

Eine Fallstudie zum Einsatz abbildender Spektroskopie in der Grünlandkartierung

SEBASTIAN SCHMIDTLEIN, Bayreuth, SABINE GRABNER & JULIA SASSIN, Innsbruck

Keywords: hyperspectral, vegetation mapping, floristic gradients, DCA, PLS

Zusammenfassung: Die Fernerkundung kann bei der Kartierung von Mustern in der Artenzusammensetzung von Vegetation gute Dienste leisten; Voraussetzung ist allerdings, dass Vegetationsanalyse und bildgebende Verfahren aufeinander abgestimmt sind. Im vorgestellten Beispiel aus Oberbayern wurden zwei nicht-klassifizierende Ansätze miteinander kombiniert, nämlich die Detrended Correspondence Analysis (DCA) aus der Vegetationskunde und die Partial Least Squares (PLS) Regression aus der Spektroskopie. Das Ergebnis ist eine Karte der Bestandesmuster von Streuwiesen, die einen guten Eindruck von den tatsächlichen graduellen Unterschieden in der Zusammensetzung der Vegetationsdecke vermittelt.

Summary: *A case study of imaging spectroscopy as a tool for mapping grassland vegetation.* Remote sensing can be a useful tool for the investigation of patterns in plant species composition. However, a necessary pre-requisite is the matching of methods in field data analysis and image processing. The present study combines two non-classifying approaches: detrended correspondence analysis (DCA) from vegetation science and partial least squares (PLS) regression from spectroscopy. The result is a map of stand patterns in hay meadows that provides a good impression of the real gradual transitions in plant species composition.

Einleitung

Muster von Pflanzengesellschaften sind mit Fernerkundungsmethoden erfassbar, weil sie mit Unterschieden in den biochemischen und biophysikalischen Eigenschaften der Vegetationsdecke einhergehen. Die Übergänge zwischen den Pflanzengesellschaften sind allerdings oft mehr oder weniger allmählich, und manchmal hat man es eher mit einem System von Gradienten in der Artenzusammensetzung zu tun als mit einem Mosaik diskreter Einheiten. Wie scharf die Grenzen zwischen Pflanzengesellschaften sind, hängt vom Betrachtungsmaßstab ab, von den Standortmustern und von der Selbstorganisation in der Vegetation.

Vegetationskundler vereinfachen ihren Gegenstand meist sehr, wenn sie eine Typenzuweisung von Beständen zu Pflanzengesellschaften vornehmen oder wenn sie Pflanzengesellschaften im Raum diskret voneinander

abgrenzen. Je mehr dabei auf gegebener Skalenebene von den tatsächlichen Verhältnissen abgesehen wird, desto schwieriger wird es, solche Einteilungen mit Hilfe der Fernerkundung nachzuvollziehen. Das gilt besonders, wenn die Kriterien der Vereinfachung nicht zwangsläufig etwas mit Reflexionsbestimmenden Merkmalen der Vegetation zu tun haben; in der Pflanzensoziologie werden zum Beispiel „diagnostische“ Pflanzenarten, die zum Teil nur geringen Anteil am Bestandaufbau haben, zur Typenzuordnung herangezogen. Es muss also nicht unbedingt zum Ziel führen, wenn der Erfassung der Vegetation mittels Fernerkundung eine pflanzensoziologische Vorklassifizierung zugrunde gelegt wird.

Nicht-klassifizierende Kennwerte der Vegetationszusammensetzung haben zwei Vorteile: a) Es gehen keine vorgefassten Typen ein und b) die metrisch skalierten Werte können dem teils kontinuierlichen, teils diskon-

tinuierlichen räumlichen Wechsel in der Zusammensetzung der Pflanzendecke gerecht werden.

Im Folgenden wird eine Studie geschildert, in denen Ordinationswerte für eine Kartierung von Pflanzengesellschaften verwendet wurden. Ordinationen bündeln die Information über die Artenzusammensetzung in wenigen Achsenwerten (JONGMAN et al. 1995, LEPŠ & ŠMILAUER 2003). Ihr Einsatz fand in der Fernerkundung bislang wenig Beachtung, und dann nur als Zwischenprodukt und nicht als eigenständiges Werkzeug zur flächenhaften Darstellung von Vegetationsunterschieden (VAN DE VEN & WEISS 2001, OHMAN & GREGORY 2002, ARMITAGE et al. 2004). Das Ziel war, eine Vegetationskarte zu erstellen, die ohne künstliche, diskrete Grenzen auskommt. Dafür wurden die Achsenwerte mit Hilfe eines Regressionsverfahrens in Bezug zur Reflexion gesetzt und in die Fläche übertragen (SCHMIDTLEIN & SASSIN 2004).

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Machtfinger Drumlinfeld bei Andechs (Voralpenland). Die pleistozänen Vergletscherungen hinterließen hier eine Moränenlandschaft mit einem Mosaik aus kalkreichen und lehmigen Substraten unterschiedlicher Feuchte. Die Analysen beschränken sich auf mehrere Streuwiesen, welche traditionell zur Gewinnung von Stalleinstreu gemäht wurden

und heute für Naturschutzzwecke gepflegt werden. Der räumliche Wechsel der Artenzusammensetzung, um dessen Aufnahme es hier ging, vollzieht sich entlang allmählicher Gradienten und ist daher mit konventionellen Methoden kaum zu kartieren.

Bilddaten

Das Bildmaterial wurde mit dem flugzeuggetragenen hyperspektralen Sensor AVIS-2 (OPPELT & MAUSER 2004) der Ludwig-Maximilians-Universität München (Sektion Geographie, Ground Truthing Centre Oberbayern, GTCO) gewonnen. Die Sensor- und Flugparameter sind in Tab. 1 zusammengestellt. Die Vorprozessierung umfasste Flatfield- und Dunkelstrom-Korrektur sowie eine Umrechnung auf 64 spektrale Bänder. Eine Atmosphärenkorrektur war für die Studie im Grunde verzichtbar, erfolgte jedoch im Zuge der am GTCO üblichen Vorprozessierung. Sie fußt auf dem Strahlungstransfer-Modell RSTAR5 (NAKAJIMA & TANAKA 1988), die geometrische Korrektur auf Daten aus digitalen Höhenmodellen sowie auf Messungen an Bord (dGPS und Inertial Measuring Unit, IMU). Die endgültige Referenzierung erfolgte anhand von Orthophotos des Bayerischen Landesvermessungsamtes. Das Bildrauschen wurde im Zuge einer inversen MNF- (Minimum Noise Fraction-) Rotation (BOARDMAN & KRUSE 1994) verringert. Die Reduzierung erfolgte durch Verzicht auf alle MNF-Bänder ohne kohärente räumliche Information. Für alle nachfolgenden Berechnungen wurden

Tab. 1: Sensor- und Flugparameter

Sensor	AVIS-2, Universität München, Sektion Geographie
Betreiber	Ground Truthing Centre Oberbayern, München
Flugzeit (UTC)	4. Juli 2001, 10:00
Bearing, Sonnen-Azimuth, -Höhe	95°, 120°, 53°
Flughöhe über Grund	um 870 m
Fluggeschwindigkeit	45 m sec ⁻¹
Spektralbereich	400–874 nm
Radiometrischer Modus	16 bit
Spektrale Auflösung	FWHM
Spektrale Samples	64 in Intervallen von 7.4 nm
Field of View (FOV)	56°
Bildpixel pro Scanreihe	640
Instantaneous Field of View (IFOV)	1.55 mrad across-track, 2.2 mrad along-track

die Bilddaten $\log_{10}(1/R)$ -transformiert (R = Reflexion). Die so erhaltene „Pseudo-Absorption“ zeigt ein nahezu lineares Verhalten zur tatsächlichen Absorption von Stoffen (KUMAR et al. 2001). Die spektrale Information für die Aufnahme­flächen am Grund wurde dem Bild entnommen. Dafür wurden jeweils die Spektren von 9 umgebenen Bildpunkten gemittelt.

Vegetationsdaten

Die Felddaten zur Zusammensetzung der Pflanzendecke wurden in 37 Aufnahme­flächen mit einer stratifizierten Anordnung erhoben. In den Probeflächen (3 m²) wurden alle auftretenden Gefäßpflanzen mit ihrer Deckung sowie die Gesamtmächtigkeiten von Moos- und Krautschicht notiert. In den Aufnahmen kamen insgesamt 134 Pflanzensippen vor.

Die Transformation zu Ordinations-Achsenwerten erfolgte mit einer Detrended Correspondence Analysis (DCA, HILL & GAUCH 1980). Die DCA errechnet aufgrund der Datenmatrix aus Arten und Aufnahmen unabhängige Gradienten mit maximaler Artendispersion und bildet diese Gradienten als Achsen ab. In dem von den Achsen aufgespannten (virtuellen) Ordinations-Raum sind die Aufnahme­flächen entsprechend ihrer Position auf den Gradienten angeordnet. Die erste Achse steht für die größten Unterschiede in der Artenzusammensetzung (den „längsten“ floristischen Gradienten), die zweite Achse für die größten Unterschiede in der verbleibenden, noch unerklärten Variation, und so fort. Die DCA ist vor allem für Verhältnisse mit „langen“ Gradienten bzw. starken Unterschieden in der Artenzusammensetzung geeignet. Bei „kurzen“ Gradienten bzw. geringfügigen Unterschieden in der Artenzusammensetzung kann sie z. B. durch eine Hauptkomponentenanalyse ersetzt werden (LEPŠ & ŠMILAUER 2003).

Modell

Ordinations-Achsenwerte auf der einen Seite und Spektral­daten auf der anderen Seite wurden durch eine Regressionsanalyse zu-

einander in Bezug gesetzt. Dafür wurde eine Partial Least Squares- (PLS-) Regression verwendet, die den starken Korrelationen zwischen den Spektral­bändern gerecht wird (WOLD 1966, 1981, NAES & MARTENS 1985, MARTENS & NAES 1992, TER BRAAK & DE JONG 1998). Die Qualität der Regressionsmodelle wurde durch eine Beschränkung auf spektrale Bänder mit hoher Aussagekraft verbessert. Diese Bänder wurden anhand der gewichteten Regressionskoeffizienten und anhand von Martens' Unsicherheitstest bestimmt (MARTENS & MARTENS 2000, DAVIES 2001). Die Regressionsgleichungen aus den PLS-Regressionen wurden dazu verwendet, um aus den Bilddaten Karten abzuleiten. Die Überprüfung der Modellqualitäten erfolgte über Kreuzvalidierungen.

Ergebnisse

Felddaten und Ordination

Die ersten drei Achsen der DCA standen für 63% der Variation in der Artenzusammensetzung. Die dritte Achse machte davon nur 3% aus. Die beiden ersten, in Abb. 1 gezeigten Achsen repräsentieren die wichtigsten Gradienten in den untersuchten Aufnahme­flächen. Die Aufnahme­flächen sind als Punkt­signaturen wiedergegeben wobei die Punkt­stärken für die Deckung von ausgewählten Arten stehen. Die Darstellung dieser typischen Arten verbildlicht das Auftreten von Vegetationstypen entlang der Achsen.

Achse 1 spiegelt eine Abnahme im Auftreten von Arten kalkreicher (Abb. 1, links) und kalkarmer Standorte (rechts). Im Zentrum der Ordination stehen typische Pfeifengras-Streuwiesen, links Übergänge zu Kalkflachmooren. Rechts differenziert Achse 2 zwischen Aufnahmen in nährstoffreichen Wiesen (Abb. 1, unten) und Aufnahmen in armen, sauren Sümpfen (Abb. 1, oben). Am Beginn von Achse 2 stehen Kohldistelwiesen, am Ende Riede mit Schnabelsegge und Schmalblättrigem Wollgras. Die Verteilung der diagnostischen Arten zeigt, dass die Vegetationstypen nicht abrupt voneinander geschieden sind.

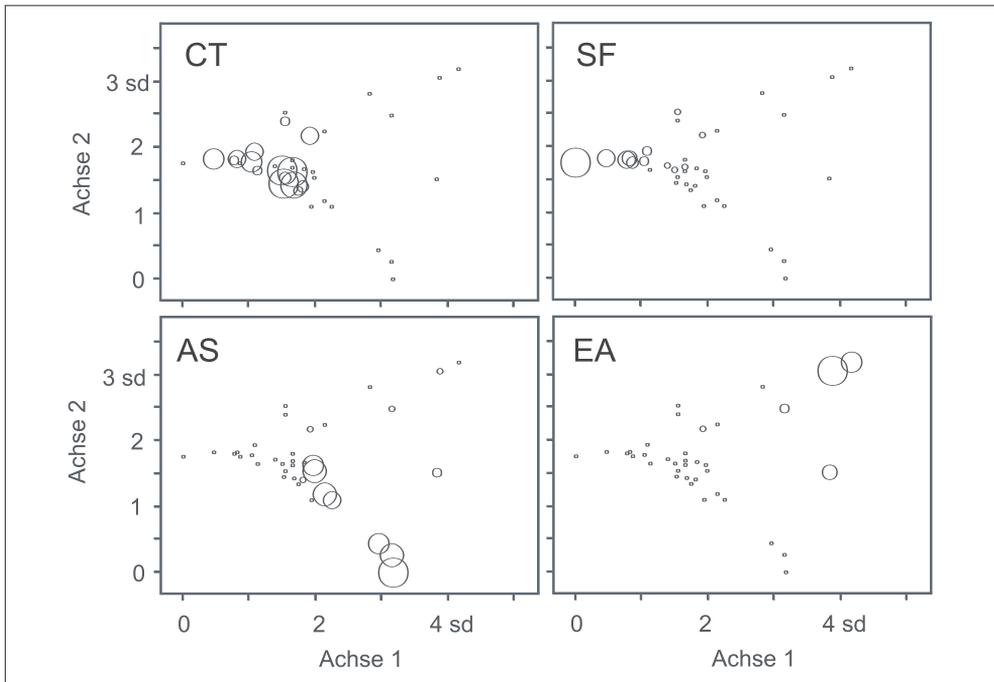


Abb. 1: Biplots mit den ersten zwei Achsen der Ordination (DCA) und der Lage der Aufnahmeflächen im Ordinationsraum (Kreissignaturen). Die Punktgrößen verbildlichen die Deckung einiger diagnostischer Pflanzenarten. CT = *Cirsium tuberosum* (L.) All. für die Pfeifengras-Streuwiesen (*Molinietum caeruleae* W. KOCH 1926), SF = *Schoenus ferrugineus* L. für die Übergänge zu den Kalkflachmooren (*Caricion davallianae* Klika 1934), AS = *Angelica sylvestris* L. für die Kohldistelwiesen (*Angelico-Cirsietum* R. Tüxen 1937), EA = *Eriophorum angustifolium* Honck. für die Schnabelseggen-Wollgras-Riede (*Carex rostrata-Eriophorum angustifolium*-Gesellschaft). sd = Standardabweichung in der Artendispersion, Skalierungen der Kreissignaturen: AS = 0–2.7% Deckung, CT = 0–2.7%, EA = 0–58%, SF = 0–41%; nach SCHMIDTLEIN & SASSIN (2004).

Vegetation und Reflexion

Die modellierten floristischen Gradienten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den im Feld beobachteten Gradienten ($R^2 = 0,71$ und $0,66$ für die beiden DCA-Achsen, Abb. 2). Die Fehler in der Kreuzvalidierung (*root mean square errors*) belaufen sich auf $0,51$ sd bzw. $0,37$ sd (sd = Standardabweichung in der Artendispersion entlang der Achsen – 4 sd stehen für die Spanne einer Art entlang einer Achse; HILL & GAUCH 1980). Die Modellfehler betragen also bis rund $1/8$ einer Artenspanne. Die Fehler waren dabei nicht gleichmäßig verteilt sondern konzentrierten sich in den verhältnismäßig wenig durch Aufnahmen repräsentierten Einheiten an den extremen Enden der Gradienten.

Wichtige Wellenlängen für die Vorhersage der ersten DCA-Achse lagen im Bereich um den Red Edge (716–738 nm), im sichtbaren Rot (648–686 nm) und im nahen Infrarot um 850 nm. Die zweite Achse war besonders gut durch Unterschiede in der Grün- und Blaufärbung um 520–565 und unter 437 repräsentiert. Unterschiede in allen diesen Bereichen können auf Unterschiede in biochemischen und biophysikalischen Merkmalen der Vegetationsdecke bezogen werden. So werden beide DCA-Achsen offenbar durch Variationen im Chlorophyllgehalt und korrelierten Variablen wie Blattflächenindex und Stickstoffgehalt gekennzeichnet (z. B. GUYOT et al. 1992, YODER & PETTIGREW-CROSBY 1995, THENKABAIL et al. 1999, CLEVERS & JONGSCHAAP 2001, HANSEN &

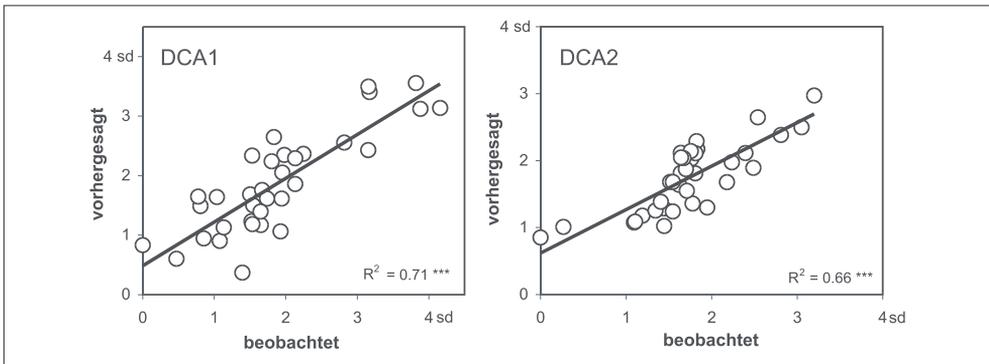


Abb. 2: Ergebnis der Kreuzvalidierung des Regressionsmodells für die Vorhersage von DCA-Achsenwerten. In der Kreuzvalidierung werden reihum alle Feldaufnahmen aus der Modellkalibrierung ausgeschlossen. Die dann für die entsprechende Aufnahme vorhergesagten Werte liegen der Validierung zugrunde. Nach SCHMIDTLEIN & SASSIN (2004).

SCHJOERRING 2003), was gut zu den im Feld beobachteten Trends in der Wüchsigkeit, Dichte und Hartlaubigkeit der Pflanzendecke passt.

Die Übertragung der Ordinationswerte von den Feldaufnahmen in die Fläche erbrachte Muster, die in Feldbeobachtungen weitgehend verifiziert werden konnten. Das Kartenbeispiel in Abb. 3 zeigt zwei der Pfeifengras-Streuwiesen mit verschiedenen, ineinander übergehenden floristischen Ausbildungen.

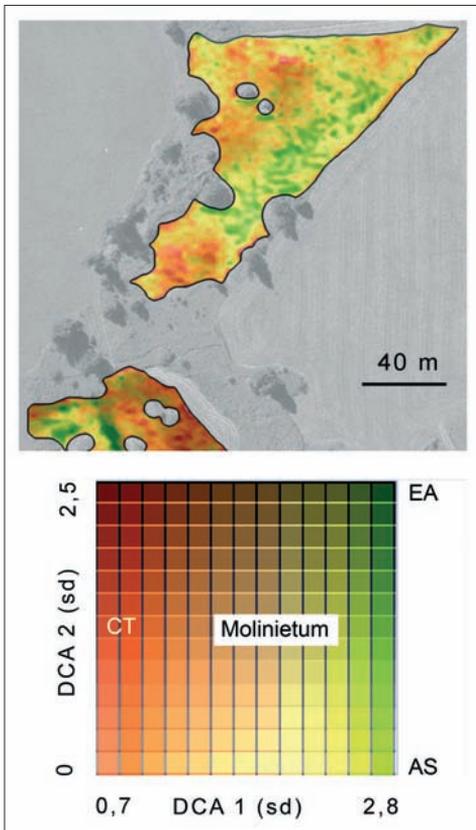


Abb. 3: Ausschnitt aus der Karte der Pflanzengesellschaften. Die Legende zeigt den von den zwei ersten Achsen der Ordination aufgespannten Merkmalsraum. Die erste Achse (DCA 1, rot bis grün) steht für die größten Unterschiede in der Artenzusammensetzung, die zweite (DCA 2, Helligkeitsverlauf) für die größten Unterschiede in der verbleibenden, noch nicht erklärten Variation. Jede Farbe repräsentiert eine Artenkombination. Der gezeigte Ausschnitt umfasst verschiedene Typen der Pfeifengrasstreuwiesen (*Molinietum caeruleae* W. KOCH 1926) und ihre Übergänge: Der linke Bereich der Ordination umfasst eine Ausbildung mit *Cirsium tuberosum* (CT), nach Rechts schließen sich die Übergänge zu den Schnabelseggen-Wollgras-Rieden (EA) und den Kohldistelwiesen (AS) an. Die zuletzt genannten Einheiten selbst kommen im dargestellten Ausschnitt nicht vor.

Diskussion

Die Fernerkundung tut sich mit der Kartierung von Artenzusammensetzungen der Vegetation besonders schwer (LEWIS 1998). Dies kann daran liegen, dass die verwendeten Methoden der Vegetationskunde und der Fernerkundung nicht kompatibel sind (ebd.). Das in diesem Aufsatz gezeigte Beispiel führt vor Augen, dass die Fernerkundung bei sorgfältiger Methodenkombination besonders auch in Fällen mit unscharf abgegrenzten Vegetationstypen eine Hilfe sein kann.

Auf Seiten der Vegetationskunde stehen verschiedene Klassifikationsansätze zur Auswahl, von denen der im deutschsprachigen Raum dominierende pflanzensoziologische Ansatz (MÜLLER-DOMBOIS & ELLENBERG 1974, DIERSCHKE 1994) gewiss einer derjenigen ist, die am wenigsten mit Fernerkundungsmethoden kompatibel sind: Der Pflanzensoziologie liegen, wie oben bereits angesprochen, Kriterien zugrunde, die für Reflexionsmerkmale irrelevant sein können. Neben den Klassifikationsansätzen gibt es in der Vegetationskunde ein breites Spektrum von Ordinationsmethoden (JONGMAN et al. 1995, MCCUNE et al. 2002, LEPŠ & ŠMILAUER 2003). Sie werden dem teilweisen

Kontinuumcharakter der Vegetation (AUSTIN & SMITH 1989) besser gerecht als Klassifikationen. Für Kartierzwecke sind dabei vor allem solche Verfahren interessant, die explizit Gradienten in der Vegetationszusammensetzung adressieren (SCHMIDTLEIN & SASSIN 2004). Eines dieser Ordinationsverfahren ist die im Beispiel verwendete Detrended Correspondence Analysis (DCA, HILL & GAUCH 1980).

Wie in der Vegetationskunde stehen auch in der Bildverarbeitung klassifizierende und nicht-klassifizierende Ansätze zur Verfügung. Der Sinn von Klassifizierungen ist Vereinfachung; kombiniert man Klassifikationen der Vegetationskunde mit solchen der Bildverarbeitung, vervielfachen sich die Abweichungen von der Realität. Im vorgestellten Beispiel wurden deswegen zwei nicht-klassifizierende Verfahren miteinander kombiniert, nämlich DCA und Partial Least Squares-Regression (PLS, WOLD 1966).

Neben der DCA gibt es Ordinationsverfahren wie die Kanonische Korrespondenzanalyse (CCA, TER BRAAK 1986), die die Arten-Aufnahmenmatrix unmittelbar mit der Reflexion oder abgeleiteten Hauptkomponenten in Bezug setzen. Dem zweistufigen Vorgehen (erst Ordination, dann Regression) wurde hier aufgrund der größeren Fle-

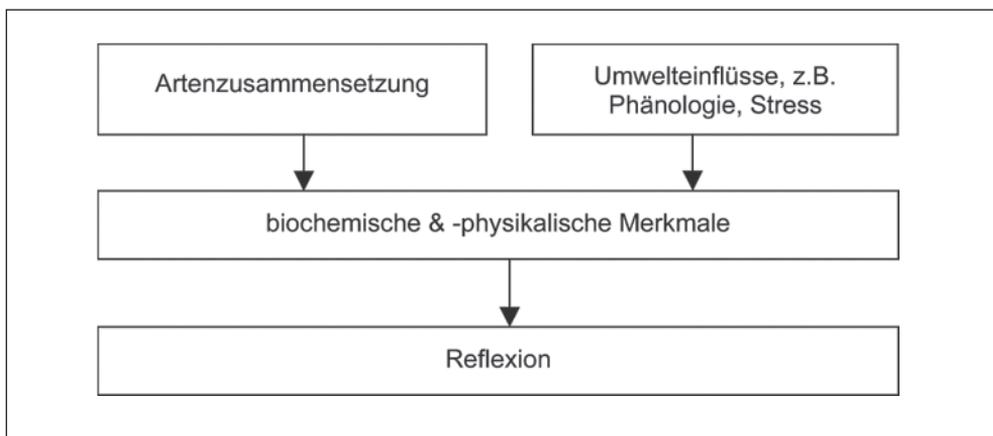


Abb. 4: Der Einfluss von Umwelteinflüssen auf die biochemischen und biophysikalischen Merkmale der Vegetationsdecke verbietet eine Generalisierung des Verhältnisses zwischen Artenzusammensetzung und Reflexion. Deshalb sind bei jeder neuen Aufnahme Feldaufnahmen zur Neukalibrierung unverzichtbar.

xibilität in beiden Schritten der Vorzug gegeben. Die Kartierung von Achsenwerten aus Ordinationen erwies sich im Beispiel als gut geeignet, um Muster in der Vegetationszusammensetzung abzubilden. Dabei ist zu beachten, dass Achsenwerte in Ordinationen keine absoluten Werte darstellen, sondern unter veränderten Vegetationsverhältnissen Unterschiedliches bezeichnen. Die entsprechenden Grauwerte stehen also in unterschiedlichen Datensätzen für unterschiedliche Artenkombinationen, und dies gilt auch für aufeinander folgende Zeitschnitte am gleichen Ort. Für solche Vergleiche ist die Anwendung von einer Ordination auf die Felddaten von mehreren Zeitschnitten zu empfehlen.

Der Vergleich der für die Vorhersage von Vegetationsgradienten wichtigen Wellenlängenbereiche mit den aus der Literatur bekannten spektralen Merkmalen von biochemischen und biophysikalischen Parametern zeigte erwartungsgemäß deren steuernden Einfluss. Der Zusammenhang zwischen Gradienten und Reflexion ist freilich kein zwingender – die gleiche Artenzusammensetzung kann unter anderen Rahmenbedingungen (Phänologie, Stress) abweichende reflexionsbestimmende Merkmale aufweisen (Abb. 4). Dieser Umstand führt dazu, dass bei Aufnahmen an einem neuen Ort oder nach einem Zeitraum, in der sich die Artenzusammensetzung geändert haben kann, neue Feldaufnahmen nötig sind um den Bezug herzustellen. Es ist auch denkbar, dass phänologische Prozesse Gradienten verwischen. Ein multitemporaler Ansatz könnte helfen, die Methode zu verbessern. Dies soll in weiteren Untersuchungen geprüft werden.

Danksagung

Die Autoren danken den Kollegen von der Ludwig-Maximilians-Universität München, Sektion Geographie, Ground Truth Centre Oberbayern, wo ein Teil der Fallstudie entstand.

Literatur

- ARMITAGE, R.P., KENT, M. & WEAVER, R.E., 2004: Identification of the spectral characteristics of British semi-natural upland vegetation using direct ordination: a case study from Dartmoor, UK. – *International Journal of Remote Sensing* **25**: 3369–3388.
- AUSTIN, M.P. & SMITH, T.M., 1989: A new model for the continuum concept. – *Vegetatio* **83**: 35–47.
- BOARDMAN, J.W. & KRUSE, F.A., 1994: Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada. – In: Proceedings, ERIM 10th thematic conference on geologic remote sensing, S. 407–418. Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI.
- CLEVERS, J.P. & JONGSCHAAP, R., 2001: Imaging spectrometry for agricultural applications. – In: VAN DER MEER, F.D. & JONG, S.M. (eds.): *Imaging spectroscopy*. – p. 157–199, Kluwer Academic Press, Dordrecht, Netherlands.
- DAVIES, H.C., 2001: Uncertainty testing in PLS regression. – *Spectroscopy Europe* **13**: 16–19.
- DIERSCHKE, H., 1994: *Pflanzensoziologie. Grundlagen und Methoden*. – 683 S., UTB, Ulmer, Stuttgart.
- GUYOT, G., BARET, F. & JACQUEMOUD, S., 1992: *Imaging spectroscopy for vegetation studies*. – In: TOSELLI, F. & BODECHTEL, J. (eds.): *Imaging spectroscopy: fundamentals and prospective applications*, S. 145–165, Kluwer Academic Publications, Dordrecht, Netherlands.
- HANSEN, P.M. & SCHOERRING, J.K., 2003: Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. – *Remote Sensing of Environment* **86**: 542–553.
- HILL, M.O. & GAUCH, H.G., 1980: Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. – *Vegetatio* **42**: 47–58.
- JONGMAN, R.H.G., TER BRAAK, C.J.F. & VAN TONGEREN, O.F.R. (Hrsg.), 1995: *Data analysis in community and landscape ecology*. – 299 p., Cambridge University Press, Cambridge.
- KUMAR, L., SCHMIDT, K., DURY, S. & SKIDMORE, A., 2001: *Imaging spectrometry and vegetation science*. – In: VAN DER MEER, F.D., & DE JONG, S.M. (eds.): *Imaging spectroscopy. Basic principles and prospective applications*. – p. 111–155, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- LEPŠ, J. & ŠMILAUER, P., 2003: *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO*. – 269 p., Cambridge University Press, Cambridge.

- LEWIS, M.M., 1998: Numeric Classification as an Aid to Spectral Mapping of Vegetation Communities. – *Plant Ecology* **136**: 133–149.
- MARTENS, H. & MARTENS, M., 2000: Modified Jack-knife estimation of parameter uncertainty in bilinear modelling by partial least squares regression (PLSR). – *Food Quality and Preference* **11**: 5–16.
- MARTENS, H. & NAES, T., 1992: *Multivariate calibration*. – Wiley, Chichester, UK.
- MCCUNE, B., GRACE, J.B. & URBAN, D.L., 2002: *Analysis of ecological communities*. – 300 p., Mjrm Software Design, Gleneden Beach, OR.
- MÜLLER-DOMBOIS, D. & ELLENBERG, H., 1974: *Aims and methods of Vegetation Ecology*. – 547 p., John Wiley and Sons, New York.
- NAES, T. & MARTENS, H., 1985: Comparison of prediction methods for multicollinear data. – *Communications in Statistics, Simulation and Computation* **14**: 545–576.
- NAKAJIMA, T. & TANAKA, M., 1988: Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using truncation approximation. – *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **40**: 51–69.
- OHMAN, J.L. & GREGORY, M.J., 2002: Predictive mapping of forest composition and structure with direct gradient analysis and nearest-neighbor imputation in coastal Oregon, U.S.A. – *Canadian Journal of Forest Research* **32**: 725–741.
- OPPELT, N. & MAUSER, W., : Hyperspectral monitoring of physiological parameters of wheat during a vegetation period using AVIS data. – *International Journal of Remote Sensing* **25**: 145–159.
- SCHMIDTLEIN, S. & SASSIN, J., 2004: Mapping of continuous floristic gradients in grasslands using hyperspectral imagery. – *Remote Sensing of Environment* **92**: 126–138.
- TER BRAAK, C.J.F., 1986: Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. – *Ecology* **67**: 1167–1179.
- TER BRAAK, C.J.F. & DE JONG, S.M., 1998: The objective function of partial least squares regression. – *Journal of Chemometrics* **12**: 41–54.
- THENKABAIL, P.S., SMITH, R.O. & DE PAUW, E., 1999: Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. – *Remote Sensing of Environment* **71**: 158–182.
- VAN DE VEN, C.M. & WEISS, S.B., 2001: Mapping arid vegetation species distributions in the White Mountains, eastern California, using AVIRIS, topography, and geology. – In: *AVIRIS Proceedings: May 20 and 21, 1991*. – Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA.
- WOLD, H., 1966: Estimation of principal components and related models by iterative least squares. – In: KRISHNAIAH, P.R. (ed.): *Multivariate Analysis*. – p. 391–420. Academic Press, New York.
- WOLD, H., 1981: *The fix-point approach to interdependent systems*. – North Holland, Amsterdam.
- YODER, B.J. & PETTIGREW-CROSBY, R.E., 1995: Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400–9,500 nm) at leaf and canopy scales. – *Remote Sensing of Environment* **53**: 199–211.

Anschriften der Autoren:

Dr. SEBASTIAN SCHMIDTLEIN
 Universität Bayreuth, Biogeographie
 D-95440 Bayreuth, e-mail:
 sebastian.schmidtlein@uni-bayreuth.de

Mag. Dr. SABINE GRABNER
 Leopold Franzens Universität Innsbruck
 Institut für Botanik, Sternwartestr. 15
 A-6020 Innsbruck,
 e-mail: sabine.grabner@uibk.ac.at

Mag. JULIA SASSIN
 Leopold Franzens Universität Innsbruck,
 Institut für Botanik, Sternwartestr. 15
 A-6020 Innsbruck,
 e-mail: julia.sassin@gmx.de

Manuskript eingereicht: Januar 2005
 Angenommen: März 2005