

Spektrometrie – moderne, nicht-invasive Erfassungstechnik von Pflanzenbeständen

Andreas Schaumberger^{1*}, Jürgen Schellberg² und Jens Hollberg²

Zusammenfassung

Die Entwicklungsdynamik von Pflanzenbeständen wird von zahlreichen Bewirtschaftungs- und Standortfaktoren beeinflusst. Die laufende Beobachtung dieser Dynamik setzt voraus, dass der Bestand nach jeder Datenerhebung unbeeinflusst und ohne Beeinträchtigung sein Wachstum fortsetzen kann. Mit der Spektrometrie als berührungslose Erfassungsmethode kann eine sehr hohe Dichte an Informationen über den Zustand von Pflanzen gewonnen werden, die weit über die Möglichkeiten hinausgehen, die eine klassische Pflanzenbonitur oder Wuchshöhenbestimmung bieten können. Die Messung der vom Pflanzenbestand reflektierten elektromagnetischen Strahlung liefert eine Spektralsignatur über die Wellenbereiche des sichtbaren Lichts, des nahen Infrarots bis hin zu Bereichen des kurzwelligen Infrarots. Wellenlängenspezifische Auswertungen können Auskunft über Pigmentkonzentrationen (z. B. Chlorophyll), Nährstoffversorgung der Pflanzen, Wassergehalt, Biomasse, Stressindikatoren, usw. geben. Die Feldspektroskopie findet unter natürlichen Bedingungen am Feld statt. Die Intensität der Strahlung (Wolkenbedeckung) sowie die von der Tages- und Jahreszeit abhängige Geometrie zwischen Strahlungsquelle (Sonne), Pflanzenbestand und Spektroskopensensor hat erheblichen Einfluss auf die Messung. Als Reaktion auf wechselnde atmosphärische Bedingungen ist daher eine laufende Kalibrierung die Voraussetzung für korrekte Daten. Um zwischen Spektren und (bio)physikalischen Parametern kausale Zusammenhänge herstellen zu können, sind neben Spektralmessungen umfangreiche Beprobungen des Pflanzenbestandes durchzuführen. Der große Datenumfang bedarf eines soliden Datenmanagements und einer effizienten Datenaufbereitung. Softwaretools mit Datenbankschnittstellen sind unverzichtbarer Bestandteil und die Voraussetzung für eine gut organisierte spektrale Datenanalyse. Diese ist letztlich das Instrument zur Gewinnung von Informationen über den Zusammenhang zwischen der Entwicklungsdynamik von Pflanzenbeständen und ihrer Einflussfaktoren.

Summary

Dynamics of vegetation development depend on many management and site factors. Monitoring of these dynamics needs to be operated without any effect and disturbance on plant growth. Spectroscopy is a contact-free method to collect a high density of information about the status of plants and extends the possibilities of classical plant surveys and crop height determination considerably. The output of electro-magnetic radiation reflectance of plants are spectral signatures over the wavebands of visible light, near infrared up to the short-wave infrared region. Waveband analysis provides information about pigment concentration (e. g. chlorophyll), nutrition supply of plants, water content, biomass, stress, etc. Field spectroscopy takes place on the field under natural conditions with several variable natural factors. The quality of results strongly depends on a very careful handling. Radiation intensity (cloud cover) as well as daily and seasonally dependent radiation geometry between sun as the source of radiation, plants and sensor significantly affects the spectral measurements. In response of permanent changes of the atmosphere, repeated calibration and reference measurements are an important precondition of accurate data. Many plant samples as well as a substantial number of spectral data are necessary to correlate spectral data and (bio)physical plant parameters. All these data, especially the spectral ones, need to be managed properly and processed efficiently. Software tools with interface to database management systems are essential components and the precondition for a well-organized spectral data analysis. These analyses are finally the key for gaining information about the correlation of vegetation development dynamics and their influencing factors.

Einleitung

Die Entwicklung von Grünlandbeständen wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst, die sowohl von der Bewirtschaftung als auch von Standorteigenschaften bestimmt werden. Im Gegensatz zum Ackerbau mit homogenen Pflanzenbe-

ständen stellt das Grünland mit seinen unterschiedlichen Arten und damit auch unterschiedlichen Ansprüchen eine besondere Herausforderung dar.

Im Grünland wirken die verschiedenen Einflüsse direkt und indirekt auf die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes

¹ Abteilung für Grünlandmanagement: Geoinformation, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

² Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz/Agrar- und Produktionsökologie, Universität Bonn, Katzenburgweg 5, D-53115 BONN

* Ansprechpartner: Mag. Dr. Andreas SCHAUMBERGER, MSc, andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at



und bestimmen so den Ertrag und die Qualität des Futters. Standortfaktoren wie Klima, Boden und Topografie bilden die natürlichen Rahmenbedingungen für den Pflanzenbau, dessen Potenzial erst durch eine an den jeweiligen Standort angepasste Bewirtschaftung effizient und auch ökologisch sinnvoll genutzt werden kann (Pötsch, 2009).

Um die Wirkung von Einflussfaktoren wie Standort und Bewirtschaftung auf die Leistungsfähigkeit eines Grünlandbestandes bestimmen zu können, werden seit Jahrzehnten wissenschaftliche Experimente durchgeführt. Viele der daraus gewonnenen Erkenntnisse fließen in die landwirtschaftliche Praxis ein und tragen zu einer laufenden Optimierung der Bewirtschaftung bei. Im pflanzenbaulichen Versuchswesen wird dazu das Pflanzenmaterial eingehend analysiert und mittels statistischer Methoden in Beziehung zu verschiedenen Einflussfaktoren gestellt. Für die österreichische Grünlandwirtschaft können auf diese Weise Aussagen über den Zusammenhang zwischen Höhenstufen und Futterertrag (Buchgraber und Pötsch, 1999), Schnittzeitpunkt und Futterinhaltsstoffe (Buchgraber, 1997), Bewirtschaftungsintensität und Stickstoffkreislauf, Bewirtschaftungssysteme und Futterqualität (Pötsch *et al.*, 2006) sowie Düngung und Futterinhaltsstoffe (Pötsch, 1995) getroffen werden, um einige Beispiele zu nennen.

Die Gewinnung von Daten zum Pflanzenbestand ist, von wenigen Ausnahmen abgesehen, (z. B. Pflanzenbestandsaufnahmen, Beobachtung phänologischer Phasen) mit der Entnahme eines Teils oder der Ernte des gesamten Bestandes verbunden. Diese destruktiven Maßnahmen setzen der oberirdischen Biomasseentwicklung ein abruptes Ende, bieten aber die Möglichkeit, das Pflanzenmaterial einer genauen Laboranalyse unterziehen zu können. Ertrags- und Qualitätskennwerte sind damit exakt bestimmbar, allerdings stellen diese immer das Endergebnis eines Entwicklungsprozesses dar. Zum Zeitpunkt der Entnahme bzw. der Ernte kann somit lediglich die Gesamtwirkung aller ertragsbestimmenden Faktoren während eines Aufwuchses den Parametern des Erntegutes gegenübergestellt werden. Steht jedoch die Entwicklungsdynamik des Bestandes selbst im Fokus einer wissenschaftlichen Untersuchung, ist die Beobachtung auf Methoden beschränkt, die keine bzw. nur minimale Eingriffe in den Pflanzenbestand erforderlich machen. Auf diese Weise bleibt nach jeder Messung ein unbeeinflusstes, kontinuierliches Wachstum des Bestandes gewährleistet.

Um die einzelnen Entwicklungsschritte eines Pflanzenbestandes differenzieren und sie nach Möglichkeit mit Umwelteffekten, wie z. B. der Witterung, in Beziehung setzen zu können, ist eine Beobachtung in kurzen Zeitabständen notwendig. Wird auch die räumliche Variabilität eines Pflanzenbestandes erfasst, müssen innerhalb der beobachteten Fläche Messungen an möglichst vielen Positionen durchgeführt werden. Die Bewerkstellung einer hohen zeitlichen und räumlichen Beobachtungsdichte ist vielfach nur mit Methoden möglich, die eine effiziente Datenerfassung mit relativ geringem Aufwand unterstützen. Nicht-invasive Techniken sind dafür besonders gut geeignet, da sie mit Sensoren durchgeführt werden können, welche meist berührungslos und schnell arbeiten.

Eine herausragende Rolle spielt die Fernerkundung, mit der Daten durch die Messung elektromagnetischer Strahlung,

welche von Objekten reflektiert oder emittiert wird, gewonnen werden. Die Plattformen für Fernerkundungssysteme und die darauf basierenden Anwendungen sind aufgrund des hohen Informationsgehaltes in Spektren vielfältig und durchdringen beinahe alle Lebensbereiche. Auf globaler Skala liefern satellitengestützte spektrale Aufnahmesysteme detaillierte Daten über Erdoberfläche und Atmosphäre. Sensorplattformen auf Flugzeugen oder Drohnen, ausgestattet mit Multi- und Hyperspektralkameras, werden zur gezielten Beobachtung von Phänomenen im regionalen Maßstab eingesetzt. Ein besonders breites Feld für Anwendungen der Spektroskopie, insbesondere der Infrarot-Spektroskopie, findet sich in den vielen Laboren der unterschiedlichsten Fachbereiche.

Interessant für die angewandte Agrarforschung, sowie in ersten Anfängen auch für die landwirtschaftliche Praxis sind handliche Geräte, welche die Messung von Spektren am Feld erlauben. Damit ist es möglich, fernkundliche Methoden zur Beobachtung des „lebenden“ Pflanzenbestands einzusetzen und wissenschaftlich auszuwerten. Die unkomplizierte Handhabung und sofortige Verfügbarkeit der Ergebnisse ist auch die Voraussetzung für die Verwendung derartiger Systeme im *Precision Farming*, wo Ertragsituation, Nährstoffversorgung, Schädlingsbefall, Krankheiten, usw. am Feld erkannt werden und unmittelbar darauf flächenspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen, wie z. B. gezielte Düngung oder Pestizideinsatz, erfolgen können.

In der vorliegenden Arbeit wird die Feldspektroskopie im Kontext der Grünlandforschung thematisiert, wobei in erster Linie auf methodische Grundlagen eingegangen wird, die durch Anwendungsbeispiele illustriert werden.

Grundlagen der Feldspektroskopie

Mit Hilfe der Spektroskopie können auf vergleichsweise einfache und berührungslose Weise biologische Systeme hinsichtlich ihrer Komponenten, Strukturen und molekularer Wirkungsweisen analysiert werden. Dazu erfassen geeignete Sensoren die Interaktion der elektromagnetischen Strahlung mit Materie, welche je nach Wellenlänge auf unterschiedlichem Energieniveau erfolgt. Das Spektrum reicht von hoch energetischen, kurzwelligen Gammastrahlen über die Wellenlängen des sichtbaren Lichts bis hin zu den langwelligen und energiearmen Radiowellen (Hammes, 2005). Das Ergebnis einer spektroskopischen Messung ist eine spektrale Signatur, die den Anteil der absorbierten, transmittierten und reflektierten elektromagnetischen Strahlung über einen bestimmten Wellenbereich ausweist. In der Infrarot-Spektroskopie werden Spektren üblicherweise in prozentuellem Anteil transmittierter Strahlung dargestellt (Jespersen, 2006). In der Reflexionsspektroskopie, zu der auch die Feldspektroskopie gehört, wird die Relation der reflektierten elektromagnetischer Strahlung aufgezeichnet und ausgewertet. *Abbildung 1* zeigt Beispiele von Reflexionsspektren für unterschiedliche Oberflächen, aufgenommen von einem Feldspektrometer.

Feldspektrometer, ausgestattet mit Hyperspektralsensoren, bieten die Möglichkeit, kontinuierliche Signalkurven über zusammenhängende Bereiche des Spektrums zu generieren. Für konkrete Anwendungen ist es sinnvoll, den Messbereich

auf dafür relevante Wellenbereiche abzustimmen. So ist es beispielsweise bei einer Beobachtung der Vegetation erforderlich, sowohl den Bereich des sichtbaren Lichtes (400 bis 700 nm) als auch die Signatur im nahen (700 bis 1400 nm) und fallweise im kurzwelligen (1400 bis 3000 nm) Infrarotbereich (NIR bzw. IR-A und SWIR bzw. IR-B) zu untersuchen. Neben Feldspektrometern mit drei Sensoren und einer vollständigen Abdeckung bis 2500 nm werden bei pflanzenbaulichen Experimenten aus Kostengründen oft auch Zwei-Sensor-Instrumente eingesetzt, welche bis zu Wellenlängen von 1700 nm arbeiten und damit jenen Teil des Spektrums abdecken, der die größte Informationsdichte hinsichtlich Vegetationsparametern enthält.

Mit den Sensortypen des verwendeten Spektrometers wird nicht nur die Breite des spektralen Messbereichs festgelegt, sondern auch die spektrale Auflösung. In einem Gerät weisen die verschiedenen Sensoren meist unterschiedliche Auflösungen auf. Das HandySpec Field VIS/NIR 1.7 der Firma tec5 bietet beispielsweise für den ersten der beiden verbauten Sensoren (360 bis 1100 nm) eine Auflösung von 10 nm und für den zweiten Sensor (1000 bis 1690 nm) 5 nm. Mit höheren Auflösungen können mehr Informationen aus den Spektren ausgelesen werden, indem einzelne Elemente mit individuellen Reflexions- und Absorptionseigenschaften besser differenzierbar sind (Govender *et al.*, 2007). Die Ausgabe der Spektralsignatur erfolgt nach einem Resampling meist einheitlich in Ein-Nanometer-Schritten, d. h. geringere Auflösungen werden interpoliert und ergeben damit eine mehr oder weniger starke Glättung der Signatur.

Feldspektrometer unterscheiden sich von Laborspektrometern in erster Linie dadurch, dass keine künstliche Strahlungsquelle zur Verfügung steht, sondern eine passive Messung der reflektierten natürlichen Sonnenstrahlung erfolgt. Da die Umwelt bei Felderhebungen nicht standardisiert und vollständig kontrolliert werden kann, wirkt eine Vielzahl von Einflüssen auf die Messergebnisse. So spielen beispielsweise Schatten im Pflanzenbestand, Wind, Regen- oder Taunässe, ja sogar die Kleidung der messenden Personen eine große Rolle (Mac Arthur, 2011; Milton, 1987). Äußerst sorgfältige Arbeit und die Beachtung einiger wichtiger Regeln ist daher die wichtigste Voraussetzung, um Daten vergleichbar und mit möglichst hoher Wiederholgenauigkeit generieren zu können.

Der Zustand der Atmosphäre und die damit verbundene Strahlungsintensität der Sonne kann sich innerhalb kürzester Zeit verändern. Dabei verschiebt sich in Abhängigkeit des Wolkentyps auch das Verhältnis von direkter und diffuser Sonnenstrahlung mit erheblichen Auswirkungen auf die vom Pflanzenbestand reflektierte Strahlung (Perbandt *et al.*, 2009). Sowohl zarte, lichtdurchlässige Cirruswolken bei fast wolkenlosen Bedingungen als auch Veränderungen innerhalb einer vollständig geschlossenen Wolkendecke können einen signifikanten Einfluss auf die Strahlungsintensität haben und verzerren das Messergebnis (Mac Arthur, 2011). Zudem sind die bestrahlten Zielobjekte meist nicht in der Lage, vollständig diffus zu reflektieren und damit hängt die reflektierte Strahlungsenergie, sehr stark vom Einstrahlungswinkel der Sonne ab. Dies gilt besonders dann, wenn der Anteil direkter Strahlung an der Gesamtstrahlung hoch ist (Milton, 1987).

Unter Berücksichtigung der Atmosphäre (Wolkenbedeckungsgrad, Aerosolkonzentration) ist deshalb die Geometrie von bestrahlter Oberfläche, Strahlungsquelle (Sonne) und Sensorposition für Spektralmessungen von großer Bedeutung. Eine ständige Kalibration mittels neutraler Referenzoberfläche (vgl. Rollin *et al.*, 2000) ist erforderlich, um die wechselnden Bedingungen bei möglichst gleichartiger Strahlungsgeometrie im Messergebnis berücksichtigen zu können. Optimal wäre es, zwei Sensoren gleichzeitig zu verwenden, damit Pflanzenbestand und Referenzfläche unter exakt gleichen Strahlungsbedingungen gemessen werden könnten (Milton *et al.*, 2009). In der Regel scheidet dies an den hohen Sensorkosten. Deshalb wird versucht, Referenz- und Zieloberfläche möglichst zeitnah hintereinander zu messen, um beim Einsatz nur eines Sensors mögliche Fehler so gering wie möglich zu halten (Mac Arthur, 2011). Alternativ dazu kann die Einstrahlung während der Reflexionsmessung durch einen nach oben gerichteten Spektralsensor mit Cosinus-Korrektor erfasst werden, womit ein Referenzsignal erzeugt wird, das einer perfekten diffusen Reflexion einer Weißreferenzoberfläche entspricht (Milton, 1987). Die Firma tec5 hat im HandySpec ein derartiges Zwei-Kanal-System implementiert. Bei jeder Messung des Pflanzenbestandes wird gleichzeitig eine Referenzmessung der Himmelsstrahlung durchgeführt und daraus das Reflexionssignal errechnet. Dies erleichtert die Handhabung und ermöglicht auch zügige Messungen unter „ungünstigen“ Bedingungen. Dennoch sollten bei der praktischen Arbeit Messungen nach Möglichkeit unter wolkenlosen Bedingungen und bei möglichst hohem Sonnenstand, also um die Mittagszeit, erfolgen (vgl. Fricke und Wachendorf, 2013).

Möglichkeiten der Feldspektroskopie

Ziel der berührungsfreien Sensorik mit Feldspektrometern ist die kleinräumige Erfassung von Zuständen eines Pflanzenbestandes. Dazu zählen unter anderem Bodendeckung, Blattflächenindex, Chlorophyllgehalt, Stickstoffgehalt, Wassergehalt und Biomasse. Die Anwendung der Feldspektroskopie in der Landwirtschaft ist im Wesentlichen noch der Forschung vorbehalten. Da moderne Fernerkundungssatelliten sehr viel größere Areale mit hoher spektraler und zeitlicher Auflösung abdecken können, lohnt sich die Feldspektroskopie nur im kleinen Maßstab. Jedoch ist deren Potenzial nicht zu unterschätzen, denn nur in Feldexperimenten können die kausalen Zusammenhänge zwischen spektraler Signatur und Zuständen der Grünlandbestände ermittelt werden, da eine zeitgleiche Beprobung des Pflanzenbestandes aus dem Sichtfeld des Sensors dafür unerlässlich ist.

Der typische Verlauf der spektralen Signatur von Pflanzenbeständen ist im Wesentlichen geprägt von der Absorption der Blattpigmente im sichtbaren Bereich des Spektrums (400–700 nm) und von Zellstruktur, Blattdicke und Blattfläche im Nahinfrarot (700–1100 nm). Jegliche Veränderung im Zustand des Pflanzenmaterials, verursacht zum Beispiel durch Stress oder Nährstoffmangel, kann anhand der Signatur identifiziert werden. Es lassen sich aus Änderungen der Signatur in schmalen Spektralbändern aber auch weitere, für die Pflanzenphysiologie und Morphologie wichtige Variable wie beispielsweise Mineralstoffgehalte, Toxine,

oder Neutrale-Detergenz-Faser, ableiten. Zusammenstellungen möglicher Anwendungen finden sich bei Govender *et al.* (2007), Schellberg *et al.* (2008) oder Thenkabail *et al.* (2014).

Die mittels Feldspektrometer gemessenen Zustände einer Oberfläche werden in Abhängigkeit der spektralen Auflösung als Reflexionswerte entlang eines beobachteten Wellenbereiches aufgetragen. *Abbildung 1* zeigt Beispiele von Spektralsignaturen für unterschiedliche Oberflächen. Gemessen wurden Reinbestände von Weißklee und Englisch Raygras sowie eine Fläche offenen Bodens. Die Reflektanz im sichtbaren Licht ist im Vergleich zu jener im Infrarotbereich vergleichsweise gering. Im Gegensatz zum offenen Boden kann bei den Pflanzensignaturen ein signifikanter Anstieg im Red-Edge-Band beobachtet werden. Dieser für Vegetation typische Verlauf kann beispielsweise dafür genutzt werden, den Ernährungszustand von Pflanzen zu interpretieren (vergleiche Anwendungsbeispiel).

Die dargestellten Signaturen zeigen in den Wellenbereichen um 970, 1150 und besonders stark um 1400 nm abnehmende Reflexionswerte. Der Grund dafür liegt in der durch Wasser bewirkten selektiven Absorption der Strahlung. Im Wellenbereich um 1400 nm führt die von der atmosphärischen Wasserdampfkonzentration abhängige Absorption der Sonnenstrahlung zu einem starken Rauschen der Messung, da in diesem Band eine zu geringe Strahlungsenergie auf den Sensor gelangt. Der Wellenbereich zwischen 1350 und 1450 nm ist aus diesem Grund für Auswertungen nicht nutzbar. (Für die Darstellung in *Abbildung 1* wurden die Signaturen

geglättet und daher ist das Signalrauschen hier nicht zu sehen.) Im Gegensatz dazu sind die weniger stark absorbierenden Wasserbande um 970 und 1150 nm, wie sie bei den Vegetationssignaturen in *Abbildung 1* deutlich zu sehen sind, für Auswertungen von feuchtigkeitssensitiven Vegetationsparametern sehr gut geeignet (Sims und Gamon, 2003).

Ein Grünlandmischbestand zeigt im Lauf der Aufwuchsperiode entwicklungs-dynamische Veränderungen, die mit Hilfe der Spektroskopie erfasst und in weiterer Folge entsprechend interpretiert werden können. *Abbildung 2* zeigt am Beispiel ausgewählter Zeitpunkte innerhalb des zweiten Aufwuchses einer Dreischnittfläche die Verläufe von Spektralsignaturen in Abhängigkeit des Entwicklungszustandes. Die Signatur der ersten Woche hat beispielsweise viel Ähnlichkeit mit jener des offenen Bodens in *Abbildung 1*. Je stärker sich die Pflanzen zu einem geschlossenen Bestand hin entwickeln, desto mehr nimmt der Kurvenverlauf eine für „lebende“ Vegetation typische Form an.

Hoch aufgelöste Spektren aus Hyperspektralsensoren sind durch eine extrem hohe Informationsdichte gekennzeichnet. Damit die in den Signaturen verborgenen Informationen auch für bestimmte Anwendungen genutzt werden können, müssen geeignete Methoden der spektralen Datenanalyse angewendet werden. Diese Analysen können direkt auf Basis der Rohdaten vorgenommen werden, oder aber auch mit aufbereiteten Datenbeständen erfolgen. Ziel dabei ist, nicht-redundante Information zu identifizieren und sie von redundanten Datenelementen zu trennen. Beispiele dafür sind die Auswertung von Ableitungen (Tsai und Philpot,

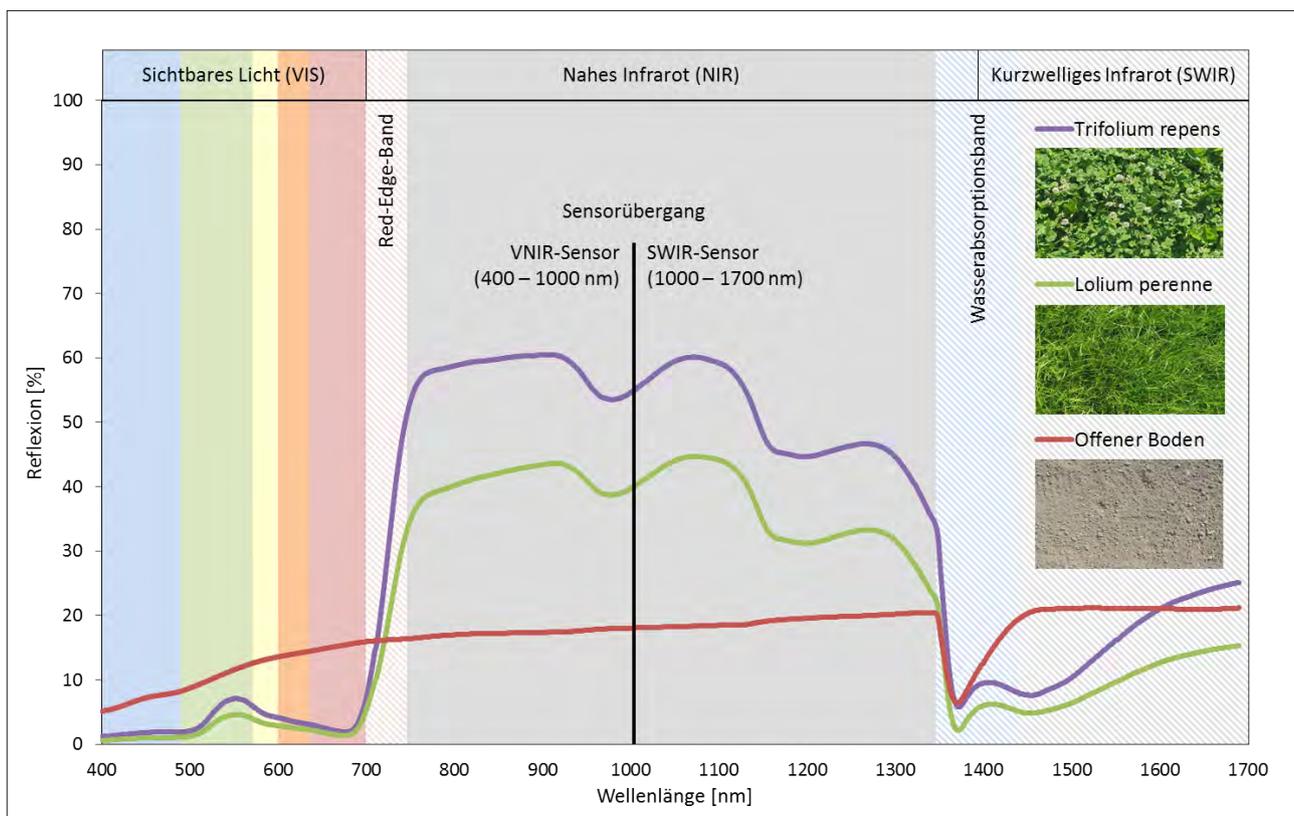


Abbildung 1: Beispiele von Reflexionsspektren unterschiedlicher Oberflächen mit einer Darstellung der wichtigsten Wellenbereiche im Spektrum zwischen 400 und 1700 nm.

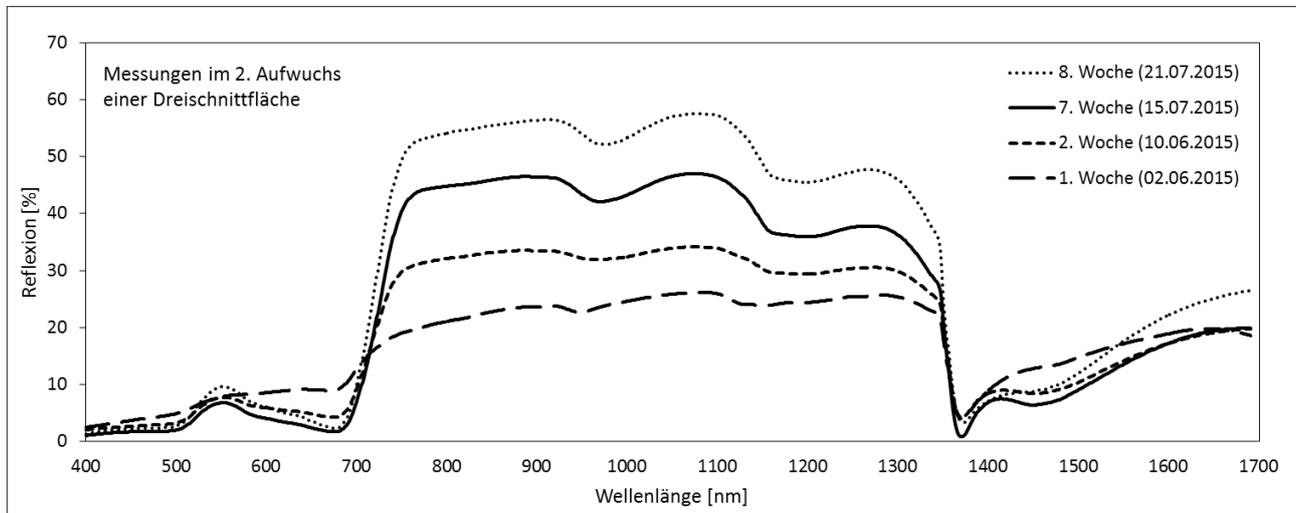


Abbildung 2: Ausgewählte Spektralsignaturen eines Dauergrünlandbestandes in Abhängigkeit der Entwicklungsphasen während des zweiten Aufwuchses.

1998) oder auch der Einsatz der Hauptkomponentenanalyse (PCA) (vgl. Thenkabail *et al.*, 2004).

Die mit Abstand wichtigste Form der Nutzung spektraler Daten sind Auswertungen auf Basis von Indizes. In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Arbeiten, welche sich mit der Optimierung und Evaluierung von Indizes für verschiedenste Anwendungen befassen. Mittlerweile gibt es umfangreiche Sammlungen, die unter anderem sehr übersichtlich auf <http://www.indexdatabase.de> zusammengefasst sind. Indizes können hier nach verschiedenen Kriterien selektiert und zusammen mit Formel und Referenzliteratur angezeigt werden. Grundsätzlich werden bei ihrer Berechnung Reflexionswerte bestimmter Wellenlängen gemäß entsprechender Definition miteinander kombiniert. Zahlreiche Untersuchungen zeigen signifikante physikalische Zusammenhänge in den Spektralsignaturen einzelner Wellenlängen- bzw. Frequenzbereiche, welche für die Bildung von Indizes im Rahmen der Vegetationsanalyse genutzt werden können. *Tabelle 1* fasst dafür eine Übersicht nach Thenkabail *et al.* (2014) zusammen.

Meist werden aus den Spektren Vegetations-, Chlorophyll- und Wasserindizes gebildet, die auf Kulturarten und Auswertungsschwerpunkte (Biomasseschätzung, Entwicklungsdynamik, Qualitätsparameter, usw.) angepasst sind. In der Regel werden diese mittels Differenzierung von Reflexionswerten aus unterschiedlichen Bereichen des Spektrums mit anschließender Normierung gebildet. Der Blatt-Chlorophyll-Index (Leaf Chlorophyll Index, LCI)

wird beispielsweise aus der Differenz eines NIR-Bandes und dem für den Chlorophyllgehalt maßgeblichen Red-Edge-Band gebildet und anschließend normiert: $LCI = \lambda_{850} - \lambda_{710} / \lambda_{850} + \lambda_{710}$ (Dorigo, 2008). In *Abbildung 3* ist die Auswertung dieses Index für den Verlauf von drei Aufwüchsen eines Dauergrünlandbestandes dargestellt. Die Entwicklung des LCI verhält sich bei jedem Aufwuchs ähnlich und zeigt damit klar, dass es eine Abhängigkeit zwischen Entwicklungsstadium und Index gibt. Um daraus in weiterer Folge ein Modell, d. h. einen allgemein gültigen Zusammenhang ableiten zu können, müssen den Indexwerten weitere Beprobungen und Laboranalysen, wie z. B. Futterinhaltsstoffe, Biomasse, Bestandeshöhen, Artenzusammensetzung, usw. gegenübergestellt und statistisch ausgewertet werden. Erst dadurch können die Ergebnisse dieser LCI-Auswertung einer sinnvollen Interpretation zugeführt werden.

Praktische Umsetzung von Spektralmessungen am Versuchsfeld

Um die Entwicklungsdynamik eines Pflanzenbestandes erfassen zu können, ist es notwendig, wiederholte Messungen in relativ kurzen Zeitabständen durchzuführen. Ein wöchentlicher Rhythmus hat sich dabei als praktikabel erwiesen. Da die Spektroskopie in hohem Maße vom Wetter bzw. der Wolkenbedeckung abhängig ist (vgl. Abschnitt 2), kann ein regelmäßiges Messintervall ohnehin nur angestrebt

Tabelle 1: Spektralbereiche und eine Auswahl ableitbarer Informationen für die Vegetationsanalyse (nach Thenkabail *et al.*, 2014).

Frequenzbereich	Bedeutung für die Untersuchung von Pflanzenbeständen
Sichtbares Licht: Blau	Stickstoff, Seneszenz, Carotinoide, Lichtnutzungseffizienz, Vegetationsstress
Sichtbares Licht: Grün	Pigmente (Carotinoide, Chlorophyll, Anthocyane), Stickstoff, Vitalität, Licht-nutzungseffizienz, Vegetationsstress, Schädlinge und Krankheiten
Sichtbares Licht: Rot	Blattflächenindex (LAI), Biomasse, Bestandeshöhe, Kulturart
Red-Edge-Band	Stickstoffstress, Chlorophyll, Seneszenz, Trockenstress
NIR (850-970 nm)	LAI, Biomasse, Bestandeshöhe, Kulturart, Feuchtegehalt, Protein
NIR (1070 -1250 nm)	LAI, Biomasse, Bestandeshöhe, Kulturart, Pigmente, Wassersensitivität
SWIR (1450 – 1650 nm)	Vegetationsklassifikation, Feuchtigkeitsgehalt, Feuchtigkeitssensitivität

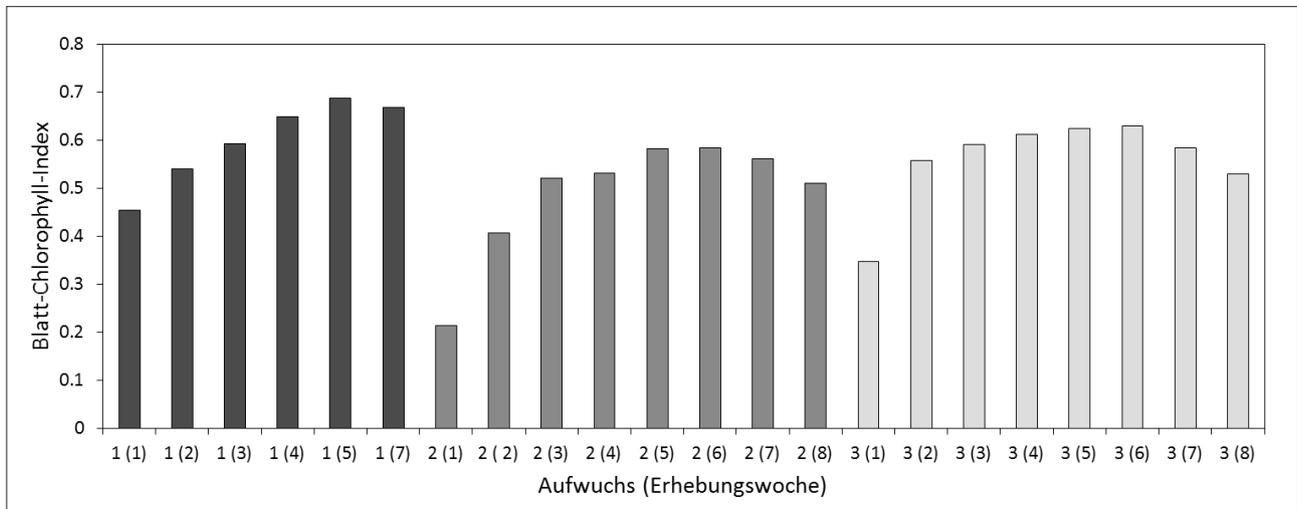


Abbildung 3: Verlauf des Blatt-Chlorophyll-Index für einen Dauergrünlandbestand mit drei Aufwüchsen (Auswertung von Spektren mit dreifacher Wiederholung).

werden. An der HBLFA Raumberg-Gumpenstein wird das Feldspektrometer HandySpec Field VIS/NIR 1.7 (tec5) eingesetzt, mit dem auch Beobachtungen unter suboptimalen atmosphärischen Bedingungen dank der integrierten Referenzmessung einigermaßen effizient erledigt werden können. Eine Kalibrierung mittels Graureferenzadapter ist in der Regel nur zu Beginn einer Messkampagne vorzunehmen. Das HandySpec erfasst zunächst die Reflektanz des Pflanzenbestandes und unmittelbar darauf mit dem nach oben gerichteten Cosinus-Korrektor die Umgebungsstrahlung. Verändert sich allerdings während dieses kurzen Zeitraums von wenigen Sekunden die Strahlungsintensität, beispielsweise indem sich Wolken oder leichte Dunstschleier vor die Sonne schieben, führt dies zu unbrauchbaren Ergebnissen. Solange die Strahlungsbedingungen während des kurzen Zeitabstandes zwischen den beiden zusammengehörenden Messungen stabil sind, können korrekte Messungen erwartet werden, auch wenn sich die Atmosphäre während der Messkampagne insgesamt verändert. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber Systemen, die vor und nach einigen Messungen eine explizite Kalibrierung erfordern. Bei einem direkten Vergleich mit anderen Feldspektrometern oder einer geräteunabhängigen Kalibrierung ist dies allerdings auch ein Nachteil, da in diesem Fall eine standardisierte Referenzmessung (z. B. mittels Spectralon-Medium) nötig sein würde (Jung *et al.*, 2009).

Die besten Ergebnisse sind dann zu erwarten, wenn konstant hohe Strahlungsintensitäten, also wolkenlose Bedingungen, über den gesamten Messzeitraum bestehen. Aufgrund der Tatsache, dass die direkte Strahlung in Abhängigkeit des Sonnenstandes einen erheblichen Einfluss auf die Schattenbildung innerhalb des Bestandes und damit die Reflektanz hat, sollte bei den Messungen darauf geachtet werden, dass die Azimutwinkel von einfallender und reflektierter Strahlung möglichst gering sind (Milton, 1987). Messungen am Feld sind deshalb vorzugsweise um die Tagesmitte vorzunehmen.

Spektromessungen werden in der Regel nur bis wenige Meter über der Bestandesoberfläche durchgeführt, entweder mit Geräten, die von Hand geführt werden (*Handheld Mode*)

oder die an einem Kran oder Hubsteiger befestigt sind. Seitdem Flugdrohnen die Entwicklungsreife für den Feldeinsatz erlangt haben und das Gewicht einfacher Spektrometer deutlich reduziert wurde, können Spektrolsignaturen auch aus größerer Höhe gewonnen werden. Damit vergrößert sich die Abdeckung der Aufnahmefläche bei deutlich reduziertem Zeitaufwand.

Die regelmäßige Beobachtung eines Pflanzenbestandes sollte nach Möglichkeit immer an genau definierten Positionen erfolgen, um einen Verschiebungseffekt durch unterschiedliche Pflanzenindividuen bei der Erfassung ausschließen zu können. Der Sensor des HandySpec hat einen Öffnungswinkel (*Field-of-View*) von 25°. Mit dem Abstand zum Boden wird damit die Größe der Messfläche definiert. Die Sensorhöhe spielt vor allem bei Ackerkulturen mit Reihenanbau aufgrund des Verhältnisses von Vegetation und Boden eine besonders wichtige Rolle (Daughtry *et al.*, 1982). Beim Grünland handelt es sich in den meisten Fällen um einen geschlossenen Bestand, allerdings ist bei Messreihen auch hier neben der Position die Höhe des Sensors über Grund möglichst konstant zu halten, um von Woche zu Woche dieselben Oberflächen zu erfassen. Um dies bei einer Vielzahl von Versuchspartellen auch praktisch realisieren zu können, wurde an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein ein mobiler Messwagen konstruiert. Mit diesem Wagen und dem darauf befindlichen Feldspektrometer inklusive Bedienungs-Notebook wird jede Parzelle an exakt gleicher Stelle angefahren. Für die Messung selbst nimmt eine Halterung den Messkopf an definierten Positionen und in einer Höhe von 120 cm über Grund auf (vgl. Milton *et al.*, 2009). Zusätzlich werden in Anlehnung an Fricke und Wachendorf (2013) auf dieser mobilen Einheit Ultraschallsensoren zur Messung der Bestandeshöhe (Fricke *et al.*, 2011) mitgeführt.

Ein Grünlandbestand muss nicht zwangsläufig eine homogene Oberfläche mit gleicher Artenzusammensetzung bilden, im Gegenteil. Aus diesem Grund ist eine mehrfache Messwiederholung an verschiedenen Positionen innerhalb einer Parzelle durchzuführen, um eine für den jeweiligen Pflanzenbestand repräsentative Spektrolsignatur durch Mittelwertbildung der Einzelspektren zu erhalten. Der von

uns konstruierte Messwagen erlaubt die Arretierung des Spektrometer-Messkopfs an vier verschiedenen Positionen, welche unter Berücksichtigung der Sensorhöhe die Messung einer zusammenhängenden Fläche von einem Quadratmeter ermöglicht. Die mobile Halterung gewährleistet dabei, dass bei den wöchentlichen Messwiederholungen immer dieselbe Bestandesoberfläche betrachtet wird. Die Spektralsignatur einer Parzelle wird generell aus vier Wiederholungen gebildet.

Um die Identifikation von unerklärlichen Abweichungen in den Spektren bei der späteren Datenanalyse zu erleichtern, empfiehlt sich die fotografische Aufnahme der gemessenen Oberfläche (Mac Arthur, 2011). Zu diesem Zweck ist auf dem mobilen Messwagen neben Spektrometer, Notebook und Ultraschallsensoren auch eine kleine Kamera (GoPro) installiert, mit der prinzipiell vor jeder Spektralmessung ein Foto erstellt wird. Zu Beginn und Ende der Messkampagne erfolgt noch zusätzlich eine Aufnahme des Himmels, um bei Bedarf die atmosphärischen Verhältnisse im Zuge der Spektrenauswertung beurteilen zu können.

Management und Aufbereitung von Spektraldaten

Eine mit dem HandySpec Field VIS/NIR 1.7 gespeicherte Spektralsignatur umfasst 1291 Einzelwerte (Wellenbereich zwischen 400 und 1690 nm). Innerhalb eines Jahres wurden an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein insgesamt etwa 50 Parzellen mit knapp 1700 Spektralsignaturen (bestehend aus jeweils vier Einzelspektren und Mittelwertspektrum) meist wöchentlich beobachtet; das entspricht einem Rohdatenbestand von 11 Millionen Einzelwerten. Dazu kommen noch Metadaten, verschiedene Aufbereitungen und Auswertungen, welche knapp eine Verdoppelung auf etwa 20 Millionen

Datensätze ergeben. Mit diesen Zahlen soll gezeigt werden, dass eine ernsthafte Auseinandersetzung mit der Spektroskopie sehr schnell zu großen Datenbeständen führt, welche auf geeignete Weise administriert werden wollen. Vielfach wird eine einfache, dateibasierte Ablage vorgenommen, bei der jedoch Aufbereitung und Auswertung von Daten schwierig und zeitaufwendig sind. Um eine beliebige Anzahl von Spektren verwalten und verarbeiten zu können, wurde eine eigene Software (SpectroAnalyst) programmiert und mit einer Datenbankschnittstelle ausgestattet. In *Abbildung 4* zeigt ein Screenshot den grafischen Aufbau des SpectroAnalyst mit den Bereichen Spektralselektion (links), Foto der selektierten Beobachtung (unten links), dynamische Visualisierung (rechts oben), Verwaltung, Korrektur und Glättung von Spektren sowie Metadatenverwaltung (unten).

Die Software bietet die Möglichkeit, Spektren aus gerätespezifischen Formaten (z. B. HandySpec-Textformat) zu importieren, mit dazugehörigen Fotoaufnahmen zu verlinken, die Rohspektren zu verwalten, Mittelwertspektren zu generieren, Korrekturen und diverse Glättungen vorzunehmen sowie Metadaten einzugeben und zu verwalten. In weiterer Folge können beliebige Spektren zu Varianten zusammengefasst und daraus wieder Mittelwertspektren erstellt werden. Aus mehreren Varianten ist es möglich, Analyse-Datensätze zu erstellen, für die eine umfangreiche deskriptive Statistik erstellt werden kann. Originale Spektralsignaturen können weiterverarbeitet werden, indem die Spektren dem Statistikpaket R mit dem dafür verfügbaren Paket PROSPEKTR (Stevens und Lopez, 2014) übergeben werden. Als Ergebnis gelangen verschiedene Spektralkurven wie Glättungen, Ableitungen, Trendbereinigungen usw. zum SpectroAnalyst zurück, werden in der Datenbank gespeichert und bei Bedarf visualisiert. Für alle im System verfügbaren Spektren (Originale und davon abgeleitete Da-

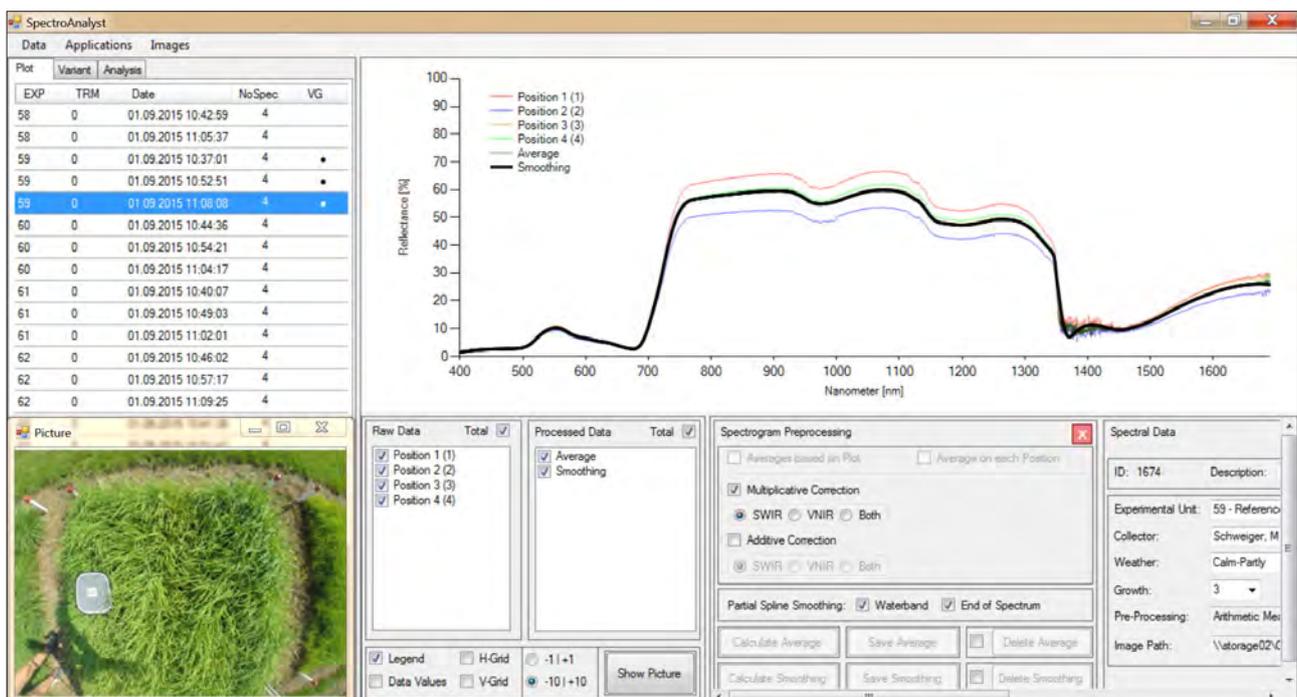


Abbildung 4: SpectroAnalyst – Software zur Verwaltung, Visualisierung, Aufbereitung und Auswertung von Spektren.

tensätze) können beliebige Indizes berechnet und ebenfalls in die Datenbank gespeichert werden.

Mit dem SpektrAnalyst ist es möglich, die häufig auftretende Verschiebung (*Sensor Shift*) der Kurve im Sensorübergangsbereich (im Fall des HandySpec Field VIS/NIR 1.7 befindet sich dieser bei 1000 nm – siehe *Abbildung 1*) entweder multiplikativ oder additiv zu korrigieren (Aasen *et al.*, 2014; Dorigo, 2008; Dorigo *et al.*, 2006; Mac Arthur *et al.*, 2012; Milton *et al.*, 2009). Um das an verschiedenen Stellen auftretende Rauschen in der Spektralsignatur weitgehend zu eliminieren, werden alle gespeicherten Spektren einer Glättung nach Savitzky-Golay (Savitzky und Golay, 1964) unterzogen. Dabei wird nicht die gesamte Signatur gleich behandelt, sondern die Glättung mit Hilfe eines „*Adaptive-Degree Polynomial Filter*“ nach Barak (1995) an den Kurvenverlauf angepasst.

Die wichtigste Funktionalität des SpektrAnalyst liegt darin, dass sämtliche Daten in einer SQLServer-Datenbank abgespeichert werden. Metadaten, Rohspektren, abgeleitete Spektren, alle vorgenommenen Korrekturen, die Zusammenfassung zu Varianten und Analyse-Sets, die Definitionen der diversen Vegetationsindizes, die Verweise auf Fotos und vieles mehr sind in einem relationalen Datenschema abgelegt und können bei Bedarf in den SpektrAnalyst zur Visualisierung oder weiteren Verarbeitung geladen werden. Die Daten können ebenfalls in beliebige Formate exportiert werden (beispielsweise als CSV-Dateien), um sie in Excel oder Spezialprogrammen wie GRAMS weiterzuverarbeiten. Die Verwendung einer Datenbank bietet hinsichtlich Datenmanagement, Datensicherheit und Skalierbarkeit erhebliche Vorteile. So kann der Datenbestand beispielsweise ohne Performanceverlust beliebig und nahezu unbegrenzt erweitert werden. Ein weiterer Vorteil für die praktische Arbeit liegt darin, dass mit dem SpektrAnalyst eine große Zahl von Spektren nicht nur einzeln, sondern gesammelt einer beliebigen Verarbeitungsfunktion wie z. B. einer Glättung oder der Berechnung von Vegetationsindizes zugeführt werden kann.

Um aus den Spektraldaten fachliche Erkenntnisse gewinnen und kausale Zusammenhänge zu Bewirtschaftungs- und Umweltfaktoren herstellen zu können, müssen neben den Spektren möglichst viele Parameter erfasst werden, welche den jeweiligen Spektren bzw. den davon abgeleiteten Informationen (z. B. Vegetationsindizes) direkt zugeordnet werden können. Um beispielsweise mit Hilfe von Spektren den Biomasseertrag schätzen zu können, braucht es für jede erhobene Spektralsignatur das exakte Gewicht der Biomasse. Es ist also in diesem Fall zu jeder Spektralmessung auch eine Ernte mit der Wiegung des Erntegutes oder der Trockenmassebestimmung notwendig. Ist die Anzahl an Ernteproben und dazugehörigen Spektren in für die statistische Analyse ausreichendem Maße vorhanden, kann mit der Bildung eines Modells (z. B. eine lineare Regressionsanalyse) begonnen werden. Je mehr Spektren und Erhebungsparameter mit starkem Zusammenhang einander zugeordnet werden können, desto stabiler wird das Modell. Eine wichtige Maßnahme im Zuge der Modellbildung ist die Reduktion der Spektraldaten auf jene Wellenlängen, welche hoch signifikante Zusammenhänge zu (bio)physikalischen Parametern aufweisen. Dazu gehört die Selektion von ein-

zelnen Bändern mit Hilfe von Korrelationsmatrizen, die Entfernung von irrelevanter Hintergrund-Reflektanz (*Continuum Removal*), schrittweise Regression, PCA (*Principal Components Analysis*) PLSR (*Partial Least Squares Regression*), derivative Spektralanalyse, usw. (Mac Arthur, 2011).

Ausgewählte Anwendungsbeispiele der Feldspektroskopie

Im Folgenden soll anhand von Anwendungsbeispielen erläutert werden, wie die Spektroskopie in Feldversuchen eingesetzt wird und welche Erkenntnisse für die Zustandsbeschreibung von Grünlandbeständen daraus abgeleitet werden können. Für die angewandte Grünlandforschung sind dabei vor allem solche Verfahren von Interesse, die eine technische Umsetzung in die Praxis des Grünlandmanagements ermöglichen.

Ableitung des Stickstoffernährungszustandes

Die Stickstoffbelastung von Grünlandstandorten zwingt vielerorts Landwirte und Berater zur Reduzierung des Düngeraufwandes, ohne dass sie über zuverlässige Daten des Versorgungsgrades der Pflanzen verfügen. Die Bestimmung des N-Gehaltes ist in der Regel mit aufwändiger Analytik verbunden. Hinzu kommt, dass sich mit fortschreitendem Wachstum der N-Bedarf ändert und wiederholte Beprobungen und Messungen nötig wären. Es ist wohl bekannt, dass Chlorophyllgehalt, photosynthetische Leistung des Pflanzenbestandes und N-Gehalt eng korreliert sind, und dass Gehaltsänderungen die spektrale Signatur in gesetzmäßiger Weise verändern. Als Folge einer höheren Chlorophyllkonzentration sinkt die Reflexion im roten Wellenlängenbereich, während sie im Bereich des nahen Infrarots ansteigt. Zwischen beiden Spektralbereichen steigt die prozentuale Reflexion sprunghaft an. Die dabei entstehende Flanke (*Red-Edge*) und dessen Wendepunkt (*Red Edge Inflection Point*, REIP) verschieben sich mit jeder Änderung im roten und infraroten Kanal.

Mistele und Schmidhalter (2008) haben an Weizen gezeigt, dass die Position dieser Flanke eng mit dem N-Ernährungsindex (*Nitrogen Nutrition Index*, NNI) des Bestandes korreliert (Lemaire *et al.*, 2008). Eigene Untersuchungen bestätigen diesen Zusammenhang auch für artenreiche Grünlandbestände (*Abbildung 5*). Damit ist es theoretisch möglich, den N-Versorgungszustand von Grünland mittels Spektrometrie zu schätzen. Diese Vorgehensweise setzt allerdings die Kenntnis der kritischen Stickstoffkonzentration voraus, also die Mindestkonzentration an Stickstoff in der oberirdischen Biomasse, die für eine maximale Trockenmasseakkumulation erforderlich ist und die über einen Stickstoffsteigerungsversuch ermittelt wird (Justes *et al.*, 1994).

Im nächsten Schritt wäre nun zu prüfen, wie robust die Schätzgleichung der Kritischen Stickstoffkonzentration ist, ob also eine oder wenige Schätzgleichungen genügen, um den NNI mittels Spektrometrie über unbekanntem Grünlandflächen hinreichend genau zu schätzen. Gleichzeitig wäre zu prüfen, ob die Beziehung zwischen REIP und NNI, wie in *Abbildung 5* gezeigt, zwischen mehreren Aufwüchsen und Standorten variiert, denn immerhin ist wohl dokumentiert,

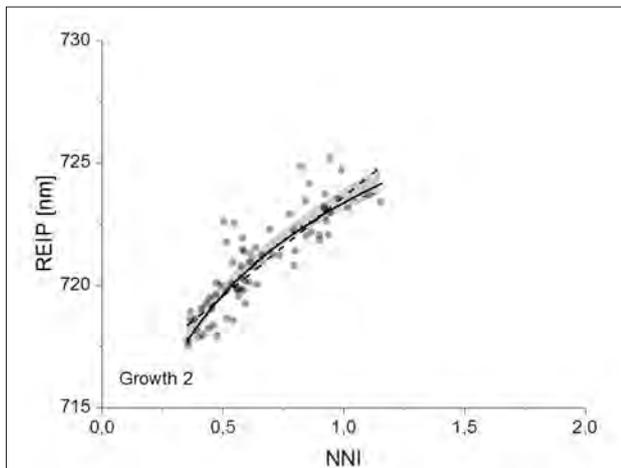


Abbildung 5: Vergleich des N-Ernährungsindex (NNI) mit dem Wendepunkt der Rot-Infrarot-Flanke (REIP) der spektralen Signatur. Daten aus einem N-Steigerungsversuch auf Grünland, INRES, Universität Bonn, Standort Klein-Altendorf. (Voelzke, 2014, unveröffentlicht).

dass die floristische Zusammensetzung einen Einfluss auf die spektrale Signatur hat (Gitelson und Merzlyak, 1996).

Detektion von Entwicklungsstadien/ Phenometrics

Spektrale Signaturen von Pflanzenbeständen zeigen typische Veränderungen während der Vegetationsperiode. Allerdings ist es in gemischten Pflanzenbeständen schwierig, diese anhand der Phänologie individueller Arten zu erfassen. Ersatzweise kann die Dynamik des Wachstums, die mit der phänologischen Entwicklung einhergeht, und die anhand von Änderungen der Biomasse, der Wuchshöhe, der Blattflächenentwicklung und der Bodendeckung erkennbar ist, mittels Spektroskopie verfolgt werden. Dazu werden die zeitlichen Änderungen von Vegetationsindizes, also Verhältniszahlen oder normalisierte Differenzen der Reflektanz in ausgewählten Kanälen, berechnet und in einer Zeitreihe dargestellt. Schließlich können aus diesen Verlaufskurven phänometrische Variablen abgeleitet werden, nämlich z.B. Beginn und Ende des Wachstums, Dauer der Vegetationsperiode, Zeitpunkt maximaler Biomasse (Abbildung 6).

Je nach Standorteigenschaften, Klima, Vegetationstyp und Bewirtschaftung fallen diese Verlaufskurven sehr unterschiedlich aus. Es kommt nach einer Nutzung und vollständigen Entblätterung des Grünlandbestandes naturgemäß zu einem Einbruch des NDVI. Dieser kann detektiert und für das Monitoring von Grünlandflächen verwendet werden.

Schließlich ist mit Fernerkundungssensoren die Detektion der phänometrischen Daten möglich, und zwar am Boden, getrennt für jedes Pixel. Extrahiert man pixelweise innerhalb einer Grünlandfläche die in *Abbildung 6* gezeigte Phänometrie, so werden Heterogenitäten erkennbar, die Rückschlüsse auf Bodeneigenschaften zulassen. In Kombination mit der Detektion des N-Ernährungsindex ermöglicht diese Technik eine recht genaue Beschreibung des Zustands im Grünland, die für die teilschlagspezifische Bewirtschaftung (z.B. teilschlagspezifische Gülledüngung; Schellberg und Lock

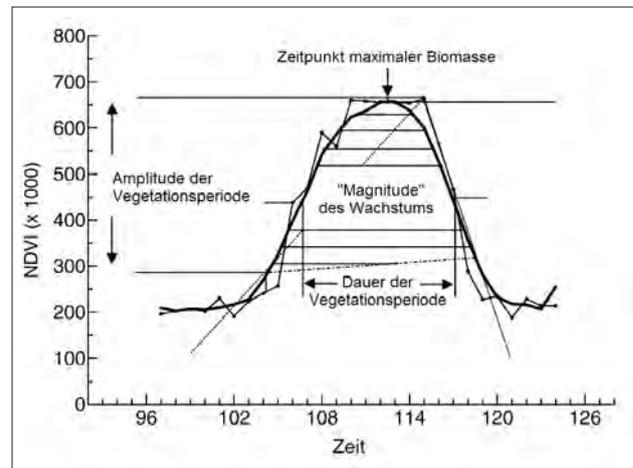


Abbildung 6: Ableitung phänometrischer Daten aus dem zeitlichen Verlauf des Vegetationsindex (NDVI) nach Reed et al. (1994).

(2009)) erforderlich ist. Für die großräumige und langjährige Kartierung der Phänometrie (Phänokartierung – Phenomapping) ergeben sich weiterreichende Anwendungen, nämlich z. B. in der Dokumentation von Bewirtschaftungsintensität und Klimavariabilität.

Perspektiven der Feldspektroskopie in der Grünlandforschung

Die nicht-invasive Beobachtung von Grünlandbeständen hat unter anderem das Ziel, Entwicklungsdynamiken und deren Abhängigkeit von Bewirtschaftungs- und Umwelteffekten zu beschreiben. Die mittels Feldspektroskopie laufend erfassten Spektラルsignaturen von Pflanzenbeständen können beispielsweise mit dem jeweiligen Witterungsverlauf in Beziehung gebracht werden. Aus dem Zusammenhang zwischen Entwicklungsphasen und Wetter, insbesondere Wetterextremen, lassen sich möglicherweise Modelle ableiten, die das Wachstum und letztlich den Ertrag unter veränderten Klimabedingungen abschätzen können. Gelingt es, ein derartiges Modell mit den Daten eines Klimaszenarios anzutreiben, ist eine konkrete Anwendung zur Abschätzung der Klimafolgen für die Grünlandwirtschaft umsetzbar.

Der Schwerpunkt in der Feldspektroskopie verlagert sich mehr und mehr zu bildgebenden Verfahren. Damit wird pro Messfläche nicht nur eine (mittlere) Signatur erfasst, sondern für jeden einzelnen Pixel innerhalb des Messbereiches jeweils eigene Spektraldaten. Gerade im Grünland, das sich aus verschiedenen Arten zusammensetzt, ist eine optische Trennung von großem Vorteil, um einzelne Effekte gesondert betrachten zu können (Stichwort: *Spectral Unmixing*). Hier besteht auch eine wichtige Querverbindung zur klassischen Fernerkundung, wo multi- und hyperspektrale Daten für große Teile der Erdoberfläche in mittlerweile hoher Auflösung gesammelt werden. Die präzisen Ergebnisse aus der Feldspektroskopie lassen sich sehr gut dafür verwenden, einerseits satellitengestützte Daten zu kalibrieren und zu evaluieren und andererseits aus Felddaten entwickelte Modelle in großem Maßstab, nämlich unter Einbeziehung von Satellitenaufnahmen, anzuwenden.

Literatur

- Aasen, H., M.L.Gnyp, Y. Miao and G. Bareth (2014): Automated Hyperspectral Vegetation Index Retrieval from Multiple Correlation Matrices with HyperCor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 80 (8), 785-795.
- Barak, P. (1995): Smoothing and Differentiation by an Adaptive-Degree Polynomial Filter. *Analytical Chemistry* 67 (17), 2758-2762.
- Buchgraber, K. (1997): Der Einfluss des Schnittzeitpunktes auf den Mineralstoffgehalt des Grünlandfutters. Conference on nutrition of domestic animals „Zadavec-Erjavec-Days“, Radenci, Zivinorejsko-Veterinarski zavod za Pomurje Murska Sobota, 27.-28. Oktober 1997, 57-62.
- Buchgraber, K. und E.M. Pötsch (1999): Einfluss der Höhenstufen auf Futterertrag, Futterqualität, Tierbesatz und Milchleistung: Landkalendar 2000, 63. Jahrgang, Leopold Stocker Verlag, Graz, 133-138.
- Daughtry, C.S.T., V.C. Vanderbilt and V.J. Pollara (1982): Variability of Reflectance Measurements with Sensor Altitude and Canopy Type. *Agronomy Journal* 74 (4), 744-751.
- Dorigo, W.A. (2008): Retrieving canopy variables by radiative transfer model inversion - a regional approach for imaging spectrometer data. Dissertation, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, 230 S.
- Dorigo, W.A., M.Bachmann and W. Heldens (2006): AS Toolbox & Processing of field spectra, User's manual, German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, 31 S.
- Fricke, T. and M. Wachendorf (2013): Combining ultrasonic sward height and spectral signatures to assess the biomass of legume-grass swards. *Computers and Electronics in Agriculture* 99 (0), 236-247.
- Fricke, T., F. Richter and M. Wachendorf (2011): Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 79 (2), 142-152.
- Gitelson, A.A. und Merzlyak, M.N. (1996): Signature Analysis of Leaf Reflectance Spectra: Algorithm Development for Remote Sensing of Chlorophyll. *Journal of Plant Physiology* 148 (3-4), 494-500.
- Govender, M., K. Chetty and H. Bulcock (2007): A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water SA* 33 (2), 145-152.
- Hammes, G.G. (2005): Fundamentals of Spectroscopy: Spectroscopy for the Biological Sciences, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 1-15.
- Jespersen, N. (2006): Chapter 5 General principles of spectroscopy and spectroscopic analysis. In Ahuja and Jespersen (Eds.): *Comprehensive Analytical Chemistry*, Volume 47, Elsevier, 111-155.
- Jung, A., C. Götze and C. Gläßer (2009): A Comparison of four Spectrometers and their Effect on the Similarity of Spectral Libraries. 6th EARSeL SIG IS Workshop, Tel-Aviv University, European Association of Remote Sensing Laboratories, March 16-19, 2009, 6.
- Justes, E., B. Mary, J.-M. Meynard, J.-M. Machet and L. Thelier-Huche (1994): Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany* 74 (4), 397-407.
- Lemaire, G., M.-H. Jeuffroy and F. Gastal (2008): Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy* 28 (4), 614-624.
- MacArthur, A. (2011): Introduction to Field Spectroscopy, NERC Field Spectroscopy Facility, Monte Bondone, Italy, Course Handbook - COST Action ES0903, 63 S.
- MacArthur, A., C.J. MacLellan and T. Malthus (2012): The Fields of View and Directional Response Functions of Two Field Spectroradiometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50 (10), 3892-3907.
- Milton, E.J. (1987): Principles of field spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing* 8 (12), 1807-1827.
- Milton, E.J., M.E. Schaepman, K. Anderson, M. Kneubühler and N. Fox (2009): Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* 113 (Supplement 1), S92-S109.
- Mistele, B. and U. Schmidhalter (2008): Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *European Journal of Agronomy* 29 (4), 184-190.
- Perbandt, D., T. Fricke und M. Wachendorf (2009): Der Einfluss des Bewölkungsgrades auf hyperspektrale Messungen im Feld am Beispiel eines Klee-Gras-Bestandes. 52. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Halle/Saale, Band 21, September 1-3, 2009, 51-52.
- Pötsch, E.M. (1995): Einfluss der Düngung und Nutzung des Grünlandes auf den Gehalt an Futterinhaltsstoffen. Conference on nutrition of domestic animals „Zadavec-Erjavec-Days“, Radenci, Zivinorejsko-Veterinarski zavod za Pomurje Murska Sobota, 26.-27. Oktober 1995, 85-95.
- Pötsch, E.M. (2009): Einflussfaktoren auf Ertrag und Qualität von Grünlandfutter. Fortbildungsveranstaltung „Tierärztliche Bestandsbetreuung von Milchviehbetrieben in Österreich“, Gumpenstein, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 4.-6. Juni 2009, 5-13.
- Pötsch, E.M., R. Resch, A. Schaumberger and K. Buchgraber (2006): Effect of different management systems on quality parameters of forage from mountainous grassland. 21st EGF General Meeting "Sustainable Grassland productivity", Badajoz, Spain, Grassland Science in Europe, 11, April 3-6, 2006, 484-486.
- Reed, B.C., J.F. Brown, D. VanderZee, T.R. Loveland, J.W. Merchant and D.O. Ohlen (1994): Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science* 5 (5), 703-714.
- Rollin, E.M., E.J. Milton and D.R. Emery (2000): Reference panel anisotropy and diffuse radiation - some implications for field spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing* 21 (15), 2799-2810.
- Savitzky, A. and M.J.E. Golay (1964): Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry* 36 (8), 1627-1639.
- Schellberg, J. and R. Lock (2009): A site-specific slurry application technique on grassland and on arable crops. *Bioresource Technology* 100 (1), 280-286.
- Schellberg, J., M.J. Hill, R. Gerhards, M. Rothmund and M. Braun (2008): Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy* 29 (2-3), 59-71.
- Sims, D.A. and J.A. Gamon (2003): Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment* 84 (4), 526-537.
- Stevens, A. and L.R. Lopez (2014): An introduction to the prospectr package, 22 S., <http://antoinestevens.github.io/prospectr/>, (07.09.2015).
- Thenkabail, P.S., E.A. Enclona, M.S. Ashton and B. Van Der Meer (2004): Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. *Remote Sensing of Environment* 91 (3-4), 354-376.
- Thenkabail, P.S., M.K. Gumma, P. Teluguntla and I.A. Mohammed (2014): Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation and Agricultural Crops. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 80 (8), 697-709.
- Tsai, F. and W. Philpot (1998): Derivative Analysis of Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment* 66 (1), 41-51.