden, dass ohne Qualitätseinbuße das durch mehr Effizienz und Objektivität gekennzeichnete neue Verfahren bei der Ableitung der landwirtschaftlichen Flächennutzung aus Fernerkundungsdaten eingesetzt werden kann.

Summary: *Accuracy assessment for the classification of agricultural crops with spectral standard curves.* The necessity of the integration of land use dynamics into process oriented geoscientific investigations is beyond all questions. In ITZEROTT & KADEN 2006 was shown that the implementation of spectral standard curves in a hierarchically structured classification algorithm allow a higher degree of utilization of the remote sensing potentials in those purposes. This paper presents the application of the new decision rule for the detection of typical agricultural crops in the federal state Brandenburg. Using the example of the cultivated lots (1600 hectares) of an agrarian cooperative the operability of its use and the comparison to a conventional Maximum Likelihood classification are shown. This company possesses a cultivation spectrum typical for Brandenburg and provided the ground truth data to validate the classification results. The results of both procedures have a comparable accuracy assessed by error matrices. From this it can be concluded that without quality loss the new more efficient and objective procedure can be used for the detection of the agricultural land use from remote sensing data.

1 Problemstellung

Zahlreiche Aufgaben des Umweltmonitorings sind eng mit der Kenntnis der Flächennutzung verbunden (OENEMA et al. 1998, MARTINEZ-CASASNOVAS et al. 2005). So bedarf die Erfassung von Wasser- und Stoffflüssen in Flusseinzugsgebieten und ihre realitätsnahe Abbildung in Modellen der Be-

rücksichtigung der Dynamik der landwirtschaftlichen Flächennutzung und der damit verbundenen zeitlichen und räumlichen Variation diffuser Nährstoffeinträge. Das erfordert die Kenntnis der jährlichen schlaggenauen Verteilung der Fruchtarten. Diesen Anspruch können Fernerkundungsdaten erfüllen, da sie die Kulturen durch ihre spektrale Charakteristik sowohl in der räumli-

chen Anordnung als auch in ihrer zeitlichen Dynamik abbilden. Aus zahlreichen Messungen und Veröffentlichungen ist bekannt, dass die spektralen Signaturen für einen bestimmten phänologischen Entwicklungszustand ein und derselben Kultur sehr unterschiedlich ausfallen können (GUERIF et al. 1996). Der in ITZEROTT & KADEN 2006 vorgestellte Ansatz über die Verwendung von spektralen Normkurven ist eine Möglichkeit, diese Varianzen kalkulierbar zu machen. Gleichzeitig können die zur Zeit vorzugsweise genutzten überwachten Klassifizierungsverfahren auf Basis von Trainingsflächen durch objektivere Algorithmen abgelöst werden. Damit wird die Grundforderung der Übertragbarkeit der Klassifizierungsvorschrift in der operationellen Verwendung von multitemporalen Fernerkundungsdaten erfüllt (BRUZZONE & PRIETO 2002). Das vorgestellte Prinzip fand mehrfache Anwendung im vom BMBF geförderten Projekt „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel“ (BRONSTERT & ITZEROTT 2005). Das dort verwendete räumlich genestete Modellsystem verlangt die Bereitstellung schlaggenauer Nutzungsinformation der Landwirtschaft für verschiedene Skalenbereiche, von der Betriebsebene (ca. 1500 ha) bis zur Ebene des Gesamteinzugsgebietes der Havel (ca. 14000 km²). Gleichzeitig musste der Forderung nach Bereitstellung längerer Zeitreihen nachgekommen werden. Da herkömmliche Klassifizierungsverfahren diesen Ansprüchen an wechselnden Raum- und Zeitbezug wegen der Nichtübertragbarkeit des Klassifikators nicht gerecht werden können, musste ein neues Verfahren entwickelt werden. Der nachfolgende Beitrag zeigt exemplarisch die Anwendung des Algorithmus und vergleicht die Güte des Ergebnisses mit der einer Maximum Likelihood Klassifizierung der gleichen Datenbasis.

2 Anwendung des Klassifizierungsalgorithmus

Wie in ITZEROTT & KADEN 2006b dargestellt wurde, ist bei der schlaggenauen Differen-

zierung von Feldkulturen eine hierarchisch strukturierte Herangehensweise angebracht. Sie greift die in den Normkurven abgebildete Differenziertheit in der Phänologie der Kulturen auf und setzt sie um. Der Algorithmus umfasst drei Bearbeitungskomplexe. In der Vorverarbeitung werden die zur Verfügung stehenden Landsat-Daten eines Anbaujahres normiert, maskiert und zu einem multitemporalen NDVI-Datensatz der Ackerschläge zusammengefügt. Zur Erstellung des Klassifikators müssen für die Aufnahme Termine die kulturbeschreibenden Parameter aus den Normkurven extrahiert werden. Die eigentliche Klassifizierung umfasst vier pixelbasierten Bildanalysen nach dem Parallelepipedprinzip und eine abschließende Majoritätsanalyse der Schläge.

Der Klassifikationsalgorithmus wurde im vorliegenden Beispiel für das Anbaujahr 1995 angewendet. Für diesen Zeitraum standen vier Satellitenszenen zur Verfügung. Folglich werden die Winterkulturen des Jahres 1995 durch vier (25.10.94, 05.05.95, 08.07.95 und 09.08.95) die Sommerkulturen hingegen nur durch drei (05.05.95, 08.07.95 und 09.08.95) Informationen charakterisiert. Die Herbstinformation aus dem vorangegangenen Jahr ist wegen ihrer Relevanz für die Winterkulturen dem Gesamtzyklus zuzuordnen. Das Problem, eine Differenzierung von Fruchtarten auf Basis dieser wenigen, zum Teil ähnlichen Spektralmerkmale vorzunehmen, zeigt sich offensichtlich. Wie beschrieben, setzt eine genaue Trennung der einzelnen Kulturen eine große Anzahl zeitgenau platzierter Satellitenszenen voraus.

Referenzbetrieb ist die Agrargenossenschaft Hohennauen. Die zur Verfügung gestellten Informationen betreffen 1620 ha Anbaufläche auf 144 Schlägen. Diese Daten konnten zur Validierung des erzielten Klassifizierungsergebnisses verwendet werden. Aus den Normkurven wurden nach kulturspezifischer agrarmeteorologischer Bewertung für die Aufnahmetage folgende Informationen in den Klassifikator geschrieben (Tab. 1).

Für das Vergleichsjahr lässt sich der Klassifikator wie folgt bewerten. Die Anzahl von

Tab. 1: Phänologische Datierung der Aufnahmetermine des Anbaujahres 1995.

Aufnahmedatum der Satellitenszene	Tag im Jahr laut Datum (julianischer Tag)	Verwendeter phänologischer Tag laut Entwicklungszustand der Kultur auf Basis agrarmeteorologischer Daten											
		Brache	Winterroggen	Winterweizen	Wintergerste	Winterraps	Feldgras (mehrjährig)	Sommergetreide	Zuckerrüben	Silomais	Ölfrüchte/Leguminosen	Kartoffeln	Feldgras (Neuansaat)
25.10.1994	298	293	298	293	298	298	293						
05.05.1995	125	132	128	132	15	135	132	125	128	128	125	128	125
08.07.1995	189	184	193	14	189	183	184	183	191	189	183	191	183
09.08.1995	221	226	221	26	221	221	226	225	224	218	225	224	225

Tab. 2: Phänologische Beschreibung der Aufnahmetermine für Winterroggen.

Phänologischer Tag	Phänologische Phase	Aufnahmedatum
298	Auflaufen/Bestockung	25.10.1994
128	Schossen	05.05.1995
193	Ende der Milchreife	08.07.1995
221	Kurz nach der Ernte, Stoppelreste	09.08.1995

vier (drei) Fernerkundungsszenen entspricht dem Durchschnitt der momentan pro Jahr im mitteleuropäischen Raum zur Verfügung stehenden Szenen. Ihre Verteilung im phänologischen Jahr ist zufällig. Sie reflektiert jedoch verschiedene Entwicklungszustände und weist auf gute Interpretierbarkeit hin. Betrachtet man exemplarisch die Kultur Winterroggen, bilden die Daten die in Tab. 2 genannten phänologischen Phasen ab.

Für die anderen Winterkulturen stellt sich die Situation ähnlich dar. Damit kann ihre Phänologie relativ gut erfasst werden. Außerdem zeigen sich durchaus Möglichkeiten der Differenzierung zwischen den einzelnen Kulturen zu diesen Zeitpunkten. Die Situation für die Unterscheidbarkeit der Sommerkulturen ist weitaus ungünstiger zu bewerten. Während der erste Termin noch vor dem Saataufgang der meisten Sommerfrüchte liegt und damit kaum zur Differen-

zierung innerhalb dieser Gruppe beiträgt, bringen die beiden anderen Termine nur geringe Trennmöglichkeiten, da sie einen geringen Zeitabstand besitzen und quasi denselben Entwicklungszustand abbilden (Abb. 1).

Bei der Betrachtung der Kulturen im Einzelnen fällt Folgendes auf:

Brache trennt sich anhand der vier Termine deutlich. Es ist vor allem der vierte Wert (221ster Tag), der die Unterscheidung ermöglicht. Die größte Ähnlichkeit besteht zu den Klassen Feldgras und Ölfrüchten/Leguminosen.

Mehrjähriges **Feldgras** besitzt eine ähnliche Charakteristik wie Brache. Unterschiede bestehen im zweiten Termin, wo deutlich höhere Werte des NDVI auf eine intensivere Begrünung hinweisen. Auch für die beiden folgenden Termine liegen die Werte über denen der Brache.

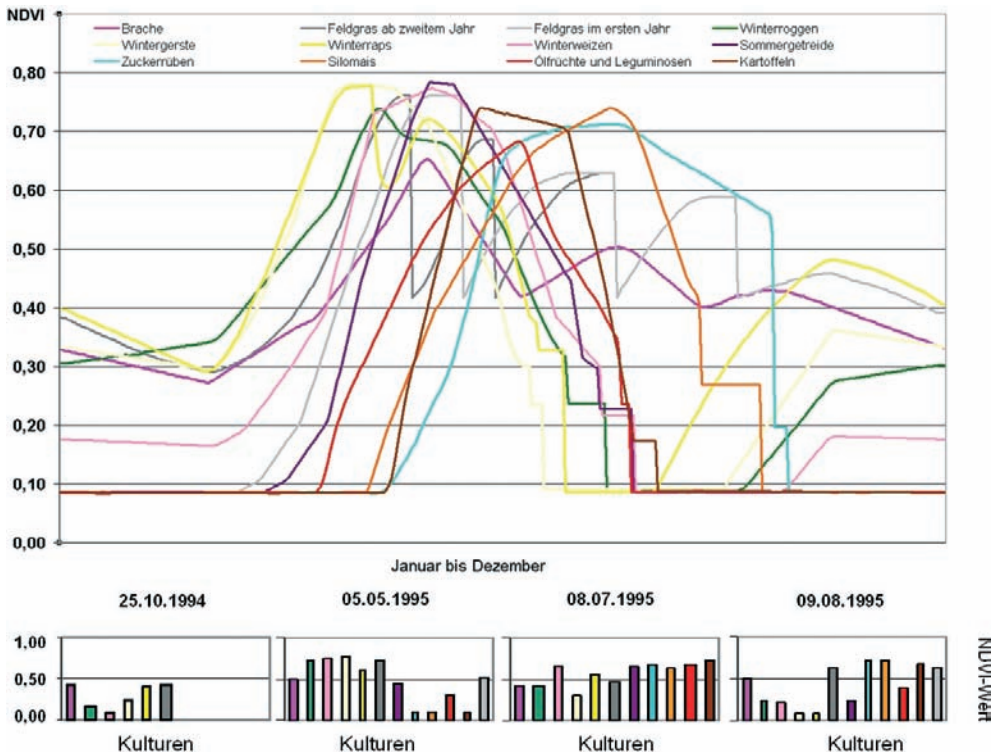


Abb. 1: Normkurven des NDVI der Kulturen und Gegenüberstellung der NDVI-Normwerte an den ermittelten phänologischen Tagen der Aufnahmedaten.

Winterroggen lässt sich im Aufwuchsstadium und während des Reifens gut von den restlichen Wintergetreidearten unterscheiden. Die NDVI-Werte fallen bei Roggen während des Reifens langsamer. Die beiden Aufnahmetermine an den Tagen 193 und 221 erfassen diese Tatsache gut.

Winterweizen besitzt eine sehr gute Erkennungsgenauigkeit zum ersten und dritten Termin. Zu diesen Zeitpunkten hat er die auffälligsten Entwicklungsdifferenzen zu den anderen Wintergetreidearten. Im Herbst liegt der Termin zu Beginn des Auflaufens. Im Sommer (Anfang Juli) beginnt der Reifeprozess beim Weizen gerade, während er bei den restlichen Wintergetreidearten bereits fortgeschritten ist, wodurch deutlich niedrigere NDVI-Werte entstehen.

Wintergerste kann mit hoher Wahrscheinlichkeit durch den Wert am Anfang Juli

(dritter Termin) von den anderen Wintergetreidearten getrennt werden. Sie ist im Abreifen am schnellsten.

Winterraps besitzt zum zweiten Aufnahmetermin die maximale Unterscheidbarkeit. Entscheidend dafür ist der durch die Rapsblüte verursachte vergleichsweise geringere NDVI-Wert Anfang Mai.

Sommergetreide besitzt zu den drei zur Verfügung stehenden Zeitpunkten kaum Unterschiede zu den anderen Getreidearten. Da im Frühjahr erst am 5. Mai ein Satellitenbild zur Verfügung steht, kann zu dieser Zeit (kurz vor dem Schossen) nicht mehr vom gerade schossenen Winterweizen unterschieden werden. Zu den beiden späteren Terminen ähnelt das Sommergetreide bezüglich der NDVI-Normkurve dem Winterweizen noch stärker, da die anfänglichen Entwicklungsunterschiede insbesondere

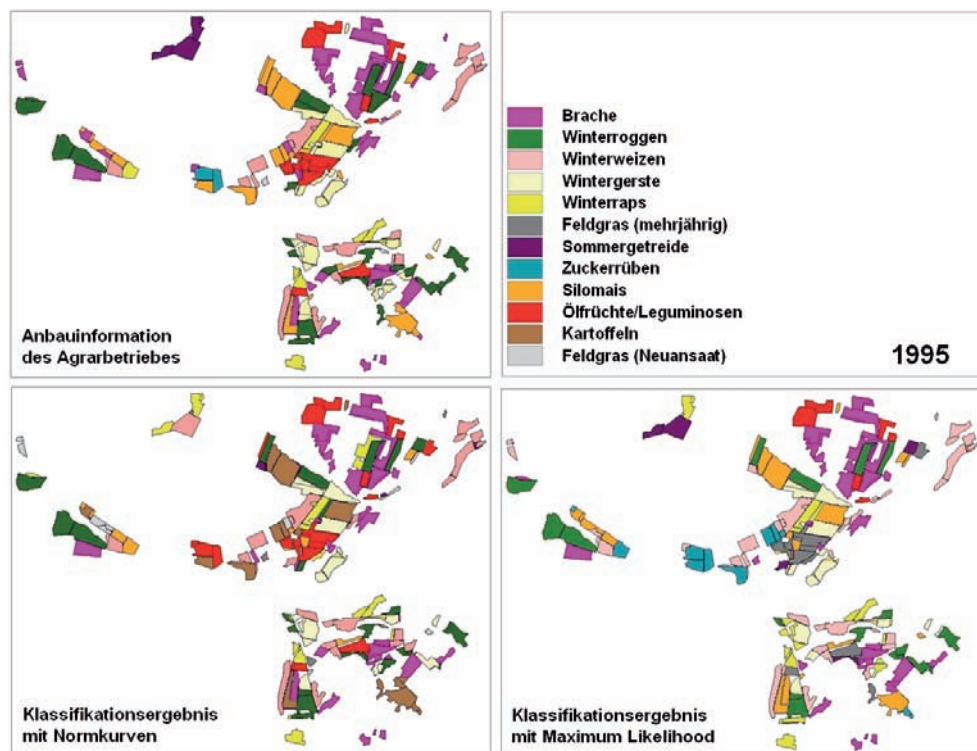


Abb. 2: Vergleich der Klassifizierungsergebnisse beider Verfahren mit der Anbauinformation.

zum Winterweizen immer mehr ausgeglichen werden.

Zuckerrüben sind in der Ausprägung der NDVI-Werte nur schwer von einigen anderen Sommerkulturen zu unterscheiden. Die größte Ähnlichkeit wird zum Mais sichtbar, der sich lediglich in den Juli-Werten geringfügig niedriger zeigt.

Silomais besitzt zu den zur Verfügung stehenden Zeitpunkten geringe Unterschiede in den Werten zu Kartoffeln. Die NDVI-Werte sind sehr ähnlich. Eine Unterscheidungsmöglichkeit besteht im August. Hier nimmt die Kartoffel geringfügig niedrigere NDVI-Werte im Vergleich zum Mais an.

Ölfrüchte/Leguminosen heben sich durch ihren relativ schnell ablaufenden Zyklus von den anderen Sommerkulturen deutlich ab. Im Aufgang (Mai) liegen die Werte sichtbar über denen der Hackfrüchte bzw. von Mais

und unter den Werten von Sommergetreide und Feldgras (Neuansaat). Im August liegen die Werte merklich niedriger als die der Hackfrüchte, des Mais und des Feldgrases.

Kartoffeln sind von Mais und Zuckerrüben zu den zur Verfügung stehenden Terminen kaum zu unterscheiden. Lediglich im Augusttermin liegen die Werte durch die beginnende Abtrocknung bereits etwas niedriger.

Feldgras in Neuansaat ist zu den ersten beiden relevanten Terminen (Mai, Juli) dem Sommergetreide in den Werteausprägungen nahe, unterscheidet sich von diesem aber im Augustwert klar. Auch zu den anderen Sommerkulturen sind zu diesem Zeitpunkt Differenzierungsmöglichkeiten gegeben. Allerdings sind die NDVI-Werte zwischen einjährigem und mehrjährigem Feldgras hier bereits ausgeglichen.

Zieht man für eine erste Bewertung des Klassifizierungsergebnisses einen visuellen Vergleich zu den Anbauinformationen (Abb. 2, links oben und unten), so kann für viele Schläge eine Übereinstimmung beider Datensätze festgestellt werden. Das trifft insbesondere für die Winterkulturen zu, deren Zuweisung nur vereinzelt fehlerhaft erfolgt ist und diese keine Regelmäßigkeit zeigt. Auffällig ist die Überrepräsentanz von Kartoffeln im Klassifizierungsergebnis. Das kündigte sich bereits in der Bewertung des Klassifikators an und bestätigt den in der Anzahl der verwendeten Datensätze liegenden Informationsnachteil der Sommer- gegenüber den Winterkulturen.

3 Gütebewertung des Ergebnisses

Genauere Bewertungsmöglichkeiten eröffnen eine Konfusionsmatrix (Tab. 3). Sie wurde in Bezug zur Anbaufläche erstellt und ermöglicht somit eine flächenbezogene Bewertung des Klassifizierungsergebnisses anhand der Kontrolldaten (STEHMAN 1997, FOODY 2002, FOODY 2004). Abweichend zu pixelbezogenen Bewertungen ist zu beachten, dass der Algorithmus ein schlagbezogenes Ergebnis liefert. Die Unterschiede in der Schlaggröße bilden sich in der Gütebewertung ab. Die Matrix erfasst die richtig klassifizierte Flächenanteile (%) in ihrer Diagonalen. Alle Werte außerhalb der Diagonalen sind Fehlzuweisungen (%). Bewertet wird dabei der Omissionsfehler (Unterlassungsfehler) und der Commissionsfehler (Einschlussfehler). Der Omissionsfehler ist der Anteil einer Klasse (hier angegeben in Hektar und Prozent), der bezogen auf die Validierungsdaten durch die Klassifizierung nicht erfasst wurde. Der Commissionsfehler erfasst die Anteile (in Hektar und Prozent), die fälschlicherweise einer Klasse zugeordnet wurden. Die overall accuracy ist der Anteil der richtig klassifizierten Fläche, bezogen zur Fläche der Anbauinformationen. Er kann als ein komplexes Bewertungsmaß angesehen werden. Die Klassifizierung erreicht eine overall accuracy von 65,7%. Dies kann unter den Voraussetzungen, das kein interaktiver bildbezogener Klassifikator einge-

setzt wurde, als ein respektables Ergebnis betrachtet werden.

Betrachtet man das Ergebnis genauer, so verweist die Konfusionsmatrix auf die Probleme. Sehr gut erkannt werden Wintererbsen, Winterweizen und Ölfrüchte/Leguminosen. Zufrieden kann man auch mit dem Erkennen von Winterroggen, Wintergerste und Brache sein. Alle anderen Kulturen erzielen dagegen eher unbefriedigende Ergebnisse. Bewertet man auf anderer Generalisierungsebene zunächst die Anbaugruppen, so sind die Winter- und Dauerkulturen zufriedenstellend, die Sommerkulturen nur schlecht erkannt worden. Fehlzuweisungen zwischen diesen Gruppen sind eher selten. Hauptsächlich werden die Sommerkulturen in sich falsch zugeordnet. Zwei Schwerpunktfehler werden deutlich. Einerseits werden Sommergetreide, Feldgras in Neuansaat und Zuckerrüben nicht erkannt und falsch zugeordnet. Andererseits erfolgt eine teilweise Fehlzuweisung von Mais zu Kartoffeln. Dementsprechend treten für diese Kulturen hohe Omissionsfehler auf. Abschwächend dabei wirken die oftmals geringen Flächenanteile bezogen auf die Gesamtfläche dieser Kulturen. So wurden Sommergetreide nur auf 54,0 ha (3,3% der Gesamtfläche), Zuckerrüben auf 27,7 ha (1,7%) und Feldgras (Neuansaat) auf 3,7 ha (0,2%) angebaut. Lediglich bei Mais werden 231,5 ha von 271,0 ha fälschlicherweise anderen Kulturen, primär der Kartoffel zugeordnet. Dies stellt das wesentliche Problem dar, das hinsichtlich der Omission besteht.

Der Commissionsfehler liegt bei Feldgras (sowohl mehr- als auch einjährig), Sommergetreide und Kartoffel bei 100%. Aber auch hier schwächt sich die Bewertung der Fehlzuweisungen durch die geringen Flächenanteile der Fehlzuweisungen für mehrjähriges Feldgras (9,1 ha), Sommergetreide (8,4 ha) und Feldgras in Neuansaat (34,2 ha) ab. Wiederum problematisch zeigt sich der bedeutende Flächenanteil (206,8 ha = 12,9% der Anbaufläche) der fälschlicherweise als Kartoffeln klassifiziert wurde. Meist handelt es sich laut Anbauinformation um Flächen, die mit Silomais bestellt waren. Etwas höhere Commissionsfehler treten auch bei

Tab. 3: Konfusionsmatrix der Klassifizierung mit Normkurven.

		Klassifizierungsergebnis														
		Brache	Feldgras (mehrjährig)	Winterroggen	Winterweizen	Wintergerste	Winterraps	Sommergetreide	Zuckerrüben	Silomais	Ölfrüchte/ Leguminosen	Kartoffeln	Feldgras (Neuansaat)	Anbaufläche in ha	richtig klassif. Anteil an Anbaufläche in ha	Omissionsfehler ha %
Referenzdaten	Brache	76,6	1,6	0,4			6,7	1,6		0,4	4,4	3,2	5,1	328,6	251,7	76,9 23,4
	Feldgras (mehrjährig)													0	0	0
	Winterroggen	10,1		71,1	8,8	6,1	1,6				0,4	1,9		299,0	214,1	84,9 28,9
	Winterweizen	1,6		2,9	91,7		1,5	0,7					1,6	214,0	196,2	17,8 8,3
	Wintergerste	5,3		10,8		76,9	3,9				2,0	1,1		186,4	143,3	43,1 23,1
	Winterraps	1,2			1,5		97,3							67,5	65,7	1,8 6,7
	Sommergetreide				52,4		47,6							54,0	0	54,0 100
	Zuckerrüben										100,0			27,7	0	27,7 100
	Silomais	0,4		6,2	1,4		1,3	0,6		14,5	1,8	68,5	5,2	271,0	39,5	231,5 85,5
	Ölfrüchte/ Leguminosen	2,1					1,0			3,1	92,1	1,7		167,5	154,3	13,2 7,9
	Kartoffeln													0	0	0
	Feldgras (Neuansaat)		100,0											3,7	0	3,7 100
	Fläche der Klassen in ha	300,9	9,1	257,4	255,6	161,6	133,6	8,4	0	45,5	206,2	206,8	34,2	∑ 1619,4*	1064,7	
	richtig klassif. Anteil an Anbaufläche in ha	251,7	0	214,1	196,2	143,3	65,7	0	0	39,3	154,3	0	0	1064,7		Overall Accuracy
	Commissionsfehler ha %	49,2 16,4	9,1 100	43,3 16,8	59,4 23,2	18,3 11,3	67,9 50,8	8,4 100	0	6,2 13,2	51,9 25,2	206,8 100	34,2 100			65,7%

* Validierungsfläche

Raps (50,8%), Öllein/Leguminosen (25,2%) und Winterweizen (23,2%) auf. Diese Klassen sind somit ebenfalls im Klassifizierungsergebnis etwas überpräsentiert.

Als Begründung für die oben erwähnten Probleme lassen sich folgende Argumente anführen. Die deutlichen Unterschiede in der Klassifizierungsgüte zwischen den Winterkulturen (besser) und Sommerkulturen (schlechter) ergeben sich zwangsläufig zu-

nächst aus der unterschiedlichen Anzahl der in die Klassifizierung eingegangenen Szenen. Wenn für die Winterkulturen vier Szenen berücksichtigt werden konnten, für die Sommerkulturen dagegen nur drei, so ergibt sich a priori 25% weniger Informationsmöglichkeit. Bezieht man außerdem den interpretatorischen Wert der einzelnen Szenen hinsichtlich der Beschreibung der Phänologie der Kulturen ein, so besitzen die beiden

Szenen vom 08.07. und 09.08. einen stark ähnlichen Informationsgehalt.

Zuckerrüben werden nicht erkannt. Sie werden der Gruppe Ölfrüchte/Leguminosen zugeordnet. Das ist ein Zeichen dafür, dass Anfang August der Zustand der Zuckerrübenflächen schlecht gewesen sein muss, wenn sie den zu dieser Zeit schon abreifenden Ölfrüchten ähneln. Trockenheit ist die Ursache dafür.

Die agrarmeteorologischen Berichte für das Jahr 1995 stellen fest:

Temperatur:

- liegt **über Normalwerten** vom: 01.04.–07.04., 30.04.–05.05., **06.07.–25.08.**, 07.09.–13.09., 03.10.–20.10.
- kalte Abschnitte lagen im Zeitraum: 09.05.–22.05., 01.06.–08.06., 27.08.–06.09.
- **das Jahr 1995 war eher zu warm**, jedoch herrschten Fröste bis Ende Mai

Niederschlag:

- niederschlagsreiche Abschnitte: 1. Aprildekade, 07.05.–18.05., 26.05.–28.05., 23.08.–20.09.
- **niederschlagsarm:** 04.03.–14.03., 21.4.–06.05., 25.06.–01.07., **23.07.–12.08.**, 09.10.–17.10., 21.10.–30.10.
- verbreitet zu nass: im Januar, Februar, Juni, September; **zu trocken: im Juli**, Oktober, Dezember
- **klimatische Wasserbilanz:** 3. April- und 1. Maidekade sowie **Ende Juni bis 2. Augustdekade spürbar negativ**

Das bedeutet, dass für **Zuckerrüben** durch verstärkten Wasserstress in dieser Phase die NDVI-Werte gesunken waren und auf das Niveau der Ölfrüchte/Leguminosen fielen. Das ist keinen Entwicklungsverzug, sondern eine Stresssituation, in der der Blattapparat verwelkt und anschließend neu gebildet werden muss. Dieser außergewöhnliche Effekt kann mit der Zeitkorrektur der Normkurve nicht ausgeglichen werden. Die in der Normkurve für den korrigierten Zeitpunkt festgelegten, dennoch hohen NDVI-Werte können mit einem zerstörten oder im Neuaufbau befindlichen Blattapparat nicht erreicht werden. Hieraus erklärt sich der Omissionsfehler für Zuckerrüben (100%)

und der Commissionsfehler für Ölfrüchte/Leguminosen (25,2%).

Mais stellt den Schwachpunkt innerhalb der Klassifizierung dar. Er wird den tatsächlichen Anbauflächen nur teilweise richtig zugeordnet. Häufig werden mit Mais bestellte Flächen als Kartoffeln klassifiziert. Ausdruck dafür ist ein Omissionsfehler für Mais von 85,5% und ein Commissionsfehler für Kartoffeln von 100%. Die Ursachen zeichnen sich bereits a priori im Klassifikator ab. So sind die Werte für Mais und Kartoffeln für die verwendeten Termine ähnlich. Anfang Mai sind beide Kulturen kaum aufgegangen. Die trockene Periode wirkte verzögernd für beide Kulturen zu diesem Zeitpunkt. Zum zweiten Termin (Anfang Juli) konnten die Rückstände durch die positive klimatische Wasserbilanz in der zweiten Maihälfte und im Juni etwas aufgeholt werden. Sie fällt aber im Juli/August wieder negativ aus, so dass Welkeerscheinungen vor allem auf grundwasserfernen Standorten für den Augusttermin auftreten. Steht Mais auf oberen Talsandterrassen oder anderen sandigen grundwasserfernen Standorten, setzt Wasserstress ein. Im spektralen Erscheinungsbild entspricht das dem langsam einsetzenden Welkeprozess des Kartoffelkrautes zu diesem Zeitpunkt. Der Mais nimmt demzufolge die für Kartoffeln im August geringfügig niedrigeren NDVI-Werte der Normkurve an und wird als Kartoffel klassifiziert. Mais, der im Gegensatz dazu in der Niederung angebaut wird und daher in der Regel gut grundwasserversorgt ist, zeigt die Welkeerscheinungen nicht. Er wird richtigerweise als Mais erkannt.

Sommergetreide wird nicht als solches erkannt und zu Winterweizen und Winterraps (Omissionsfehler Sommergetreide 100%, Commissionsfehler Winterweizen 23,2% bzw. Winterraps 50,8%) zugeordnet. Dieser Fehler entsteht auf einer weiter vorn platzierten Stufe des Algorithmus, dort, wo die Trennung der Winter- von den Sommerkulturen stattfindet. Bereits hier erfolgt die Fehlzuweisung. Die Ursache liegt im Fehlen einer echten Frühjahrsszene (März/April), so dass das Beräumen der Winterzwischenfrucht bildlich nicht erfasst und auf den un-

unterbrochenen Vegetationszyklus von Winterfrüchten geschlussfolgert wird.

Dass **Feldgras** (Erstansaat) als Feldgras (mehrjährig) klassifiziert wird, sollte zunächst vernachlässigt werden dürfen. Die für die Validierung zur Verfügung stehenden Flächen sind klein (3,7 ha). Damit ist eine Gütebewertung kaum möglich. Andererseits muss festgehalten werden, dass beide Kulturen schnell ineinander übergehen und nur zwischen der Saat und dem ersten Schnitt tatsächlich signifikante Unterschiede zu erwarten sind. Ebenso erschwert eine gewisse Beliebigkeit in Anzahl und Zeitpunkten der Mahd eine präzise Zuordnung zur Klasse.

4 Gütevergleich des Ergebnisses mit einer Maximum Likelihood Klassifizierung

Abschließend wurde ein Vergleich mit einer herkömmlichen überwachten Klassifizierung derselben Daten für dieses Gebiet vorgenommen. Es wurde nach der üblichen Vorgehensweise für den analogen maskierten multitemporalen NDVI-Datensatz ein Klassifikator erstellt und nach dem Maximum Likelihood Algorithmus klassifiziert (ML-Klassifikation). Nach dem Majoritätsprinzip wurde jeder Fläche die prägende Nutzung zugewiesen. Das Ergebnis zeigt die Abb. 2 (rechts). Auf den ersten Blick stellt man eine gute Übereinstimmung zwischen dem Klassifizierungsergebnis und den Anbauinformationen fest. Wesentliche Flächen werden richtig erkannt. Feldgras fällt sofort als überpräsentiert auf. Eine detailliertere Bewertung des Ergebnisses soll wiederum auf der Basis einer Konfusionsmatrix erfolgen (vgl. Tab. 4). Gleichzeitig wird das Ergebnis mit dem durch Verwendung des Normklassifikators erzielten verglichen.

Mit einer overall accuracy von 72,8% liegt das Gesamtergebnis höher als bei der Klassifizierung auf Basis der Normkurven. Das war zwingend zu erwarten, da ein datensatzspezifischer Klassifikator die Bildstatistik genauer abbildet. So werden durch den interaktiven Ansatz a priori Kenntnisse über

spezifische Situationen genutzt (Ausschluss spezieller Kulturen auf Grund der Anbauangaben, Wichtung der Informationsgehalte der einzelnen Szenen, Nutzung der räumlichen Anordnung der Spektralwerte bei der Klassenabgrenzung). Damit entsteht ein speziell angepasster Klassifikator, der den Qualitätszuwachs im Ergebnis erzeugen muss. Ein letztendlicher Gütezuwachs von 7,1% (Anstieg der Overall Accuracy von 65,7% auf 72,8%) kann jedoch durchaus als ein vertretbarer Unterschied angesehen werden, der den Einsatz eines Normklassifikators rechtfertigt, da der Qualitätsverlust nicht wesentlich ist. Bei der Betrachtung der Commissions- bzw. Omissionsfehler der beiden Matrizen gibt es große Ähnlichkeiten in den wesentlichen Teilen. Das heißt, dass in beiden Fällen die Datenstruktur in gleicher Weise in ihren Grundsätzen erkannt wurde. Auch das spricht für die Verwendung des Normklassifikators.

Verfolgt man die Veränderungen in den Omissions- bzw. Commissionsfehlern der Einzelkulturen (vgl. Tab. 5) so treten die auffallendsten Unterschiede bei den Sommerkulturen auf. Während bei den Winterkulturen die Beträge der Abweichungen niedrig bleiben und sich Verbesserungen und Verschlechterungen in etwa die Waage halten, werden hier fast überall deutliche Bewertungsunterschiede sichtbar.

Da a priori bekannt ist, dass Kartoffel und Feldgras (ab zweitem Jahr) im betrachteten Jahr nicht angebaut wurden, und dieses Wissen in die interaktive Gestaltung des ML-Klassifikators eingehen kann, wurden beide Klassen wesentlich nicht gebildet, da keine entsprechenden Beispielflächen zu Verfügung standen. Dadurch erklärt sich die Abweichung in den Commissionsfehlern für diese beiden Kulturen. Zwangsläufig führt dies zu Veränderungen in der Zuweisung der restlichen Sommerkulturen, was einerseits eine verbesserte Identifizierung (Sommergetreide, Zuckerrüben, Mais) aber auch durchaus eine Verschlechterung (Öllein/Leguminosen) zur Folge haben kann. Auch hier wirken die unzureichenden Informationsgehalte der zur Verfügung stehenden Bilder.

Tab. 4: Konfusionsmatrix der Maximum Likelihood Klassifizierung.

		Klassifizierungsergebnis														
		Brache	Feldgras (mehrjährig)	Winterroggen	Winterweizen	Wintergerste	Winterraps	Sommergetreide	Zuckerrüben	Silomais	Ölfrüchte/ Leguminosen	Kartoffeln	Feldgras (Neuansaat)	Anbaufläche in ha	richtig klassif. Anteil an Anbaufläche in ha	Omissions- fehler ha %
Referenzdaten	Brache	78,6	3,5	0,4	8,7	1,8			0,3	6,6				328,6	258,3	70,3 21,4
	Feldgras (mehrjährig)													0	0	0
	Winterroggen	11,0		2,3	68,2	5,2	2,5	3,9	6,3					299,0	203,8	95,2 31,8
	Winterweizen			2,9	95,5		0,9			0,7				214,0	204,5	9,5 4,5
	Wintergerste	2,0	4,2	5,0	3,7	71,7	12,3			1,1				186,4	133,6	52,8 28,3
	Winterraps				5,2		94,8							67,5	64,0	3,5 5,2
	Sommergetreide						27,8	72,2						54,0	39,0	15,0 27,8
	Zuckerrüben								100,0					27,7	27,7	0,0 0,0
	Silomais	1,8		4,4	2,1		3,2		23,8	64,6				271,0	175,1	95,5 35,4
	Ölfrüchte/ Leguminosen	1,4	47,7		1,0		1,0		1,0	4,7	43,2			167,5	72,3	95,2 56,8
	Kartoffeln													0	0	0
	Feldgras (Neuansaat)		67,6			32,4								3,7	0,0	3,7 100
	Fläche der Klassen in ha	305,7	57,9	232,9	268,3	147,1	125,9	106,1	94,8	208,2	72,3	0	0	∑ 1619,4*	1178,3	
	richtig klassif. Anteil an Anbaufläche in ha	258,3	0	203,8	204,5	133,6	64,0	39,0	27,7	175,1	72,3	0	0	1178,3	Overall Accuracy	
Commissionsfehler ha %	47,4 15,5	57,9 100	28,1 11,1	63,8 23,8	13,5 10,1	61,9 53,3	67,1 63,2	67,1 70,8	33,1 15,9	0,0 0,0	0	0		72,8%		

* Validierungsfläche

Wertet man die Konfusionsmatrix für die ML-Klassifizierung in sich, so fallen insbesondere die relativ hohen Omissionsfehler für die Wintergetreide Roggen und Gerste, sowie für Sommergetreide, Silomais, Öllein/Leguminosen und Feldgras (Neuansaat) auf. Während das für die Kulturen Silomais und Sommergetreide zwar eine deutliche Verbesserung im Vergleich zur Normklassifikatoranwendung darstellt, verweist es den-

noch auf weiterhin bestehende Unsicherheiten. Die anderen Omissionsfehler sind eher mit Verschlechterungen verbunden, was für die Qualität der Klassifizierung mit dem Normklassifikator spricht. Speziell für die Klasse Öllein/Leguminosen ist eine deutliche Erhöhung festzustellen. Die Commissionsfehler sind bei den Ergebnissen der ML-Klassifikation außerdem bei den Kulturen Feldgras (mehrjährig), Winterraps,

Tab. 5: Vergleich der Fehlerwerte beider Klassifizierungen (eine graue Hinterlegung stellt eine negative Abweichung des Ergebnisses der Normklassifizierung von der herkömmlichen ML-Klassifizierung dar).

Kultur	Differenz Omission	Differenz Commission
Brache	2,0	0,9
Feldgras (mehrjährig)	0	0
Winterroggen	2,9	5,7
Winterweizen	3,8	0,6
Wintergerste	5,2	1,2
Winterraps	1,5	2,5
Sommergetreide	72,2	36,8
Zuckerrüben	100	70,8
Silomais	50,1	2,7
Ölfrüchte/ Leguminosen	48,9	25,2
Kartoffeln	0	100
Feldgras (Neuansaat)	0	100

Sommergetreide und Zuckerrüben hoch. Das heißt, dass diese Klassen im Ergebnis überrepräsentiert sind. Probleme treten jeweils in der Trennung von Sommergetreide und Winterroggen (Winterroggen wird als Sommergetreide identifiziert), von Zuckerrüben und Silomais (Silomais wird den Zuckerrüben zugeordnet) sowie von Feldgras (mehrjährig) und Öllein/Leguminosen (Öllein wird als Feldgras erkannt) auf. Sowohl die letztgenannte Klasse als auch die Klasse Winterraps nehmen auch andere Kulturen auf, das ist ein Zeichen ihrer Unschärfe.

Bewertet man auf dieser Basis die Güte eines Klassifikationsansatzes auf der Grundlage eines normierten Klassifikators, so kann festgestellt werden, dass eine zur herkömmlichen Bildklassifikation durchaus vergleichbare Güte erreicht wird. Die Bildinformationen sind in annähernd gleicher Weise herauszufiltern. Zwar wird durch die fehlende individuelle Bilderschließung bei der Klassifikatorerstellung zunächst nicht das optimale Ergebnis erreicht, der Vorteil der Übertragbarkeit (damit verbunden der Vergleichbarkeit und Objektivität) gleicht jedoch für viele Aufgabenstellungen die ge-

genwärtigen Gütenachteile aus. Zudem ist davon auszugehen, dass durch die Integration weiterer Informationen zur Vervollkommnung der Normkurven und durch Präzisierungen am Klassifikationsalgorithmus diese Nachteile weiter ausgeglichen werden.

5 Fazit

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Verfahren hat gezeigt, dass der neue hierarchisch strukturierte Ansatz auf der Basis von Normkurven Resultate ähnlicher Güte erzielt und seine Verwendung gerechtfertigt ist. Auch in vergleichenden Tests (BRENNING et al. 2006) weiterer überwachter Klassifikationsverfahren sind ähnliche Fehlerraten (20–35%) aufgetreten. Der entscheidende Vorteil besteht jedoch in der Existenz eines abrufbaren Klassifikators in Form einer Normkurve. Es bedarf lediglich der Einpassung der Aufnahmezeitpunkte in das Normjahr der phänologischen Entwicklung der Kultur, um daraus die Entscheidungsvorschrift zu erstellen. Dieser Schritt ist wesentlich effizienter als die jeweils erneute Gewinnung von Spektralsignaturen aus dem Bild in herkömmlichen Verfahren. Erst der damit verbundene Zeitgewinn bringt Aufwand und Nutzen in Monitoringansätzen in ein vertretbares Verhältnis. Grundlage dieser Einschätzung sind die im Rahmen des Projektes durchgeführten 20 Anwendungen des Ansatzes auf verschiedene Anbaujahre und -gebiete. Limitierungen zeigten sich hauptsächlich, wenn die Anzahl und die Zeitpunkte der Aufnahmen eine adäquate Abbildung der Phänologie im Anbaujahr nicht zuließen.

Überdies wird die Güte eines Klassifizierungsergebnisses prinzipiell von der Güte des Klassifikators beeinflusst. Im vorliegenden Fall betrifft das wesentlich die in die Normkurve eingegangenen Informationen. Derzeit muss für einzelne Datensätze vermerkt werden, dass bei manchen Rahmenbedingungen (ungünstige Lage der Aufnahmezeitpunkte, sehr starke Abweichung der phänologischen Entwicklung vom langjährigen Mittel) die spektrale Variabilität inner-

halb einer Klasse größer ist als die Unterschiede zwischen den Kulturen. Durch das Hinzufügen neuer Daten sollte sich dieses Problem abschwächen und der „Informationsspeicher Normkurve“ vervollkommen werden. Das kann bei Bedarf dazu führen, dass eine stärkere Berücksichtigung von naturräumlichen Faktoren (Boden mit Nährstoffversorgung, Wasserversorgung und Wasserspeicherfähigkeit) und Bewirtschaftungsfaktoren (Düngung, Sorte) erfolgt. Diese Einbeziehung erlaubte z. B., die Kultur unabhängig von den sich durchprägenden Bodenverhältnissen sicher zu erkennen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Forschungsprojekt „*Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel*“ durchgeführt und vom BMBF unter dem Kennzeichen 0330227 gefördert.

Literatur

- BRENNING, A., ITZEROTT, S. & KADEN, K., 2006: Comparing classifiers for crop identification based on multitemporal LANDSAT TM/ETM data. – Second Workshop of the EARSeL SIG on Remote sensing of Land Use and Land Cover, Bonn.
- BRONSTERT, A. & ITZEROTT, S., 2006: Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel – Abschlussbericht zum BMBF-Projekt. Brandenburgische Umweltberichte, Band 18, Potsdam.
- BRUZZONE, L. & PRIETO, D.F., 2002: A partially unsupervised cascade classifier for the analysis of multitemporal remote-sensing images. – Pattern Recognition Letters **23**: 1063–1071.
- FOODY, G.M., 2002: Status of land cover classification accuracy assessment. – Remote Sens. Environ. **80**: 185–201.
- FOODY, G.M., 2004: Thematic map comparison: Evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **70**: 627–633.
- GUERIF, M., BLÖSER, B., ATZBERGER, C., CLASTRE, P., GUINOT, J.-P. & DELECOLLE, R., 1996: Identification de parcelles agricoles a partir de la forme de leur evolution radiometrique au cours de la saison de culture. – Photo-Interpretation, pp. 12–22
- ITZEROTT, S., MÜLLER, D. & KADEN, K., 2004: Klassifikation agrarischer Nutzungen unter Verwendung spektraler Normkurven. – Halle-sches Jahrbuch Geowissenschaften, **A26**: 93–110.
- ITZEROTT, S. & KADEN, K., 2005: Erfassung von Modellbezugsflächen und Bereitstellung von flächenbezogenen Parametern aus Fernerkundungsdaten – Abschlussbericht des Teilprojektes 6 im Rahmen des BMBF-Projektes „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel. unveröffentlicht, Potsdam.
- ITZEROTT, S. & KADEN, K., 2006a: Spektrale Normkurven – eine notwendige Voraussetzung für die Klassifizierung der Fruchtartenverteilung aus Fernerkundungsdaten. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2006** (3): 205–216.
- ITZEROTT, S. & KADEN, K., 2006b: Ein neuer Algorithmus zur Klassifizierung landwirtschaftlicher Fruchtarten auf Basis spektraler Normkurven. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2006** (6): 509–518.
- MARTINEZ-CASASNOVAS, J.A., MARTIN-MONTERO, A. & CASTERAD, M.A., 2005: Mapping multi-year cropping pattern in small irrigation districts from time-series analysis of Landsat TM images. – European Journal of Agronomy **23**: 159–169.
- OENEMA, O., BOERS, P.C.M., VAN EERDT, M.M., FRATERS, B., VAN DER MEER, H.G., ROEST, C.W.J., SCHRÖDER, J.J. & WILLEMS, W.J., 1998: Leaching of nitrate from agriculture to groundwater: the effect of policies and measures in the Netherlands. – Environmental Pollution **102** (S1): 471–478.
- STEHMAN, S.V., 1997: Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. – Remote Sens. Environ. **62**: 77–89.

Anschriften der Autoren:

Dr. SIBYLLE ITZEROTT
GeoForschungszentrum Potsdam
Sektion Fernerkundung
Telegraphenberg A 17, D-14473 Potsdam
Tel.: 0331-2881107, Fax: 0331-2881192,
e-mail: itzerott@gfz-potsdam.de

Dr. KLAUS KADEN
Universität Potsdam, Institut für Geoökologie,
Karl-Liebknecht-Str. 24–25, D-14476 Potsdam
Tel.: 0331-9772107, Fax: 0331-9772092,
e-mail: kkaden@rz.uni-potsdam.de

Manuskript eingereicht: März 2006
Angenommen: Oktober 2006