

Spektrale Normkurven – eine notwendige Voraussetzung für die Klassifizierung der Fruchtartenverteilung aus Fernerkundungsdaten

SIBYLLE ITZEROTT & KLAUS KADEN, Potsdam

Keywords: remote sensing, satellite data, spectral standard curve, winter wheat, agriculture

Zusammenfassung: Multitemporale Anwendungen nehmen inzwischen bei der Klassifizierung von Ackerkulturen aus Fernerkundungsdaten einen breiten Raum ein. Bisher ungelöst ist jedoch das Problem eines universellen Klassifikators für Fruchtarten, unabhängig von Witterungs- und Bodeneinflüssen. Dazu ist nach Meinung der Autoren neben der geometrischen und Atmosphärenkorrektur der verwendeten Daten die zeitliche Korrektur der Bildinhalte, geknüpft an den phänologischen Zustand der abgebildeten Früchte, von höchster Wichtigkeit. Die vorgestellten Untersuchungen widmen sich diesem Problem mit der Erzeugung von spektralen Normkurven, die den Zusammenhang zwischen Entwicklungszustand und Spektralwert von Ackerkulturen herstellen.

Summary: *Spectral standard curves – a precondition of crop distribution classification in agriculture from satellite data.* Multitemporal applications rank at present in a high position in the field of crop distribution classification in agriculture. But the problem of a universal class description for crops, uninfluenced by special weather and soil conditions, is still unresolved. The authors are convinced that apart from the geometrical and atmosphere correction of the used data highest importance has to be attached to the temporal correction of the satellite image contents, according to the phenological status of the shown crops. The presented investigations are dedicated to that problem by designing spectral standard curves, which implicate the phenological status with the spectral value of crops.

1 Problemstellung

Umweltbezogene Fragestellungen sind eng mit der Verarbeitung von raum-zeit-bezogenen Informationen verbunden. Die Verwendung von Modellen ist dabei gegenwärtig die zentrale Methode, Prozesse in ihrem Raumbezug abzubilden. Bei ihrer Entwicklung ist heute ein Stand erreicht, der zunehmend Prozesse realitätsnah abbildet. Das führt zu einem gewachsenen Bedarf an in Raum und Zeit hoch auflösenden Daten. Hier sollen die Fernerkundungsdaten ansetzen. Wenngleich ihre Nutzung noch weit entfernt vom Echtzeit-Monitoring ist, können ihre Potenzen in der Auflösung von Raum und Zeit nutzbar gemacht werden.

Die Flächennutzung ist eine hochdynamische Größe. Dies trifft insbesondere für den Ackerbau zu. Die Fläche wird durch verschiedene Fruchtarten genutzt, die im jährlichen Wechsel – in Fruchtfolgen – angebaut werden. Als Ackerland genutzte Flächen unterliegen regelmäßiger Bodenbearbeitung, Saat, Düngung, Pflege und Ernte der Kulturpflanzenarten. Die Fruchtfolgengestaltung ist von verschiedensten Faktoren abhängig. Zum einen von den natürlichen Standortverhältnissen (Klima, Boden), zum anderen von kulturartenspezifischen Ansprüchen an die Saatzeit, Bearbeitung und den Wasservorrat. Hinzu kommen verschiedene Unverträglichkeiten der Fruchtarten nacheinander und Selbstunverträglichkeiten.

ten der Feldfrüchte. Die Berücksichtigung dieser Zusammenhänge manifestiert sich in der Fruchtfolgelehre (KÖNNECKE 1967). Aber nicht nur die genannten Faktoren beeinflussen die Fruchtfolgegestaltung, oftmals sind auch ökonomische Zwänge für den Anbau bestimmter Kulturen ausschlaggebend. Im konventionellen und integrierten Landbau werden „notwendige Fruchtfolgefehler“, die mit Ertragseinbußen und Krankheits- und Schädlingsbefall einhergehen, durch Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sowie Herbiziden kompensiert. Im Resultat existieren Bewirtschaftungszustände für einzelne Zeitpunkte und Flächen, die schwerlich nach Raum und Zeit normierbar sind. Von der ursprünglichen Regelmäßigkeit der agronomischen Anbaulehre kann in der Aktualität erheblich abgewichen werden. Deshalb bedarf es der Erfassung der tatsächlichen Fruchtfolge aus flächenhaft gewonnenen Abbildern der Nutzung – den Fernerkundungsdaten.

2 Flächennutzung in der Fernerkundung

Die Etablierung der Fernerkundung als Methode ist eng an das Themenfeld „Flächennutzung“ gebunden. Die Erfassung der agrarischen Nutzung stellt einen wesentlichen Schwerpunkt dar und hat einen bedeutungsvollen Stand erreicht (BARSCH & SÖLLNER 1987, WIEGAND et al. 1991, STOLZ 1998, KADEN et al. 1999, LUNETTE et al. 2002).

Eine der bekanntesten Anwendungen der Fernerkundung ist seit den 90er Jahren die Kontrolle landwirtschaftlicher Anbauflächen in Europa zur Gewährung staatlicher Beihilfen aus dem Europäischen Ausrichtungs- und Garantiefonds für die Landwirtschaft (*EAGFL*). Als Kontrollwerkzeug wird das Integrierte Verwaltungs- und Kontrollsystem (*InVeKoS*) eingesetzt, das auf Fernerkundungsmethoden aufsetzt. Auch als landwirtschaftliche Basisinformationen zur Erfassung kleinräumiger Boden- und Bestandsheterogenität für die teilschlagspezifische Bewirtschaftung sind Fernerkundungsaufnahmen nach GRENZDÖRFFER (1998) sehr gut geeignet. Bei der als *Preci-*

sion Farming bezeichneten Bewirtschaftungsmethode wird die räumliche und zeitliche Variabilität innerhalb eines Schlages berücksichtigt. Der Landwirt strebt in Bezug auf Bewässerung, Einsatz von Düngemitteln und Herbiziden sowie Ernte eine Einsparung von Ressourcen und die Entlastung von Umwelt und Trinkwassergewinnung an. Der Einsatz der Fernerkundung für diese Anwendung beschränkt sich derzeit jedoch im Wesentlichen auf den Einsatz von Luftbildern.

Die Anwendung der Fernerkundungsmethode muss dabei häufig als Einzellösung verstanden werden, das heißt, sie ist auf den vorliegenden Sachverhalt abgestimmt. Die Übertragbarkeit von Methode und Ergebnis auf andere Regionen ist eingeschränkt und verlangt Kalibrierungen in der Verarbeitungskette. Routinemäßig werden Fernerkundungsdaten hinsichtlich ihrer spektralen, radiometrischen und geometrischen Auflösung korrigiert, die das eigentliche Potenzial der Daten bestimmende zeitliche Auflösungskorrektur bleibt dahingehend in der Regel unbeachtet. Witterungsbedingte Bewertungen werden meist in die Interpretation verlagert. Dieser Faktor ist in der vorgestellten Untersuchung berücksichtigt. Das stellt wohl den entscheidenden Fortschritt gegenüber bisherigen Lösungsansätzen dar.

3 Strategie zum Einsatz der Fernerkundungsdaten

Die Verwendung der Fernerkundungsdaten und der Einsatz der Fernerkundungsmethode ist heute meist an einen bestimmten Arbeitsalgorithmus geknüpft. Mit Hilfe von Bildverarbeitungssystemen werden die Daten aufbereitet und dabei ein breites Spektrum von Werkzeugen eingesetzt. Im Wesentlichen bestehen die Arbeitsschritte aus:

- Datenaufbereitung (atmosphärische und geometrische Korrektur)
- Erstellung von Klassifizierungsmasken
- Interpretationsorientierte Bildaufbereitung (Erzeugen von Ratiobildern, z. B. NDVI)
- Erstellen eines Klassifikators zur Bildklassifizierung (Bildclustering)

- Klassifikation nach Algorithmus
- Bildverbesserung des Klassifikationsergebnisses mittels Filterung.

Die durchgeführten Untersuchungen zielen auf das Kernstück dieser oder ähnlicher Arbeitsabläufe, das Erstellen eines Klassifikators. In der Regel ist er gegenwärtig nicht nur an einen Klassifizierungsalgorithmus gebunden, sondern in hohem Maße auch an die verwendeten Bilddaten. Eine Übertragung des Klassifikators auf andere Datensätze scheitert fast immer an deren Spezifik. Soll er zur Fixgröße werden, müssen normierte spektrale Klassenbeschreibungen (im Weiteren Normkurven genannt) erzeugt werden. Außerdem müssen die verwendeten Bilddatensätze dem Normklassifikator entsprechend kalibriert werden. Fernerkundungsdaten können somit gezielter aufbereitet und der Interpretation zugeführt werden. Das ist eine unabdingbare Forderung für das Arbeiten mit hochdynamischen Größen wie der Flächennutzung. Der vorgestellte Ansatz zielt auf die Entwicklung spektraler Normkurven für Ackerkulturen, die über das Spektralverhalten die phänologische Situation einzelner Kulturen im vollständigen Jahresverlauf abbilden. Sie ermöglichen damit für jeden phänologischen Zustand die Extraktion der wahrscheinlichen Spektralcharakteristik einer Feldkultur. Der Grundgedanke ist die Ermittlung spektraler Normkurven aus den spezifischen Rückstrahleigenschaften der einzelnen Nutzungsklassen. So bestimmen Chlorophyll- und Wassergehalt, die Zellstruktur der Blätter und die Architektur des Pflanzenbestandes (Bedeckungsgrad, Blattflächenindex, durchscheinender Boden) die spektrale Signatur eines Pflanzenbestandes. Diese wird im Laufe eines Jahres durch sich verändernde Phänologiemerkmale, Witterung, Standorteigenschaften, Kulturart und agrotechnische Bewirtschaftungstermine beeinflusst. Somit wirken verschiedene Faktoren auf die spektralen Signaturen ein. Die Frage, inwieweit diese Merkmale entscheidend die spektralen Normkurven verschiedener landwirtschaftlicher Nutzungen beeinflussen, rückt in den unmittelbaren Betrachtungsbereich. Ausge-

hend vom Anbauspektrum des Landes Brandenburg wurden für die Kulturen Winterroggen, Wintergerste, Winterweizen, Wintererbsen, Sommergetreide, Silomais, Kartoffeln, Zuckerrüben, Ölfrüchte/Leguminosen, Feldfutter und Brache spektrale Normkurven entwickelt. Basis sind die im Verlauf eines Jahres veränderten spektralen Eigenschaften. Dabei tritt normalerweise ein gleicher phänologischer Jahresverlauf in jeder Kultur/Klasse wiederholt auf. Solche Klassen werden als intraannuale dynamische Klassen bezeichnet. Sie sind die angestrebten Elemente des Klassifikators. Aus diesem Blickwinkel rücken zunächst folgende Aufgaben in den unmittelbaren Blickpunkt:

- Erzeugung eines multitemporalen Fernerkundungsdatensatzes als Basis für die Generierung der spektralen Charakteristik der Normkurven,
- Spektrale Charakteristik der Kulturen inklusive der Ermittlung geeigneter spektraler Kenngrößen auf der Grundlage feldspektrometrischer Messungen,
- Auswertung von Wetterdaten zur exakten Bewertung der phänologischen Situation der einzelnen Kulturen zu den Aufnahme-terminen,
- Zusammenstellung und Bewertung von schlagbezogenen Betriebsdaten über den Anbau der Kulturen für ausgewählte Referenzbetriebe,
- Untersuchung des Einflusses von Boden- daten auf die Spektralmerkmale.

Dementsprechend wurden die Datengrundlagen geschaffen. Sie bilden die Voraussetzung für die Ableitung der spektralen Normkurven. Am Beispiel der Kultur Winterweizen soll die Entwicklung der spektralen Normkurve dargestellt werden.

4 Datengrundlagen und Datenaufbereitung für die Entwicklung spektraler Normkurven

Die Bewertung des komplexen Bedingungsgefüges bei der Entwicklung spektraler Normkurven erfordert die Einbeziehung unterschiedlicher Informationsquellen. Im

Folgenden sollen die notwendigen Daten kurz charakterisiert werden.

Fernerkundungsdaten

Zur Verfügung standen 35 Satellitenbilddatensätze (vorwiegend Landsat-TM/ETM-Vollszenen) aus den Jahren 1987 bis 2002. Für die atmosphärische und geometrische Kalibrierung wurden die Software Routinen von ERDAS IMAGINE/ATCOR2 genutzt. Die Datenaufbereitung wird ergänzt durch eine Maskierung und eine Indexberechnung. Bildmaskierungen vereinfachen die Bildinterpretation erheblich. Dadurch verringern sich Speicherplatz und Rechenzeit, aber vor allem Fehlklassifizierungen speziell bei Flächennutzungsklassifizierungen. Aus der digitalen Biotoptypenkartierung Brandenburgs (Grundlage Color-Infrarot (CIR) Luftbildkartierungen aus dem Jahr 1992/1993) wurde eine Ackermaske erstellt. Für den Datensatz der ackerbaulichen Nutzflächen wurde im nächsten Aufbereitungsschritt der NDVI berechnet. Ratios reduzieren insbesondere bei multitemporaler Anwendung die Datenmenge bei Beibehal-

tung ihrer Interpretationsfähigkeit sinnvoll. Mit der Eigenschaft, Vegetationstypen und -zustände signifikant unterscheiden zu können, ist der NDVI gut für die Klassifizierung von Ackerkulturen geeignet (JACKSON 1983, THENKABAIL et al. 2000). Datenbasis ist somit ein multitemporaler Datensatz der NDVI-Werte der Ackerflächen.

Feldspektrometermessungen

Ein wesentlicher Aspekt der Verwendung der Fernerkundungsdaten war die Entscheidung über die zu nutzende optimal interpretierbare spektrale Information. Neben eigenen und allgemeinen Erfahrungen wurden hierzu in einem Feldexperiment zusätzlich spektrale Signaturen für einzelne Kulturen ermittelt und ausgewertet. Für die Messungen wurde das Feldspektrometer FieldSpec® Pro FR (Analytical Spectral Devices Inc.; Boulder, USA) verwendet. Es deckt den Wellenlängenbereich zwischen 350 und 2500 nm ab. Die spektrale Auflösung im VIS und NIR beträgt ca. 3 nm, im SWIR liegt das Intervall zwischen 10 und 12 nm. Das Sensorblickfeld beträgt 8° (ver-

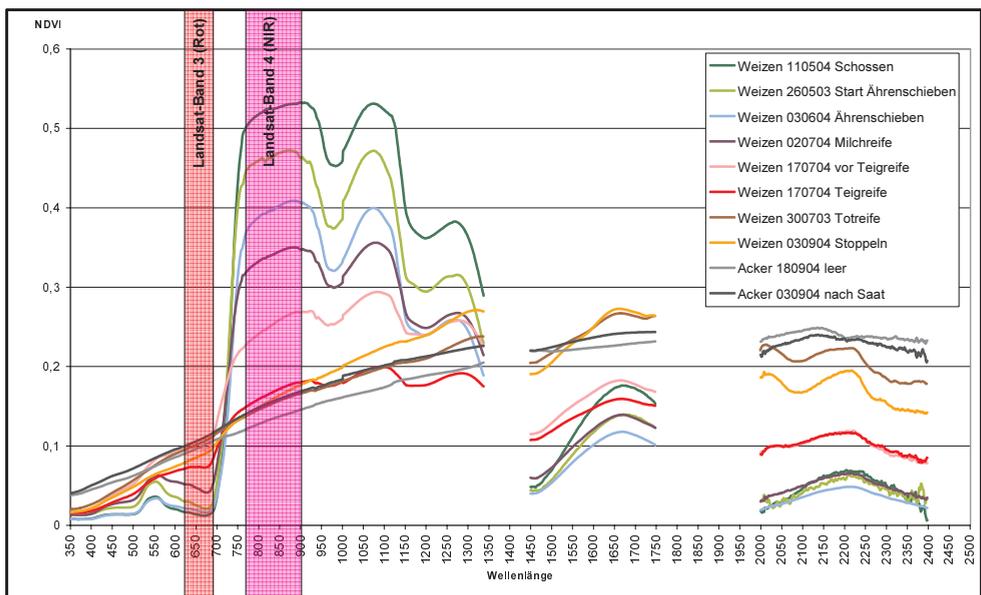


Abb. 1: Feldspektrometrische Charakteristik von Winterweizen.

änderbar auf 25° oder 1°). Es wurden pro Standort und Aufnahmeterrain ca. 25 mal 50 Punktmessungen vorgenommen. Die Einzelmessungen wurden bei der Datenauswertung gemittelt. Damit lag eine repräsentative Datenmenge vor.

Die Abb. 1 verdeutlicht die Ergebnisse der Feldspektrometernmessungen für Winterweizen. Das Verhältnis von NIR und ROT (abgebildet durch den NDVI) erscheint bei Betrachtung der Abbildung als durchaus geeignetes Merkmal zur Verdeutlichung der Wuchsunterschiede zu den verschiedenen Zeitpunkten. Dies unterstreicht die herausragende Stellung des NDVI (NIR – ROT / NIR + ROT) innerhalb der gegenwärtig verwendeten Indexwerte und untermauert eine Entscheidung zu Gunsten dieser Größe.

Betriebsdaten

Referenzdaten sind der unersetzbare Schlüssel zur Interpretation von Fernerkundungsdaten. Um diese derzeit feststehende Aussage abzuschwächen, sind die angestellten Untersuchungen durchgeführt worden. Die zu entwickelnden spektralen Normkurven sol-

len dem Anspruch der Übertragbarkeit genügen und diese enge Bindung lösen. Es war aber unumgänglich, dass bei der Ableitung der Normkurven die spektrale Charakteristik fest an aussagekräftige Bewirtschaftungsangaben gebunden wurde.

Informationen dazu lieferten Beispielbetriebe. Bei der Auswahl der Referenzgebiete wurden verschiedene Bodenregionen Brandenburgs berücksichtigt. Schlagbezogene Anbauinformationen für die Untersuchungsjahre wurden eingeholt und in einem GIS zusammengeführt. Dieser Anbaudatenbank kann für jeden Schlag in jedem Jahr die Information über die angebaute Kultur entnommen werden. Die Informationen sind in zweierlei Hinsicht bedeutungsvoll, einerseits ermöglicht der Raumbezug die schlaggenaue und fruchtgenaue Auswertung der Fernerkundungsinformation, andererseits kann mit der Dokumentation der Anbaufolgen der Zeitaspekt in dem multitemporalen Untersuchungsansatz besser berücksichtigt werden.

In den Referenzgebieten wurden je zwei Agrarbetriebe für die Ermittlung der Anbauinformationen ausgewählt. Diese Betrie-

Tab. 1: Anbaudaten der Agrarbetriebe.

| Referenzgebiet und Bodenregion | Betrieb | Anzahl der Ackerschläge | Gesamtfläche (in ha) | Anbaujahre |
|---|--|-------------------------|----------------------|------------------------|
| Rheinsberger Land Ertragsarme Böden in grundwasserfernen Lagen | Agrargenossenschaft Braunsberg eG | 22 | 1003 | 1992–1994 1997–2002 |
| | NEUGRO Landwirtschaft- und Dienste GmbH Großwoltersdorf | 84 | 1905 | 1988–2002 |
| Unteres Havelland Ertragsreiche Böden in grundwassernahen Lagen | Agrargenossenschaft Hohennauen eG | 180 | 2119 | 1990–2002 |
| | Agrargenossenschaft Neustadt eG | 8 | 242 | 1987–2002 |
| Fläming Ertragsarme Böden in grundwassernahen Lagen | Agrargenossenschaft „Der Märker“ Jänickendorf | 79 | 1895 | 1988–2002 |
| Fläming Ertragsreiche Böden in grundwasserfernen Lagen | Agrargenossenschaft Nuthequelle GmbH Niedergörsdorf | 51 | 1857 | 1992–2002 |

Tab. 2: Durchschnittlicher Beginn (julianischer Tag) phänologischer Phasen ausgewählter Fruchtarten in Brandenburg (Mittelwerte der Jahre 1951 bis 2003).

| | Bestellung | Saat-aufgang | Beginn Schossen | Bestands-schluss | Ähren-schieben | Blüte | Vollblüte | Reife | Gelbreife | Ernte |
|--------------|------------|--------------|-----------------|------------------|----------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| Winterraps | 239 | 249 | 100 | | | 129 | | 191 | | 198 |
| Winterroggen | 269 | 281 | 112 | | 138 | 151 | 156 | 215 | 201 | 212 |
| Winterweizen | 283 | 296 | 123 | | 157 | | | 212 | 205 | 220 |
| Wintergerste | 264 | 275 | 113 | | 139 | | | 190 | 183 | 194 |
| Hafer | 88 | 105 | 138 | | 166 | | | | 208 | 219 |
| Zuckerrüben | 108 | 125 | | 176 | | | | | | 294 |
| Kartoffeln | 115 | 142 | | 172 | | 185 | | | | 266 |
| Silomais | 122 | 136 | 195 | | | 203 | | | 258 | 262 |

be stellen Angaben zur Abgrenzung der einzelnen Ackerschläge und zu der jeweiligen landwirtschaftlichen Nutzung für den Zeitraum von 1987 bis 2002 zur Verfügung. Die Tab. 1 gibt Auskunft über Anzahl und Gesamtgröße der Ackerschläge, die in die Untersuchung eingegangen sind.

Phänologische Daten

Die entscheidende Variable für die spektrale Charakteristik von Pflanzenbeständen ist die Zeit. Die als langjährige Zeitreihen vorliegenden Eintrittstermine phänologischer Phasen können als Normierungsgrundlage verwendet werden. Entsprechende Angaben findet man z. B. in den agrarmeteorologischen Wochenberichten des DWD. Die notwendigen präzisen Informationen können aber nur aus den stationsbezogenen Aufzeichnungen des DWD abgeleitet werden. Dazu wurden für die im Untersuchungsgebiet relevanten 40 Stationen die dort verzeichneten Eintrittstermine bestimmter Phänophasen genutzt. Aus den Angaben dazu wurde aus einer Zeitreihe von 1951–2003 jeweils der mittlere Termin des Eintretens einer bestimmten phänologischen Phase ermittelt und als „Norm“ gesetzt.

Für ausgewählte Kulturarten sind diese Termine für das Land Brandenburg aus der

nachstehenden Tabelle zu entnehmen. Dabei bezeichnet die Zahlenangabe den Zähltag im Jahr ab dem 1. Januar (julianischer Tag).

5 Entwicklung der Normkurven

Entsprechend dem gewählten Ansatz sollen spektrale Normkurven die phänologische Situation einzelner Kulturen im vollständigen Jahresverlauf abbilden. Eine Normkurve wird dabei von den folgenden drei Parametern bestimmt:

- die normierte Zeitskala (exakte phänologische Einordnung der Satellitenszenen entsprechend der agrarmeteorologischen Informationen),
- die normierte spektrale Information (atmosphärenkorrigierte Datensätze des NDVI),
- die normierte räumliche Zuordnung beider Informationen (schlagbezogene Anbaudaten und schlagbezogene spektrale Information über die NDVI-Werte).

Beachtet werden müssen sowohl räumliche als auch zeitliche Strukturen. Zu berücksichtigen ist insbesondere, dass Boden vorrangig räumliche Differenzierungen besitzt, wogegen Witterung eine Variabilität in Raum und Zeit aufweist. Für die vorgenommenen Untersuchungen wurde ein weitest-

gehend homogener Raum vorausgesetzt, es erfolgte eine Beschränkung auf das Land Brandenburg. Räumliche Inhomogenitäten wurden durch die Einbeziehung verschiedener Bodenregionen und Klimastationen ausgeglichen. Damit konnte der Fokus auf die Zeitstruktur gelegt werden.

Ein bestimmtes Aufnahme datum bildet nicht in jedem Jahr den gleichen Entwick-

lungszustand von Pflanzenbeständen ab. Er ist wesentlich durch witterungsbedingte Varianzen beeinflusst. Aktuelle Witterungsereignisse weichen in der Regel beträchtlich von den durchschnittlichen Witterungsbeschreibungen eines Jahres ab. Da der Zusammenhang zwischen phänologischem Entwicklungszustand und spektralem Abbild herzustellen ist, muss dem Aufnahme-

Tab. 3: Beschreibung des BBCH-Codes für Winterweizen (Erläuterungen zum BBCH-Code in www.bba.de).

| BBCH-Code und Bezeichnung des Makrostadiums Fernerkundungsrelevante Bemerkungen zur Bestandes- und Pflanzenphysiologie und -physiognomie nach OEHMICHEN (1986), GEISSLER (1983) und SEIFFERT (1987) |
|---|
| BBCH-Makrostadium 0 – Keimung – Saat von Mitte bis Ende Oktober – Keimdauer bis zum Auflaufen beträgt bei Keimtemperaturoptimum (16–25°)–12 Tage, bei Keimtemperaturminimum (2–4°) mehr als 30 Tage |
| BBCH-Makrostadium 1 – Blattentwicklung – vom Austritt des ersten Blattes aus Keimscheide bis zum Erscheinen von 9 und mehr Blättern – endet noch vor dem Winter |
| BBCH-Makrostadium 2 – Bestockung – beinhaltet generative Entwicklung des Haupthalmes, Beginn der Assimilation – Bestockung vor dem Winter bei üblicher später Aussaat wegen geringer Temperaturen weniger stark ausgeprägt, setzt sich im Frühjahr mit Bildung weiterer produktiver Bestockungstriebe fort – langsamer Temperaturanstieg im Frühjahr führt zu längerer Bestockungsphase und erhöhter Bestandesdichte, schneller Temperaturanstieg führt zu schnellerem Übergang zum Schossen, – Trockenheit führt zur Verringerung der Anzahl produktiver Bestockungstriebe (Bestandesdichte wird verringert angelegt) – dauert bis Anfang Mai |
| BBCH-Makrostadium 3 – Schossen – Streckung der 5 bis 7 Internodien von unten nach oben – Hauptphase der Längen- und Massenentwicklung der oberirdischen Biomasse und der Wurzeln – photosynthetische Leistung kommt aus 3 oder 4 jüngsten (obersten), größten Blättern – die intensive Masseentwicklung führt oft zu Trockenheitsstress in Schossphase, damit zu verringerter Anzahl von ährentragenden Halmen (Bestandesdichte) und Blütenanlagen je Ährchen, – Wassermangel wirkt sich auf Trockenmassebildung der Pflanze aus und bewirkt beschleunigte Pflanzenalterung (verfrühtes Eintreten des Ährenschiebens) – Andauer etwa 35 Tage |
| BBCH-Makrostadium 4 – Ährenschnellen – verläuft zeitgleich mit Schossen – maximaler LAI wird erreicht (bei voller Entwicklung Werte um 6–7, auch > 10 möglich) durch starkes Wachstum von Blättern und Halm, später gehört auch Ähre zu assimilierenden Teilen |
| BBCH-Makrostadium 5 – Ährenschieben – letztes Internodium mit Ähre streckt sich, Längenwachstum der Halme wird abgeschlossen, Gesamtlänge nimmt noch zu – Wassermangel führt zur Verringerung der Anzahl der zur Befruchtung kommenden Blüten – Bestandesphysiognomie ändert sich durch Überdeckung der Blätter durch Ähren |

Tab. 3: (Fortsetzung)

| |
|--|
| <p>BBCH-Makrostadium 6 – Blüte</p> <ul style="list-style-type: none"> – Blüte setzt nach vollständigem Erscheinen der Ähre vor Abschluss der Pflanzenstreckung ein – Bestand blüht geschlossen ab (von Mitte der Ähre nach oben und unten gleichmäßig fortsetzend) – Andauer der Blüte ist temperaturabhängig (Ähre selbst blüht eine Woche) – Gesamtlänge der Pflanze wird erreicht – ebenso maximale Wurzelmasse, 80–85 % aller Wurzeln in Tiefen < 30 cm |
| <p>BBCH-Makrostadium 7 – Fruchtentwicklung</p> <ul style="list-style-type: none"> – Phase der Kornfüllung mit BFI von nur noch 50 % des Maximum – Wassermangel führt zu beschleunigtem Kornwachstum und vermindertem Kornertrag – Phase teilt sich in: <ul style="list-style-type: none"> → Wasserreife: 95 % Wasser in Fruchtknoten, 5 % Kornfüllung, 2 Wochen nach Blüte → Dünnmilchreife: 70–80 % Wasser, 30 % Kornfüllung, 4. Woche nach Blüte, Bestand grün, unterste Blätter sterben ab → Milchreife/Grünreife: 60 % Kornfüllung, 50–60 % Wasser im Korn, 5. Woche nach Blüte, Bestand im Kopf noch ganz grün, unten abgestorben, dazwischen verfärbt → späte Milchreife: nur Kopf noch grün |
| <p>BBCH-Makrostadium 8 – Fruchtreife</p> <ul style="list-style-type: none"> – Phase teilt sich in: <ul style="list-style-type: none"> → Teigreife/Gelbreife: 90 % Kornfüllung, 30–40 % Wasser im Korn, 6. bis 7. Woche nach Blüte, Bestand zeigt Abreifeverfärbungen im Kopf (gelb bis hellgrün), Spelzen schon strohfarbig, Korn schrumpft, ist etwas knetbar und leicht zu brechen, teigiger/zäher Brei tritt aus, Assimilatverlagerung noch nicht beendet, Bestand schnitt- und bindereif, |
| <ul style="list-style-type: none"> → Vollreife: 100 % Kornfüllung, 20 % Wasser im Korn, 8. Woche nach Blüte: Pflanze voll abgestorben, Halmknoten eingetrocknet, Assimilatverlagerung beendet, Korn ist druschfähig, aber noch nicht lagerfähig |
| <p>BBCH-Makrostadium 9 – Absterben</p> <ul style="list-style-type: none"> – Phase beinhaltet: <ul style="list-style-type: none"> → Tot- und Mähdruschreife: 14–16 % Wasser im Korn, überreifer Bestand → danach ist Kornausfall möglich, Halme brechen zusammen |

datum einer Szene ein eindeutiger Entwicklungszustand zugeordnet werden. Diese zeitliche Kalibrierung ist Grundvoraussetzung für die Berücksichtigung jahresübergreifender Daten und ermöglicht den Einsatz eines universellen Klassifikators auf der Basis der spektralen Normkurven.

Im vorgestellten Ansatz wurden witterungsbedingte Korrekturen in die Datenaufbereitung integriert und der eigentliche Aufnahmezeitpunkt in das jeweils kulturspezifische phänologische Normjahr eingepasst. Die Korrekturen müssen bezogen auf die jeweilige Kultur getrennt vorgenommen werden, da alle Kulturen unterschiedlich auf eine konkrete Witterungssituation reagieren.

Die Einordnung der Aufnahmetermine in die Zeitskala erforderte die Hinzuziehung

der agrarmeteorologischen Informationen sowie von Kenntnissen über die Abläufe der Phänologie für die einzelnen Kulturen. Beschreibungen dieser Art bestehen aus der Abfolge markanter Wuchszustände, im Falle des beschriebenen BBCH-Codes in Makro- und Mikrostadien gegliedert.

Das Wissen über die Physiognomie des Pflanzenbestandes zu den Entwicklungsstadien bildet das Gerüst für die Entwicklung der Normkurven. Für die spektrale Beschreibung der Stadien können über die Kenntnis ihrer Eintrittstermine die Spektralinformationen der Fernerkundungsdaten genutzt werden.

Der im jeweiligen Satellitendatensatz abgebildete und durch die Beobachtungsdaten des DWD bestimmbare Zustand musste in die mittlere Zeitskala transformiert werden.

Tab. 4: Beispiel für die Einpassung einer Satellitenszene in das Normjahr – Kultur Winterweizen.

| Aufnahmedatum der Satellitenszene | Zähltag im Jahr nach Aufnahmedatum | Mittlerer phänologischer Entwicklungszustand zum Aufnahmezeitpunkt | Tatsächlicher phänologischer Entwicklungszustand zum Aufnahmezeitpunkt | Korrekturwert | Korrigierter Zähltag |
|-----------------------------------|------------------------------------|--|--|---------------|----------------------|
| 05.05.1995 | 125 | 2 Tage nach mittlerem Schossbeginn | 9 Tage nach Schossbeginn | + 7 | 132 |

So können für jede Kultur getrennt Korrekturen der Terminierung der Szenen abgeleitet werden. Der tatsächliche Aufnahmeterrmin (Zähltag im Jahr ab jeweils 01. Januar) wird mittels des tatsächlichen, witterungsverursachten phänologischen Entwicklungszustandes auf das phänologische Normjahr übertragen und entsprechend dem Zähltag korrigiert. Exemplarisch ist die Verfahrensweise in der Tab. 4 dargestellt.

Im Resultat erhält man zeitlich kalibrierte Datensätze. Damit stehen für die Beschreibung der Phänologie von Weizen zeitlich abgestimmte Informationen aus mehreren Jahren zur Verfügung. Die vorgenommenen Korrekturen zur phänologischen Einpassung der 35 Aufnahmetermine werden in Tab. 5 dargestellt.

Für die Entwicklung der spektralen Normkurve für Winterweizen stehen für jeden der 35 Satellitendatensätze die folgenden drei Informationen zur Verfügung:

- der korrigierte Zähltag der Szene und der abgebildete phänologische Zustand,
- die flächendeckende NDVI-Information (atmosphären- und lagekorrigiert),
- die aus den Anbauinformationen gewonnene Lageinformation von Weizenschlägen.

Durch den Verschnitt der Daten wurden zeitpunktbezogene, einen bestimmten Entwicklungszustand repräsentierende, spektrale Informationen von Weizen gewonnen. Sie bildeten die Stützpunkte für die spektralen Normkurven. Das bedeutet, dass auf der Grundlage der Schlaginformation die NDVI-Statistiken gewonnen wurden. Alle

Spektralinformationen einer Kultur (zu allen Zeitpunkten und in allen Beispielbetrieben) wurden zu einer Datenbank vereint, die sich im Falle von Weizen 345 Basisdatensätzen aufbaut.

Diese Daten wurden einer ersten Güteabschätzung unterzogen. Schläge mit deutlich abweichender Spektralcharakteristik und solche von geringer Größe wurden nicht berücksichtigt. Getrennt nach den Agrarbetrieben wurde für die einzelnen Zeitpunkte ein mittlerer Spektralwert berechnet. Diese zeigen noch den Einfluss der Bodenregion. Unter Einbeziehung von Zusatzwissen wurden diese Mittelwerte erneut gütebewertet und gingen gewichtet in die Berechnung der Stützpunkte der Normkurve ein.

Trotz umfangreicher Satellitendatenbasis bleiben Informationslücken bei der Kurvenbeschreibung. Diese konnten aus der Kenntnis zwingender Zusammenhänge zwischen phänologischem Zustand und spektraler Charakteristik geschlossen werden. Mit diesem Hintergrundwissen können die fehlenden Werte in der spektralen Normkurve künstlich erzeugt und der Kurvenverlauf gegebenenfalls geglättet werden. Die Abb. 2 zeigt die so generierte Normkurve für Winterweizen.

Winterweizen besitzt den am spätesten einsetzenden phänologischen Zyklus der Winterkulturen. Saataufgang ist um den 300sten Tag. Es verbleibt nur noch eine kurze vorwinterliche Wachstumszeit. Ein geringes und auch verhältnismäßig langsames Ansteigen der NDVI-Werte ist die Folge. Während der Winterruhe wird das niedrige

Tab. 5: Potenzielle phänologische Information der Satellitenszenen für Winterweizen.

| Korrigierter Zähltag | Tatsächlicher phänologischer Entwicklungszustand | BBCH Code | Aufnahmedatum der Satellitenszene | Zähltag nach Aufnahmedatum |
|----------------------|--|-----------|-----------------------------------|----------------------------|
| 12 | Bestockung (Winterruhe) | 1 | 12. 01. 1989 | 12 |
| 32 | Bestockung (Winterruhe) | 1 | 01. 02. 1996 | 32 |
| 43 | Bestockung (Winterruhe) | 1 | 12. 02. 2000 | 43 |
| 95 | Bestockung | 2 | 26. 03. 1998 | 85 |
| 106 | Bestockung | 2 | 21. 04. 1996 | 111 |
| 110 | Bestockung | 2 | 24. 04. 1997 | 114 |
| 118 | Bestockung | 2 | 15. 04. 1988 | 105 |
| 122 | Schossen | 3 | 29. 04. 1987 | 119 |
| 130 | Schossen | 3 | 30. 04. 1999 | 120 |
| 132 | Schossen | 3 | 05. 05. 1995 | 125 |
| 134 | Schossen | 3 | 02. 05. 2000 | 122 |
| 139 | Schossen | 3 | 09. 05. 1988 | 129 |
| 151 | Schossen | 3 | 02. 06. 1997 | 153 |
| 152 | Schossen | 3 | 28. 05. 1992 | 148 |
| 154 | Schossen | 3 | 08. 06. 1996 | 169 |
| 173 | Blüte | 6 | 21. 06. 1998 | 172 |
| 179 | Blüte | 6 | 19. 06. 2000 | 170 |
| 184 | Milchreife | 7 | 08. 07. 1995 | 189 |
| 195 | Milchreife | 7 | 11. 07. 1999 | 192 |
| 204 | Start Gelbreife | 8 | 07. 07. 1989 | 188 |
| 210 | Gelbreife | 8 | 21. 07. 1994 | 202 |
| 212 | Gelbreife | 8 | 11. 08. 1996 | 223 |
| 224 | kurz nach Ernte, Stoppelreste | – | 11. 08. 2002 | 223 |
| 226 | kurz nach Ernte, Stoppelreste | – | 09. 08. 1995 | 221 |
| 228 | kurz nach Ernte, Stoppelreste | – | 14. 08. 2000 | 226 |
| 233 | kurz nach Ernte, Stoppelreste | – | 20. 08. 2002 | 232 |
| 234 | nach der Ernte | – | 22. 08. 1994 | 234 |
| 239 | nach der Ernte | – | 27. 08. 2002 | 239 |
| 247 | nach der Ernte | – | 04. 09. 1987 | 247 |
| 255 | nach der Ernte | – | 12. 09. 2002 | 255 |
| 256 | nach der Ernte | – | 13. 09. 1999 | 256 |
| 258 | nach der Ernte | – | 15. 09. 1991 | 258 |
| 258 | nach der Ernte | – | 15. 09. 1997 | 258 |
| 288 | Bestellung | 0 | 14. 10. 1996 | 287 |
| 293 | Start Auflaufen | 1 | 25. 10. 1994 | 298 |

Niveau in etwa gehalten. Der Winterweizen startet seine Hauptwachstumsphase im Frühjahr aufgrund des geringeren Bedeckungsgrades von einem deutlich niedrigeren Niveau als die anderen Winterfrüchte, die Startwerte von 0,3 bis 0,42 besitzen. Winterweizen erreicht derartige Werte erst 35 Tage nach Vegetationsbeginn. Dieser Zeitverzug verringert sich nur geringfügig, so dass der NDVI-Höchstwert von 0,77 zu Beginn des Ährenschiebens im Vergleich zu den anderen Winterkulturen auch erst später erreicht wird. Während des vorangehenden Schossens steigt der NDVI zunächst rapide an, zum Ende dieser Phase nimmt seine Größe wegen des weitgehenden Bestandesschlusses

nur noch geringfügig zu. Das allmähliche Erscheinen der Ähren mit dem im Vergleich zu den Blättern geringeren Chlorophyllgehalt wirkt sich in der Kurve mit einem langsamen Rückgang des NDVI aus. Das Ende der Blüte markiert den Beginn des Reifeprozesses. Bis zum Beginn der Gelbreife, wenn auch die Ähre und das Fahnenblatt der Pflanze Abreifeerscheinungen zeigt, nimmt der Chlorophyllgehalt kontinuierlich ab. Auch wenn das Vergilben von unten her einsetzt, macht sich dieser Prozess im Bestand mit stetiger Abnahme des NDVI bemerkbar. Nach der Gelbreife nimmt der NDVI nicht mehr stark ab, das im roten Lichtbereich aktive Chlorophyll ist weitest-

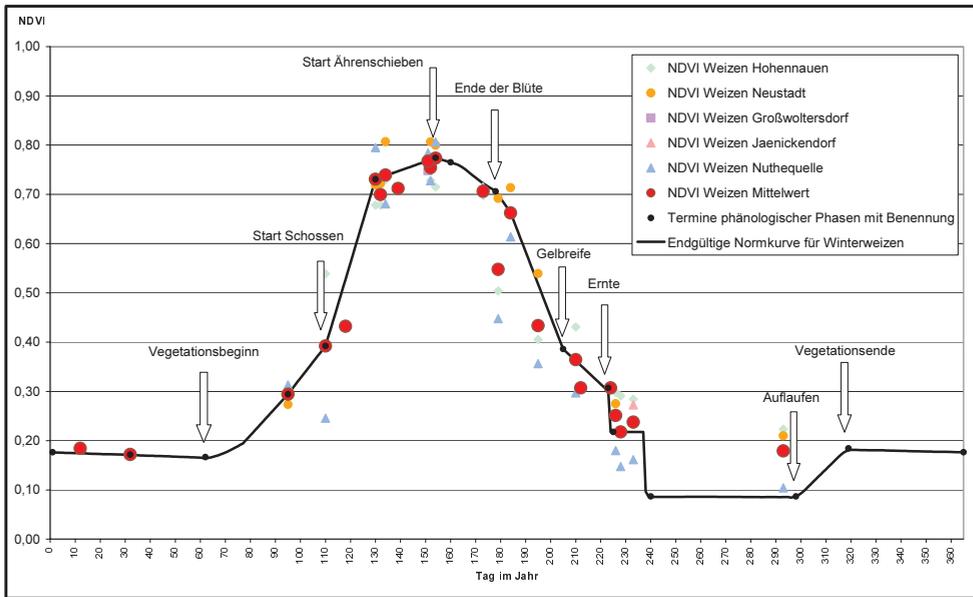


Abb. 2: NDVI-Normkurve für Winterweizen im Vergleich zu Mittelwerten aus Beispielsbetrieben.

gehend abgebaut. Der Reifeprozess von Winterweizen setzt später ein als bei den anderen Winterfrüchten und endet zuletzt. Die Ernte erfolgt um den 225ten Tag, ab dem 240sten Tag wird das Feld nach der Beräumung zur weiteren Nutzung frei.

Der phänologische Ablauf wird so spektral als zeitlich genormte Kurve des mittleren NDVI-Verhaltens eines Winterweizenbestandes abgebildet. Bei Kenntnis des abgebildeten Entwicklungszustandes in einer Satellitenaufnahme kann aus dieser Kurve der für diesen Zustand typische Spektralwert entnommen und zur Klassifizierung verwendet werden (ITZEROTT & KADEN 2004 und 2005).

6 Fazit

Moderne Geofernerkundung wird immer mehr auf multitemporale Vorteile abzielen. Dies impliziert eine Vergleichbarkeit der genutzten Bilddaten und erfordert ihre Kalibrierung bis hin zur Zeitschiene. Übertragbare Klassifikatoren werden in den Fokus gerückt, damit auf dieser Basis Monitoringansätze umgesetzt werden können. Die vor-

gestellten Untersuchungen beschäftigen sich mit der Ableitung spektraler Normkurven. Diese stellen zur Zeitachse kalibrierte spektrale Daten zur Verfügung, die in einen universellen Klassifikator eingehen können.

Exemplarisch wird die Vorgehensweise für das Flächennutzungs-Monitoring an der Ackerkultur Winterweizen vorgestellt. Eine Übertragbarkeit ist möglich und wurde für die das Anbauspektrum des Landes Brandenburg bestimmenden Kulturen bereits durch die Autoren vollzogen (ITZEROTT & KADEN 2005). Einflussgrößen auf die Güte der Normkurve sind die exakte Einordnung der spektralen Information der Bilddaten in die Zeit- und Werteskala (unter Verwendung der phänologischen, geometrischen und Atmosphärenkorrektur), die Anzahl der einbezogenen Satellitenaufnahmen (mit der Repräsentanz der entscheidenden phänologischen Phasen) und die Güte der Anbauinformation (mit Anzahl sowie räumlichen und zeitlicher Verteilung der Beispielflächen).

Für die vorgenommene Ableitung der Normkurven stand eine beachtliche Datenbasis zur Verfügung. Dennoch entstehen

Lücken in einzelnen Zeitfenstern. Nachdem für die eingeflossenen Untersuchungsjahre bereits alle zur Verfügung stehenden Szenen des Landsat-Systems genutzt wurden, bedarf es für den Lückenschluss der Nutzung der vorgelagerten Jahre (verbunden mit dem Problem der Beschaffung der Anbauinformationen) oder des Rückgriffs auf andere Aufnahmesysteme (die in ihrer spektralen und radiometrischen sowie ihrer geometrischen Auflösung z. T. erheblich von den genutzten Daten abweichen). Gleichwohl werden die erzeugten Normkurven als tragfähige Grundlage zur Gewinnung genormter Spektralinformationen von Ackerkulturen angesehen. Das ist für Monitoringkonzepte zur Flächennutzung zwingend erforderlich.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel“ durchgeführt (BRONSTERT et al. 2005) und vom BMBF unter dem Kennzeichen 0330227 gefördert.

Literatur

- BARSCH, H. & SÖLLNER, R., 1987: Erfassung von Komponenten der Ertragsbildung in agrotechnischen Geosystemen auf der Grundlage spektraler Signaturen – Ergebnisse des Interkosmos-Experimentes KURSK-85. – Petermanns Geographische Mitteilungen, **131**(1): 41–50.
- BRONSTERT, A. et al., 2005: Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel – Abschlussbericht zum BMBF-Projekt. – Brandenburgische Umweltberichte, im Druck, Potsdam.
- GEIßLER, G., 1983: Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas. – Parey, Berlin.
- GRENZDÖRFFER, G., 1998: Fernerkundung zur teilschlagspezifischen Bewirtschaftung. – Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, **66** (5–6): 135–145.
- ITZEROTT, S. & KADEN, K., 2004: Klassifikation agrarischer Nutzungen unter Verwendung spektraler Normkurven. – Hallesches 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“. unveröff., Potsdam.
- JACKSON, R. D., 1983: Spectral indices in n-space. *Remote Sens. Environ.*, **13**: 409–421.
- KADEN, K., ITZEROTT, S., ZEBISCH, M. & FRITSCHE, U., 1999: Räumliche Unterschiede im Wassertransfer (Boden-Pflanze-Atmosphäre) in Niederungen des mitteleuropäischen Binnentieflandes. – Potsdamer Geographische Forschungen, **B18**, Potsdam.
- KÖNNECKE, G., 1967: Fruchtfolgen. – Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- LUNETTE, R. S., EDIRIWIKREMA, J., JOHNSON, D. M., LYON, J. G. & MC KERROW, A., 2002: Impacts of vegetation dynamics on the identification of land-cover change in a biologically complex community in North Carolina, USA. – *Remote Sens. Environ.*, **82**: 258–270.
- OEHMICHEN, J., 1986: Pflanzenproduktion. Bd. 2. Produktionstechnik. – Parey, Berlin.
- SEIFFERT, M., 1987: Drusch- und Hackfruchtproduktion. – Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- STOLZ, R., 1998: Die Verwendung der Fuzzy Logic Theorie zur wissensbasierten Klassifikation von Fernerkundungsdaten. – Münchner Geographische Abhandlungen, **B 26**, GEOBUCH-Verlag, München.
- THENKABAIL, P. S., SMITH, R. B. & DE PAUW, E., 2000: Hyperspectral vegetation indices and their relationship with agricultural crop characteristics. – *Remote Sens. Environ.*, **71**: 158–182.
- WIEGAND, C. L., RICHARDSON, A. J., ESCOBAR, D. E. & GERBERMANN, A. H., 1991: Vegetation indices in crop assessments. – *Remote Sens. Environ.*, **35**: 105–119.

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,
PF 601553, D-14415 Potsdam,
Tel.: 0331-9772107, Fax: 0331-9772092,
e-mail: kkaden@rz.uni-potsdam.de

Manuskript eingereicht: November 2005
Angenommen: Januar 2006