

Spektrale Entmischung von Reflexionssignaturen zur Ermittlung von Leguminosenanteilen in Futterbaubeständen

THORSTEN MEWES, STEFAN ERASMI, MARTIN KAPPAS, Göttingen & SONJA BIEWER, THOMAS FRICKE, MICHAEL WACHENDORF, Kassel

Keywords: Remote Sensing, Fieldspectrometry, Spectral Mixture Analysis, Grassland

Summary: *Spectral Mixture Analysis (SMA) of reflectance curves from Legume-Grass-Plots for the analysis of species composition in forage production.* This paper focuses on the detection of individual fractions of legume and grass species based on *Spectral Mixture Analysis* of remotely sensed, non-imaging data. In 2005 one glass-house-experiment and one field-experiment were built up and continuous measurements and samples were taken for subsequent comparison. Marked crop-plots were spectrally recorded with the fieldspectrometer ASD Fieldspec[®] Pro JR and subsequently harvested for laboratory analysis. In the first step the reflection signatures were smoothed by the adaptive Savitzky-Golay-Filter and evaluated for inaccurate data by means of descriptive statistics. After reduction to relevant wavelength-ranges the spectra were unmixed to their pure components (endmembers). One of the basic steps here is the selection of accurate endmembers. The endmembers have to represent one fraction in an appropriate manner. The results show the possibilities and limits of the method with fieldspectrometrical data with focus on their usage for site specific forage production. Good relations could be found for the data of the glass-house-experiment, whereas the data from the field-experiment show deficiencies, mainly due to high weed rates and a more complex stand structure.

Zusammenfassung: Im Futterbau kann die genaue Kenntnis über die Zusammensetzung der Pflanzenbestände helfen, um Stoffflüsse abzuschätzen und situativ mit geeigneten Methoden reagieren zu können. Dabei kommt der Bestimmung der einzelnen Fraktionsanteile in Gemengeansaaten eine hohe Bedeutung zu. Um den Einfluss der Gemengezusammensetzung auf deren Futterqualität zu untersuchen, wurde im Jahr 2005 zunächst ein systematischer Gefäß- und daran anschließend ein Feldversuch angelegt, die in regelmäßigen Abständen während der Wachstumsphase beprobt wurden. Abgesteckte Bestandsausschnitte wurden mit dem Feldspektrometer ASD Fieldspec[®] Pro JR erfasst und im Anschluss für Laboranalysen abgeerntet. Als Methode für die Abschätzung der Fraktionen von Gräsern und Leguminosen in unterschiedlichen Ansaaten aus Spektraldaten wurde die Lineare Spektrale Entmischung verwendet. Der wichtigste Schritt hierbei ist die Auswahl geeigneter Endmember, also repräsentativer Reflexionssignaturen einer Fraktion. Die Ergebnisse zeigen die Möglichkeiten der Linearen Spektralen Entmischung (SMA) mit dem Fokus auf deren Einsatz im Futterbau auf. Für den Gefäßversuch konnten statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen Bestandsdaten und Endmember-Abundanzen nachgewiesen werden, während die Ergebnisse aus dem Feldversuch überwiegend wegen der komplexen Bestandsstruktur nur bedingt übertragbar sind.

1 Einleitung

Seit Beginn der 90er Jahre sind Begriffe wie integrative Landwirtschaft und ökologischer Landbau zu festen Bestandteilen in der Agrarlandschaft geworden. Dem Anbau von Leguminosen kommt dabei besonders

im ökologischen Futterbau eine zentrale Rolle zu. Die mit ihnen in Symbiose lebenden Knöllchenbakterien fixieren Stickstoff aus der Luft und stellen diesen der Pflanze zu Verfügung. Dies stellt eine Form der natürlichen Düngung dar (OEHMICHEN & LÜTKE ENTRUP 2000).

Der Anteil von Leguminosen im Gemenge kann durch ihre Fähigkeit Stickstoff aus der Luft zu fixieren den Ertrag stark beeinflussen. (BIEWER et al. 2005). Zum Thema Optimierung der Gemengeanteile sind zahlreiche Publikationen erschienen (u. a. CARLSSON et al. 2003, KUNELIUS et al. 2006, MCKENZIE et al. 2005), im Freiland unterliegen sie jedoch den Witterungs- und Standortbedingungen, so dass die Artenanteile bei der Aussaat die endgültige Bestandszusammensetzung nicht direkt bestimmen. Zur Förderung und Optimierung des Ertrags erwünschter Pflanzenarten bedarf es der teilflächenspezifischen Kenntnis der Fraktionsanteile während des Anbauzyklus (WACHENDORF 2005). Deren Bestimmung auf konventionelle Art durch destruktive Verfahren (Teilernte und Bestandsanalyse) ist jedoch mit sehr hohem Arbeits- und Zeitaufwand verbunden.

Der Einsatz spektraler Sensoren in der Landwirtschaft wird bereits seit den 90er Jahren in zahlreichen Studien vor dem Hintergrund der teilflächenspezifischen Bewertung im konventionellen Ackerbau intensiv untersucht (u. a. UDELHOVEN et al. 2003, JARMER et al. 2003) und deren Nutzen z. T. kontrovers diskutiert (u. a. ITZEROTT et al. 2006). Hinsichtlich der Aufnahmetechnik lassen sich hierbei grundsätzlich abbildende (Kameras, Scanner) und nicht-abbildende Aufnahmeverfahren (Spektrometer) unterscheiden. Die potenziellen Anwendungsbereiche dieser Verfahren decken das gesamte Spektrum der ackerbaulichen Maßnahmen von der Einsaat über die Bestandspflege (Pflanzenschutz, Düngung) bis hin zur Ernteprognose ab (siehe z. B. GERHARDS et al. 2005, NORDMEYER 2006, GOEL et al. 2003). In der Graslandwirtschaft lag der Fokus der Untersuchungen in der Vergangenheit auf der Erkennung von Unkräutern (GEBHARDT et al. 2006, GEBHARDT & KÜHBAUCH 2007) und der Ertragsschätzung. Insgesamt liegen aber bisher nur wenige Studien vor, die die Möglichkeiten des Einsatzes von Fernerkundungsdaten zur Abschätzung von qualitativen Bestandsparametern und damit zur Optimierung von Anbauprozessen in der Graslandwirtschaft untersuchen. Die vorlie-

gende Studie untersucht vor diesem Hintergrund die generellen Zusammenhänge zwischen spektraler Messung und der Artenzusammensetzung von Leguminosen-/Gras-Beständen. Voruntersuchungen zur vorliegenden Arbeit zeigten, dass Leguminose-Gras-Gemenge generell höhere Erträge liefern als Reinsaaten von Gräsern oder Leguminosen und dass spektrale Indikatoren prinzipiell geeignet sind, um die Futterquantität (Biomasse) zu schätzen (BIEWER et al. 2005). Aufbauend auf diesen Erkenntnissen untersucht der vorliegende Beitrag die Möglichkeiten der Schätzung von Bestandsfraktionen in Leguminose-Gras-Gemenge und damit der Futterqualität aus spektraler Information.

Das Ziel der Studie ist, ein Messverfahren zur teilflächenbezogenen Bestimmung von Gemengeanteilen in Grünlandbeständen aus spektral hochaufgelöster Information zu entwickeln. Hierzu wurde die Methode der linearen spektralen Entmischung (spectral mixture analysis, SMA) angewendet.

2 Versuchskonzept und Datenerfassung

Für die Datenerhebung mit dem Spektrometer ASD Fieldspec[®] Pro JR konnte auf einen systematischen Gefäß- und einen Feldversuch zurückgegriffen werden. Der Gefäßversuch wurde am 08. 11. 2004 angelegt und nach 63 Tagen beprobt. Es wurden folgende Arten in vier Wiederholungen angesät (vgl. Tab. 1): Deutsches Weidelgras (*Lolium perenne* L.), Weißklee (*Trifolium repens* L.), Ackerrotklee (*Trifolium pratense* L.) und Luzerne (*Medicago sativa* L.). Alle vier Arten wurden sowohl im Gemenge als auch in Reinsaat angesät. Zusätzlich wurden noch zwei Varianten ohne Ansaat angelegt, eine um die im verwendeten Mutterboden ohne Selektion vorhandenen Beikräuter zu erfassen und eine reine Bodenvariante die bestandsfrei gehalten wurde. Die Aussaat der Gemengevarianten wurde im Abstand von zwei Wochen viermal wiederholt, um zur Ernte unterschiedliche Altersstufen der Bestände erfassen zu können (21, 35, 49 bzw. 63 Tage nach Ansaat). Die Ansaatstär-

Tab. 1: Varianten – Gefäßversuch 2005 und Freilandversuch 2006.

Var.	Typ	Angesäte Arten	Gefäßv.	Feldv.
1	Reinsaat	Deutsches Weidelgras (20 kg/ha bzw. 25 kg/ha)	X	X
2	Reinsaat	Rotklee (8 kg/ha)	X	X
3	Reinsaat	Weißklee (4 kg/ha)	X	X
4	Reinsaat	Luzerne (16 kg/ha)	X	X
5	Saatgemenge	Dt. WG (20 bzw. 25 kg/ha) & Rotklee (8 kg/ha)	X	X
5b	Saatgemenge	Dt. WG (20 bzw. 25 kg/ha) & Rotklee (2 kg/ha)	X	–
6	Saatgemenge	Dt. WG (20 bzw. 25 kg/ha) & Weißklee (4 kg/ha)	X	X
7	Saatgemenge	Dt. WG (20 bzw. 25 kg/ha) & Luzerne (16 kg/ha)	X	X

ke des Weidelgrases betrug 20 kg/ha, die Leguminosen wurden in individuellen Ansaatstärken ausgebracht, wobei bei Rotklee zwei unterschiedliche Mengen verwendet wurden. Hieraus resultiert eine Anzahl von 4 Gemengevarianten für jeden der vier Ansaattermine.

Die Pflanzenbestände wuchsen in Holzkisten der Größe 70 × 70 × 20 cm (B × H × T). Jedes Holzgefäß wurde mit 2 cm Drainsubstrat (Lavagrus) und ca. 16 cm Boden befüllt (pseudovergleyte Parabraunerde, bzw. homogenisierter feinkrümeliger Boden für die Bodenvariante, siehe BIEWER et al. 2005). Im Anschluss an die Messungen mit dem Feldspektrometer wurden die Bepflanzungskästen oberirdisch abgeerntet und die Bestandsdaten Biomasse-feucht (FM) sowie Biomasse-trocken (TM) jeweils für die Gesamtmasse als auch für die einzelnen Fraktionen bestimmt.

Im Feldversuch wurden insgesamt elf verschiedene Varianten zu vier verschiedenen Messterminen (69, 78, 91 und 123 Tage nach der Ansaat) beprobt, wovon allerdings nur sieben Varianten für einen direkten Vergleich mit dem Gefäßversuch in Frage kamen (vgl. Tab. 1). Im Unterschied zum Gefäßversuch betrug die Ansaatstärke des Weidelgrases im Feldversuch 25 kg/ha und das Saatgemenge Weidelgras/Rotklee lag nur in einer Variante vor. Sämtliche Varianten wurden in vier Wiederholungen angelegt. Hieraus ergibt sich ein Stichprobenumfang

n = 12 für die Saatgemenge für jeden Messtermin (3 Gemengevarianten à 4 Parallelen).

Für die Datenerfassung im Gefäßversuch wurde jeder Pflanzenkasten in vier Quadranten unterteilt. Jeder Quadrant wurde anschließend als separate Messung erfasst. Die Bepflanzungskästen wurden über zwei Kunstlichtquellen (Quartz-Tungsten-Halogen-Lampe) mit konstanter Strahldichte ausgeleuchtet, welche im Wellenlängenbereich zwischen 350 und 2500 nm die solare Einstrahlung simuliert. Der Messaufbau wurde über den Zeitraum der Messkampagne konstant gehalten. Die Verwendung von zwei Lichtquellen verfolgte das Ziel, die direktionale Komponente der Strahlung zu verringern und damit den Effekt der Beschattung bei der Aufnahme der Spektralsignaturen zu minimieren. Hierzu wurden die Beleuchtungsquellen aus einer Höhe von 110 cm mit einem Zenitwinkel von 40° aus gegenüber liegenden Richtungen so auf die Bestände gerichtet, dass der gerichtete Lichtstrahl jeweils die näher gelegene Hälfte des Bepflanzungskastens ausleuchtete. Um in allen vier Quadranten jeweils von einer Lichtquelle direkte Strahlung zu empfangen wurden die Pflanzkästen auf Rollwagen unter der Messvorrichtung parallel zur Beleuchtungsachse geschoben. Die Messungen mit dem Feldspektrometer erfolgten aus einer Aufnahmehöhe von 60 cm über dem Bodenmaterial. Die Normalisierung der Strahldichtemessungen erfolgte über die

vorgeschaltete Messung eines Weißstandards (30 × 30 cm, Polytetrafluoroethylen, Fa. Labsphere Inc.) bei gleich bleibender Aufnahmekonfiguration.

Im Gegensatz zum Gefäßversuch steht im Feldversuch die Sonne als Lichtquelle zur Verfügung, was aufgrund des variablen Azimut- und Zenitstands der Sonne sowie der inhomogenen Trübung der Atmosphäre eine systematische Versuchsdurchführung erschwert. Um die Schwankungen der Umgebungsvariablen so gering wie möglich zu halten, wurden sämtliche Messungen zur Mittagszeit durchgeführt, da hier die geringste Abweichung vom Zenitwinkel und potenziell der größte Strahlungsfluss vorliegt. Die Beprobungsflächen hatten jeweils eine Größe von 50 × 50 cm, die durch die spektrale Messung bestmöglich erfasst werden sollte. Die Aufnahmehöhe für die Strahllichtheitsmessungen lag entsprechend im Feldversuch bei 90 cm über dem Boden.

3 Datenprozessierung

Die Datenvorprozessierung beinhaltet verschiedene Arbeitsschritte, die primär die Minimierung der Störeinflüsse bei der Datenaufnahme zum Ziel hatten. Signalstörungen haben ihren Ursprung entweder in systemspezifischen Beschränkungen (z. B. Signal-Rausch-Verhältnis) oder in Schwankungen der Umgebungsvariablen (z. B. atmosphärischer Wassergehalt). Hierzu wurden die Spektralsignaturen zunächst einer nicht-linearen Frequenz-Filterung unter der Annahme eines Polynoms fünfter Ordnung mit einem Filterfenster von 11 Stützstellen unterzogen (vgl. SAVITZKY & GOLAY 1964).

Nach der Datenglättung wurde das Signal-Rausch-Verhältnis untersucht. Dies erfolgte mittels Berechnung des spektralen Variationskoeffizienten (cv) über die Wiederholungsmessungen für jede einzelne Probe ($n = 4$) und der empirischen Definition eines Grenzwertes für cv (cv_{max}). Hat der Wert dabei den definierten Grenzwert cv_{max} überschritten, wurden die betreffenden Wellenlängenbereiche ausgeschlossen, da ihr Einfluss auf die Definition spektraler Endmember zu groß wäre und die Ergebnisse verfä-

len würde. Durch die Analyse der Variationskoeffizienten wurden die Daten für den Gefäß- sowie für den Feldversuch auf die Spektralbereiche des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots (355–1349 nm) sowie des kurzwelligen Infrarots (1450–1799 nm) beschränkt. Zu Zwecken der Datenreduktion und Minimierung von Redundanzen wurde der Datensatz für die weitere Bearbeitung auf 10 nm Stützstellenabstand reduziert.

Die Schätzung der Abundanzen von Gemengeanteilen aus Spektraldaten erfolgte auf Basis der Methode der SMA. Der Ansatz der SMA in der Fernerkundung geht ursprünglich auf die Auswertung räumlich expliziter Abbildungen zurück und die Problematik, dass multispektrale Sensoren in der Regel durch die begrenzte räumliche Auflösung nicht in der Lage sind, die kleinräumige Heterogenität eines Landschaftsausschnittes zu erfassen. Das Ergebnis sind Mischspektren aus Reflektanzen verschiedener Oberflächentypen. Die SMA geht davon aus, dass sich ein Mischspektrum linear aus mehreren Einzelspektren, so genannten Endmemberanteilen zusammensetzt (ADAMS 1986). Sind die Endmember (Spektren homogener Oberflächen) bekannt, lassen sich theoretisch über die SMA die Anteile dieser am Mischspektrum berechnen, und so das räumliche Detail einer Sensoraufnahme verbessern (NICHOL 2007). Dieser Ansatz lässt sich ohne weiteres auf nicht-abbildende Daten, wie die hier vorliegenden Spektralsignaturen übertragen. Hierbei setzt sich jedes Spektrum generell aus den Endmembern Leguminose, Gras und Boden zusammen. Der Prozess der Spektralen Entmischung für den hier vorliegenden Fall wird durch Abb. 1 veranschaulicht. Gemengeplot A bzw. B stehen je für einen imaginären Messwert, die hinsichtlich ihrer Lage in dem durch ausgewählte Endmember abgesteckten Bereich im n -dimensionalen Raum geprüft werden. Das Resultat der SMA sind normierte Abundanzwerte (0 bis 100%) der einzelnen Fraktionen für die jeweilige Ansaatvariante, die als Schätzer in ein Regressionsmodell eingehen. Die Umsetzung der Entmischung von Spektralsig-

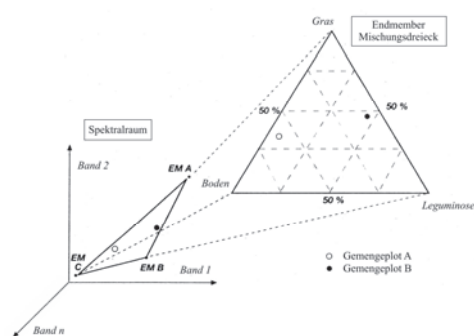


Abb. 1: Raumabgrenzung im n-dimensionalen Raum durch drei Endmember (verändert nach HILL 1998).

naturen erfolgte unter Verwendung der Programmbibliotheken von IDL (interactive data language) mit der Software ENVI.

Die Schätzung der Ertragsanteile aus den Abundanzwerten der Entmischungsprozesse erfolgte durch einfache Regressionsanalyse. Die Art und Stärke des Zusammenhangs wurde über das Bestimmtheitsmaß sowie das Konfidenzniveau statistisch ermittelt.

4 Ergebnisse

4.1 Gefäßversuch

Die Ergebnisse der Bestandsinventur für den Gefäßversuch 2005 sind in Tab. 2 zusammengefasst. Auffällig ist der hohe Anteil an Beikräutern bei den Reinsaatarten Rotklee, Weißklee und Luzerne sowie die Variabilität der Anteile über die Wachstumsperiode bzw. für die verschiedenen Ansaattermine v. a. in der Ansaatvariante 5 (Rotklee/Weidelgras).

Die Anteile der Ansaatkomponenten Gras und Leguminose stellen die abhängigen Variablen für die Regressionsanalyse dar. Die erklärenden Variablen werden durch die normierten Abundanzwerte aus der SMA geliefert. Hierbei wurden die Anteile der Beikräuter nicht berücksichtigt, da hierfür kein repräsentatives Endmember generiert werden konnte. Für die SMA wurden aus den Reinsaatvarianten 1 bis 4 sowie der Bodenvariante zunächst die spektralen Endmember ‚Weidelgras‘, ‚Rotklee‘, ‚Weißklee‘, ‚Luzerne‘ und ‚Boden‘ generiert, wobei pro

Tab. 2: Mittlerer Anteil von Leguminosen, Weidelgras und Beikräutern in der Ansaatvariante, KW 46–52 (vgl. HIMSTEDT 2005).

Variante	Tage nach Ansaat	Weidelgras [%]	Leguminosen [%]	Beikräuter [%]
Weidelgras (1)	63	79,24	0	20,76
Rotklee (2)	63	0	58,19	41,81
Weißklee (3)	63	0	51,71	48,29
Luzerne (4)	63	0	69,10	30,90
Rotklee/Weidelgras (5)	63	45,47	41,49	13,04
	49	63,13	24,40	12,48
	35	56,47	32,00	11,53
	21	49,94	44,90	5,16
Rotklee/Weidelgras (5b)	63	67,64	17,20	15,16
	49	67,43	9,59	22,99
	35	73,68	11,36	14,96
	21	82,46	11,02	6,52
Weißklee/Weidelgras (6)	63	57,68	17,86	24,46
	49	72,22	18,17	9,61
	35	73,21	17,87	8,92
	21	76,56	17,10	6,33
Luzerne/Weidelgras (7)	63	45,42	36,15	18,43
	49	62,34	29,56	8,10
	35	57,09	36,13	6,78
	21	51,15	44,42	4,43

SMA-Prozedur eine der drei Leguminosenarten stellvertretend für alle stand. Die SMA wurde anschließend für die Saatgemenge der Varianten 5, 5b, 6 und 7, durchgeführt.

Abb.2 zeigt beispielhaft Streudiagramme der Anteile von Weidelgras bzw. Luzerne und der berechneten normierten Abundanz aus der spektralen Entmischung auf. Der

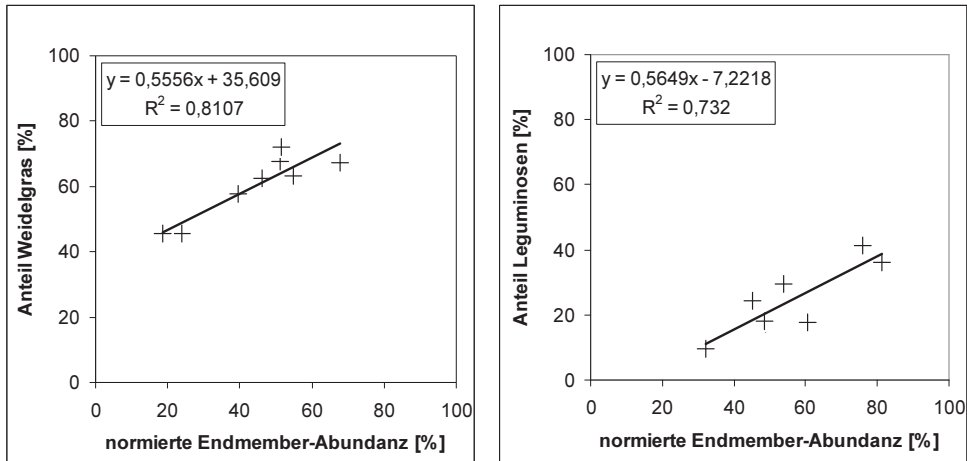


Abb. 2: Regressionsmodelle auf Basis der SMA (Gefäßversuch) für die Varianten Dt. Weidelgras (links) bzw. Luzerne (rechts) (63 & 49 Tage nach Ansaat, n = 8).

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten nach Pearson aus normierter Endmember-Abundanz und Anteil an Gesamt-Trockenmasse in % (zur Erläuterung der verwendeten Varianten für die Endmember vgl. Tab. 1).

Endmember-kombination	Bestandsalter (Tage nach Ansaat)	n	Dt. Weidelgras	Leguminosen
<i>A</i> Varianten 1/2 Boden	21 + 35 + 49 + 63	16	49,72	17,97
	35 + 49 + 63	12	*67,91	41,61
	49 + 63	8	**89,85	*81,22
	63	4	**99,41	94,73
<i>B</i> Varianten 1/3 Boden	21 + 35 + 49 + 63	16	44,82	14,04
	35 + 49 + 63	12	*61,43	37,92
	49 + 63	8	**90,72	**84,13
	63	4	**99,74	93,22
<i>C</i> Varianten 1/4 Boden	21 + 35 + 49 + 63	16	40,50	7,87
	35 + 49 + 63	12	*60,11	38,20
	49 + 63	8	**90,04	**85,56
	63	4	**98,81	90,18

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.
 * Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Zusammenhang zwischen SMA-basierten Fraktionsanteilen und den kartierten Anteilen der Ansaatkomponenten ist klar ersichtlich und statistisch signifikant nachweisbar. Die Summe der Anteile für Weidelgras und Leguminose liegt sowohl bei den Schätzern als auch bei den erklärenden Variablen in der Regel unter 100%, was auf das Fehlen der Beikräuter und den Anteil des Bodensignals bei der Entmischung zurück zu führen ist.

Die SMA-Prozessierungen wurden mit drei verschiedenen Endmemberkombinationen durchgeführt (Dt. Weidelgras, Leguminose (A-Weißklee, B-Rotklee, C-Luzerne), Boden), wobei, wie oben bereits beschrieben, die Anteile der jeweiligen Fraktionen als Gesamtdatensatz in die Schätzung eingingen. Tab. 3 fasst die Ergebnisse der SMA für den Gefäßversuch zusammen. Für die statistische Analyse der Zusammenhänge wurden die Wertepaare nach dem Bestandsalter von älteren zu jüngeren Beständen zusammengefasst. Diese Zusammenfassung

wurde für die Betrachtung der jüngeren Bestände im Gefäßversuch notwendig, da nur die ältesten Bestände im Gefäßversuch als Reinsaaten vorlagen. Die Ergebnisse der statistischen Analyse zeigen hoch signifikante Zusammenhänge zwischen Schätzern (normierte Abundanzen) und Bestandsdaten (Fraktionen) für die älteren Bestände auf (Bestandsalter 63 & 63 + 49 Tage). Hierbei ist es unerheblich, welche der drei Leguminosenarten als Endmember für die SMA verwendet wurde. Die Stärke des Zusammenhangs nimmt unter dem Einfluss jüngerer Bestände und bei Kombination unterschiedlicher Wachstumsphasen in einem Schätzmodell ab.

4.2 Feldversuch

Die SMA der Spektraldaten aus dem Feldversuch wurde in Analogie zum Gefäßversuch für die drei Hauptvarianten Weidelgras/Weißklee, Weidelgras/Rotklee und Weidelgras/Luzerne als Gesamtdatensatz

Tab. 4: Korrelationskoeffizienten nach Pearson aus normierter Endmember-Abundanz und Anteil an Gesamt-Trockenmasse in % – kumulierte Bestandsalter (zur Erläuterung der verwendeten Varianten für die Endmember vgl. Tab. 1).

Endmemberkombination	Bestandsalter (Tage nach Ansaat)	n	Dt. Weidelgras	Leguminosen
<i>Varianten 1/2/Boden</i>	69 + 78 + 91 + 123	48	2,24	6,48
	78 + 91 + 123	36	15,23	18,17
	91 + 123	24	*40,71	*42,05
	123	12	*60,01	*68,48
<i>Varianten 1/3/Boden</i>	69 + 78 + 91 + 123	48	26,21	6,71
	78 + 91 + 123	36	**47,72	18,00
	91 + 123	24	17,49	29,58
	123	12	*61,65	*68,62
<i>Varianten 1/4/Boden</i>	69 + 78 + 91 + 123	48	3,74	1,73
	78 + 91 + 123	36	5,57	6,48
	91 + 123	24	14,87	26,42
	123	12	25,04	*68,75

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

durchgeführt. Für jede Auswertung ging ebenfalls ein Bodenspektrum als Endmember in die Entmischung ein, die Beikräuter wurden bei der SMA, ebenso wie im Gefäßversuch nicht berücksichtigt. Die Resultate der Regressionsanalysen zwischen Fraktionen aus der Bestandsinventur und normierter Abundanz aus der SMA sind in Tab. 4 aufgeführt. Die Zusammenstellung ist analog zu Tab. 3 gegliedert nach der verwendeten Endmemberkombination für die SMA, sowie nach der Zusammensetzung über das Bestandsalter.

Allgemein nimmt die Güte des Schätzmodells unter dem Einfluss jüngerer Bestände und bei Kombination unterschiedlicher Wachstumsphasen ab. Der Zusammenhang zwischen Leguminosenanteil und Endmember-Anteil ist im Allgemeinen stärker als für

Tab. 5: Korrelationskoeffizienten nach Pearson aus Endmember-Abundanz und Anteil an Gesamt-Trockenmasse in % – nicht-kumulierte Bestandsalter (n = 12).

Endmemberkombination	Bestandsalter (Tage nach Ansaat)	Dt. Weidelgras	Leguminosen
<i>Varianten 1/2/Boden</i>	69	20,93	24,78
	78	17,03	11,31
	91	17,38	16,03
	123	*60,01	*68,48
<i>Varianten 1/3/Boden</i>	69	11,22	27,75
	78	**80,01	1,73
	91	0,71	16,73
	123	*61,01	*68,62
<i>Varianten 1/4/Boden</i>	69	29,26	44,05
	78	4,58	15,97
	91	46,47	22,61
	123	25,04	*68,75

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

die Schätzung des Grasanteils. Der größere Stichprobenumfang im Feldversuch ermöglicht eine zusätzliche separierte Betrachtung der einzelnen Wachstumsstadien (Tab. 5). Die Zusammenhänge sind wie schon im Gefäßversuch mit zunehmendem Bestandsalter stärker. Die Güte der Regressionsmodelle ist vor allem bei den jüngeren Beständen sehr gering, so dass zumeist kein signifikanter Zusammenhang nachzuweisen ist.

5 Diskussion

Die im Feld- und Gefäßversuch durchgeführten Spektralen Entmischungsprozesse zeigen deutliche Unterschiede im Ergebnis auf. Der Vergleich der Fraktionsanteile aus der Bestandsinventur mit den aus den Endmembers abgeleiteten Abundanzen zeigt für den Gefäßversuch im Allgemeinen deutliche Zusammenhänge auf, wobei die Güte der Schätzung mit dem Bestandsalter zunimmt. Eine Erklärung hierfür ist, dass die prozentualen Fraktionsanteile aus der Bestandsinventur sich auf die oberirdische Gesamtbio-masse beziehen, unabhängig vom Anteil der Bodenbedeckung zum Zeitpunkt der Erfassung. Bei der optischen Messung müssen jedoch die Spektralwerte für Pflanzenanteil, Boden und möglichst auch Schatten berücksichtigt werden. Solange eine hohe Biomasse vorliegt, also der Anteil des Bodensignals gering ausfällt, stellt dieser Unterschied kein Problem dar. Bei der Betrachtung jüngerer Bestände müsste allerdings der Flächenanteil des Bodens mit einbezogen werden. Ähnliches gilt für Schattenwurf. Jüngere Bestände weisen in der Regel eine höhere Beschattung durch die Bestandsgeometrie auf. Schatten wirkt sich im Allgemeinen dämpfend auf die reflektierte spektrale Strahl-dichte aus und beeinflusst somit das Mess-signal, der Einfluss kann aber im Allgemeinen als additiv bzw. subtraktiv über den gesamten Wellenlängenbereich betrachtet werden und hat somit keinen Einfluss auf die spektrale Entmischung (ERASMI 2003). Im Gewächshaus wurde dem Einfluss der Beschattung dennoch durch eine Ausleuchtung mittels bidirektionaler Beleuchtung Rechnung getragen. Im Feldversuch waren

hingegen keine derartigen Beleuchtungsansätze realisierbar. Insgesamt zeigt sich, dass durch die höhere Variabilität der Umweltfaktoren der Zusammenhang, welcher im Gefäßversuch eindeutig nachweisbar ist, deutlich geschwächt wird. Der Anteil der erklärten Varianz auf Basis der Endmember-Abundanzen variiert insgesamt sehr stark, auch wenn die Bestimmtheitsmaße zu den späteren Messterminen ebenfalls zunehmen. Neben den Umwelteinflüssen spielt im Freilandversuch die kleinräumige Bestandsheterogenität eine entscheidende Rolle. Einen Beleg hierfür liefern Senkrechtaufnahmen mit einer Digitalkamera, die als Referenz zu den feldspektrometrischen Messungen aufgenommen wurden (HIMSTEDT 2005). Als Beispiel hierfür sind in Abb. 3 die vier Parallelen der Variante 3 (Rotklee, Reinsaat) abgebildet.

Die hohe Variation des Bewuchses ist auf den Aufnahmen ersichtlich. Diese Heterogenität ist vor allem in ökologisch bewirtschafteten Grünlandflächen ausgeprägt und

stellt eine bedeutende Herausforderung für die teilflächenspezifische Bestandsanalyse auf Basis optischer Strahlungssensoren dar.

Eine weitere Einschränkung der Aussagefähigkeit im Freilandversuch stellt der hohe Beikräuteranteil dar, der die Folge einer schwierigen Bestandsetablierung nach der Ansaat war. Da für den Feldversuch kein entsprechendes Endmember generiert werden konnte, ist die Spektralaufnahme der Variante Beikräuter aus dem Gefäßversuch nicht in die Analyse eingeflossen. Wie in Tab. 2 ersichtlich ist der prozentuale Anteil der Beikräuterfraktion relativ hoch. Dieser Anteil an der Spektralsignatur wird so jedoch einem der verwendeten drei Endmember zugeschrieben, was zu Überschätzungen der erklärenden Abundanzen führen kann (vgl. Abb. 2). Unterschätzungen weisen hingegen darauf hin, dass ein Anteil einer Fraktion einem oder mehreren Endmembern einer anderen Fraktion zugeteilt wird. Die Minimierung von Über- und Unterschätzungen ist eine Frage der Qualität der ein-

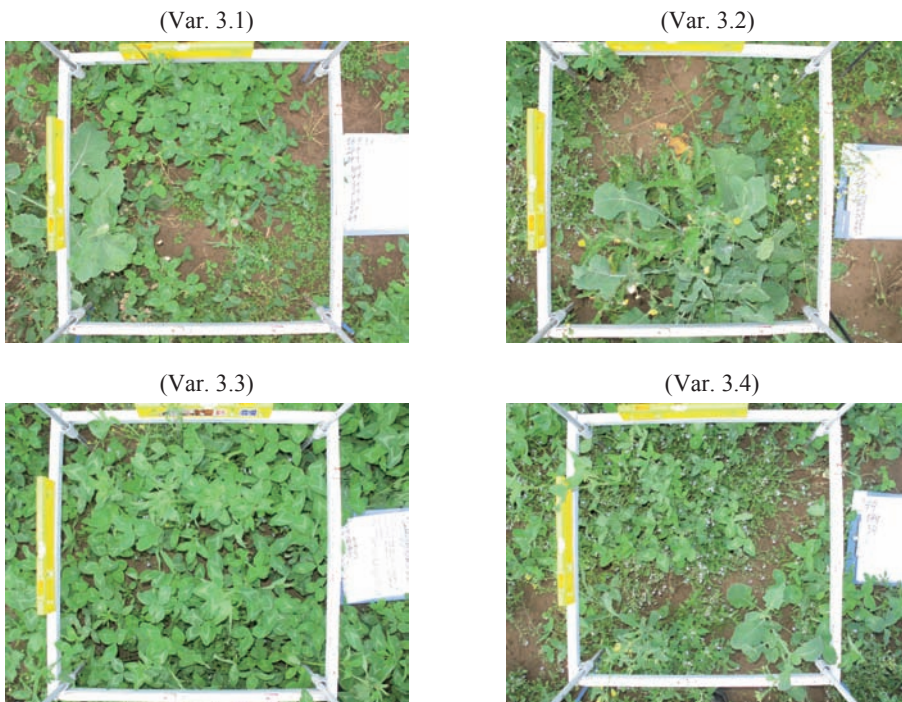


Abb. 3: Bestandsvergleich der vier Wiederholungen der Variante Rotklee am zweiten Messtermin.

zelen Endmember und wie repräsentativ die Endmemberkombination für das Gemengesignal ist.

Der Vergleich der kumulierten und nicht-kumulierten Datensätze im Freilandversuch hat gezeigt, dass auch unter Freilandbedingungen eine Schätzung von Gemengeanteilen auf Basis der spektralen Entmischung in unterschiedlichen Wachstumsphasen prinzipiell möglich ist. Werden die Daten der verschiedenen Messtermine miteinander kumuliert, ist generell eine hohe Signifikanz zu verzeichnen. Tendenziell spiegeln die Ergebnisse der nicht-kumulierten Daten zwar ähnliches wider, es ist jedoch bei den jüngeren Beständen aufgrund des geringen Bodenbedeckungsgrads in der Regel kein signifikanter Zusammenhang ermittelbar.

Der hier vorgestellte Ansatz der Spektralen Entmischung von Reflexionssignaturen für verschiedene Ansaatvarianten im Grasland-Futterbau zeigt das Potential spektroskopischer Messungen zur Analyse teilflächenspezifischer Bestandsmerkmale auf. Die Berechnung von Endmember-Abundanzen ermöglicht Aussagen über das Vorkommen von Fraktionen in Gemengeansaat und kann damit zum einen Indikatoren der Futterqualität liefern und zum anderen zur Ertragsoptimierung im der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung von Graslandbeständen beitragen (WACHENDORF 2005).

Neben der räumlichen Variabilität der Bestandsfraktionen konnte über eine Wachstumsperiode vor allem auch die zeitliche Dynamik von Gemengeanteilen unter natürlichen Umgebungsbedingungen aus spektraler Information nachgewiesen werden.

Trotz der aufgezeigten Möglichkeiten der Spektralanalyse für die Graslandwirtschaft ist der aufgezeigte Verfahrensweg für die praktische Anwendung zurzeit noch nicht realisierbar. Demgegenüber stehen bereits praxisreife Entwicklungen für die Echtzeitbestandspflege auf Basis digitaler Fotografie, wie z. B. von Gebhardt und Kühbauch (2007). Die Auswertung zeitlich und räumlich hochauflösender spektraler Information stellt aber auch für die Graslandwirtschaft vor dem Hintergrund aktueller und zukünftiger Satellitenmissionen zur Erdbeo-

bachtung (z. B. RapidEye, EnMap) eine zukunftssträchtige Perspektive dar.

Danksagung

Die durchgeführten Untersuchungen sind Bestandteil des Forschungsprojekts „Sensorische Methoden und Räumliche Analysen in der Futterproduktion“ am Fachgebiet Gründlandwissenschaft und Nachwachsen der Rohstoffe des Fachbereichs 11 der Universität Kassel.

Literatur

- ADAMS, J. B., SMITH, M. O. & JOHNSON, P. E., 1986: Spectral mixture modelling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site. – *Journal of Geophysical Research* **91**: 8090–8112.
- BIEWER, S., FRICKE, T., ERASMI, S., WACHENDORF, M. & KAPPAS, M., 2005: Schätzung der Ertrags- und der Bestandeszusammensetzung von Leguminosen/Gras-Gemengen mittels der Feldspektroskopie – Erste Ergebnisse eines Gefäßversuches. – *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau* **7**: 57–60.
- CARLSSON, G. & HUSS-DANEL, K., 2003: Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field. – *Plant and Soil* **253**: 353–372.
- ERASMI, S., 2003: Optische Fernerkundung zur teilflächenspezifischen Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen. – *Göttinger Geographische Abhandlungen* 110.
- GEBHARDT, S., SCHELLBERG, J., LOCK, R. & KÜHBAUCH, W., 2006: Identification of broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius* L.) on grassland by means of digital image processing. – *Precision Agriculture* **7**: 165–178.
- GEBHARDT, S. & KÜHBAUCH, W., 2007: A new algorithm for automatic *Rumex obtusifolius* detection in digital images using colour and texture features and the influence of image resolution. – *Precision Agriculture* **8**: 1–13.
- GERHARDS, R., DICKE, D. & OEBEL, H., 2005: Testing and analysing decision rules for site-specific weed control in malt barley (*Hordeum vulgare* L.) using a geographic information system. – *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **112**: 447–456.
- GOEL, P. K., PRASHER, S. O., LANDRY, J. A., PATEL, R. M., BONNELL, R. B., VIAU, A. A. & MILLER, J. A., 2003: Potential of airborne hyperspectral remote sensing to detect nitrogen deficiency

- and weed infestation in corn. – *Computers and Electronics in Agriculture* **38**: 99–124.
- HILL, J., 1998: Neue Wege zur Geowissenschaftlichen Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten. – *Geographische Rundschau* **50** (2).
- HIMSTEDT, M., FRICKE, T. & WACHENDORF, M., 2005: Ertrag und Bestandeszusammensetzung von Leguminosen/gras-Gemengen während der Etablierungsphase. – Erste Ergebnisse eines Gefäßversuches. – *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau* **7**: 77–79.
- ITZEROTT, S. & KADEN, K., 2006: Spektrale Normkurven – eine notwendige Voraussetzung für die Klassifizierung der Fruchtartenverteilung aus Fernerkundungsdaten. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **3/06**: 205–215.
- JARMER, T., KÖTZ, B. & ATZBERGER, C., 2003: Spektrometrische Ableitung biophysikalischer Vegetationsparameter von Weizenbeständen: Vergleichende Untersuchung verschiedener empirisch-statistischer Verfahren. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **1/03**: 43–50.
- KUNELIUS, H. T., DURR, G. H., MCRAE, K. B. & FILLMORE, S. A. E., 2006: Performance of timothy-based grass/legume mixtures in cold winter region. – *Journal of Agronomy and Crop Science* **192**: 159–167.
- MCKENZIE, D. B., PAPADOPOULOS, Y. A., MCRAE, K. B. & BUTT, E., 2005: Compositional changes over four years for binary mixtures of grass species grown with white clover. – *Canadian Journal of Plant Science* **85**: 351–360.
- NORDMEYER, H., 2006: Patchy weed distribution and site-specific weed control in winter cereals. – *Precision Agriculture* **7**: 219–231.
- NICHOL, J. & WONG, M. S., 2007: Remote sensing of urban vegetation life form by spectral mixture analysis of high-resolution IKONOS satellite images. – *International Journal of Remote Sensing* **28**: 985–1000.
- OEHMICHEN, J. & LÜTKE ENTRUP, N., 2000: Lehrbuch des Pflanzenbaus – Band 2; Kulturpflanzen, Th. Mann Verlag, Gelsenkirchen.
- SAVITZKY, A. & GOLAY, M. J. E., 1964: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. – *Analytical Chemistry* **36**: 1627–1639.
- UDELHOVEN, T., HOSTERT, P., JARMER, T. & HILL, J., 2003: Klassifikation von Getreideflächen mit hyperspektralen Bilddaten des HyMap-Sensors. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **1/03**: 35–42.
- WACHENDORF, M., KAPPAS, M., FRICKE, T., ERASMI, S., BIEWER, S., BRUNN, A., HIMSTEDT, M. & FISCHER, CH., 2005: Erfassung struktureller und funktionaler Eigenschaften gemischter Futterbau-Bestände mittels der Feldspektroskopie. – *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* **17**: 275–276.

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Geogr. THORSTEN MEWES, Dr. STEFAN ERASMI, Prof. Dr. MARTIN KAPPAS, Universität Göttingen, Geographisches Institut, Abt. Kartographie/GIS/Fernerkundung, D-37077 Göttingen, Tel.: +49-551-39-12671, Fax: -8020, e-Mail: tmewes@uni-goettingen.de

M. Sc. agr. SONJA BIEWER, Dipl.-Ing. THOMAS FRICKE, Prof. Dr. MICHAEL WACHENDORF, Universität Kassel, FB 11 – Ökologische Agrarwissenschaften, FG Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe, D-37213 Witzenhausen, Tel.: +49-5542-98-1335, Fax: -1342, e-Mail: fricke@mail.wiz.uni-kassel.de

Manuskript eingereicht: Juli 2007

Angenommen: Mai 2008