



MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH

HBLFA RAUMBERG - GUMPENSTEIN
LANDWIRTSCHAFT

Abschlussbericht SpectroGrass

Projekt Nr. 101019

**Implementierung der Feldspektroskopie
zur nicht-invasiven Untersuchung von
Pflanzenbeständen**

**Implementation of Field Spectroscopy for
non-invasive Vegetation Analysis**

Projektleitung:

Mag. Dr. Andreas Schaumberger, MSc
HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Projektmitarbeiter:

Medardus Schweiger, HBLFA Raumberg-Gumpenstein
Manuel Adelwöhrer, HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Projektlaufzeit:

2014 – 2017

raumberg-gumpenstein.at



Impressum

Herausgeber

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning
des Bundesministeriums für Land- und
Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft

Direktion:

Dir. Dr. Anton Hausleitner
LFI Dr. Johann Gasteiner

Für den Inhalt verantwortlich

Andreas Schaumberger

Druck, Verlag und © 2017

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning

Dieses Forschungsprojekt wird vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft finanziert.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
Summary	6
1 Einleitung.....	7
2 Grundlagen der Feldspektroskopie.....	9
3 Methodik und praktische Umsetzung von Messungen	12
3.1 Einfluss der Witterung auf die Messung von Spektren	12
3.2 Standardisierung von Messungen durch eine mobile Messplattform	16
3.3 Beschreibung des Messablaufs	23
3.4 Vergleich von unterschiedlichen Messsystemen	27
3.5 Einstellungen am Feldspektrometer	29
3.6 Fehlerbehebung am Spektrometer	31
3.6.1 Testbedingungen	31
3.6.2 Testergebnisse.....	32
3.6.3 Fehleridentifikation und Behebung.....	37
4 Aufbau einer Spektraldatenbank für Grünland	38
4.1 Struktur von Spektraldaten im Grünland	38
4.2 Experimente mit feldspektroskopischen Beobachtungen	39
4.2.1 Versuchsanlage ClimGrass.....	39
4.2.2 Feldspektroskopie-Referenz Reinkulturen	40
4.2.3 Feldspektroskopie-Referenz Biomassedynamik	41
4.2.4 Langzeitdüngungsversuch in Admont.....	44
4.3 Beispiele zur Analyse von Spektralsignaturen.....	45
5 Datenmanagement und Datenaufbereitung	49
5.1.1 Aufbereitung der gerätespezifischen Spektralrohdaten	49
5.1.2 Korrektur des Sensor-Shifts	50
5.1.3 Datenmanagement mit dem SpectroAnalyst	51
5.1.4 Datenmodellierung.....	53
6 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	54
7 Literatur	56

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.

Im Jahr 2014 wurde an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein damit begonnen, ausgewählte pflanzenbauliche Versuche regelmäßig und systematisch mit einem Feldspektrometer zu beobachten. Dazu wurde ein Gerät vom Typ HandySpec der Firma tec5 angeschafft. 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 unter anderem Auskunft über Pigmentkonzentrationen (z. B. Chlorophyll), Nährstoffversorgung der Pflanzen, Wassergehalt, Biomasse, Stresssituationen, usw. geben.

Da die Feldspektrometrie unter natürlichen Bedingungen am Feld stattfindet, sind die Ergebnisse sehr stark von einer sorgfältigen Durchführung der Messung abhängig. Die Intensität der Strahlung (Wolkenbedeckung) sowie die von der Tages- und Jahreszeit abhängige Geometrie zwischen Strahlungsquelle (Sonne), Pflanzenbestand und Spektralsensor hat erheblichen Einfluss auf die Messung. Als Reaktion auf ständig wechselnde atmosphärische Bedingungen ist daher die laufende Kalibrierung und Referenzmessung eine wichtige Voraussetzung für korrekte Daten. Im Verlauf des Projektes SpectroGrass wurden in langen und aufwendigen Testreihen verschiedene Messmethoden und Arbeitsabläufe sowie deren praktische Einsatzmöglichkeiten für Grünlandexperimente untersucht. Diese Tests befassten sich unter anderem damit, Schlagschatten bei direkter Sonnenstrahlung abzuschwächen, Vergleiche mit anderen Messsystemen anzustellen, sowie die Grundeinstellungen des Spektrometers zu variieren.

Als Unterstützung für möglichst effiziente Messkampagnen mit geringem Personalbedarf wurde eine mobile Erfassungseinheit entwickelt, mit der Messungen unter wiederholbaren Bedingungen durchgeführt werden können. Wird die Entwicklung eines bestimmten Pflanzenbestandes über eine längere Periode anhand von regelmäßigen, in unserem Fall wöchentlichen Messungen beobachtet, ist dieselbe Positionierung des Erfassungssensors entscheidend. Die Höhe des Sensors über Grund bestimmt beispielsweise die Größe der Aufnahmefläche, da die Reflexion des Bestandes innerhalb eines Messkegels mit konstantem Öffnungswinkel als Mittelwert erfasst wird. Ebenso wichtig ist eine wiederholbare horizontale Ausrichtung, da nur so bei allen Messungen dieselbe Pflanzenbestandszusammensetzung mit den gleichen Individuen vom Messkegel erfasst wird. Die exakte Ausrichtung des Feldspektrometers bei jeder einzelnen Messkampagne wird durch den Einsatz der entwickelten mobilen Erfassungseinheit (Spektromobil) gewährleistet. Zusätzlich wird diese Plattform auch dafür genutzt, bei jeder Messung der Spektren zeitgleich die Bestandeshöhe mit Ultraschallsensoren zu erfassen. Die fortlaufende Veränderung der Pflanzenbestandshöhe ist gut geeignet, die Wachstumsdynamik im Grünland zu beschreiben und für sich allein, aber auch in Kombination mit Spektraldaten als Parameter in statischen Modellen zur Beschreibung von Ertrags- und Qualitätsentwicklungen Verwendung zu finden.

Um zwischen Spektren und (bio)physikalischen Parametern kausale Zusammenhänge herstellen zu können, sind neben umfangreichen Spektralmessungen intensive Beprobungen des Pflanzenbestandes durchzuführen, die eine Voraussetzung für die künftige statistische Auswertung darstellen. Statistisch gesicherte Erkenntnisse bzw. Modelle aus den Erhebungsdaten können nur dann abgeleitet werden, wenn viele Spektren über mehrere Vegetationsperioden und unterschiedliche Experimente zur Verfügung stehen. Gleichzeitig müssen die beobachteten Bestände einer umfangreichen Analyse im Labor unterzogen werden, damit den Spektren Messdaten zu Ertrag und Qualität gegenübergestellt werden können.

Im Projekt SpectroGrass wurden die methodischen Grundlagen geschaffen, um einerseits die Erhebungen möglichst effizient zu gestalten und die Daten mit größtmöglicher Qualität erfassen zu können. Andererseits musste eine geeignete technische Infrastruktur geschaffen werden, um Speicherung, Verwaltung und Analyse der Spektren bestmöglich zu unterstützen. In weiteren Projekten, wie beispielsweise ClimGrassEco, werden die hier entwickelten Workflows und Softwaretools dafür genutzt, möglichst umfangreiche Datensätze über mehrere Jahre aufzubauen und für die Kalibrierung und Validierung von statistischen Modellen zu verwenden. Der große Datenumfang, insbesondere jener der Spektren, bedarf eines soliden Datenmanagements und einer effizienten Datenaufbereitung. Die in SpectroGrass entwickelten Softwaretools und daran angebundene Datenbankmanagementsysteme 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 non-invasive without any effect 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 conventional plant surveys and crop height determination considerably.

In 2014 we started regular and systematic spectral observations with a device of type HandySpec from tec5 on selected experiments at AREC Raumberg-Gumpenstein. 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. Therefore, 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 affects the spectral measurements significantly. In response of permanent changes of the atmosphere repeated calibration and reference measurements are an important pre-condition for accurate data. During the project SpectroGrass extensive test series were carry out to analyze the workflow and measurement methods for a practical use on grassland experiments. These tests cover, for example, the reduction of shadows at direct sunshine conditions, comparison with other device and variation of spectrometer settings.

We developed a mobile platform to support efficient measurement campaigns with reduced manpower requirements, whereby observations on plots can be repeated exactly. The same position of the sensor is crucial for long-term and repeated measurements over the same plants. Especially the height of the sensor above ground determine the average reflection value because of the constant view angle. The same horizontal position for each observation ensures the view on the same plants, which is important for getting time series of canopy development. The mobile platform supports all these positioning efforts and it contains also ultra-sonic sensors for measuring the canopy height at the same time. The development of plant height can be used directly or in combination with spectra to describe grassland growth dynamics in statistical models.

Many plant samples as well as a substantial number of spectral data are necessary to correlate spectral data and (bio)physical plant parameters. The stability of statistical models depend on observation data from many growing seasons and different experiments. Spectral data need to be managed properly and processed efficiently. In SpectroGrass we developed a methodological basis for efficient observations in high quality for any future grassland experiments and tools to store, manage and analyze a huge amount of spectral data. Further projects can be built on these developments to avoid most of the very time-consuming workflows around spectral data management. Software tools with interface to database management systems are essential components and the pre-condition for a well-organized spectral data analysis. These analyses are finally the key for gaining information about the correlation of vegetation development dynamics and how they are influenced.

1 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 Pflanzenbeständen stellt das Grünland mit seinen unterschiedlichen Nutzungsformen und damit auch unterschiedlichen Ansprüchen eine besondere Herausforderung dar. Im Grünland wirken die verschiedenen Einflüsse direkt und indirekt auf die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes 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 zu unterziehen. 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 Bewerkstelligung 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. Im Projekt SpectroGrass wird die Implementierung der Feldspektroskopie im Kontext der Grünlandforschung thematisiert, wobei in

erster Linie methodische Grundlagen bei der Datenerfassung und die bestmögliche technische Unterstützung des Datenmanagements und der Analyse bearbeitet wurden.

Das Projekt SpectroGrass dient der Einführung der Feldspektroskopie als nicht-invasive Messmethodik für Grünlandexperimente an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein. Zu Projektbeginn mussten zunächst Erfahrungen gesammelt werden, um anfangs bestehende Gerätefehler sowie die vielfältigen Einflüsse auf die Spektralsignaturen zu verstehen. Messungen mit dem Feldspektrometer sind zwar vergleichsweise einfach durchzuführen, allerdings sind die Rahmenbedingungen und das Verständnis für Einflussfaktoren die Voraussetzung für die Erhebung brauchbarer Daten. Dies betrifft in erster Linie die große Abhängigkeit der Datenqualität vom Zustand der Atmosphäre. Bewölkung bzw. schnell verändernde Strahlungsverhältnisse beeinflussen die Kalibrierung und haben damit große Wirkung auf die aus Umgebungsstrahlung und Oberflächenreflexion berechneten Ergebnisse. Darauf abgestimmte Einstellungen des Gerätes wie zum Beispiel die interne Messwiederholungsrate, die Integrationszeit und die Anzahl an echten Messwiederholungen spielen bei der praktischen Erhebung im Feld eine große Rolle. Auch Messzeitpunkte und der davon abhängige Sonnenstand sind Einflussgrößen, die sich auf die Messergebnisse auswirken. In der Regel versucht man, die Messungen in einem vergleichbaren Zeitfenster (beispielsweise zwischen 11:00 und 14:00 Uhr) durchzuführen.

Dazu kommt die Art und Weise, wie das Gerät bzw. der Sensor über den Bestand gebracht wird. Die Wiederholbarkeit von Messungen hängt von der exakten Positionierung des Sensors ab; im Verlauf einer Messreihe sollten dieselben Individuen und die gleiche Beobachtungsfläche erfasst werden. Dies wird durch eine exakte horizontale und vertikale Ausrichtung des Sensors bei jeder Messung bewerkstelligt. In einem mehrjährigen, iterativen Prozess haben wir dafür eine mobile Messplattform, das „Spektromobil“, entwickelt, welches die genaue Positionierung über einer Versuchsparzelle unterstützt. Bei den wöchentlichen Messungen kann damit immer wieder genau die gleiche Position eingenommen werden. Das Spektromobil bietet zusätzlich die Möglichkeit, mit Ultraschallsensoren die Pflanzenbestandshöhe zu messen. Wie Fricke und Wachendorf (2013) zeigen, eignet sich die Kombination von Spektren und Bestandeshöhen sehr gut für die Schätzung von Erträgen.

Besonders große Verzerrungen in den Reflexionswerten werden durch Schatten auf der Beobachtungsfläche hervorgerufen. Insbesondere bei den Erhebungen in der ClimGrass-Versuchsanlage, in der die Parzellen von Gestängen mit Halterungen für Heizungen und Begasungsringe umgeben sind, ist das Auftreten von Schlagschatten ein großes Problem. In zahlreichen Testmessungen wurde versucht, diesen Effekt der Schattenbildung durch die Bildung von diffusen Strahlungsverhältnissen zu minimieren. Dazu wurde ein Textil großflächig über die Parzelle gespannt, um den Anteil der direkten Strahlung zugunsten der indirekten Strahlung zu minimieren.

Die hier bei weitem nicht vollständig aufgezählten Beispiele sollen zeigen, dass ein großer Teil der Projektlaufzeit dazu verwendet werden musste, praktische Erfahrungen bei der Messung von Spektren zu sammeln. Diese Erfahrungen sind die Voraussetzung, die Qualität der Messergebnisse richtig einordnen und auf problembehaftete Spektralsignaturen entsprechend reagieren zu können.

Einen nicht zu unterschätzenden Bereich stellt das Management von Spektraldaten dar. Die große Menge an Daten und deren spezifische Struktur braucht ein geeignetes Datenmodell mit einer entsprechenden Benutzerschnittstelle. Die effiziente Bearbeitbarkeit dieser Daten ist die Voraussetzung für alle späteren Analysen und die Anwendung der Spektren. In SpectroGrass wurde dafür eine geeignete Software mit Datenbankanbindung entwickelt.

2 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). *Abbildung 1* zeigt den Bereich des elektromagnetischen Spektrums, welcher für die meisten Anwendungen in der Feldspektroskopie relevant ist.

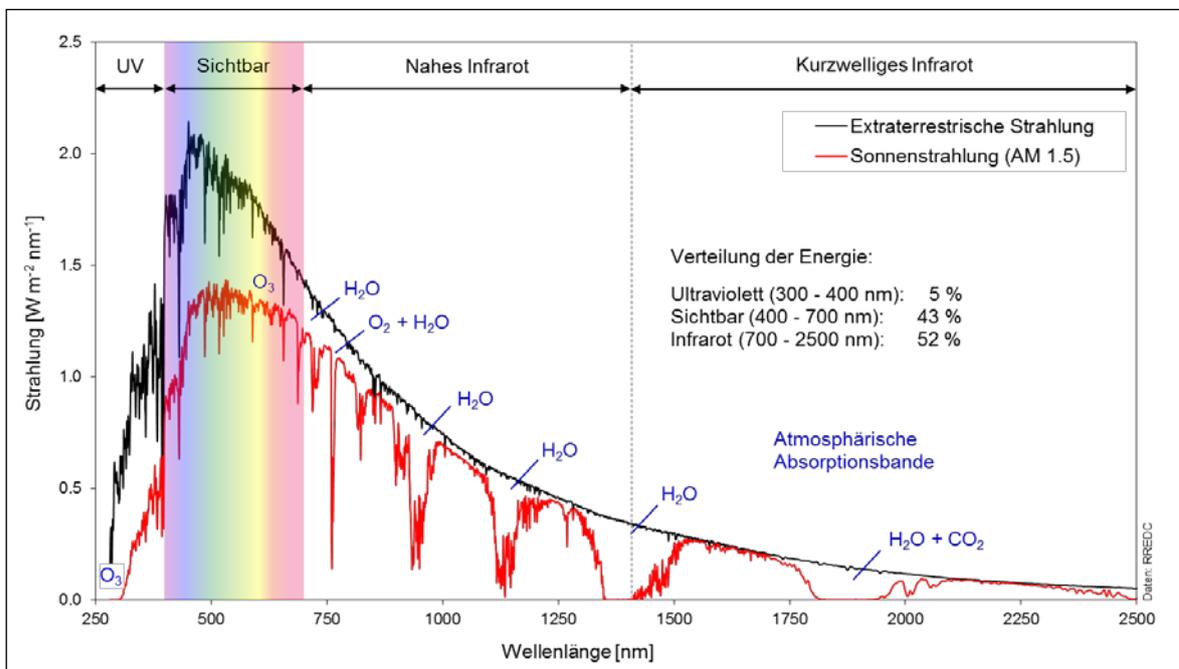


Abbildung 1: Elektromagnetisches Strahlungsspektrum des Sonnenlichts

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 elektromagnetischen Strahlung aufgezeichnet und ausgewertet.

Abbildung 2 zeigt Beispiele von Reflexionsspektren für unterschiedliche Oberflächen, aufgenommen von einem Feldspektrometer im Spektralbereich 400 – 1700 nm. Gemessen wurden Reinbestände von Weißklee (*Trifolium repens*) und Englisch Raygras (*Lolium perenne*) 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 oder den Stress von Pflanzen zu interpretieren (Clevers, 1999, Muharam *et al.*, 2015, Smith *et al.*, 2004).

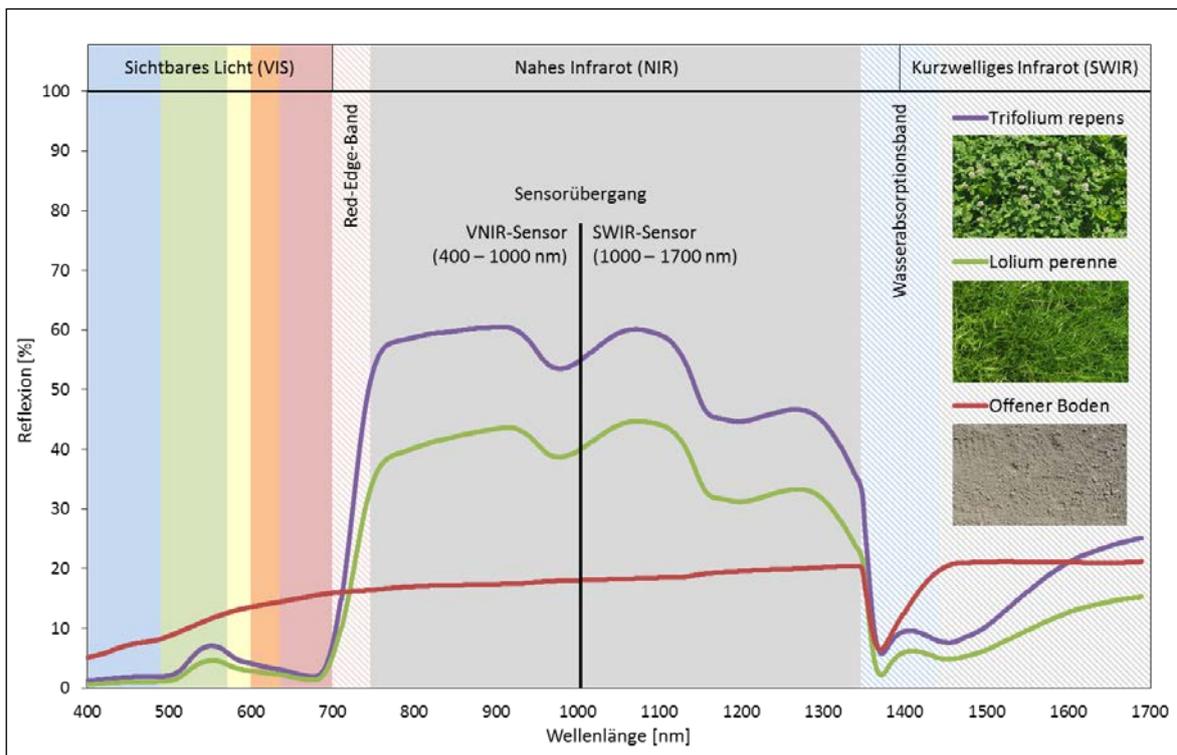


Abbildung 2: Beispiele von Reflexionsspektren unterschiedlicher Oberflächen mit einer Darstellung der wichtigsten Bänder im Wellenbereich von 400 bis 1700 nm

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, welches im Projekt SpectroGrass zum Einsatz kommt, 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 1-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 (MacArthur, 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.

Die Spektralsignatur für Vegetation weist einige Besonderheiten auf, die *Abbildung 3* schematisch dargestellt werden. Im sichtbaren Spektrum zeigt sich, bedingt durch den Chlorophyllgehalt der Pflanzen, eine starke Absorption im blauen und roten Band sowie eine Reflexion im grünen Band der Strahlung. Im Übergang zum Nahen Infrarot (Red Edge) steigt die Reflexion stark an. Dies liegt an der mehrfachen Reflexion der Infrarotstrahlung innerhalb der pflanzlichen Zellstrukturen.

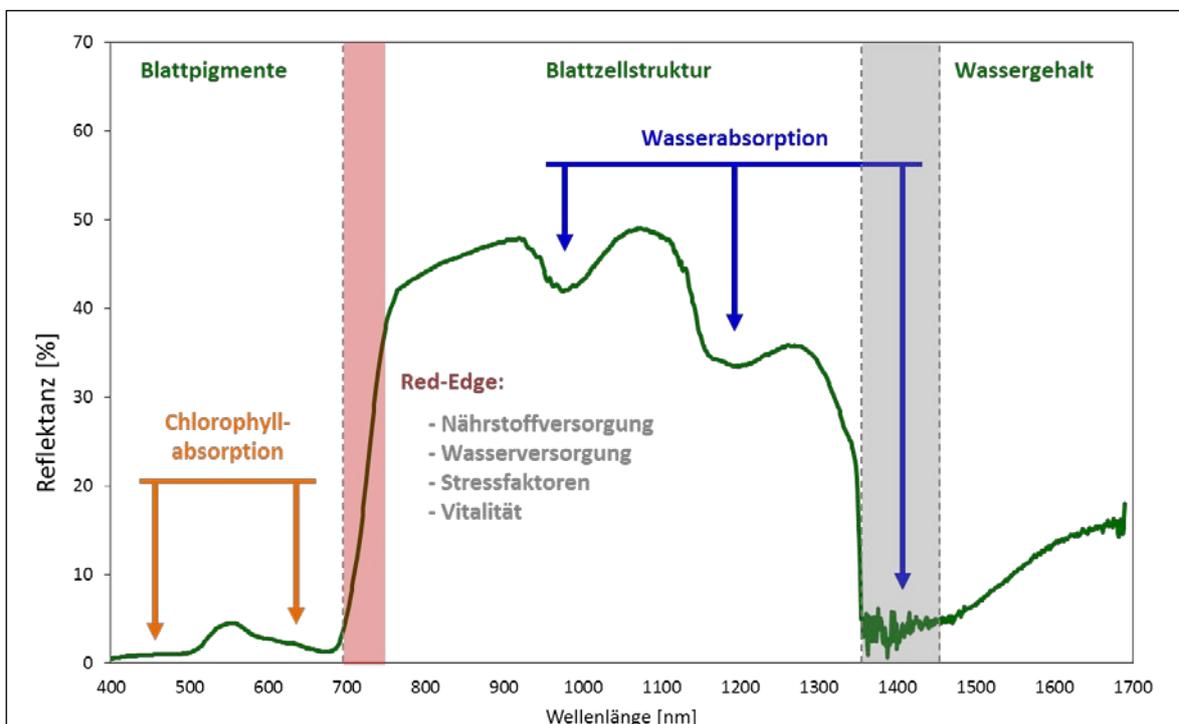


Abbildung 3: Typische Spektralsignatur einer mit Vegetation bewachsenen Oberfläche

Die in *Abbildung 3* dargestellte Signatur zeigt 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 3* wurden die Signaturen geglättet und daher ist das Signalaussehen 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 3* deutlich zu sehen sind, für Auswertungen von feuchtigkeitssensitiven Vegetationsparametern sehr gut geeignet (Sims und Gamon, 2003).

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

hauchzarte Cirruswolken bei fast wolkenlosen Bedingungen als auch Veränderungen innerhalb einer vollständig geschlossenen Wolkendecke können einen signifikanten Einfluss auf die Strahlungsintensität haben und beeinflussen das Messergebnis (MacArthur, 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 scheitert 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 (MacArthur, 2011). Alternativ dazu kann die Einstrahlung während der Reflexionsmessung durch einen nach oben gerichteten Spektroskop 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 Field VIS/NIR 1.7 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).

3 Methodik und praktische Umsetzung von Messungen

3.1 Einfluss der Witterung auf die Messung von Spektren

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 bestenfalls nur angestrebt 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 jeder Messung 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.*, 2009a).

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.

Abschattungen spielen vor allem im Rahmen der Versuchsanlage ClimGrass eine große Rolle, da hier zahlreiche Gestänge zu unterschiedlichen Tageszeiten Schatten auf die Beobachtungsflächen bzw. auf die Spektrometersensoren werfen können. Um den Effekt der Abschattung quantifizieren zu können, wurden Beobachtungssituationen mit künstlichen Schatteneffekten geschaffen und Messungen in mehrfacher Wiederholung durchgeführt. *Abbildung 4* zeigt die Ergebnisse einer Reihe von verschiedenen Abschattungskonstellationen und deren Einfluss auf die Spektralsignatur.

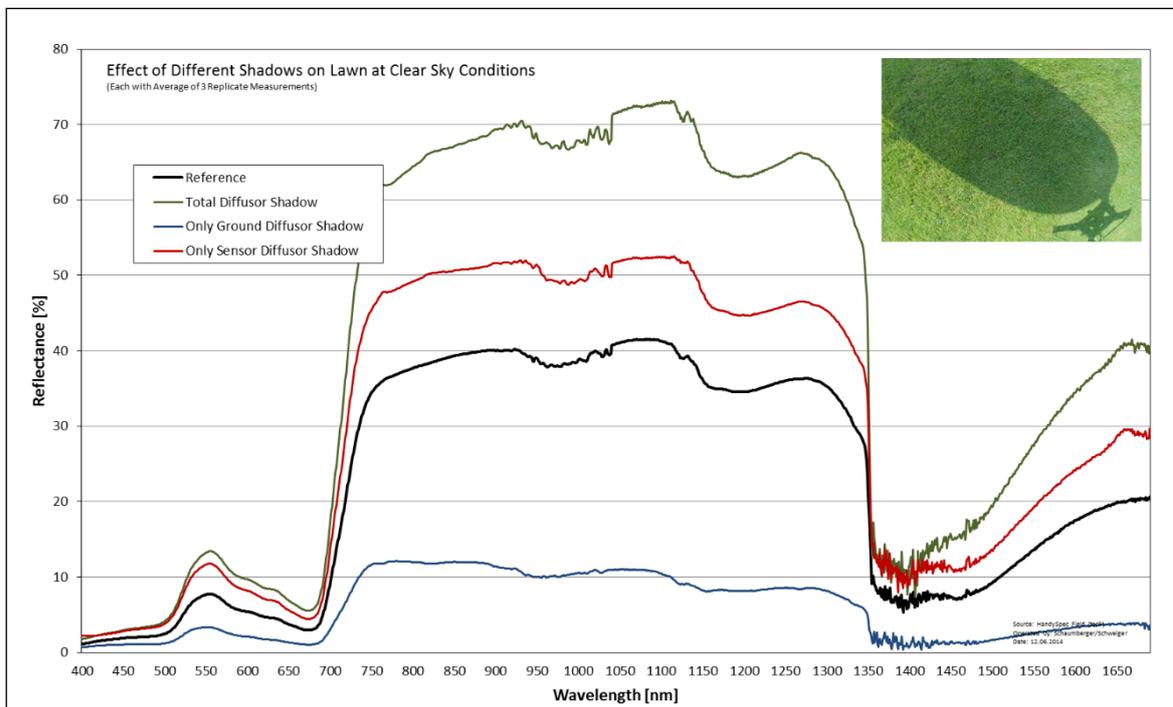


Abbildung 4: Einfluss der Abschattung bei der Spektralmessung mit tec5 HandySpec

Die Kurve „Total Diffusor Shadow“ zeigt beispielsweise sehr hohe Reflexionswerte, da der nach oben gerichtete Sensor zur Messung der Umgebungsstrahlung abgeschattet wurde und das Beobachtungsmedium (Rasen) unter voller Sonnenbestrahlung stand. Die Beschattung der Vegetation mit einem nicht beschatteten Cosinus-Korrektor führt zum gegenteiligen Effekt (vgl. blaue Kurve).

Eine systematische Beschattung und deren Effekt auf Spektren wurde mit einer Holzgitterkonstruktion bewerkstelligt, die je nach Platzierung unterschiedliche Schattenintensitäten verursacht. Die Ergebnisse sind in *Abbildung 5* dargestellt.

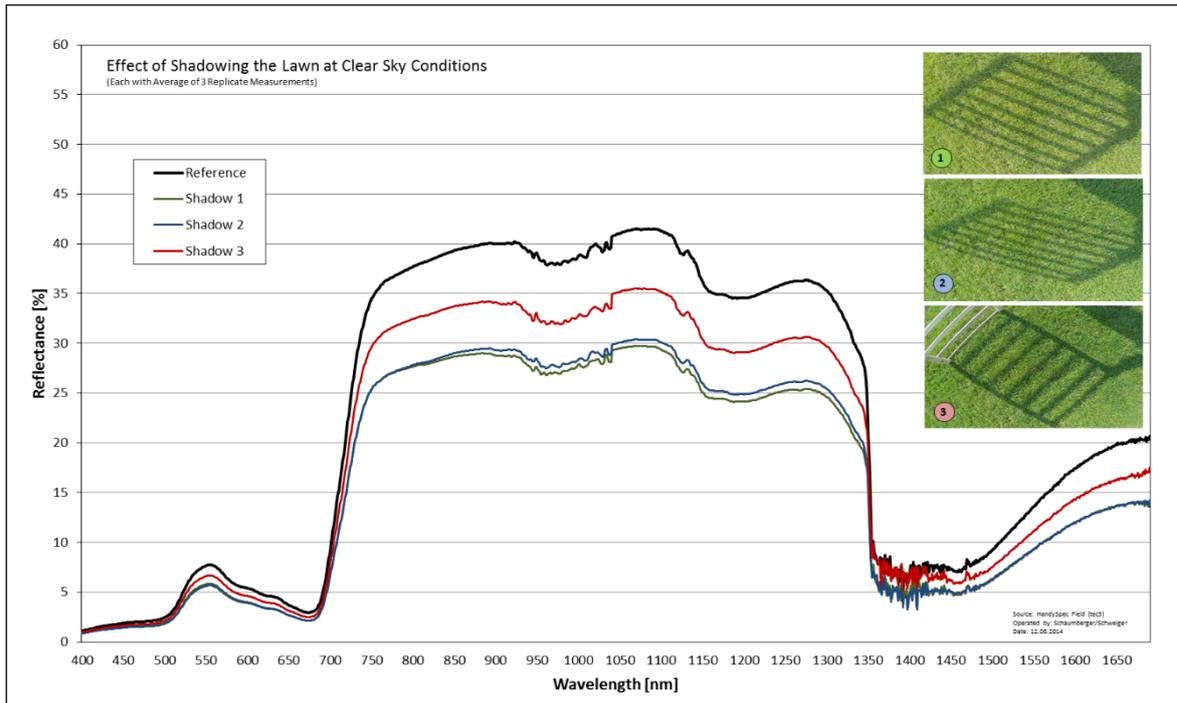


Abbildung 5: Spektren einer Rasenfläche mit systematischer Beschattung

Mit dieser Untersuchung ist nachgewiesen, dass sich eine differenzierte Beschattung, wie sie innerhalb eines Pflanzenbestandes besteht, auf die Spektralsignatur auswirkt. *Abbildung 6* zeigt die Signaturen weiterer Schattensituationen, diesmal allerdings auf einen bereits weiter entwickelten Grünlandbestand.

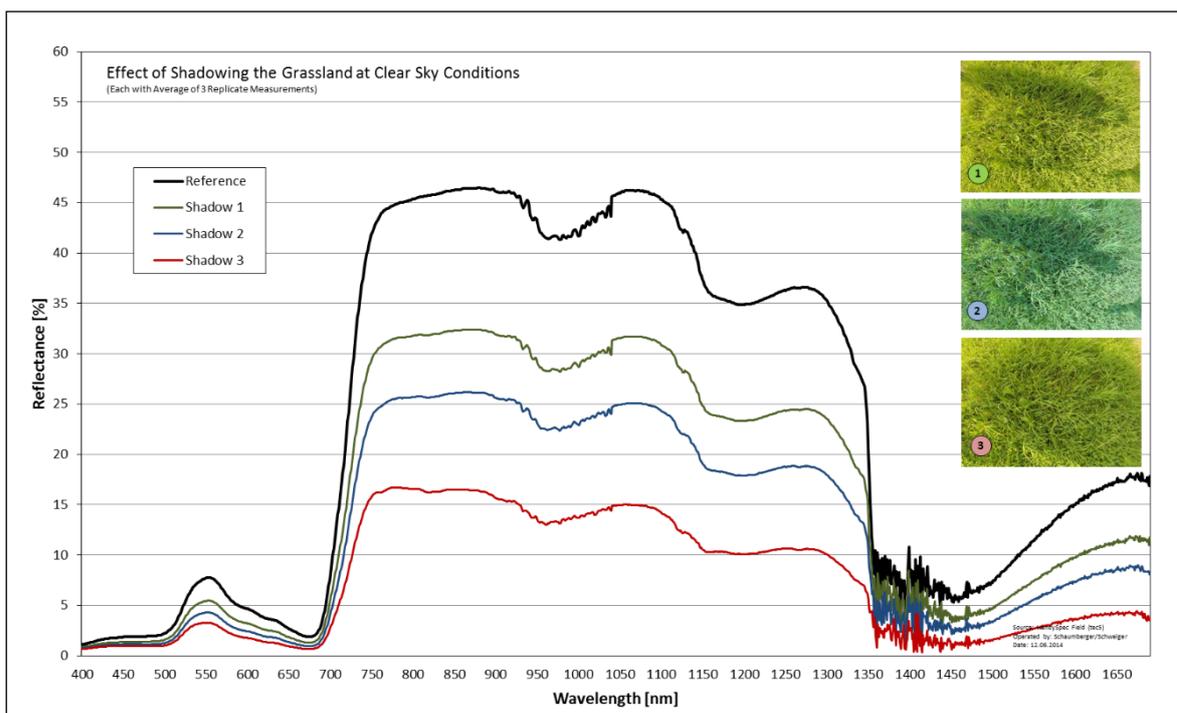


Abbildung 6: Effekte unterschiedlicher Schattenquellen auf die Spektren von Grünland

Neben den Gestängen der ClimGrass-Versuchsanlage, ist auch die Schattenbildung durch den mobilen Messwagen, wie die *Abbildung 7* zeigt, ein Problem, das gelöst werden muss. Dazu wurde mit mehreren Varianten einer partiellen Abschattung experimentiert. Ziel war es, durch ein halbtransparentes Material eine diffuse Lichtsituation zu schaffen, welches starke Schlagschatten teilweise aufzulösen vermag.



Abbildung 7: Erzeugung eines diffusen Schattens während der Messungen von Spektren am Grünland

Die Unterschiede zwischen den gemessenen Spektren bei einer Verwendung des Textils zur künstlichen Beschattung, wie in *Abbildung 7* dargestellt, und einer Messung ohne Beschattung wurden am 25.06.2015, ein wolkenloser Tag, getestet und statistisch ausgewertet. Dazu wurden unmittelbar aufeinanderfolgend Messungen auf 18 verschiedenen Parzellen des ClimGrass-Experimentes durchgeführt und aus den erhobenen Spektren die Standardabweichung gerechnet. In *Abbildung 8* ist das Ergebnis dieser Auswertung dargestellt.

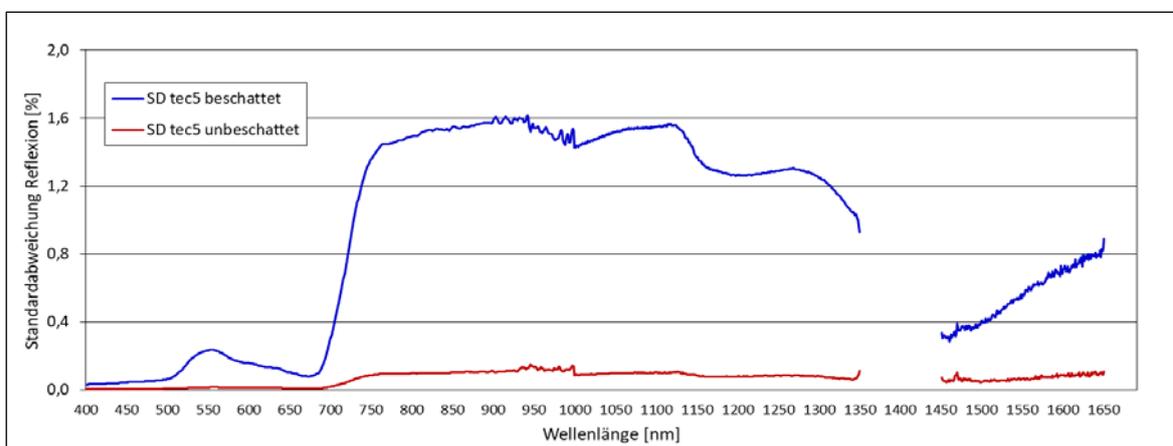


Abbildung 8: Vergleich der Standardabweichungen von gemessenen Spektren mit und ohne Abschattung

Es zeigt sich, dass die Spektren bei einer Beschattung über den gesamten Wertebereich der Spektralsignatur eine deutlich höhere Variabilität aufweisen als bei den nicht beschatteten Messungen. Der Grund dafür liegt in der nur schwer zu realisierenden Kontinuität des Beschattungsgrades. Das verwendete Textil konnte nicht so stark gespannt werden, dass der durch die Luftströmung verursachte Faltenwurf gänzlich verhindert werden konnte. Diese mehr oder minder starken Bewegungen des Tuches führten dazu, dass während der Messung sich laufend verändernde Schatten signifikant auf die Ergebnisse auswirkten.

Nach umfangreichen Tests musste diese Methode der Abschattung schließlich als ungeeignet bewertet werden. Ein zweiter Versuch mit einem fest gespannten Faltreflektor der Firma Walimex, wie er in der Fotografie eingesetzt wird, zeigte ebenfalls keine Verbesserung. Zudem war die abgeschattete Fläche, welche mit diesem Reflektor mit größter verfügbarer Ausdehnung von 150 x 200 cm, zu klein, um vier Wiederholungen auf einer Parzelle in einem Arbeitsschritt messen zu können.

3.2 Standardisierung von Messungen durch eine mobile Messplattform

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.

Der Aufbau einer umfangreichen Mess- und Datenreihe ist wegen der Vielzahl an Kleinparzellen in pflanzenbaulichen Versuchen mit den unterschiedlichsten Varianten sowie der häufigen, in kurzen Zeitabständen wiederholten Messungen mit sehr hohem Aufwand verbunden. Um Messkampagnen effizient und mit möglichst geringem Zeit- und Personalbedarf gestalten zu können, wurde von Projektbeginn an die Feldspektroskopie mit der Erfassung der Bestandeshöhe gekoppelt.

Die Entwicklung einer gemeinsamen Messplattform für Feldspektrometer und der von uns eingesetzten Ultraschallsensorik zur Wuchshöhenbestimmung in Anlehnung an Fricke *et al.* (2011b) wurde früh begonnen und im Verlauf der Entwicklungsphase entstanden mehrere Prototypen bzw. Versionen einer mobilen Messplattform.

Bereits 2013 wurde mit den ersten Versuchen der Wuchshöhenmessung am Dauergrünland mittels Ultraschallsensoren der Firma Pepperl & Fuchs begonnen (vgl. Fricke *et al.*, 2011a). Dazu wurden fünf Sensoren auf einer dreischichtverleimten Holzplatte mit einem Durchmesser von 113 cm fix montiert. Dieses Maß entspricht genau dem in den ClimGrass-Parzellen installierten Erntering.

Die Platzierung der Sensoren wurde so berechnet, dass sie bei einem Abstand von 100 cm zum Bestand und einem Schallkegeldurchmesser von jeweils 40 cm (bei einem Öffnungswinkel von 12°) die zu erhebende Erntefläche von einem Quadratmeter abdeckt (vgl. *Abbildung 17*). Diese Konstruktion wurde auf zwei langen Holzlatten verschraubt und konnte auf das Trägestell für Heizung und Begasung der ClimGrass-Parzellen oder alternativ auf Schragen aufgelegt werden (siehe *Abbildung 9*).



Abbildung 9: Prototyp der Messplatte mit 5 synchronisierten Ultraschallsensoren und der Öffnung für die Fotodokumentation mittels Digitaler Weitwinkelkamera

In den Wintermonaten 2014/15 wurde eine erste mobile Messeinheit, wie sie in *Abbildung 10* dargestellt ist, zuerst am Computer entworfen und schließlich in der hausinternen Schlosserei konstruiert. Ausgehend vom Prinzip einer Schiebetruhe wurde ein Wagen mit einer Achse und 20-Zoll-Rädern gebaut. Der fix aufgeschweißte Messturm weist 10 Bohrungen auf, in denen die jeweiligen Messhöhen mit einem Schlitten fixiert werden können.

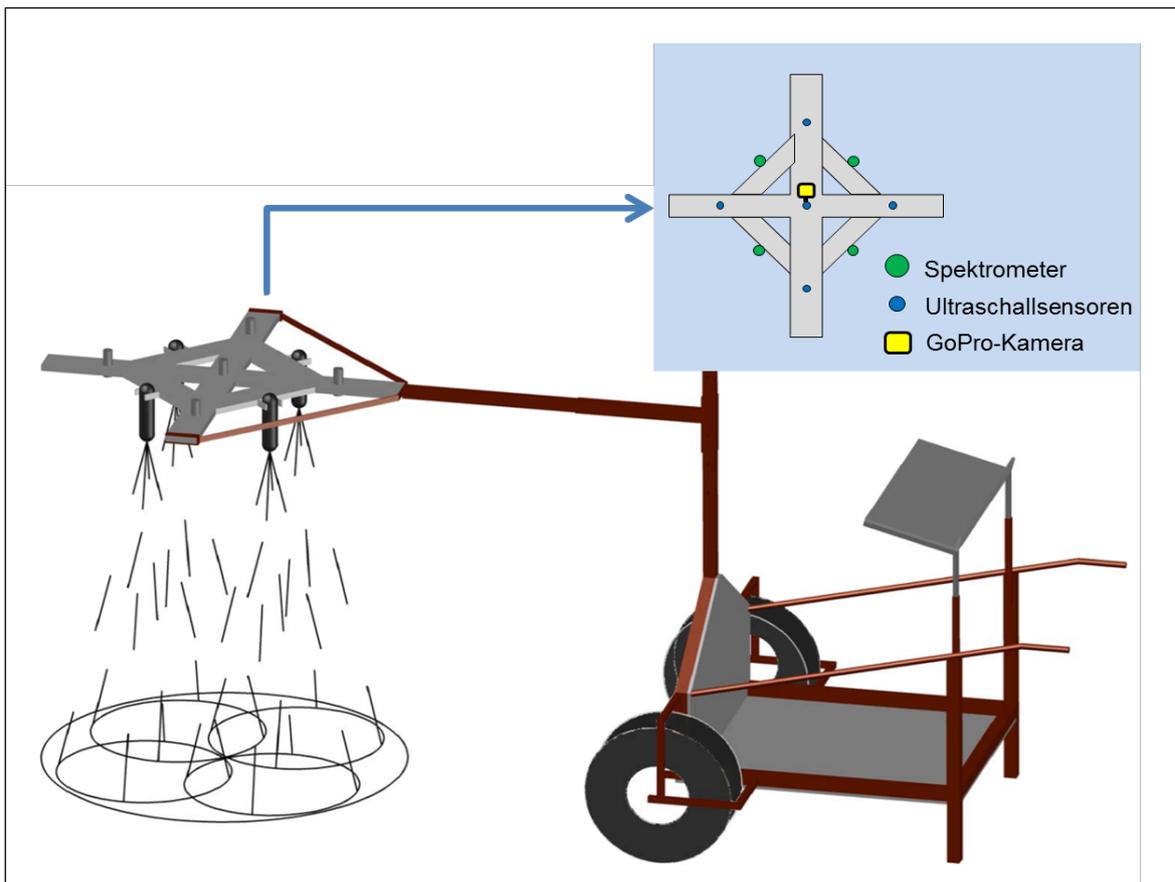


Abbildung 10: Erste Version eines Messwagens zur exakten Positionierung bei der Messung von Spektren

Mit diesem Wagen und dem darauf befindlichen Feldspektrometer inklusive Bedienungs-Notebook können Versuchspartzen so angefahren werden, dass der Ausleger über den Pflanzenbestand an exakt definierte Positionen gebracht werden kann. Für die Messung

selbst nimmt eine Halterung den Messkopf an vier verschiedenen 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 fünf fix verbaute Ultraschallsensoren zur Messung der Bestandeshöhe (Fricke *et al.*, 2011a) mitgeführt.

Ein manuell zu bedienender, am Schlitten angeschweißter Teleskopausleger, sorgt für eine horizontale, nach vorn gerichtete Flexibilität. Damit kann die Sensorplattform bis zu zwei Meter weit in die Parzelle hineingeschoben werden, wobei der Messwagen selbst vor der Parzelle abgestellt wird. Die Messplatte mit den darauf aufgebauten Systemen wurde zur Gewichtsreduktion aus Aluminiumformrohren gebaut. Die Positionierungsart der Ultraschallsensoren konnten vom Holz-Prototypen übernommen werden. Für die Stromversorgung der Ultraschallsensoren, der USB Schnittstelle und des Getriebemotors sorgt eine ivt Power Station PS-300 mit je einem 12V-DC- und einem 230V-AC-Ausgang.

Ab der Saison 2015 wurden zusätzlich zur Ultraschall-Höhenmessung auch Erhebungen mit dem Feldspektrometer sowie eine systematische Fotodokumentation aller Messungen mit einer GoPro-Kamera durchgeführt, deren Anordnung auf der Messplattform bei der Weiterentwicklung der mobilen Messeinheit berücksichtigt werden mussten. Um eine exakte Positionierung für die Messung zu gewährleisten, wurden auf der Sensorhalterung vier Univolt CL 40 HG Halterungen auf der neuentwickelten Messplatte montiert, in die der Spektrometersensorkopf genau hineinpasst.



Abbildung 11: Messplatte aus Aluminium mit fix montierten Ultraschallsensoren und den Positionen für die Aufnahme des Sensorkopfes des Feldspektrometers

Der Ablauf des Messvorganges folgt einer festgelegten Reihenfolge. Nachdem der Messwagen vor einer Parzelle genau positioniert wurde und der Sensorausleger sich exakt über dem

Ernterung der Versuchspartzele befindet, wird die Bestandeshöhe mittels Ultraschallsensoren gemessen. Die Steuerung der Messung läuft über eine eigens dafür programmierte Software. Nach der Bildung eines Mittelwertes bzw. einer Standardabweichung aus 25 aufeinanderfolgenden Wuchshöhenmessungen wird das Ergebnis abgespeichert. Im Anschluss an die Höhenmessung erfolgt die Fotodokumentation des erhobenen Bestandes mit einer GoPro Hero 3 + Black Edition, die am mittleren Ultraschallsensoren montiert ist und mittels Fernbedienung aktiviert wird.

Um bei der Auswertung Farbkorrekturen an den Fotos durchführen zu können, wurde bei jeder Aufnahme eine Graureferenz ins Bild gelegt. Bei der anschließenden feldspektroskopischen Erhebung muss zusätzlich zu jener Person, welche am Notebook das Steuerungs- und Erfassungstool bedient, eine weitere Person den Spektrometer-Sensorkopf für jede Einzelmessung in die vorgesehenen vier Positionen umstecken. Ein höhenverstellbares Pult dient der Ablage von Notebook und Kamerafernbedienung. Der Messwagen mit Detailaufnahmen ist in *Abbildung 11* dargestellt.

Die angestrebte Reduzierung des Personaleinsatzes sowie die Optimierung von Arbeits- bzw. Messabläufen erforderte eine Weiterentwicklung der mobilen Messeinheit. Ein geringerer Personalbedarf und Zeiteinsparung ohne Qualitätsverlust bei der Messung waren die besondere Herausforderung dieses Prozesses. Dafür wurde in den Wintermonaten 2015/16 die alte Messplatte abgebaut und eine neue motorgesteuerte Messleiste entwickelt, auf der nur mehr zwei Ultraschallsensoren, die GoPro-Kamera sowie der Sensorkopf des Feldspektrometers aufgebaut wurden. Die Positionierung der einzelnen Sensoren erfolgt mittels Motor und muss nicht mehr von Hand vorgenommen werden. Jene Person, welche die Datenerfassung am Pult des Messwagens durchführt, kann nun auch die Positionierung der Sensoren mit Hilfe der dafür eigens entwickelten Software vornehmen. In *Abbildung 12* ist das Schema des Sensorauslegers dargestellt, in *Abbildung 13* dessen Anbau am Messwagen. Aufgrund der Drehung des Sensorarms um die eigene Achse und einer definierten Anzahl von einprogrammierten Stopps, kann die gesamte Fläche des Ernterings, eine kreisrunde Abgrenzung in der Mitte einer ClimGrass-Versuchspartzele, gemessen werden.

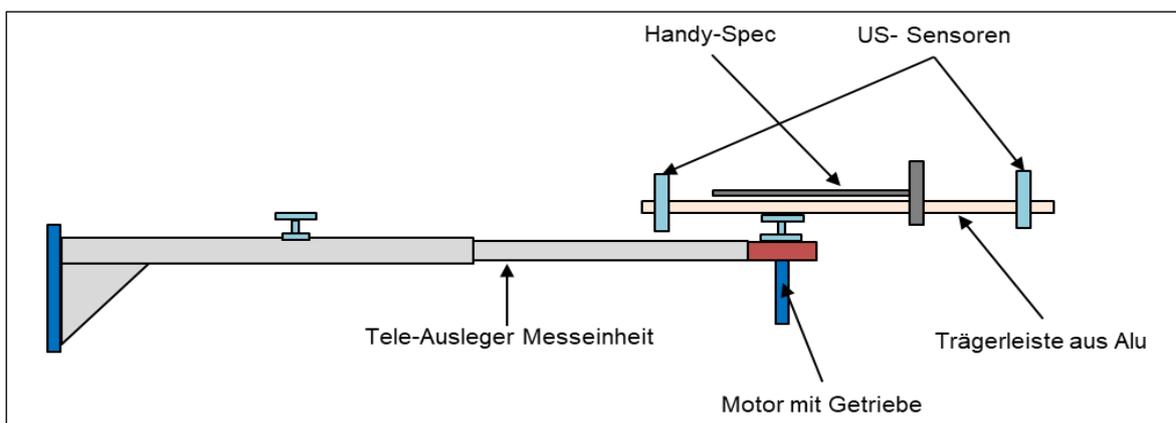


Abbildung 12: Skizze der neuen motorgesteuerten Messleiste

Der zentrale Antrieb dieser Messeinheit erfolgt mit einem bürstenlosen DC-Motor 24V mit integriertem Motion-Controller, einer seriellen Schnittstelle und Planetengetriebe der Firma Faulhaber. Die auf einer Trägerplatte aufgeschraubte Messleiste ist über eine Welle am Getriebe angeflanscht. Die Ansteuerung der berechneten Positionen erfolgt mittels Schrittzahl. Eine volle Umdrehung (360°) erfordert 1.250.000 Einzelschritte. Um mit zwei Ultraschallsensoren einen homogenen Mittelwert in der Wuchshöhenermittlung zu erzielen, werden für die Messung sieben Positionen sowie eine Parkposition verwendet.

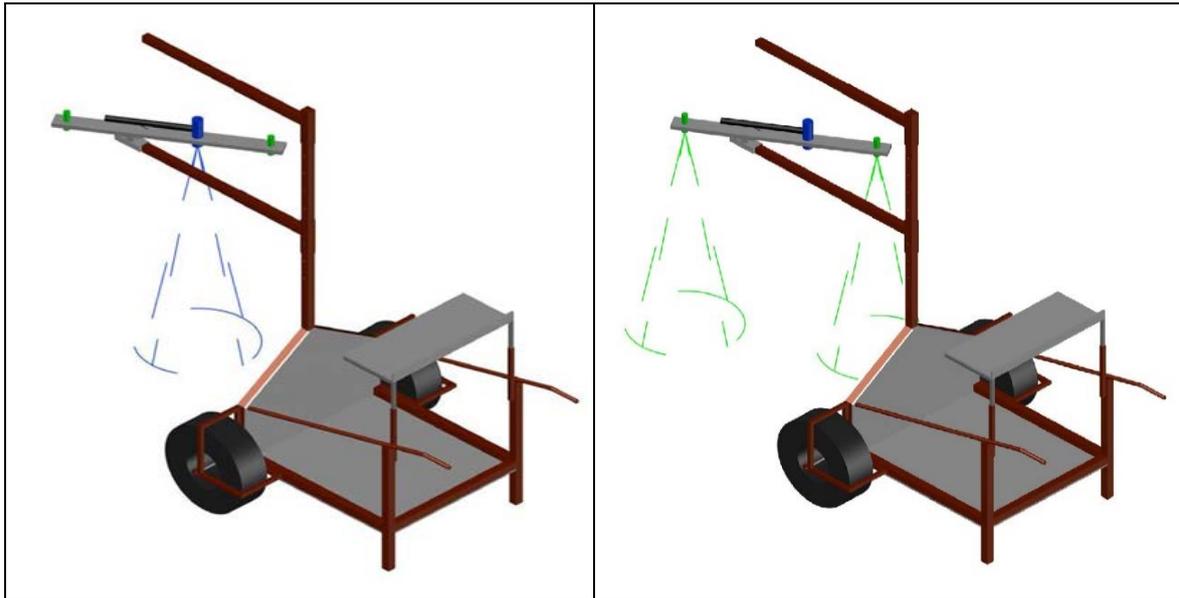


Abbildung 13: Neuer Messwagen mit motorgesteuerter Messleiste und aufgebautem Sensorkopf des Feldspektrometers (links) und Ultraschallsensoren (rechts)

Die Programmierung für die Ansteuerung der Messpositionen beruht auf dem in *Abbildung 14* angeführten Schema. Die spektroskopischen Messungen erfassen so einen Großteil der Erntefläche und ermöglichen damit auch eine Verknüpfung mit den dort erhobenen Ertrags- und Futterqualitätsdaten. Ähnliches gilt auch für die Wuchshöhenbestimmung, die auf sieben unterschiedlichen Positionen insgesamt 11-mal erfolgt. Zusammen mit der Fotodokumentation erfolgt damit eine sehr umfangreiche und exakt verortete Erhebung von Messdaten innerhalb des Begasungsringes. Während die Ultraschallmessung automatisch abläuft, werden die spektroskopischen Messungen (in *Abbildung 14* grün dargestellt) nach der Ergebniskontrolle und Speicherung der Ultraschalldaten gegen den Uhrzeigersinn über vier Positionen manuell gesteuert.

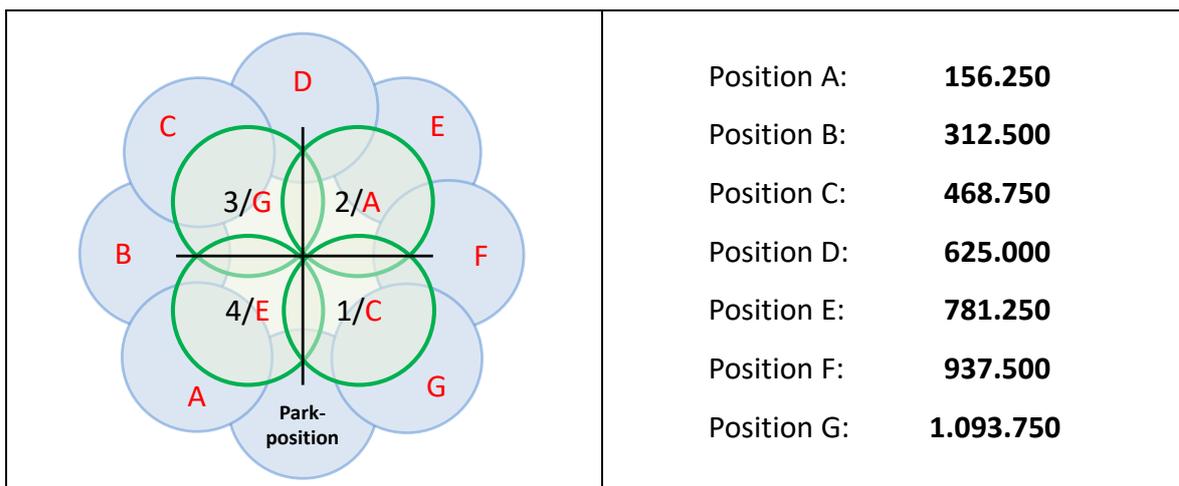


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Messpositionen für spektroskopische Messungen (1-4) sowie Wuchshöhenmessungen (A-G) mit den Haltpositionen für die Ansteuerung der Messpositionen

Es hat sich im Projektverlauf herausgestellt, dass die fotografische Aufnahme der Erhebungsfläche eine Interpretation bestimmter Spektralsignaturen enorm erleichtert und für die Beurteilung der Qualität einer Messung unumgänglich ist. Aus diesem Grund wurde die

Messplattform um eine GoPro-Kamera (GoPro Hero 3+ Black Edition) erweitert und mit einer speziellen Halterung zentral über der Erhebungsfläche am unteren Ende des Getriebemotors fixiert. Die Qualität dieser Aufnahmen ist für den Zweck einer Beurteilung der Spektralsignatur und zur Beschreibung des Pflanzenbestandes ausreichend (siehe *Abbildung 15*). Bei der Fotodokumentation wird die Parzelle mittels eingelegte Nummer auf einer Graureferenz bzw. mit Etiketten eindeutig identifiziert. Die Bedienung der Kamera erfolgt mit einer Fernbedienung.



Abbildung 15: Zentrale Positionierung der Kamera und Beispiel einer Aufnahme des Pflanzenbestandes

Die Stromversorgung der Ultraschallsensoren, der Schnittstelle und des Getriebemotors erfolgt durch die ivt Power Station PS-300. Eine dreifache Feuchtraumstecker-Kombination erleichtert die Verteilung am Messwagen. Die Ansteuerung der Ultraschallsensoren und des Motors erfolgt über die entwickelte Software; Sensoren und Motor sind dafür mit dem Notebook über USB-Kabel verbunden. Die Drehung der Messleiste um die eigene Achse wird dadurch gewährleistet, dass die Strom- und Datenkabel mit einer flexiblen Halterung über der Messeinheit geführt werden (siehe *Abbildung 16*).

Für die Steuerung und Durchführung der Messung bzw. die Speicherung der erhobenen Daten wird ein Tablet von Hewlett Packard mit Touch Screen und Tastatur verwendet, das mit einem Velfix LP 25 mm Klettkeleband am Pult fixiert ist. Die Schnittstellen von RS 232 auf USB sowie die gesamte Stromverteilung ist, wie in *Abbildung 16* ersichtlich, in einem kleineren Schaltkasten kompakt und Spritzwassergeschützt verpackt. Zur Erleichterung der Mobilität und für die Justierung des Messwinkels über Grund wurde ein handelsübliches Anhängerstützrad am Heck des Messwagens angebaut.

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 Spektralsignatur 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 von 120 cm über Grund die Messung einer zusammenhängenden Fläche von einem Quadratmeter ermöglicht. Die genaue Abmessung und die Anordnung der Messkegel ist der schematischen Darstellung in *Abbildung 17* zu entnehmen. 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.



Abbildung 16: Stromversorgung und Schnittstelle für USB (oben) und Messleiste im Einsatz (unten)

Die *Abbildung 17* zeigt den Ernterring mit einem Durchmesser von 113 cm; die Kreisfläche von einem Quadratmeter stellt die zu erntende Fläche innerhalb einer Versuchsparzelle dar. Das von dieser Fläche entnommene Erntegut wird einer umfangreichen Analyse unterzogen, um Ertrag und Qualität exakt beschreiben zu können.

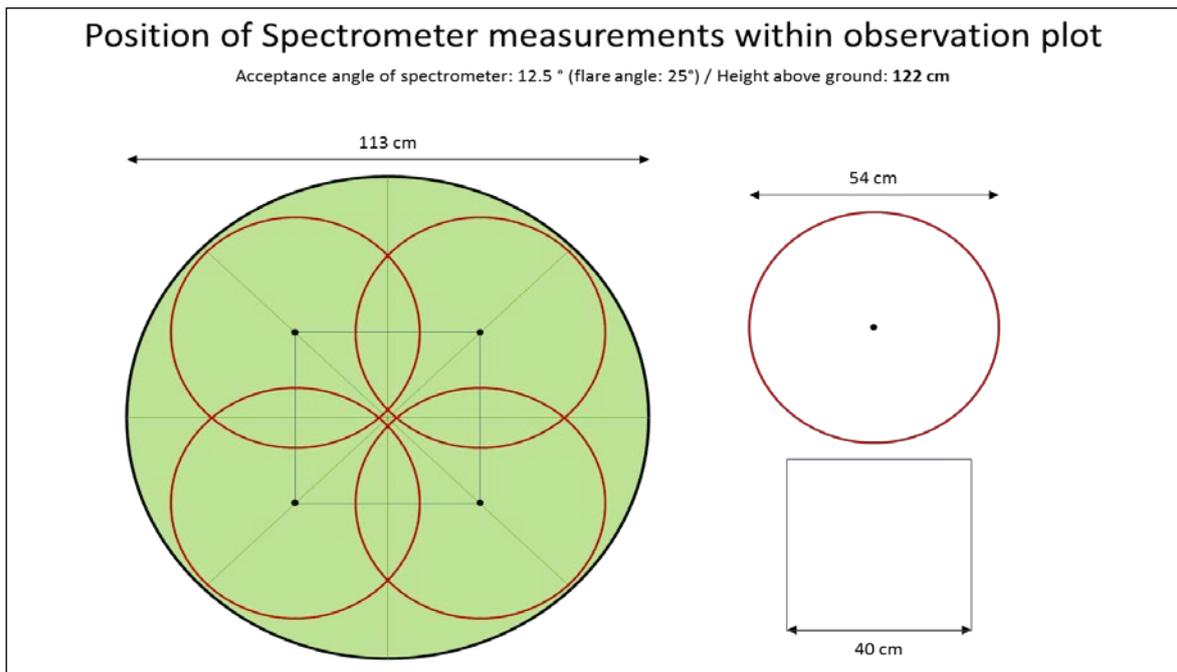


Abbildung 17: Messbereich innerhalb eines Ernterings in der Versuchsanlage ClimGrass

Der Erntering in den Parzellen der Versuchsanlage ClimGrass wird durch einen Metallring gekennzeichnet. Dieser Bereich, in dem die Probenahme der Grünlandbiomasse erfolgt, befindet sich innerhalb des Begasungsrings. Mit Hilfe des mobilen Messwagens wird der Sensorkopf des Feldspektrometers darüber positioniert, was in der Praxis allerdings nie auf den Zentimeter genau erfolgen kann. Durch eine nicht zentimetergenaue Positionierung kann der metallene Erntering bei einer spektralen Messung mehr oder weniger in den Sichtbarkeitsbereich des Sensors hineinragen. Um den Effekt der Reflexion des metallenen Ernterings zu ermitteln, wurden Testmessungen vorgenommen, deren Auswertung in *Abbildung 18* grafisch aufbereitet ist.

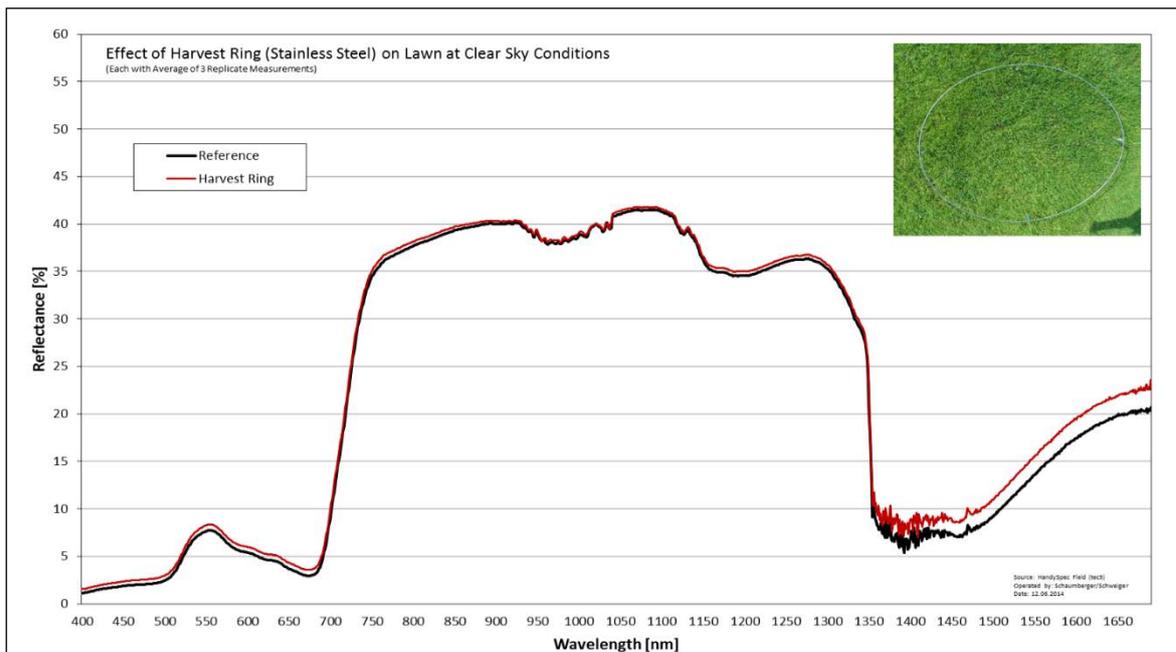


Abbildung 18: Einfluss des metallenen Ernterings auf die Spektralsignatur

Der Metallring, der nur bei sehr niedrigem Pflanzenbestand sichtbar ist, hat keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis. Daraus ergibt sich, dass die exakte Positionierung des Messwagens zwar angestrebt werden soll, eine teilweise Überlappung des Messbereichs mit dem Erntering jedoch keine Rolle spielt.

3.3 Beschreibung des Messablaufs

Mit der Neugestaltung der Messleiste und dem Aufbau des Feldspektrometers sowie die Aufgabe der anfangs durchgeführten künstlichen Abschattung konnten die Messkampagnen wesentlich effizienter, personalsparender und flexibler organisiert werden. Während die Ultraschallmessung und die Fotodokumentation eher wetterunabhängig sind, sollten bei den feldspektroskopischen Erhebungen beste Bedingungen herrschen. Ideal sind wolkenlose Bedingungen bei strahlendem Sonnenschein innerhalb eines Zeitfensters von 10:00 bis 14:00 Uhr. Im Herbst verringert sich dieses Fenster aufgrund des Sonnenstandes um etwa eine Stunde. Um kontinuierliche Datenreihen zu bekommen, wurden die Messkampagnen in regelmäßigem, wöchentlichen Zeitabstand durchgeführt.

Eine Messkampagne beginnt mit der Aufrüstung des Messwagens in der Garage. Der aufgeladene Akku wird mit Klettbandern am Plateau fixiert und an die Verteilersteckdosen angeschlossen. Dann werden die Netzgeräte der seriellen Schnittstelle, der Ultraschallsensoren

und des motorgesteuerten Getriebes angeschlossen. Nachdem das Tablet am Pult auf den vorgesehenen Klettbandern fixiert und eingeschaltet wurde, müssen die USB Schnittstellen der Ultraschall-Sensorik und des Feldspektrometers angesprochen werden. In einer komfortablen Alu Box wird das benötigte Messequipment am Messwagen mitgeführt.

Nach einer Rüstzeit von etwa 15 Minuten kann mit der tatsächlichen Messung auf den vorgesehenen Parzellen begonnen werden. Ein Ultraschallsensor zur Distanzmessung sowie ein akustisches Signal unterstützen die Anfahrt und exakte Positionierung der Messeinheit (siehe *Abbildung 19*). Der gesamte Messvorgang, beginnend mit der Ultraschall Höhenmessung, Fotodokumentation inkl. Parzellenidentifikation und der abschließend feldspektroskopischen Untersuchung, wird durch ein eigens programmiertes Softwaretool unterstützt.



Abbildung 19: Positionierung der mobilen Messeinheit vor der Parzelle

Nach der Positionierung werden am Computer der aktuelle Versuch und die zu messende Parzelle ausgewählt. Die Messdistanz zwischen Ultraschallsensor und Boden ist im Vorfeld gemessen worden und steht für jede Parzelle einzeln abgespeichert bei den Bestandeshöhenmessungen zur Verfügung. Mit dem Ultraschallsensor wird der Abstand zwischen Sensor und dem ersten Auftreffen der Schallwellen gemessen, also bis zu den obersten Spitzen der Gräser. Die Bestandeshöhe ergibt sich dann aus der Differenz dieses Abstandswertes mit der Distanz Sensor-Boden.

Anhand einer grafischen Darstellung in der Messsoftware kann der automatische Messvorgang mitverfolgt werden. *Abbildung 20* zeigt die Auswahl der Parzelle (roter Plot) und die ringförmig angeordneten Positionen beim Messen. Ist die Messung aktiv, erscheint ein grüner Kreis in der Grafik. Die rot schraffierten Kreise zeigen die bei der aktuellen Messung deaktivierten Positionen, da in diesem Beispiel nur die Höhen für die vier inneren, im Erntering befindlichen, Positionen erhoben werden.

Der aus den Einzelmessungen berechnete Mittelwert und die Standardabweichung werden am Display links unten angezeigt. Jede Position ist in Form eines Säulendiagramms dargestellt. In dieser Phase hat der Techniker die Möglichkeit, durch ein eingebautes Softwarewerkzeug Korrekturen vorzunehmen. Diese werden dann durchgeführt, wenn einzelne Gräser über den Bestand hinausragen und so die Messung der Bestandeshöhe verzerren würden. Nach der Kontrolle der als Säulen dargestellten Wuchshöhen, dem Vergleich mit dem Pflanzenbestand in der Natur und einer gegebenenfalls durchgeführten Korrektur erfolgt die Speicherung in einer CSV-Datei, die später im Büro direkt in eine zentrale Datenbank übernommen werden kann. Nach erfolgreicher Speicherung erscheint die Parzellendarstellung grün und ein Popup-Fenster leitet zur nächsten Erhebung, der Fotodokumentation, über.

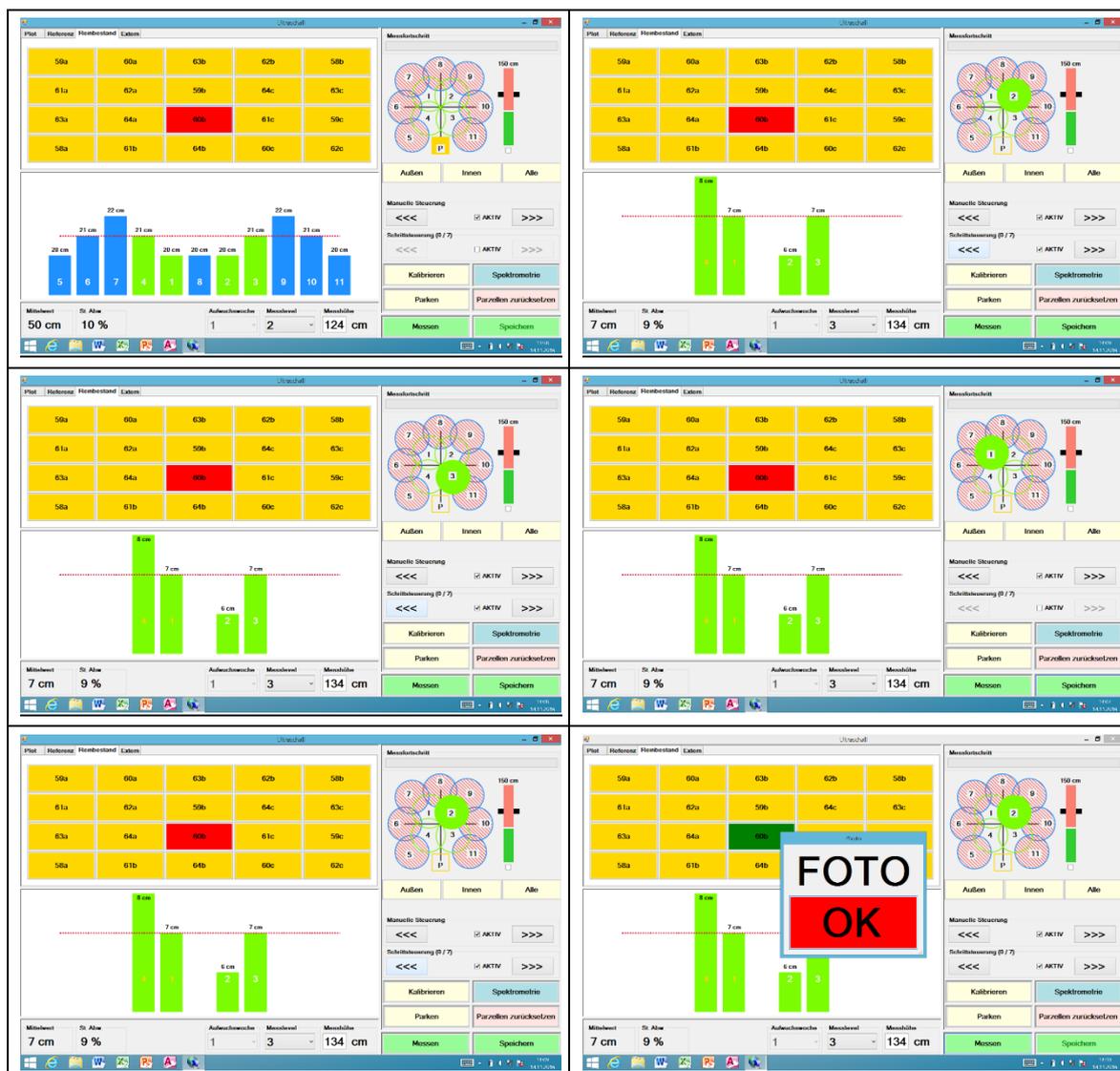


Abbildung 20: Abfolge der Bestandeshöhenmessung anhand chronologisch gereihter Screenshots

Erfahrungsgemäß tritt bei automatisierten Prozessen mit der Zeit eine gewisse Routine ein, wo Fehlerquellen so gut wie möglich ausgeschlossen werden sollten. Das in *Abbildung 20* und *Abbildung 21* dargestellte Popup-Fenster hilft beispielsweise dabei, die durchzuführende Fotodokumentation und Identifikation der erhobenen Parzelle nicht zu vergessen.

Über eine Fernbedienung wird mit der GoPro-Kamera eine Aufnahme der aktuell vermessenen Parzelle gemacht. Die Parzellenummer wird dabei mit einem handelsüblichen Handy-Stick ins Bild gehalten (siehe *Abbildung 21*). Die gespeicherten Bilder werden ebenfalls in eine vorgegebene Datenstruktur eingepflegt und der jeweiligen Messung zugeordnet. Ist das Foto erstellt, wird das OK im Popup Fenster bestätigt und daraufhin öffnet sich das Fenster für die Spektralmessung, der nächste Schritt im Messablauf.

Die feldspektroskopische Messung bildet den Abschluss der verschiedenen Beobachtungen auf einer Parzelle. Die motorgesteuerte Messleiste steht nach der Ultraschallmessung auf der letzten Position (Position 7 in *Abbildung 22*), welche gleichzeitig die Startposition für die Spektroskopie ist. Für die Messung der Spektren steht die Software AgroSpec der Firma tec5 zur Verfügung, welche optimal auf das HandySpec-Gerät abgestimmt ist. Alle Einstellungen in dieser Software dienen der Auswahl von Erhebungsmethoden sowie der Speicherung und der visuellen Beurteilung von Spektren.

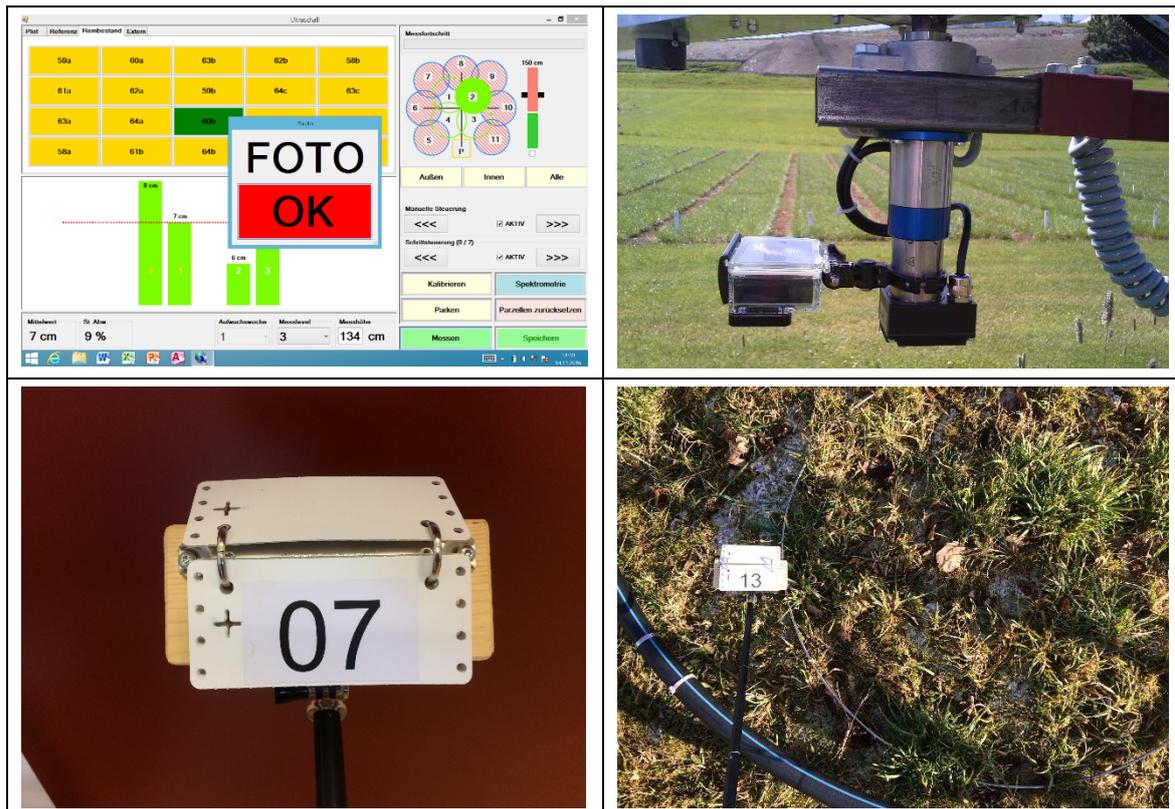


Abbildung 21: Durchführung der Fotodokumentation mit einer GoPro-Kamera

Der Messvorgang beginnt mit einer Kalibrierung. Dabei wird auf den Sensorkopf ein Graureferenzadapter geschraubt und dabei die Funktion „Cal“ ausgeführt. Ändern sich die Strahlungsbedingungen außerordentlich stark, ist vor einer neuen Messung eine neuerliche, manuelle Kalibrierung durchzuführen. Leichte Veränderungen werden von der Software automatisch ausgeglichen. Die Spektren mit allen für die Berechnung der Reflektanz notwendigen Daten werden in Textdateien gespeichert. Die Identifikation der Parzelle wird über die eingestellte „RUN-ID“, sie ist gleichzeitig der Name der Textdatei, vorgenommen.

Jede Erhebung auf einer Parzelle besteht aus vier Einzelmessungen an den, in *Abbildung 22* skizzierten Positionen, wobei jede Messung intern sechsfach wiederholt wird (siehe Beschreibung im nachfolgenden Abschnitt). Die Sichtung der Spektralkurven ist eine der wichtigsten Aufgaben, da verschiedenste Einflüsse zu Sprüngen bzw. nicht plausiblen Verläufen in den Kurven führen – sie stellen Messfehler dar. Wird eine ungewöhnliche Charakteristik in den Spektralsignaturen wahrgenommen, muss die Messung wiederholt werden. Sind alle vier Messungen einer Parzelle in Ordnung, wird der „RUN“ geschlossen und die Textdatei unter der RUN-ID abgespeichert. Die Screenshots in *Abbildung 22* zeigen den Ablauf der feldspektroskopischen Erhebung an den vier dargestellten Positionen.

Die Weiterverarbeitung der auf dem Feld-Notebook gespeicherten Bestandeshöhendaten, der Spektr-Textdateien sowie der GoPro-Bilder erfolgt nach Übertragung ins Netzwerk der HBLFA Raumberg-Gumpenstein auf unterschiedliche Weise. Die Bestandeshöhen werden in eine zentrale Datenbank importiert, die Bilder werden in einer Ordnerstruktur abgelegt, die eine automatische Verlinkung zu den Spektraldateien unterstützt. Die Spektr-Textdateien werden mit Hilfe der eigens entwickelten Software „SpectroAnalyst“ in eine Datenbank übertragen und einer Bearbeitung unterzogen, die aus den Rohdaten durch Fehlerkorrektur, Mittelwertbildung, Glättung und Zusammenfassung zu Varianten weiterverwendbare Spektralsignaturen erzeugt (siehe Kapitel Datenmanagement und Datenaufbereitung).

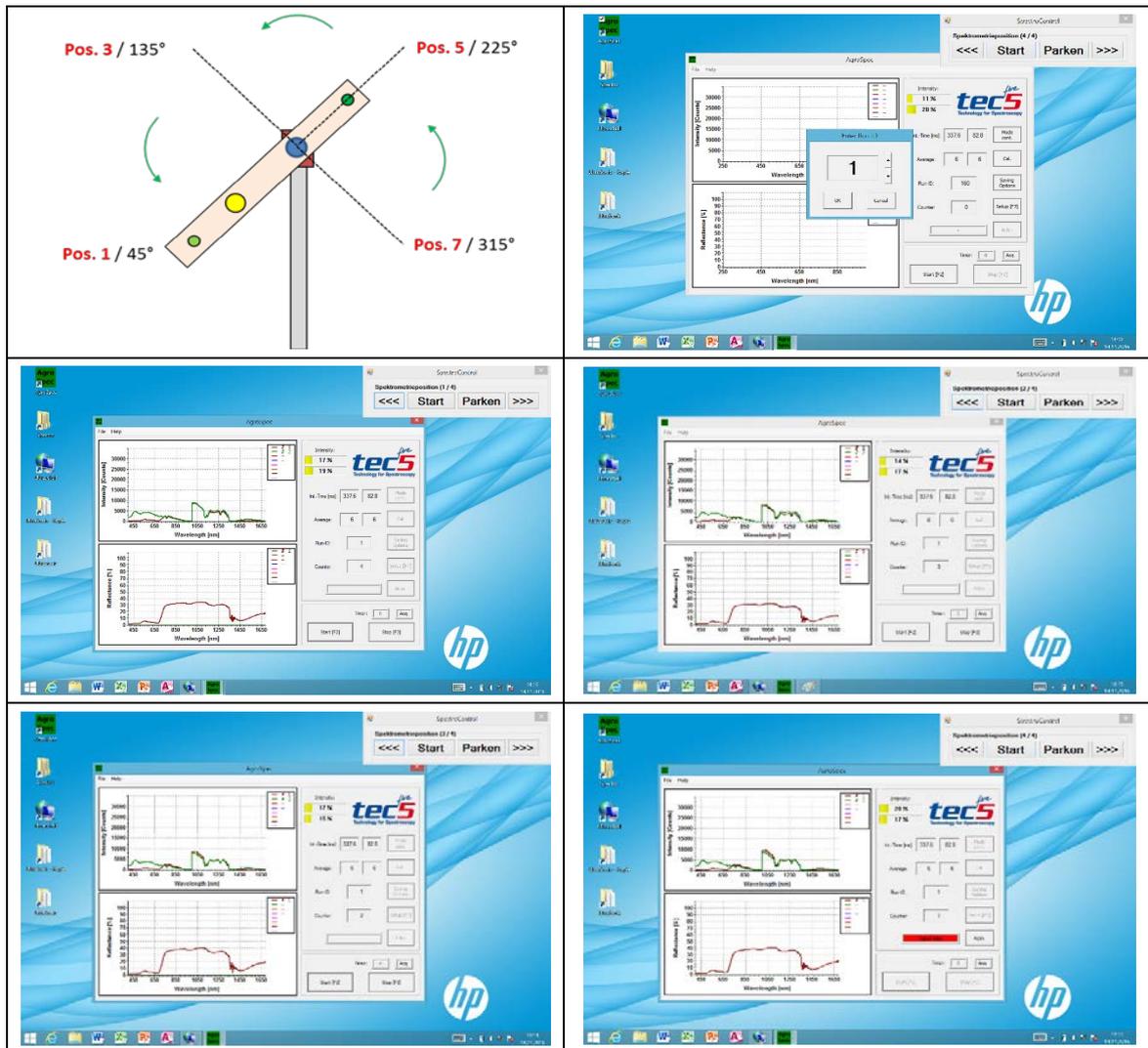


Abbildung 22: Abfolge der feldspektroskopischen Messung anhand chronologisch gereihter Screenshots

3.4 Vergleich von unterschiedlichen Messsystemen

Die feldspektroskopischen Erhebungen innerhalb eines Forschungsinstitutes werden gewöhnlich mit einem bestimmten Gerätetyp vorgenommen. Alle damit generierten Daten weisen gerätetypische Spezifika auf, die nur bedingt mit den von anderen Geräten gemessenen Daten vergleichbar sind (vgl. Jung *et al.*, 2009a, Jung *et al.*, 2009b). Bei institutsübergreifenden Forschungsansätzen besteht somit das Problem der direkten Vergleichbarkeit zwischen verteilt erhobenen Rohdatensätzen.

Um diese Unterschiede zwischen einzelnen Geräten verifizieren zu können, haben wir umfangreiche Testmessungen mit verschiedenen Geräten durchgeführt und untereinander verglichen. Neben unserem HandySpec der Firma tec5 haben wir 2015 umfangreiche Testmessungen mit dem FieldSpec der Firma ASD im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Universität Bonn durchgeführt. Dabei haben wir unterschiedliche Oberflächen, vom Rasen als Referenz über Mischbestände in ClimGrass-Versuchspartellen bis hin zu Reinkulturen, gemeinsam gemessen und die Ergebnisse gegenübergestellt. Die Rahmenbedingungen, wie Wolkenbedeckung, Sonnenstand bzw. Uhrzeit, Positionierung über dem Bestand waren bei den Vergleichsmessungen exakt gleich, trotzdem gab es systematische Unterschiede, wie sie exemplarisch in *Abbildung 23* und *Abbildung 24* dargestellt sind.

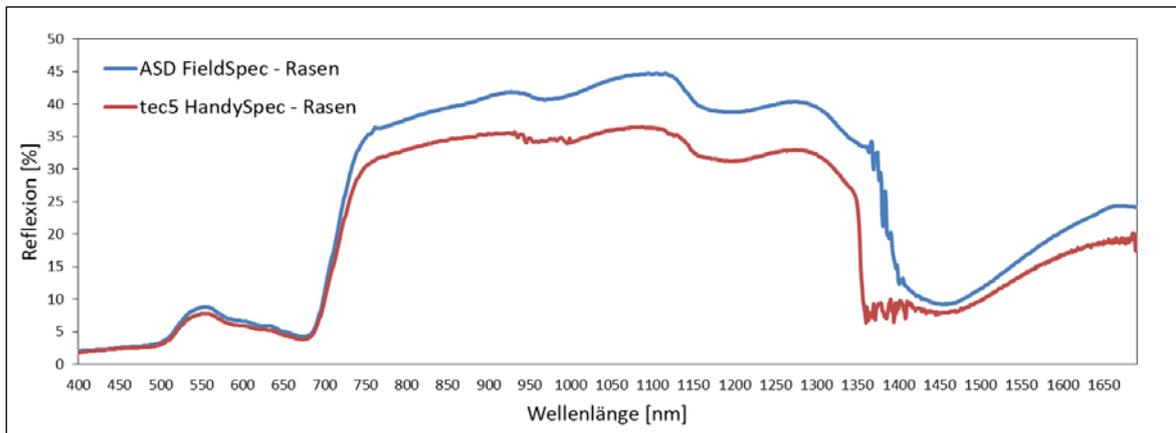


Abbildung 23: Vergleich von Messungen über Rasen mit Feldspektrometern der Firmen ASD und tec5 mit unterschiedlichen Sensortypen am 25.06.2015

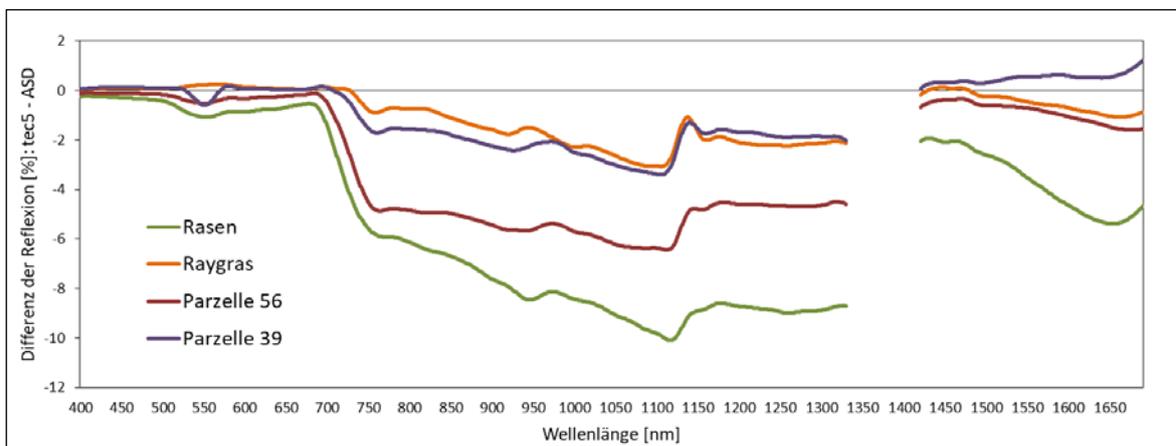


Abbildung 24: Differenz von Spektralsignaturen ausgewählter Oberflächen zwischen HandySpec von tec5 und FieldSpec von ASD, gemessen am 25.06.2015

In beiden Abbildungen ist eine systematische Verschiebung zu beobachten, wobei die Differenz mit zunehmend größerer Wellenlänge proportional zur Reflektanz einen negativen Trend aufweist. Die Differenzen sind vor allem im Bereich des nahen Infrarots sehr hoch.

Ein weiterer Vergleich wurde im Juli 2017 mit einem Selbstbausensor der Universität Jena und dem HandySpec von tec5 (Gumpenstein) durchgeführt. Auch diese Messungen sind systematisch unterschiedlich, wie die *Abbildung 25* und die *Abbildung 26* zeigen.

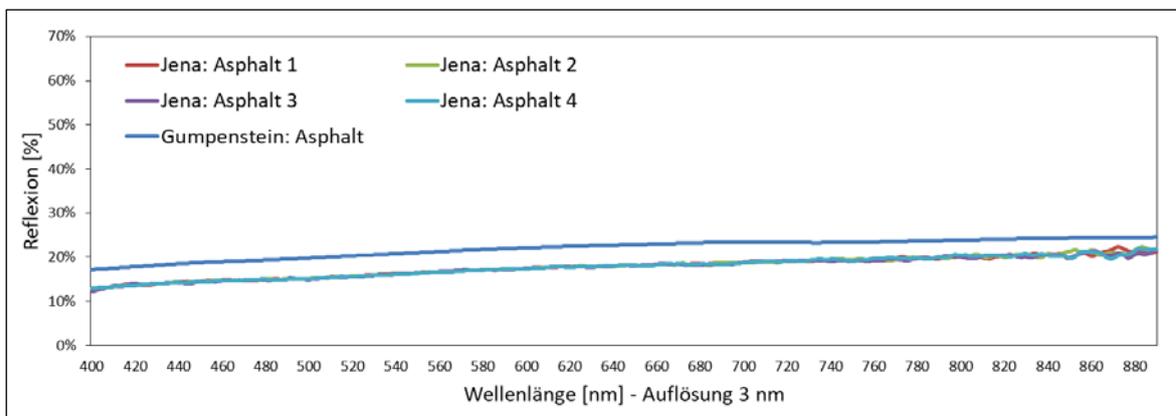


Abbildung 25: Vergleich von Referenzmessungen auf Asphalt (Referenz) zwischen zwei unterschiedlichen Feldspektrometern am 18.07.2017

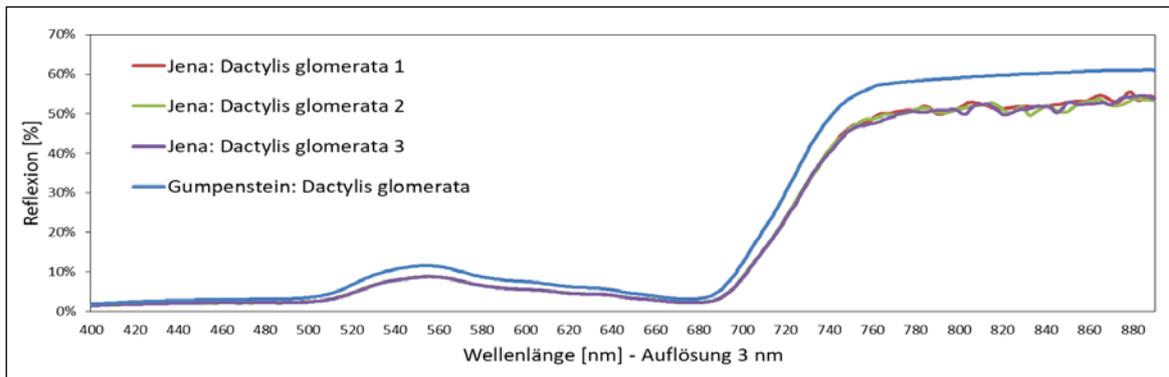


Abbildung 26: Vergleich von Referenzmessungen auf *Dactylis glomerata* zwischen zwei unterschiedlichen Feldspektrometern am 18.07.2017

Während die Messwerte mit dem HandySpec beim Test 2015 über den gesamten Spektralbereich unter denen des FieldSpec lagen, zeigt sich im Vergleich 2017 mit dem Gerät aus Jena ein umgekehrtes Verhalten; alle Werte liegen deutlich über dem Vergleichsgerät. In beiden Abbildungen zeigt sich, dass sich die Messwertdifferenzen über den gesamten Wertebereich proportional zur Reflektanz verhalten und im Gegensatz zum Vergleich mit dem FieldSpec keinen eindeutigen Trend aufweisen. Vor allem bei der Referenzoberfläche „Asphalt“ in *Abbildung 25* kommt der parallele Verlauf beider Messungen deutlich zur Geltung. Die Messungen mit dem Gerät aus Jena wurden im Gegensatz zu den Gumpensteiner Messungen vier- bzw. dreifach wiederholt, da bei diesem Gerät im Gegensatz zum HandySpec manuell kalibriert werden muss und deshalb die Qualität der Messreihe durch die mehrfache Wiederholung zusätzlich sichergestellt wurde. Bis auf ein geringes Messrauschen im hohen Reflektanzbereich zeigen sich jedoch kaum Abweichungen in den Wiederholungen; ein Hinweis auf optimale Messbedingungen – an diesem Tag herrschten wolkenlose Bedingungen.

Die beiden Gerätevergleiche zeigen, dass die Messungen zwischen verschiedenen Geräten grundsätzlich unterschiedlich sind. Bei gemeinsamen Arbeiten muss dies unbedingt berücksichtigt werden; Spektren dürfen nicht miteinander vermischt werden. Es hat sich gezeigt, dass diese Unterschiede zwar systematisch auftreten, um eine Korrekturfunktion anbringen zu können, wären allerdings vergleichende Messkampagnen mit einer sehr genauen Analyse aller Strahlungsparameter notwendig (vgl. Jung *et al.*, 2009a).

3.5 Einstellungen am Feldspektrometer

Der Feldspektrometer HandySpec von tec5 bietet die Möglichkeit, geräteintern mehrere Messungen hintereinander durchzuführen und daraus ein Endergebnis zu mitteln, das dann ausgegeben wird. Wie oft für die Mittelwertbildung intern gemessen wird, lässt sich über die Benutzerschnittstelle AgroSpec mit der Funktion „Scans per Cycle“ einstellen. Die Anzahl der „Scans per Cycle“ mit der anschließenden Mittelwertbildung hat einen glättenden Effekt auf die Ergebnisspektren, insbesondere im Bereich zwischen 900 und 1000 nm sowie zwischen 1350 und 1500 nm. Um eine optimale Konfiguration für alle zukünftigen Messungen zu bestimmen, wurden zahlreiche Testmessungen durchgeführt. In *Abbildung 27* und *Abbildung 28* werden zwei Einstellungen, mit einem und mit zehn Scans per Cycle grafisch dargestellt. Es wurden 30 Messungen unmittelbar hintereinander durchgeführt, wobei die höhere Varianz bei den 10-Scans darauf zurückzuführen ist, dass der Messzeitraum länger andauert hat. Allerdings ist festzustellen, dass die Glättung der Kurve bei 10 Scans stärker ist und Messrauschen damit deutlich reduziert wird. In *Abbildung 29* werden die beiden Mittelwertkurven aus *Abbildung 27* und *Abbildung 28* direkt miteinander verglichen. Die deutlich geringere Oszillation der Kurve im Bandbereich um 1400 nm ist ein Hinweis darauf, dass durch die höhere Anzahl an „Scans per Cycle“ das Messrauschen vermindert wird.

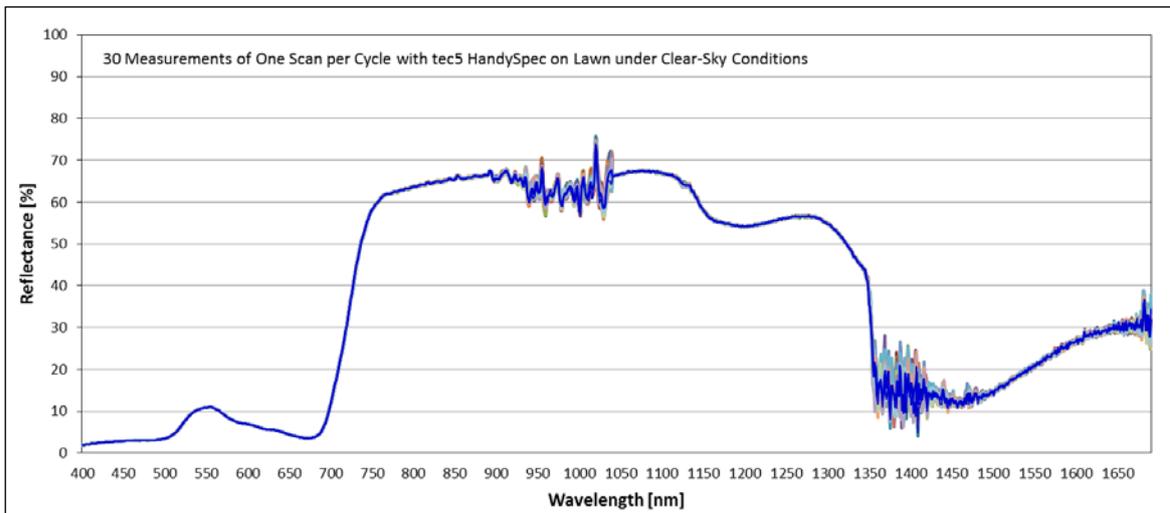


Abbildung 27: Spektren mit einem Scan per Cycle

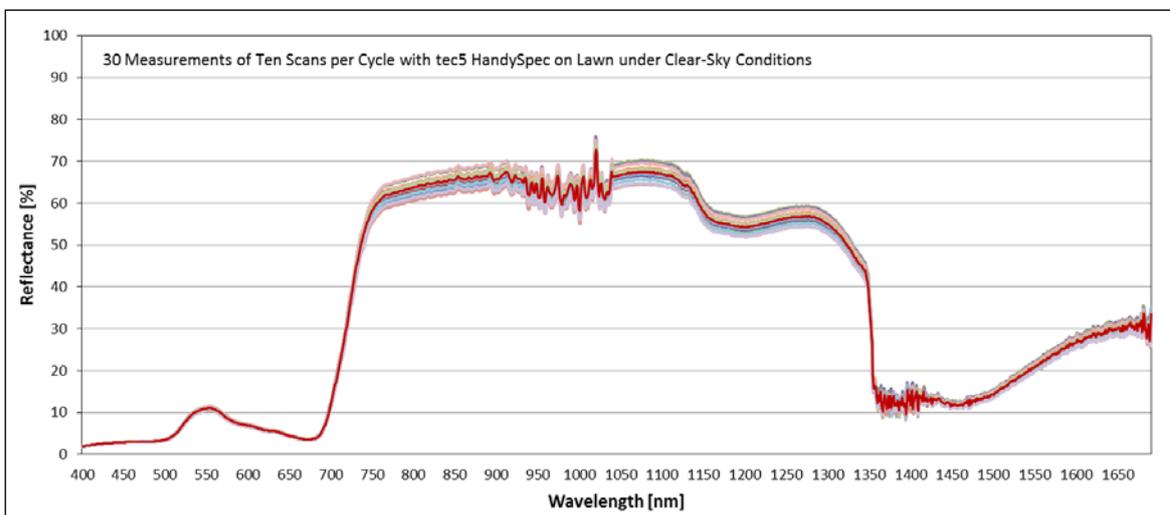


Abbildung 28: Spektren mit zehn Scans per Cycle

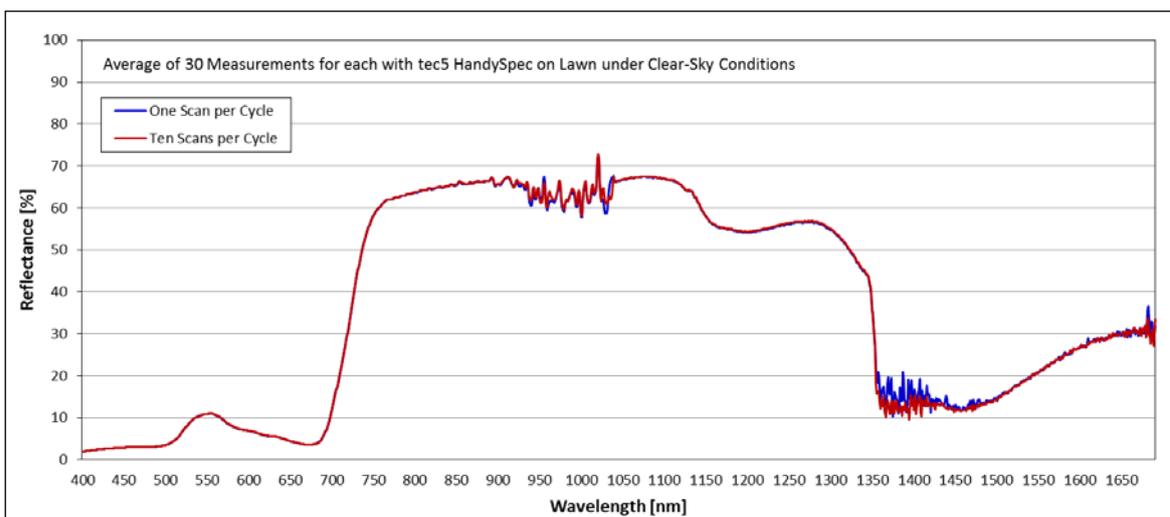


Abbildung 29: Vergleich der Mittelwertspektren mit einem und mit zehn Scans per Cycle

Abbildung 30 zeigt mit der Gegenüberstellung von bis zu 20 Messwiederholungen auf einer Standardoberfläche (Rasen) die Unterschiede der Scan-Anzahl auf die Standardabweichung der Messungen. Der Glättungseffekt scheint wünschenswert, wenn nicht sogar notwendig zu sein. Eine Einstellung mit 4 oder 10 „Number of Scans“ liefert einerseits die vorteilhafte Glättung und könnte andererseits auch Effekte ausschließen, die bei einer einzigen Messung das Ergebnis negativ verzerren würden. Aus diesen Gründen ist eine mehrfache Wiederholung der Messzyklen zur Generierung eines einzigen Spektrums sinnvoll und notwendig.

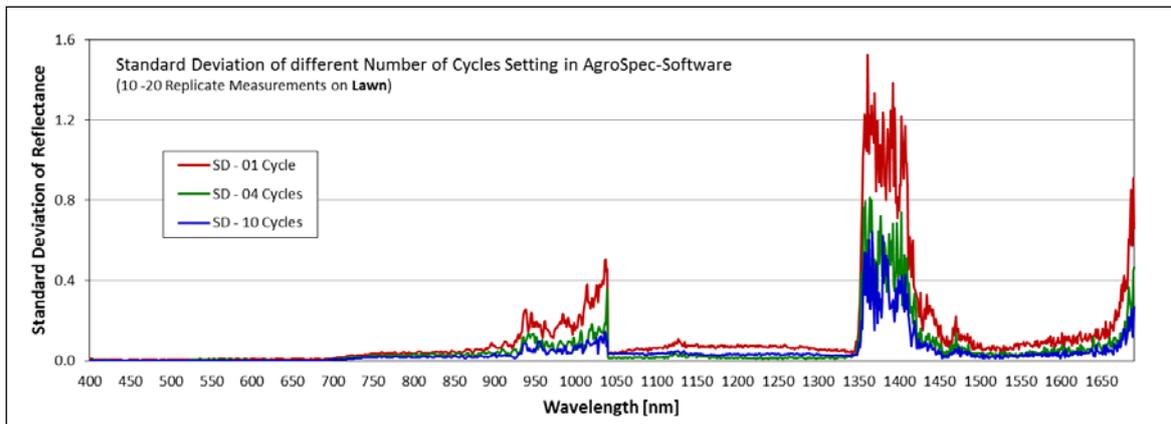


Abbildung 30: Vergleich der Standardabweichung bei unterschiedlichen Einstellungen von Scans per Cycle

Wie bereits in Abschnitt 3.3 ausgeführt, ist eine wichtige Maßnahme zur Qualitätssicherung und Evaluierung von Spektren die fotografische Aufnahme der Beobachtungsfläche. Damit können unerklärliche Abweichungen in den Spektren bei der späteren Datenanalyse identifiziert werden (MacArthur, 2011). Zu diesem Zweck ist auf dem mobilen Messwagen neben Spektrometer, Notebook und Ultraschallsensoren auch die kleine GoPro-Kamera installiert, mit der prinzipiell vor jeder Spektralmessung ein Foto erstellt wird.

3.6 Fehlerbehebung am Spektrometer

Ende Oktober 2013 wurde bei der Firma tec5 ein HandySpec Field VIS/NIR 1.7 bestellt, welches Mitte Dezember 2013 geliefert wurde. Die Auslieferung erfolgte ohne Akku, da hier im Laufe der Produktion ein Fehler festgestellt wurde. Nach zwei Monaten (Mitte Februar 2014) wurde dann ein funktionierender Akku nachgeliefert. Die erste Inbetriebnahme schlug fehl, da aufgrund eines technischen Fehlers die Kalibrierung und damit auch Messungen nicht möglich waren. Daraufhin wurde das HandySpec zurückgeholt, repariert und Ende März 2014 wieder ausgeliefert. Erste Messungen und Tests konnten somit mit einer etwa viermonatigen Verzögerung vorgenommen werden. Bei den Testläufen im Jahr 2014 wurden immer wieder unklare und nicht interpretierbare Daten generiert. Intensive Tests am Feld starteten mit Ende Mai und setzten sich bis zum Ende der Vegetationsperiode 2014 fort. Im folgenden Bericht werden beispielhaft einige Daten grafisch dargestellt, die zeigen, welche Probleme zu Beginn der Messungen mit dem HandySpec von tec5 auftraten.

3.6.1 Testbedingungen

Die Messungen wurden im Jahr 2014 mehrmals am Versuchsgelände des HBLFA Raumberg-Gumpenstein durchgeführt. Zum Zeitraum der Messungen herrschten an den jeweiligen Tagen absolut wolkenlose und windstille Bedingungen. Die Erhebungen fanden im

Laufe des Vormittags zwischen 9:00 und 12:00 Uhr statt und wurden auf Oberflächen mit verschiedenem Pflanzenbewuchs vorgenommen:

- a) gleichmäßig dichter und vitaler Rasen mit einer Wuchshöhe von 5 cm
- b) Grünlandmischbestand mit einer Wuchshöhe von 30-35 cm
- c) Weiß- und Rotkleereinbestände mit einer Wuchshöhe von 30 bzw. 60 cm

Um bei wiederholten Messungen die exakt gleichen Reflexionseigenschaften des Untergrundes gewährleisten zu können, wurde der mobile Messwagen, auf der eine fixe Arretierung des HandySpec-Sensorkopfes in einer definierten Höhe über Grund möglich ist, eingesetzt.

Alle Messungen wurden im Single Mode und durch Bedienung der Software am Notebook ohne Berührung des Sensorkopfes vorgenommen, um Erschütterungen und damit auch die geringsten räumlichen Änderungen der vom Spektrometer erfassten Oberfläche sowie eine Veränderung des Winkels zur Sonne auszuschließen. Außerdem wurde genau darauf geachtet, dass keinerlei Abschattungen auf der zu beobachtenden Oberfläche die Erfassung des Spektrums beeinflussen. Bei den Testmessungen wurden sämtliche Faktoren konstant gehalten, sodass nur die zeitliche Wiederholung der Messungen sowie unterschiedliche Einstellungen (beispielsweise „Number of Cycles“) Einfluss auf die Ergebnisse haben können.

3.6.2 Testergebnisse

Ausfall des Messkanals

Bei 20 Messdurchläufen mit 10 bis 20 Einzelmessungen (Plants) traten bei den Spektren in insgesamt 5 Messdurchläufen (9 Plants), das ist in einem Viertel aller Messungen, ein Fehler auf, der zu nicht brauchbaren Ergebnissen führte. In *Abbildung 31* sind als Beispiel die Rohdaten (jeweils ein Sample und ein Reference Channel) zweier unmittelbar aufeinanderfolgender Messungen dargestellt und zwar Plant #7 und Plant #8.

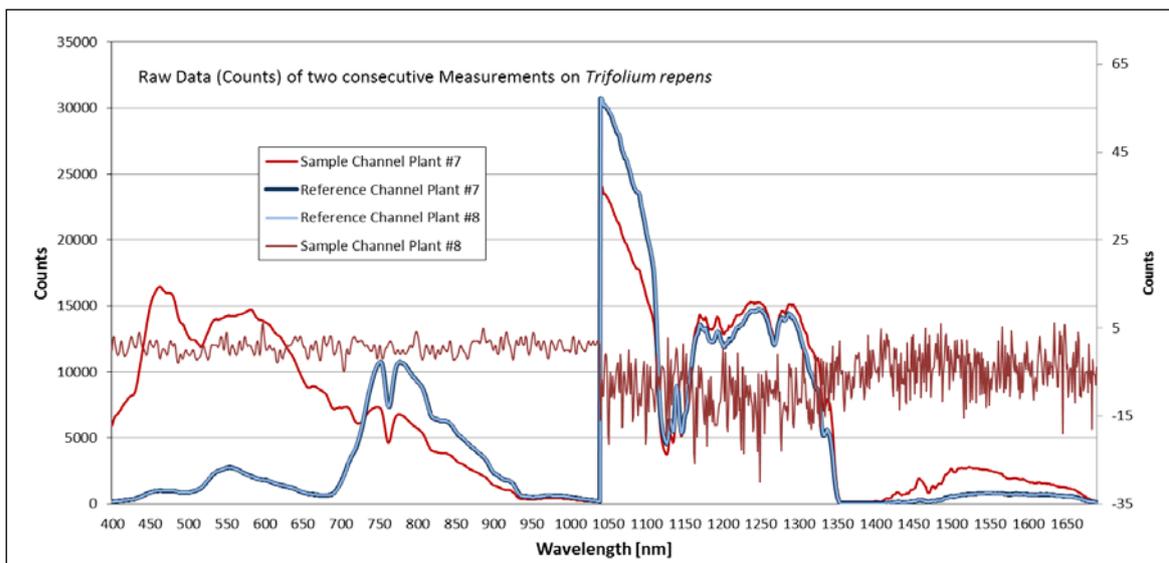


Abbildung 31: Rohdaten zweier Messungen mit Sample- und Referenzkanal

Wie die Daten von Sample Channel zeigen, ist hier ein nicht erklärbarer Fehler aufgetreten, der sich zufällig und in unregelmäßigen Abständen bei verschiedenen Messungen wiederholt. Bei der Berechnung der Reflektanzen, wo diese Fehler mit dem funktionierenden Referenzkanal kombiniert werden, kommen somit Reflexionen mit Höchstwerten bis zu 7.000.000 % heraus.

Zwischen den in der Abbildung gezeigten Messungen lag ein zeitlicher Abstand von 2 Sekunden, gemessen wurde mit einem Scan per Cycle. In diesem Messdurchlauf mit insgesamt 20 Einzelmessungen (Plants) wurden noch 2 weitere Fehlmessungen festgestellt, also insgesamt 3 (Plant #8, Plant #17, Plant #18). Die Integrationszeit für den Sample-Kanal lag während des gesamten Messdurchlaufs bei 331, die des Referenz-Kanals bei 81,6.

Abfall des Messkanals

In unregelmäßigen und nicht nachvollziehbaren Abständen traten bei den Messungen Fehler auf, die in etwa dem Muster des in *Abbildung 32* gezeigten Beispiels entsprechen.

Abbildung 32 zeigt 18 Messungen (2 Plants können nicht herangezogen werden, da hier der oben beschriebene Fehler aufgetreten ist), aufgenommen in 2-Sekunden-Abständen und in derselben räumlichen Position des Sensors auf einer homogenen, dicht bewachsenen Rasenoberfläche. Die Anzahl der Scans per Cycle betrug 1.

Der hier beschriebene Fehler trat sehr häufig auf, wobei die Höhe der Abweichungen stets variiert. Während der Messungen mit derartigen Fehlern konnte beobachtet werden, wie es zu abrupten Änderungen der Prozentwerte in der Intensity-Anzeige des Sample-Kanals (2. Zeile) gekommen ist.

Die spontanen Sprünge von minus 30 und mehr Prozent können nicht auf Veränderung der Umgebungsbeleuchtung oder sonstiger Rahmenbedingungen zurückgeführt werden, da diese in den zweisekündlichen Messintervallen nicht stattgefunden haben. Das in *Abbildung 32* gezeigte Phänomen geht auf einen signifikanten Abfall der Counts des Sample-Kanals zurück – dies zeigt eine Auswertung der Rohdaten von drei aufeinanderfolgenden Messungen in *Abbildung 33*, bei denen die mittlere Messung (Plant #13) dem Ausreißer in *Abbildung 32* entspricht. Wie *Abbildung 33* zeigt, sind die Referenzkanäle bei allen drei Messungen annähernd gleich; auch hier lagen die Integrationszeiten bei 331/81,6.

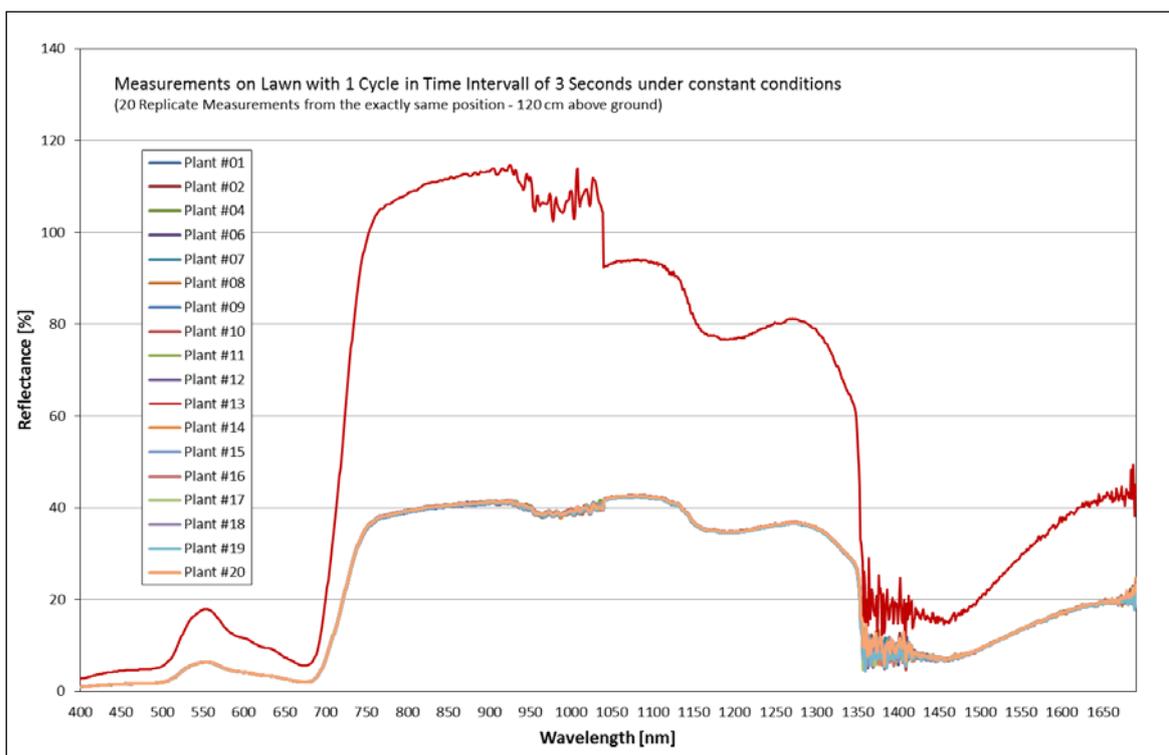


Abbildung 32: Beispiel eines Fehlers innerhalb einer kontinuierlichen Messreihe

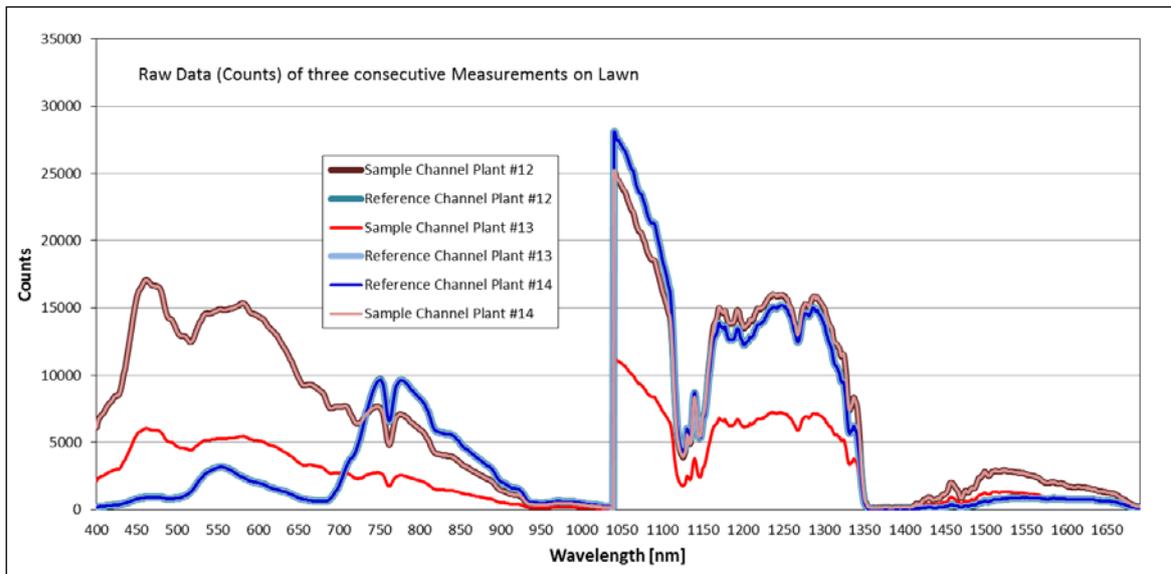


Abbildung 33: Rohdaten drei aufeinanderfolgender Messungen mit dem in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. dargestellten Fehlerwerten als Sample Channel Plant #13

Daten-Shifts und Niveauunterschiede in den Datenreihen

Der hier beschriebene Fehler trat in mehr als 20 % aller Messungen auf und steht in engem Zusammenhang mit dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Fehlverhalten. Zunächst zeigt *Abbildung 34* ein Beispiel für einen Daten-Shift am Sensorübergang ohne Niveauunterschied im MMS1-Bereich (bis 1000 nm). Ein weiteres Beispiel, dargestellt in *Abbildung 35*, zeigt ebenfalls Shifts in unterschiedlicher Intensität und kombiniert mit einem im Vergleich zu den acht „richtigen“ Messungen signifikanten Niveauunterschied der zwei Ausreißer im Bereich < 1000 nm.

Eine ebenfalls oft vorkommende Variante von Abweichungen bzw. Fehlerwerten wird in *Abbildung 36* dargestellt. Im Gegensatz zum Beispiel in *Abbildung 34* wird hier bei dreifacher Wiederholung ein Shift über den gesamten Spektralbereich festgestellt. In der Regel ergaben sich bei oftmaligen Messwiederholungen ohne Veränderung der Rahmenbedingungen und in einem minimalen zeitlichen Abstand zwischen den einzelnen Wiederholungen mehr oder weniger deutliche Unterschiede.

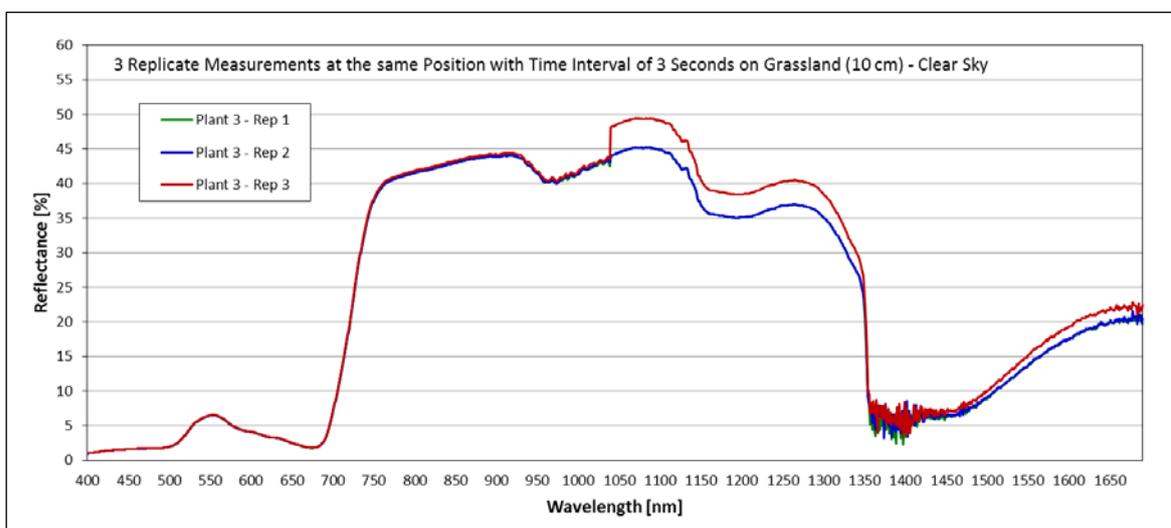


Abbildung 34: Daten-Shift im Sensorübergangsbereich

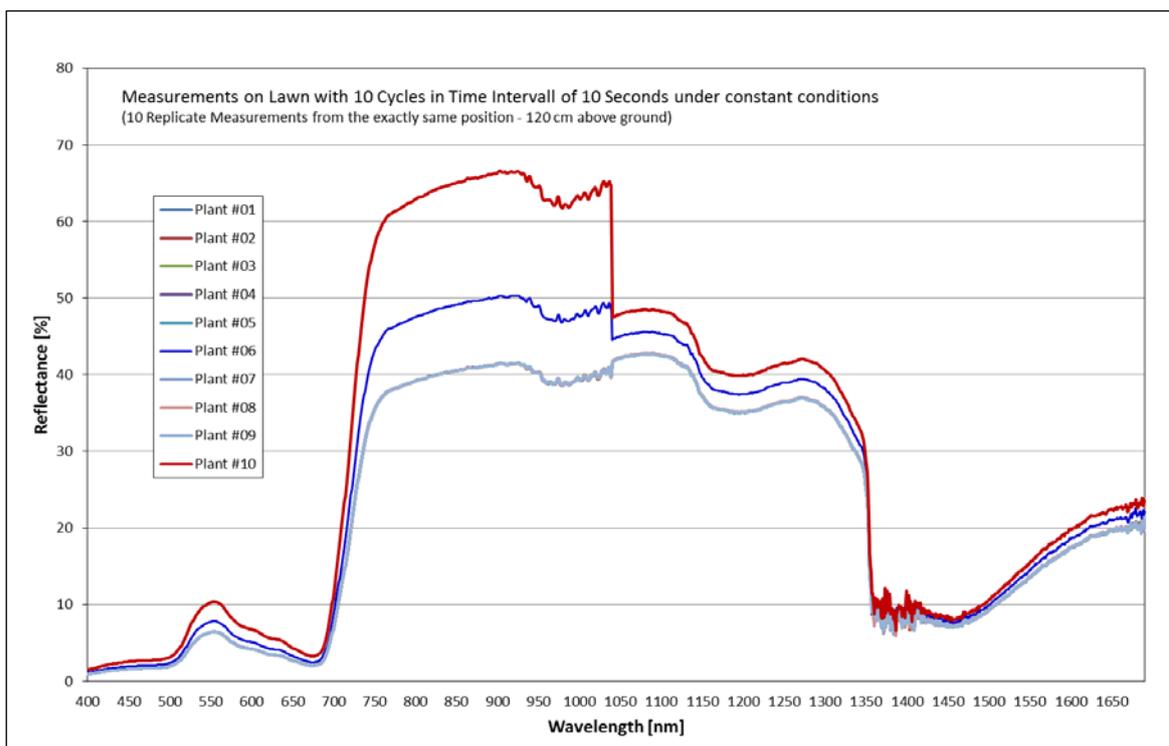


Abbildung 35: Daten-Shift im Sensorübergangsbereich, kombiniert mit Niveauunterschieden

Shifts im Sensorübergangsbereich sowie über den gesamten Spektralbereich traten ohne erkennbare Ursache und in nicht systematischer Art und Weise auf, sodass die ordnungsgemäße Funktionsweise des Gerätes in Zweifel gezogen werden musste. Eine umfangreiche Kommunikation mit der Firma tec5 brachte allerdings trotz gemeinsam konzipierter Testläufe vorerst keine Lösung.

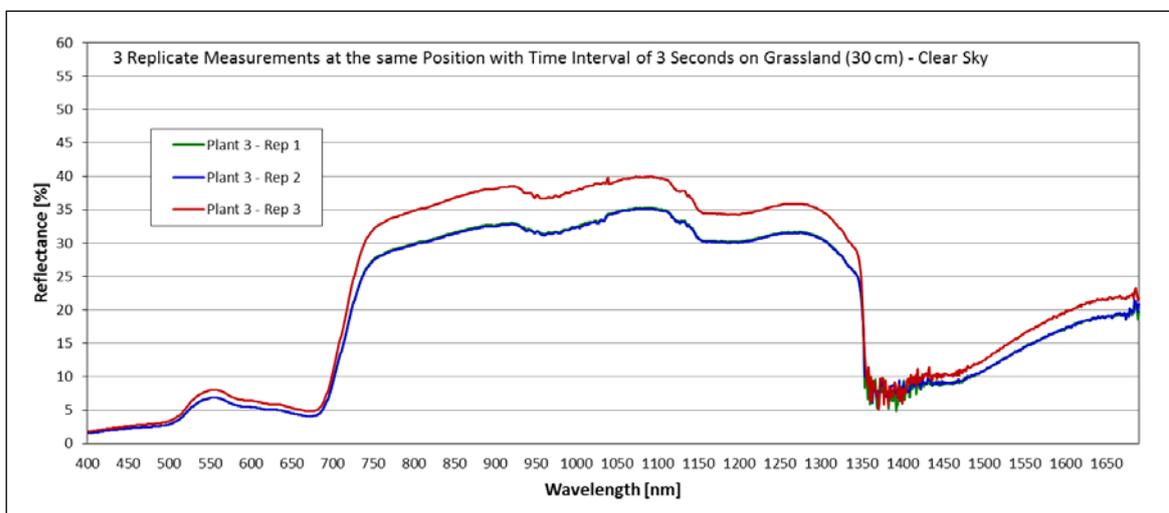


Abbildung 36: Niveauunterschiede über den gesamten Wertebereich

Die Testläufe wurden mit variierenden Einstellungen in der Bedienungssoftware AgroSpec, zu unterschiedlichen Wetterbedingungen und auf unterschiedlichen Oberflächen in vielfacher Wiederholung durchgeführt. In *Abbildung 37* bis *Abbildung 39* werden Spektralsignaturen von drei unterschiedlichen Kulturarten dargestellt. In allen Fällen wurde die Messung an vier Positionen mit jeweils dreifacher Wiederholung vorgenommen. Die einzelnen Spektren liegen unabhängig von Position und Wiederholung so weit voneinander entfernt, dass

hier eindeutig der Einfluss eines bis dahin noch unbekanntes Fehlers ersichtlich ist. In *Abbildung 37* sind zwar die wiederholten Messungen an den einzelnen Positionen sehr eng beieinander, allerdings können die großen Unterschiede von bis zu 30 % nicht auf die Variabilität des Pflanzenbestandes zurückgeführt werden, der gemäß dem Foto weitgehend homogen ist.

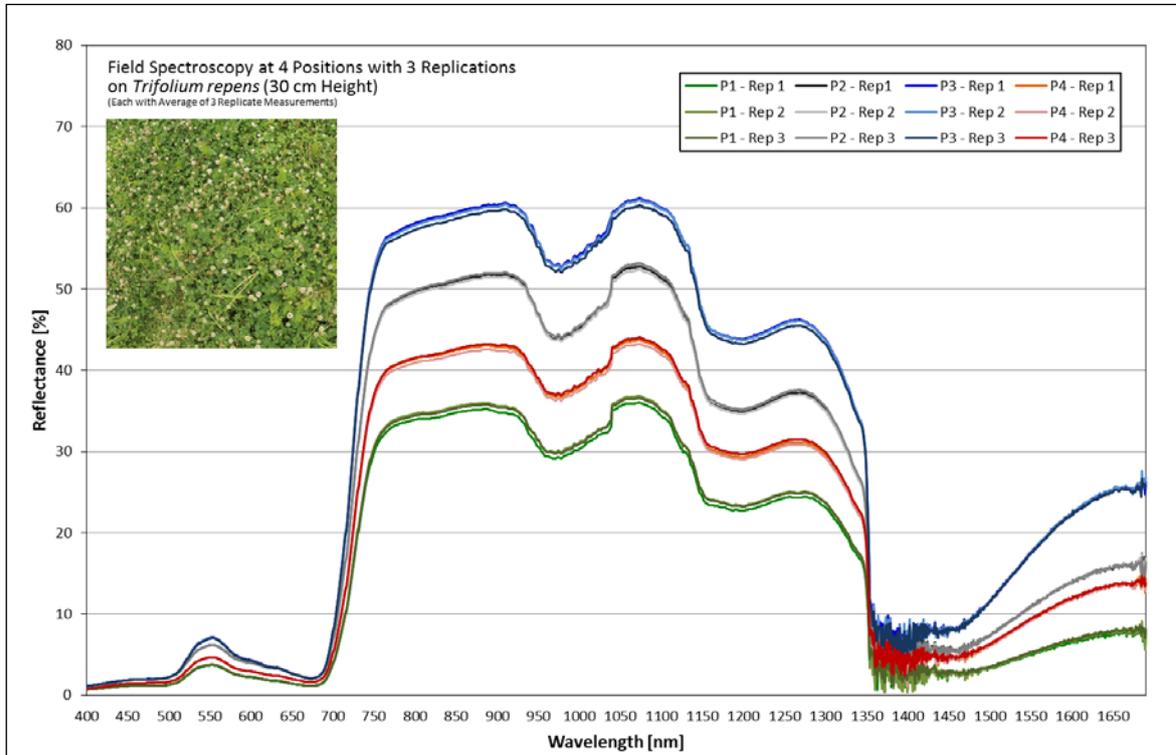


Abbildung 37: Wiederholte Spektralmessungen von *Trifolium repens*

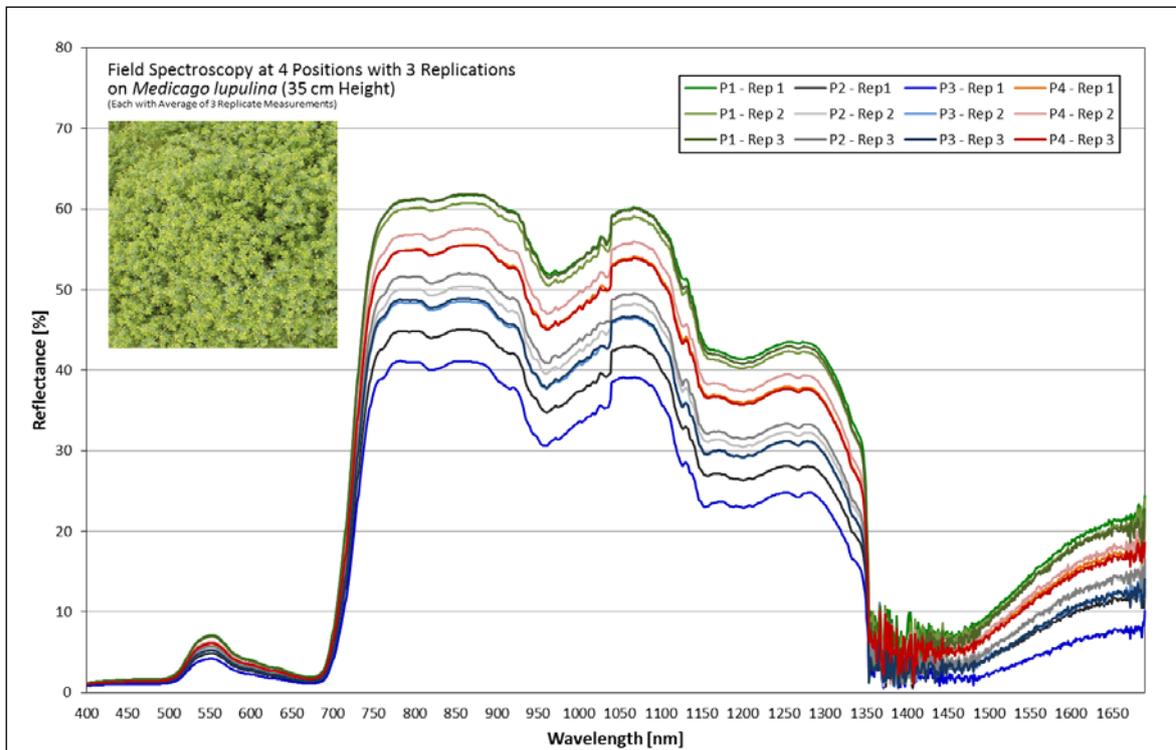


Abbildung 38: Wiederholte Spektralmessungen von *Medicago lupulina*

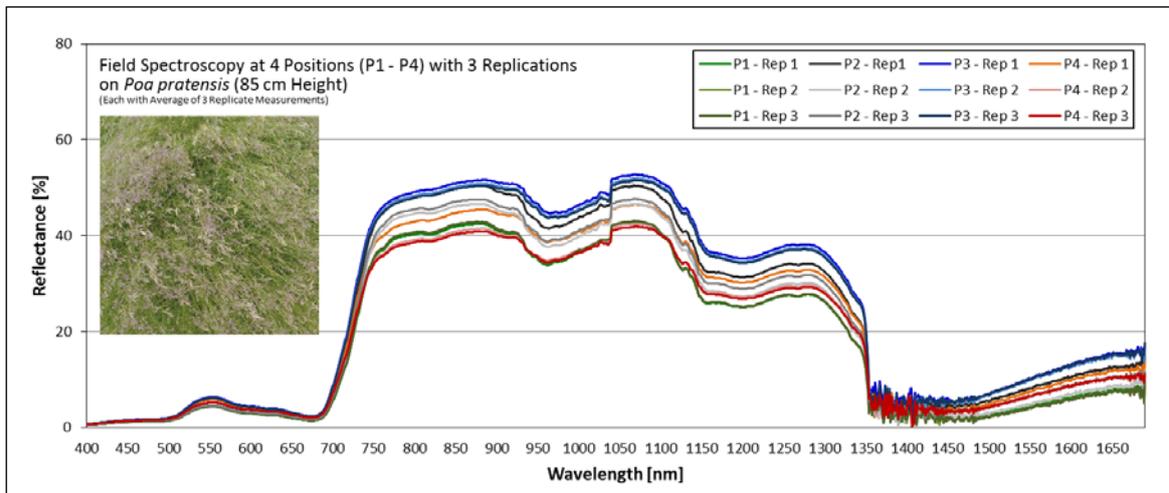


Abbildung 39: Wiederholte Spektralmessungen von *Poa pratensis*

Ein wesentliches Qualitätskriterium von Messverfahren ist die Präzision. Quantifizierbar ist diese durch die Wiederholbarkeit – Präzision ist laut DIN 55350-13 deshalb die Wiederholgenauigkeit von Messungen unter gleichen Bedingungen. Bei der Betrachtung der hier angeführten Probleme musste die Präzision des hier verwendeten Messgerätes in Hinblick auf die sorgfältig konstant gehaltenen Einflussfaktoren hinterfragt werden.

Da es sich dabei keinesfalls um vernachlässigbares Rauschen in den Ergebnissen handelte, sondern um eine massive Beeinträchtigung der Funktionalität, waren Maßnahmen zu treffen, die diesen Um- bzw. Missstand beheben konnten.

3.6.3 Fehleridentifikation und Behebung

Bei einem umfangreichen Messdurchgang im Juni 2015 wurde eine Unregelmäßigkeit beim Auftreten von „Klack“-Geräuschen während der Messung wahrgenommen. Vor dem Messsensor befindet sich ein Metallplättchen, welches nach dem Einschalten des Gerätes unter Spannung gesetzt wird und sich vor den Sensor schiebt. Wird gemessen, schwenkt das Plättchen zur Seite und gibt damit für die Dauer der Integrationszeit, in der Regel sind das einige hundert Millisekunden, die Sicht des Sensors frei. Danach bewegt sich der Shutter sofort wieder vor die Sensoröffnung zurück. Bei jeder Bewegung ist ein leises „Klack“ zu hören. Die wahrgenommene Unregelmäßigkeit bestand darin, dass bei jeder fehlerhaften Messung drei Klackgeräusche hörbar waren, bei einwandfreien Messungen jedoch nur zwei. In weiterer Folge wurde beobachtet, dass das Metallplättchen in unregelmäßigen Abständen mehr oder weniger stark hängen bleibt und dabei das überzählige Klacken verursacht; die Sensoröffnung wird nicht exakt der vorgegebenen Integrationszeit gemäß geöffnet und damit trifft zu viel oder zu wenig Strahlung auf den Sensor.

Alle aufgetretenen Fehler, die in den vorigen Abschnitten beschrieben wurden, konnten auf diese Weise begründet und auch das unsystematische und nicht nachvollziehbare Auftreten der Probleme vollständig aufgeklärt werden. Das Gerät wurde im Juni 2015 umgehend an tec5 gesandt, wo eine Reparatur vorgenommen wurde. Dabei wurde die Fixierung des Metallplättchens etwas gelockert, sodass kein unüberwindbarer Widerstand beim Öffnen und Schließen mehr auftreten konnte.

Der Grund für die detaillierte Beschreibung dieses Problems liegt darin, dass der Gerätefehler den Projektverlauf erheblich beeinflusst und verzögert hat und im Rahmen von umfang-

reichen Testläufe mit vielen Maßnahmen experimentiert wurde, die einen erheblichen Ressourceneinsatz zur Folge hatten. Positiv ist anzumerken, dass durch die anfängliche Unerklärbarkeit des Fehlers alle möglichen Einflussgrößen untersucht und durchdacht werden mussten. Dies führte zu einer sehr intensiven Auseinandersetzung mit dem Themenbereich Feldspektroskopie und es konnten Erfahrungen gewonnen werden, die wahrscheinlich bei einer problemlosen Einführung dieses Fachbereichs an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein nicht in der Tiefe möglich gewesen wären. Unsere Erfahrungen wurden 2016 auch dahingehend genutzt, das Institut für Pflanzenbau der Universität für Bodenkultur bei der geplanten Anschaffung eines Spektrometers der Firma tec5 umfassend zu beraten. Aus dieser kleinen Kooperation entwickelte sich mittlerweile bereits eine erfolgreiche Projektzusammenarbeit.

4 Aufbau einer Spektraldatenbank für Grünland

4.1 Struktur von Spektraldaten im Grünland

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 (beispielsweise Sentinel-2) 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 exakt überprüfbarer Charakteristika des Grünlandbestandes ermittelt werden. Eine zeitgleiche Beprobung des Pflanzenbestandes mit einer Analyse von Ertrag und Qualität, entnommen aus dem Sichtfeld des Sensors, ist dafür unerlässlich und die Voraussetzung für die Herstellung von Zusammenhängen zwischen Reflektanzen und Eigenschaften des Grünlands.

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.

Die Pflanzen eines Grünlandmischbestandes zeigen im Lauf der Aufwuchsperiode entwicklungs-dynamische Veränderungen, die mit Hilfe der Spektroskopie erfasst und in weiterer Folge entsprechend interpretiert werden können. So zeigt *Abbildung 44* 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 42*. Je stärker sich die Pflanzen zu einem geschlossenen Bestand hin entwickeln, desto mehr nimmt der Kurvenverlauf eine für „lebende“ Vegetation typische Form an.

4.2 Experimente mit feldspektroskopischen Beobachtungen

4.2.1 Versuchsanlage ClimGrass

Das Ziel des Projektes SpectroGrass ist die Implementierung der Feldspektroskopie als Erweiterung für pflanzenbauliche Experimente. Dazu gehört neben der Entwicklung einer effizienten Messmethodik auch die Errichtung einer informationstechnologischen Infrastruktur zur Erfassung, Speicherung und Analyse der Messdaten. Nicht zuletzt sind es die erhobenen Daten, die im Zentrum dieser Implementierung stehen und die Voraussetzung für darauf aufbauende fachbezogene Auswertungen sind. Die Spektroskopie ist äußerst datenintensiv und setzt umfangreiche Beobachtungen voraus, um daraus Erkenntnisse abzuleiten, die auf eine solide statistische Absicherung aufbauen können.

Die Generierung der Daten ist aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren, wie sie in den obigen Kapiteln beschrieben wurden, eine Tätigkeit, die große Sorgfalt, Erfahrung und bestmögliche technische Unterstützung benötigt. Erste Zielsetzung war die nicht-invasive Beobachtung der Pflanzenbestände auf der Versuchsanlage ClimGrass. In diesem Experiment wird der Effekt von klimawandelbedingter Temperaturzunahme und der Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf das Grünland untersucht. Eine ausführliche Darstellung der Versuchsanlage und ihrer Komponenten findet sich in HBLFA Raumberg-Gumpenstein (2014). Für die spektroskopischen Messungen wurde ein Erhebungskonzept entwickelt, wie es in *Abbildung 40* dargestellt ist.

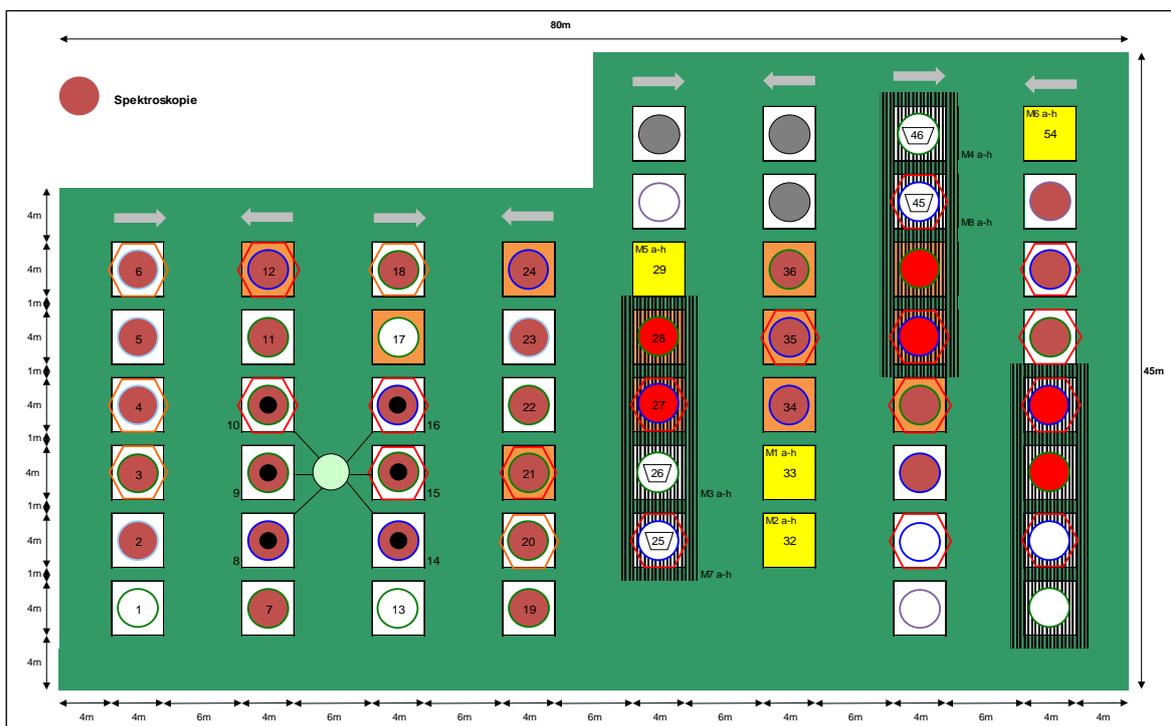


Abbildung 40: Versuchsplan ClimGrass mit Kennzeichnung der Parzellen für Spektralmessungen

Der Versuchsplan zeigt 29 Parzellen (rot dargestellt), auf denen die Spektralmessungen nach Möglichkeit wöchentlich durchgeführt wurden. Die Auswahl basiert darauf, dass für jede Versuchsvariante in zumindest zweifacher, mehrheitlich aber dreifacher Wiederholung Spektren gemessen werden können. Vor jeder der drei Ernten pro Jahr wird auf sämtlichen Parzellen gemessen, ausgenommen die Parzellen mit Mesokosmen. Während einer Trockensimulation unterhalb der Rainout-Shelter werden ebenfalls alle dort befindlichen 12 Parzellen wöchentlich gemessen.

Mit den Beobachtungen am ClimGrass-Versuch wurde im Juni 2014 begonnen. Während 2014 noch überwiegend Testläufe stattfanden, wurden die Vegetationsperioden 2015 bis 2017 vollständig erfasst. In dieser Zeit wurde auf den ClimGrass-Parzellen 2025-mal gemessen, wobei über 8000 Spektren mit insgesamt 10,5 Millionen Einzelwerten entstanden. Diese Datenbasis ist die Grundlage für weitere Auswertungen, in denen aus den Spektren Informationen zur Herstellung eines Zusammenhangs mit Zielgrößen wie Ertrag, Futterqualität, Wuchshöhen, LAI, usw. hergestellt werden können. Die Veränderungen am Bestand aufgrund der simulierten Klimaänderungen im ClimGrass-Experiment setzen nur nach und nach ein und sind nicht sofort von Beginn an erkennbar. Für eine künftige Auswertung der Spektren hinsichtlich dieser Veränderungen braucht es demnach noch weitere Erhebungen, welche im Rahmen eines Arbeitspaketes des auf SpectroGrass aufbauenden Projektes ClimGrassEco (Projekt Nr. 101067) durchgeführt werden.

4.2.2 Feldspektroskopie-Referenz Reinkulturen

Bei den Parzellen im ClimGrass-Experiment handelt es sich um eine Dauerwiesenmischung, die sich aus verschiedenen Pflanzenarten zusammensetzt. Die einzelnen Arten besitzen unterschiedliche spektrale Eigenschaften. Messungen im Mischbestand sind demnach auch als eine über mehrere Arten gemittelte Information zu verstehen.

Damit langfristig die Spektren der Hauptbestandbildner getrennt untersucht werden können, wurde ein Versuch angelegt, in dem, parallel zu den ClimGrass-Parzellen, die wichtigsten Gräser- und Kleearten in dreifacher Wiederholung als Reinkultur beobachtet werden. Zusätzlich wird auch eine Spektralsignatur des offenen Bodens erhoben. *Abbildung 41* zeigt das Design dieses ergänzenden Versuches.

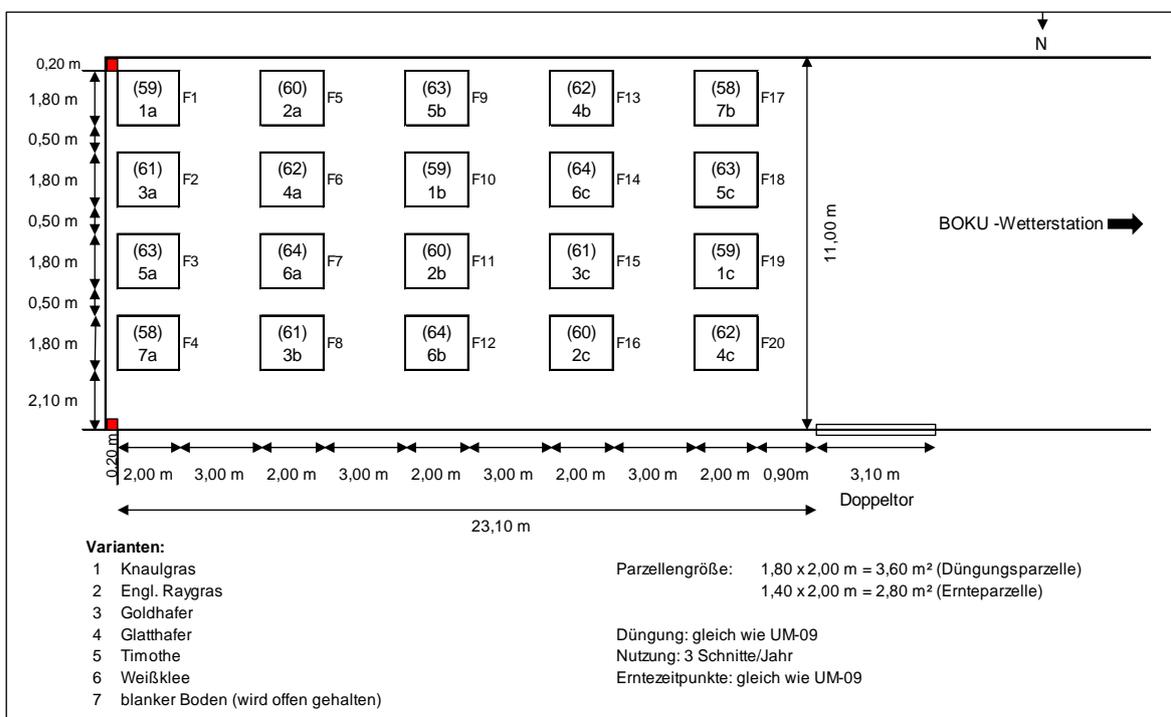


Abbildung 41: Versuchsplan der Spektr-Referenzmessungen für Reinkulturen bzw. offenem Boden

Bei einer künftigen Auswertung der Spektralsignaturen von ClimGrass-Parzellen kann auf diese Weise auch auf für einzelne Pflanzenarten spezifische Signaturen zurückgegriffen werden und so die Zusammensetzung des Mischsignals analysiert werden.

In *Abbildung 42* werden die Spektren von drei unterschiedlichen Oberflächen und damit die Verschiedenartigkeit der Signaturen in Abhängigkeit der Pflanzenarten bzw. der Oberflächenbeschaffenheit illustriert.

Seit Juni 2014 wurden die Messungen im Kulturartenreferenzversuch parallel und nach Möglichkeit zeitgleich zu den Beobachtungen in der ClimGrass-Versuchsanlage (siehe *Abbildung 40*) durchgeführt. Bei 1110 Beobachtungen wurden über 4400 Spektren erfasst, welche sich aus 5,7 Millionen Einzelwerten zusammensetzen.

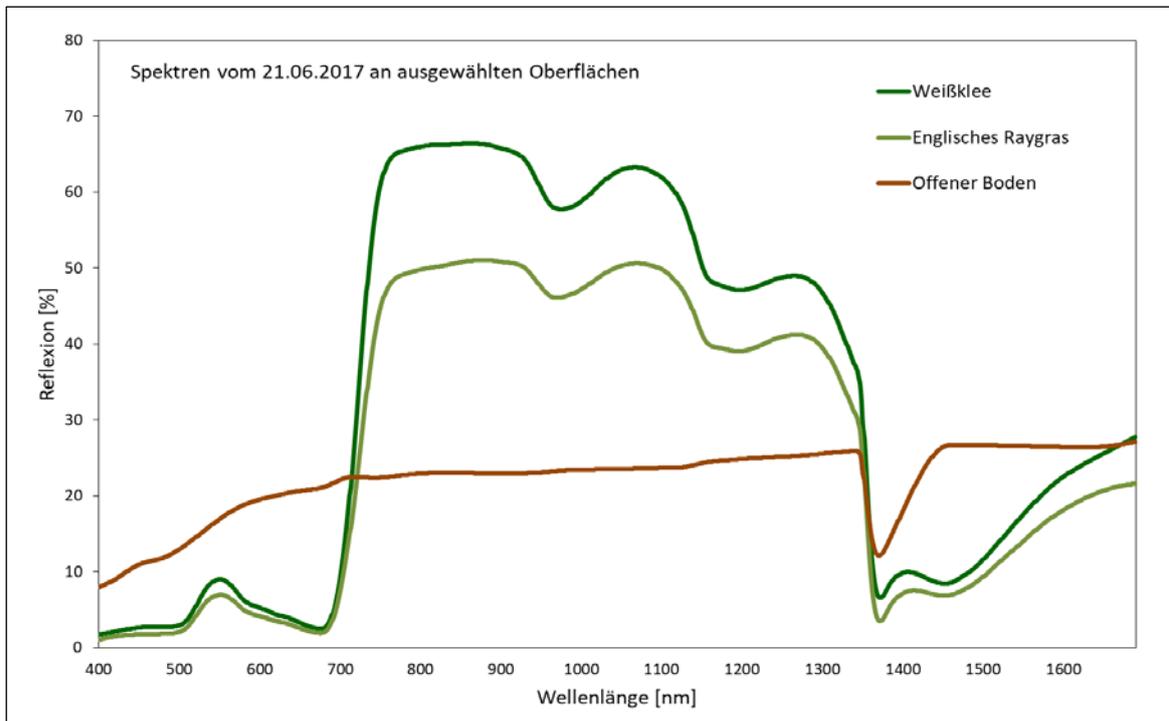


Abbildung 42: Beispiel von Spektralsignaturen unterschiedlicher Oberflächen

4.2.3 Feldspektroskopie-Referenz Biomassedynamik

Um die Information von Spektren interpretieren zu können, braucht es Messwerte, mit denen ein statistischer Vergleich durchgeführt werden kann. Wird beispielsweise der Biomasseertrag mit Hilfe einer Spektralsignatur geschätzt, bedarf es einer Korrelationsanalyse zwischen Ertragsmessungen und jenen Spektralbändern bzw. deren Kombination, die Rückschlüsse auf den Ertrag zulassen. Ein entsprechender Stichprobenumfang kann dann dafür herangezogen werden, um Aussagen über die Grundgesamtheit zu tätigen.

Um die Biomassedynamik im Grünland mit Hilfe von Spektraldaten beschreiben zu können, braucht es daher eine kontinuierliche Reihe von Ertragsmessungen in kurzen Abständen und den dazugehörigen Beobachtungen mit dem Feldspektrometer.

Im ClimGrass-Experiment kann eine dichte Messreihe von Erträgen nicht realisiert werden, da die Anzahl von drei Schnitten festgelegt ist und es darüber hinaus keine destruktive Erfassung der Erträge während der Aufwüchse gibt. Es werden zwar wöchentlich Spektren gemessen, allerdings ohne die für deren Interpretation wichtige Gegenüberstellung von gleichzeitig erhobenen Messdaten zum Ertrag.

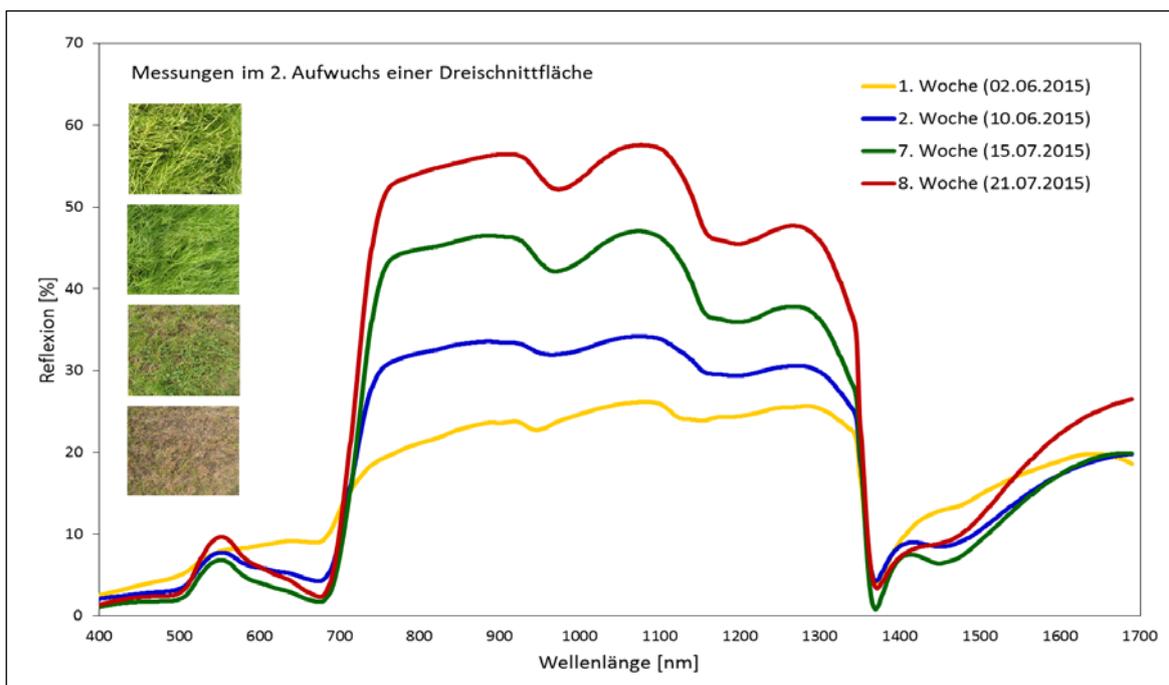


Abbildung 44: Unterschiedliche Spektralsignaturen eines Dauergrünlandbestandes in Abhängigkeit der Entwicklungsphasen während des zweiten Aufwuchses

Als Beispiel wird in *Abbildung 45* der Verlauf der Wuchshöhe in der Vegetationsperiode 2016 gezeigt. Die Wuchshöhe des ersten Aufwuchses steigt von Vegetationsbeginn bis hin zur Ernte kontinuierlich an und erreicht aufgrund des stärkeren Anteils an fertilen Gräsertrieben mit mehr als 80 cm ein höheres, absolutes Niveau als die beiden Folgeaufwüchse. Der zweite Aufwuchs weist einen geringeren Stängel- jedoch höheren Blattanteil auf und beginnt vor der Ernte teilweise zu lagern. Der dritte und letzte Aufwuchs im Spätsommer/Herbst ist sehr blattreich mit einem geringen Anteil an Stängeln und Blütenständen und weist nach knapp vier Wochen eine relativ konstante Wuchshöhe von nur mehr rund 40 cm auf.

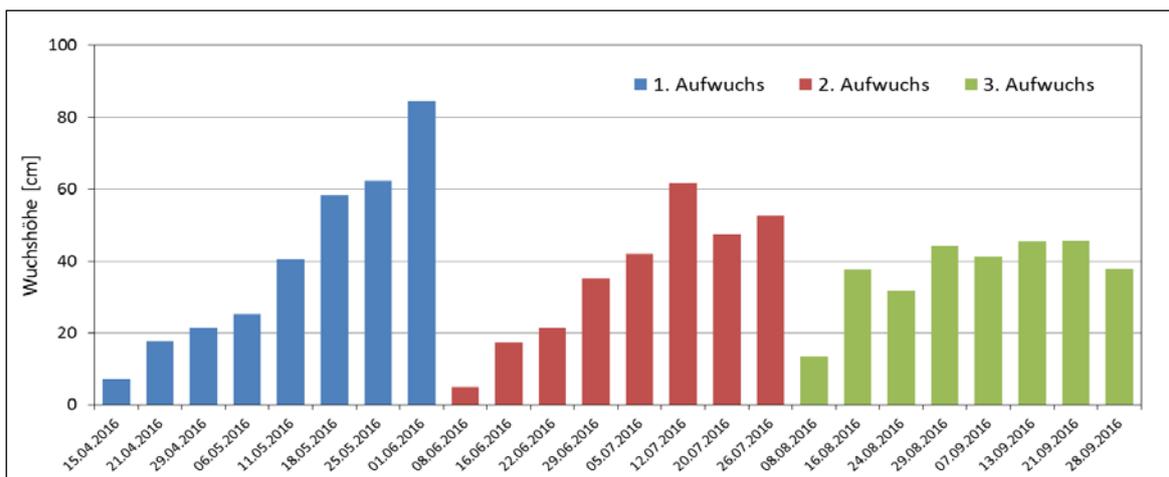


Abbildung 45: Wachstumsverlauf von drei Aufwüchsen an Hand von Beobachtungen der Wuchshöhe

Mit der Wuchshöhe des Grünlandbestandes, hier nach BMLFUW (2017, 36f) angepasst, kann ein einfaches Modell zur Schätzung des Ertrages erstellt werden. Als Beispiel wurde ein lineares Modell gerechnet, bei dem alle verfügbaren Ertragsdaten des in *Abbildung 43* angeführten Referenzversuches zusammen mit Strahlungssummen Verwendung fanden:

```
Call:
lm(formula = TM_Ertrag.ha ~ RadSum + crop.height.adjusted, data = dat)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-4.808 -1.437 -0.474  1.486  5.665

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -1.698494   0.912943  -1.860  0.06983 .
RadSum         0.005433   0.001537   3.535  0.00101 **
crop.height.adjusted 0.280267   0.031271   8.962  2.66e-11 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.426 on 42 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8393, Adjusted R-squared:  0.8317
F-statistic: 109.7 on 2 and 42 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Wie die Modellausgabe zeigt, kann mit den signifikanten Parametern Wuchshöhe und Strahlungssumme bei einem Bestimmtheitsmaß von 83 % bereits ein sehr starker Zusammenhang zum Biomassertrag hergestellt werden. Diese Auswertung zeigt, dass die systematische Erhebung der Wuchshöhe bei jeder Messung von Spektren zusammen mit der Einbeziehung von Wetterparametern eine wertvolle Interpretationshilfe von Spektralsignaturen bzw. davon abgeleiteter Indizes bietet.

4.2.4 Langzeitdüngungsversuch in Admont

Unter den verschiedenen Versuchsanlagen der Abteilung Grünlandmanagement der HBLFA Raumberg-Gumpenstein befinden sich einige wegen ihrer langen Versuchsdauer einzigartige Experimente. Der mit dem Anlagejahr 1946 älteste Versuch zur Untersuchung der langfristigen Auswirkungen von unterschiedlichen Düngungsintensitäten befindet sich in Admont. *Abbildung 46* zeigt den Plan dieser 96 Parzellen umfassenden Versuchsanlage.

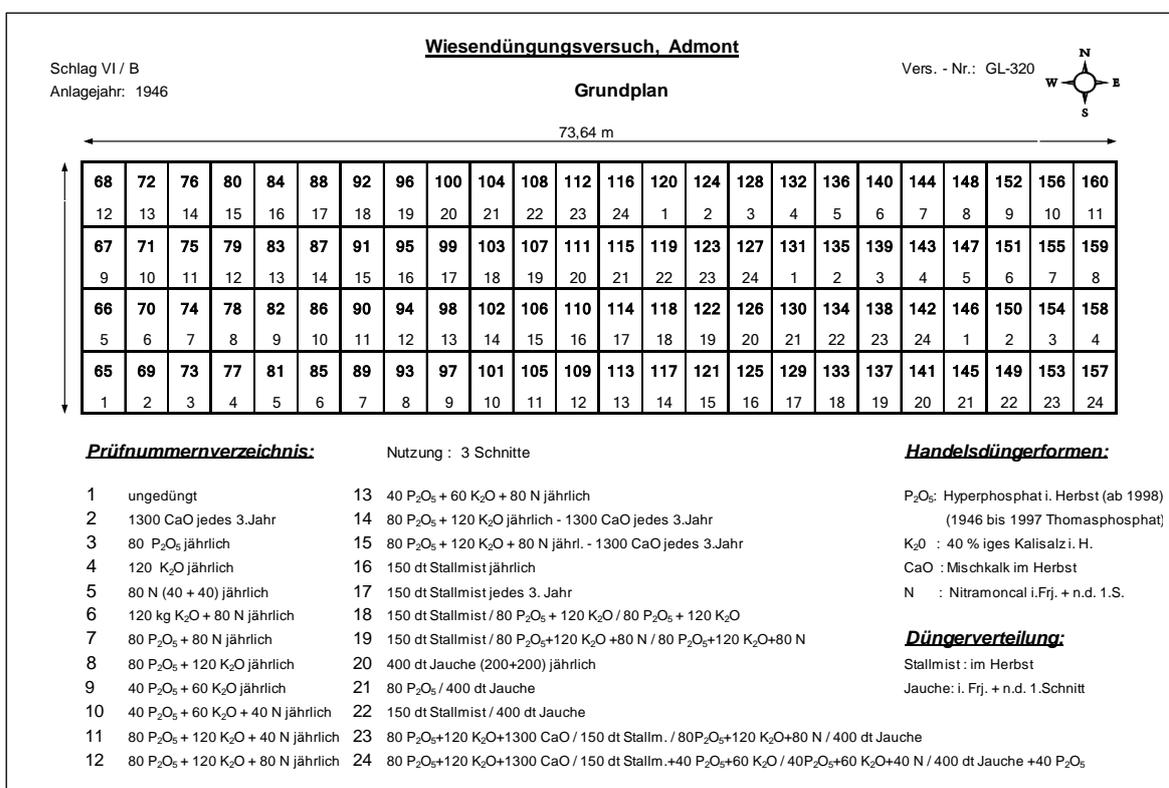


Abbildung 46: Versuchsplan des Langzeitversuches GL-320 in Admont

Aufgrund der langen Versuchsdauer hat sich auf den Parzellen ein Equilibrium in Stoffflüssen, floristischer Zusammensetzung und Bodenleben eingestellt, Eigenschaften, die bei Experimenten mit einer Projektdauer von nur wenigen Jahren nicht hergestellt werden können. Eine ausführliche Beschreibung der Langzeitversuche findet sich in Pötsch *et al.* (2015).

Der augenscheinliche Unterschied in den Pflanzenbeständen der einzelnen Varianten, die Parzellen in vierfacher Wiederholung umfassen, sind derart groß, dass eine feldspektroskopische Untersuchung vielversprechende Ergebnisse bereithält. Wir haben uns deshalb entschlossen, diesen Versuch mehrere Jahre mit feldspektroskopischen Messungen und Wuchshöhenbestimmungen zu begleiten. Die Messungen werden auf dieser Dreischnittanlage vor jeder Ernte seit Juli 2015 durchgeführt; für die Vegetationsperioden 2016 und 2017 stehen Spektromessungen für alle drei Schnitte zur Verfügung. Bisher wurde auf den Parzellen 1100-mal mit jeweils drei Wiederholungen gemessen, sodass über 3300 Spektren mit 4,3 Millionen Einzelwerten bereitstehen. Die Unterschiede in den Spektralsignaturen können am Beispiel einiger ausgewählter Varianten bei Messungen zur Ernte des ersten Aufwuchses 2017 in *Abbildung 47* gezeigt werden. Für eine detaillierte Auswertung des Zusammenhangs zwischen den durch die Düngung beeinflussten Pflanzenbeständen und den dazugehörigen Spektralsignaturen braucht es zumindest noch eine dritte vollständige Vegetationsperiode.

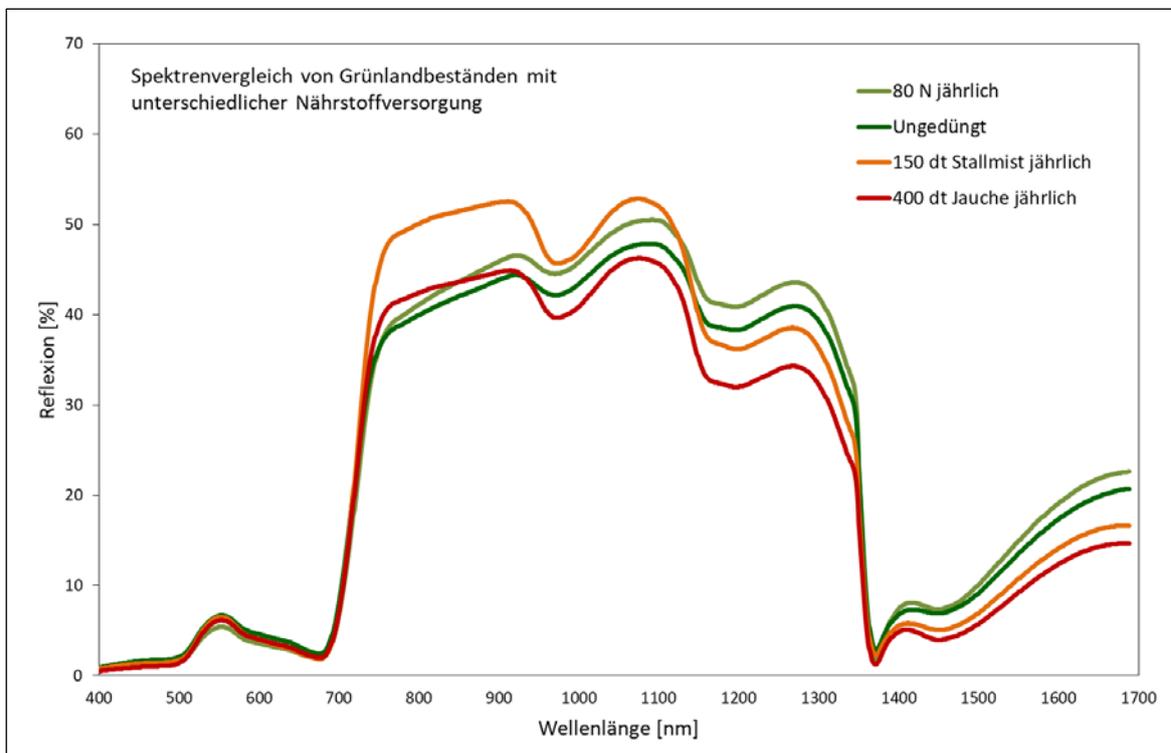


Abbildung 47: Spektralsignaturen eines Dauergrünlandbestandes in Abhängigkeit der Nährstoffversorgung

4.3 Beispiele zur Analyse von Spektralsignaturen

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 Datenbestände 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, 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 Wellen- bzw. Frequenzbereiche, welche für die Bildung von Indizes im Rahmen der Vegetationsanalyse genutzt werden können. *Tabelle 1* fasst eine Übersicht nach Thenkabail *et al.* (2014)) zusammen.

Tabelle 1: Spektralbereiche und eine Auswahl daraus 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, Lichtnutzungseffizienz, 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

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 48* 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, Biomassegewichte, Bestandeshöhen, Artenzusammensetzung, usw. gegenübergestellt und statistisch ausgewertet werden. Erst dadurch können die Ergebnisse dieser LCI-Auswertung einer sinnvollen Interpretation zugeführt werden.

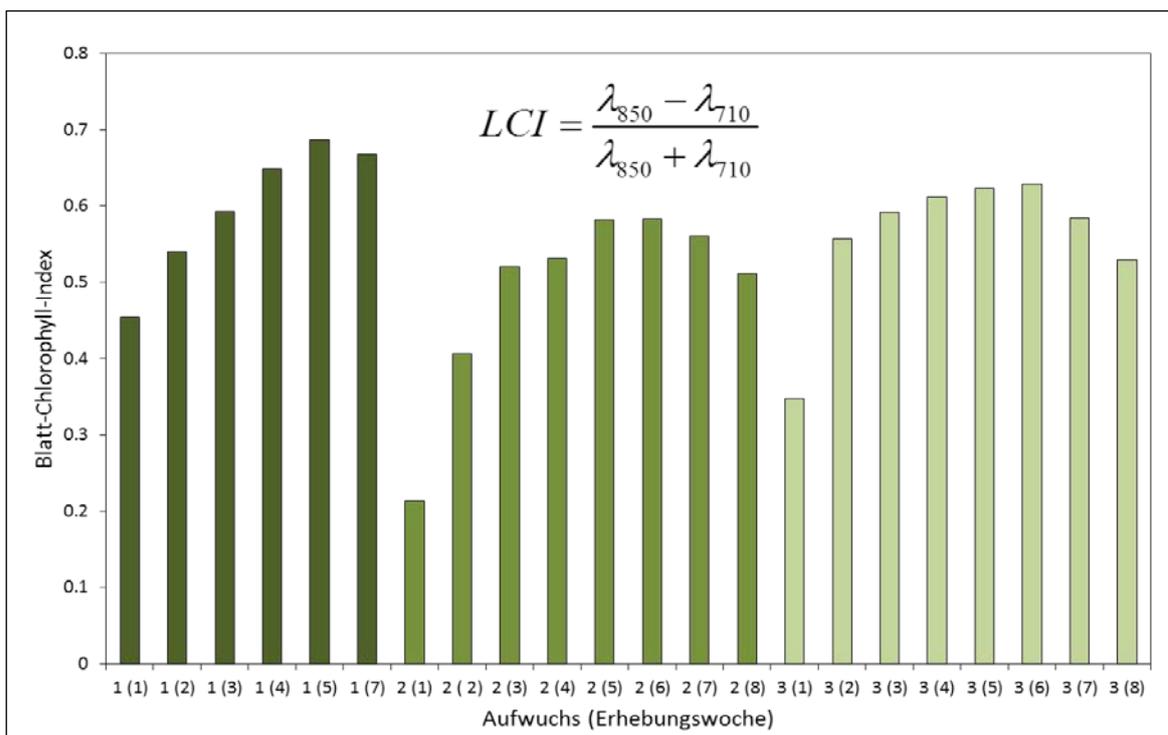


Abbildung 48: Verlauf des Blatt-Chlorophyll-Index für einen Dauergrünlandbestand mit drei Aufwüchsen (Auswertung von Spektren mit dreifacher Wiederholung)

Die Gegenüberstellung von Index und Zielparameter, in diesem Fall ist es der Trockenmasseertrag, wird in *Abbildung 49* am Beispiel des Blattflächenindex (LAI) im Rahmen einer einfachen Regressionsanalyse gezeigt. Die dafür verwendeten Daten, sowohl Spektralsignaturen als auch Erträge, stammen aus dem im Kapitel 4.2.3 vorgestellten Biomassedynamik-Referenzversuch.

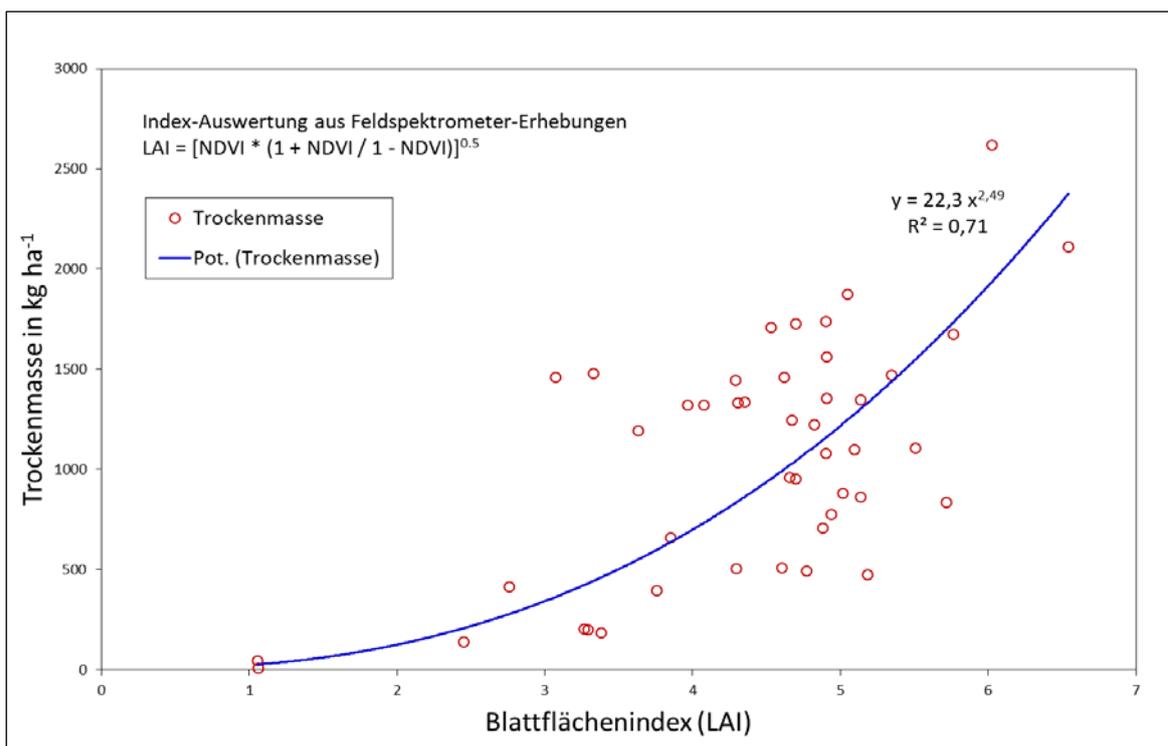


Abbildung 49: Zusammenhang zwischen Blattflächenindex und Trockenmasseertrag

Wie in *Abbildung 49* ersichtlich, herrscht zwischen LAI und Ertrag ein quadratischer Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von 71 %, also ein relativ starker Zusammenhang. Die hier dargestellte Punktwolke lässt aber auch klar erkennen, dass eine Schätzung des Ertrages mit Hilfe des LAI fehlerbehaftet ist. Abhilfe schafft die Erstellung eines Modells, bei dem die Trockenmasseerträge von mehreren Faktoren abhängen. Im nachfolgend gezeigten Beispiel eines linearen Modells wird die Erklärung des Ertrags über den LAI hinaus, mit Strahlungssumme (RadSum), Niederschlagssumme (PrecSum) sowie der klimatischen Wasserbilanz erklärt:

```
Call:
lm(formula = TM_Ertrag_ha ~ RadSum + PrecSum + CWB + LAI_calculated, data = dat)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.8009 -2.0511 -0.2109  1.7248  8.4622

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -6.85718    1.62204  -4.227 0.000133 ***
RadSum        0.06912    0.01190   5.808 8.80e-07 ***
PrecSum      -0.28571    0.05945  -4.806 2.19e-05 ***
CWB          0.27179    0.05980   4.545 4.98e-05 ***
LAI_calculated 1.79120    0.38616   4.638 3.72e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.606 on 40 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8234, Adjusted R-squared:  0.8058
F-statistic: 46.63 on 4 and 40 DF, p-value: 1.519e-14
```

Alle erklärenden Variablen dieses Modells sind hoch signifikant, tragen also wesentlich zur Erklärung des Ertrages bei. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 80 % ist ein starker Zusammenhang gegeben, der zeigt, dass die Verwendung von Spektren und daraus abgeleiteter Indizes eine gute Möglichkeit ist, mit nicht-invasiven Methoden die Entwicklung eines Pflanzenbestandes zu beschreiben. Die hier beschriebenen Beispiele sollen die Möglichkeiten der Auswertung von im Projekt SpectroGrass aufbereiteten Daten zeigen. Eine detaillierte Analyse der Spektren und aller mit ihnen erhobenen nicht-invasiven und destruktiven Daten wird Teil von weiteren, fachspezifischen Projekten sein.

So konnte beispielsweise ein 2017 auf der ClimGrass-Versuchsanlage durchgeführtes partielles Dürreexperiment auch mit feldspektroskopischen Beobachtungen begleitet werden, um Zusammenhänge zwischen Pflanzenbestandsentwicklung und Trockenheit zu beschreiben. In *Abbildung 50* sind Spektralsignaturen zweier Varianten dargestellt, welche die Wirkung von Trockenheit im Verlauf dieser Simulation sehr deutlich zeigen und die Grundlage für eine weitere intensive statistische Auseinandersetzung bilden.

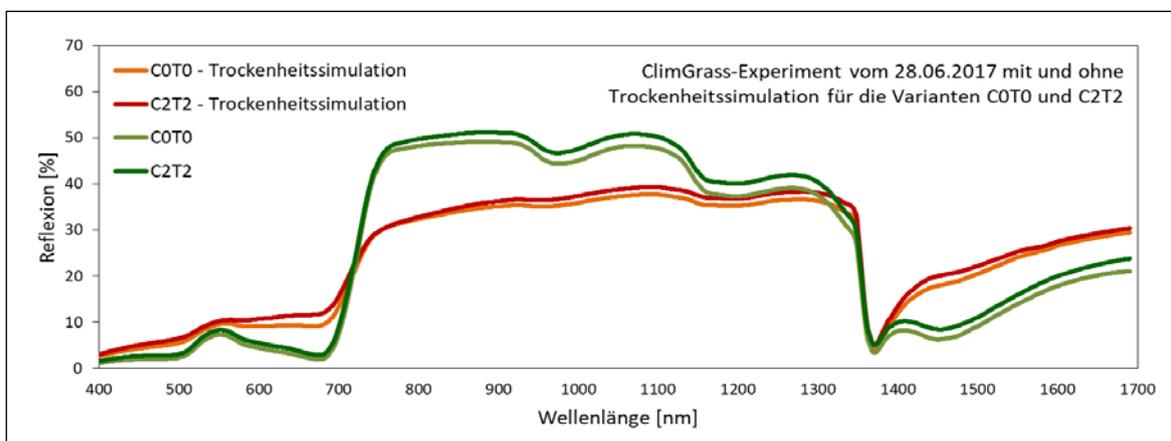


Abbildung 50: Spektren auf Parzellen mit Trockensimulation im Vergleich zu Referenzparzellen

Das Ziel von SpectroGrass ist die Implementierung der Feldspektroskopie, also die Schaffung aller Grundlagen für spätere Auswertungen. Somit waren die Messmethoden, die Rohdatenverarbeitung, das Management der Spektralsignaturen (Fehlerkorrekturen, Zusammenfassung zu Variantenmittelwerten, Berechnung von Statistiken, Visualisierung, usw.) sowie die Generierung von Indizes und anderer Maßnahmen zur Datenreduktion die zentralen Aufgaben in SpectroGrass. Künftige Projektvorhaben, bei denen Spektren erhoben werden, können auf die in SpectroGrass gelegten Grundlagen aufbauen und die hier entstandenen Methoden und Werkzeugen nutzen. Insbesondere die Möglichkeit, eine Vielzahl an Spektren mit einer geeigneten Software zu bearbeiten, ist eine Schlüsselfunktion und für eine Arbeit mit der Feldspektroskopie unumgänglich. In SpectroGrass wurde dafür ein entsprechendes Programm entwickelt, das im folgenden Kapitel in den Grundzügen vorgestellt wird.

5 Datenmanagement und Datenaufbereitung

5.1.1 Aufbereitung der gerätespezifischen Spektralrohdaten

Die HandySpec-Benutzerschnittstelle AgroSpec ermöglicht die Speicherung einer Messreihe (bezeichnet als „Run“) in einer Datei. Innerhalb der Messreihe können beliebig viele Einzelmessungen vorgenommen werden, diese werden als „Plant“ bezeichnet. Die Strukturierung der Ergebnisse wird innerhalb einer ASCII-Textdatei vorgenommen; Plants werden in aufeinanderfolgende Dateisektionen gegliedert.

Zum Transformieren des Rohtextformates in eine Excel-Datei wird von tec5 ein Tool geliefert, in dem die Textdatei geladen werden kann und dann jeder Plant ein Excel-Sheet mit zusätzlicher Grafik und Rohdatentabellen ergibt. Da im Rahmen von ClimGrass in regelmäßigen, wöchentlichen Abständen eine Vielzahl an Spektren erhoben wird, gestaltete sich die manuelle Transformation Datei für Datei als sehr aufwendig.

In einer ersten Phase der Datenaufbereitung wurde deshalb dieses Tool soweit umprogrammiert, dass es in der Lage war, alle Dateien (entspricht den „Runs“ des HandySpec) innerhalb eines ausgewählten Verzeichnisses in einem Arbeitsschritt zu konvertieren und als Excel-Dateien im Zielverzeichnis abzuspeichern. Eine zusätzliche Funktion ermöglicht die Bildung von Mittelwerten für alle Plants innerhalb eines Runs. *Abbildung 51* zeigt die Benutzeroberfläche des Excel-Makros von tec5 und die von uns erweiterten Funktionalitäten.

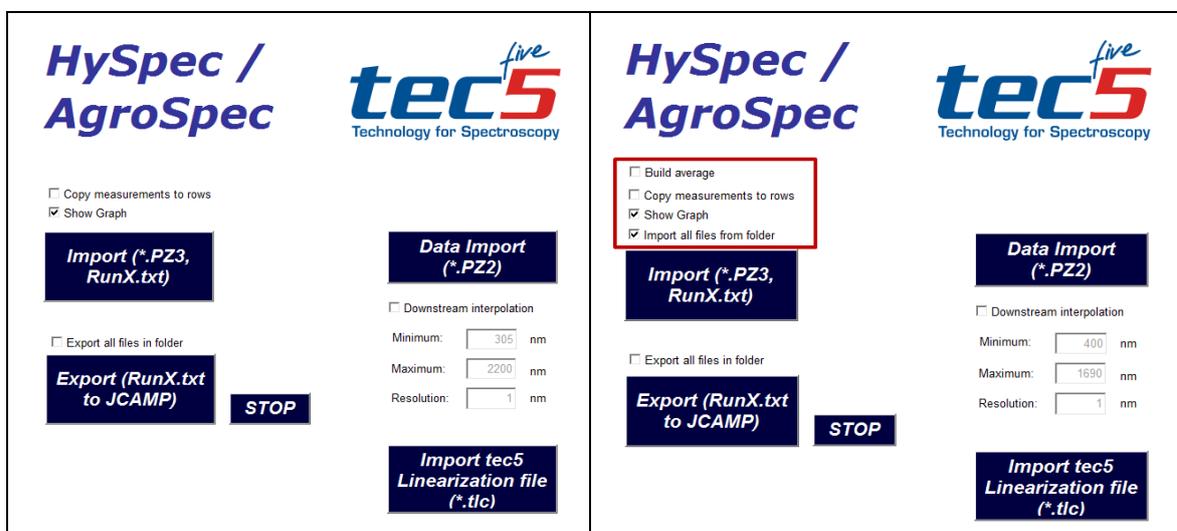


Abbildung 51: Erweiterung des tec5-Excel-Tool zum Import und Aufbereitung der HandySpec-Daten

5.1.2 Korrektur des Sensor-Shifts

Spektrometer erfassen die verschiedenen Spektralbereiche (VNIR, SWIR1, SWIR2) mit unterschiedlichen Sensoren. Aus unbestimmten Gründen kommt es beim Übergang von einem Sensor zum anderen immer wieder zu systematischen Shifts der Daten des angrenzenden Spektralbereiches. Da dieses Problem die Qualität der Daten und darauf basierende Analysen negativ beeinflussen kann, müssen geeignete Maßnahmen gesetzt werden, diesen Fehler in den Rohdaten zu korrigieren.

Unter anderen haben sich Aasen *et al.* (2014) und Dorigo *et al.* (2006) mit Algorithmen beschäftigt, die entsprechende Korrekturen im Zuge der Datenverarbeitung vornehmen. Auch im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde ein Korrekturalgorithmus entwickelt, wie er in *Abbildung 52* schematisch dargestellt ist.

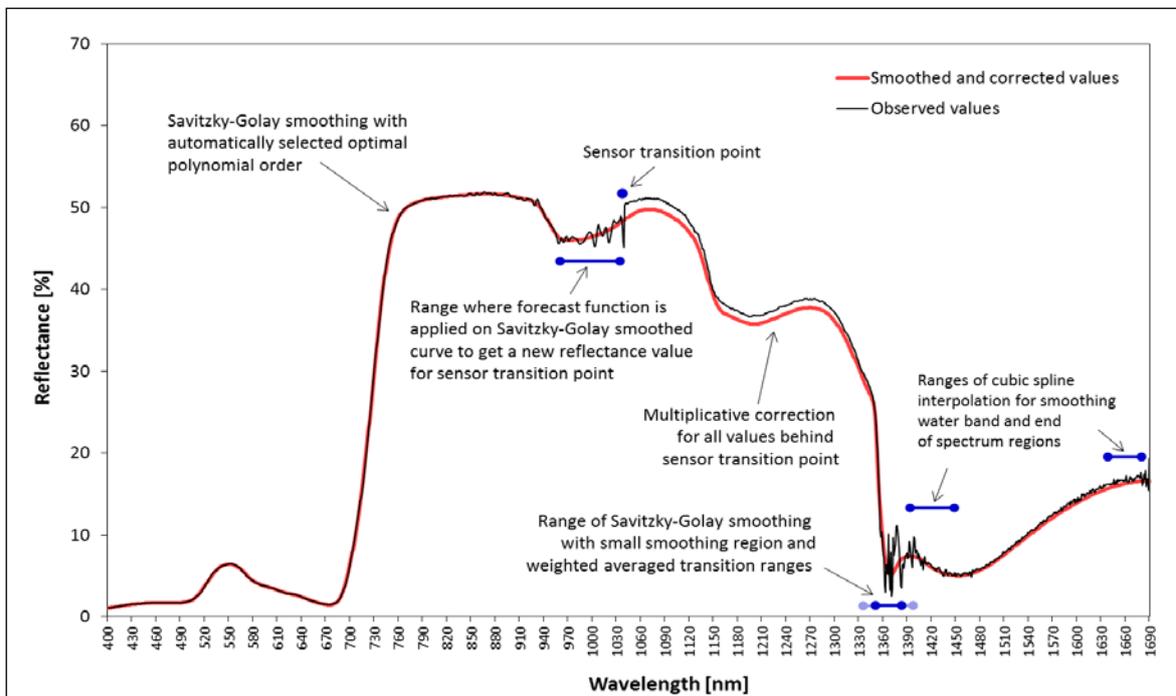


Abbildung 52: Schematische Darstellung der Algorithmen zur Korrektur des Sensor-Shifts

Zunächst wird die Kurve mittels Savitzky-Golay-Smoothing geglättet und im Sensorübergangsbereich mittels Forecast-Funktion der dem festgestellten Trend folgende Wert ermittelt. Aus der Relation zwischen diesem Forecast-Wert und dem originalen, mit dem Shift versehenen Wert ergibt sich ein Korrekturwert, der dann multiplikativ auf den zu korrigierenden Spektralbereich angewendet wird. Zusätzliche Glättungen mittels Spline werden noch im Wasserbandbereich (1350 bis 1450 nm) und am Ende des erfassten Spektrums (1650 nm) angebracht.

In *Abbildung 53* werden die verschiedenen Möglichkeiten einer Korrektur des Sensor-Shifts dargestellt. Laut Auskunft des Herstellers ist die Anhebung von VNIR auf SWIR1, also die erste Variante in *Abbildung 53*, zu bevorzugen, da im SWIR1-Bereich eine Temperaturregelelektronik eingebaut ist, welche Temperaturschwankungen kompensiert und damit im Gegensatz zum VNIR-Bereich stabiler ist. Aus technischer Sicht ist es also sinnvoller, den Wert des Sensors VNIR an den Wert des Sensors SWIR1 anzugleichen.

Die Anwendung erfolgt weitgehend automatisiert im Zuge der Mittelwertbildung, wenn Einzelmessungen auf einer Parzelle, in der Regel sind das vier Positionen, zu einem Parzellenmittelwert zusammengefasst werden.

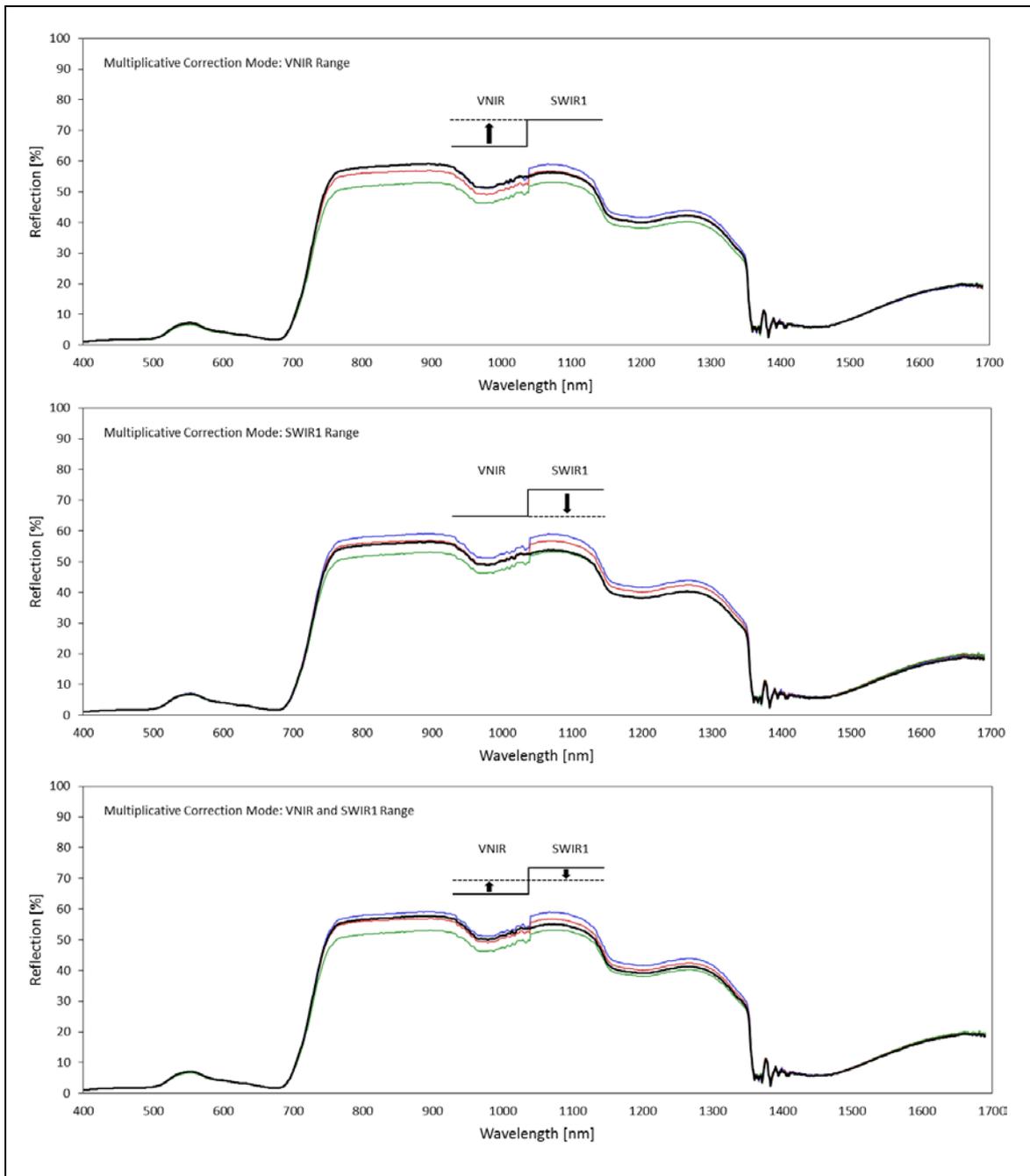


Abbildung 53: Korrekturvarianten von Kurvenverschiebungen im Sensorübergang von VNIR zu SWIR1

5.1.3 Datenmanagement mit dem SpectroAnalyst

Im Zuge der Projektarbeit wurde sehr schnell erkannt, dass die Datenmenge in kurzer Zeit sehr stark anwächst und eine dateibasierte Datenaufbereitung einen enormen Aufwand verursacht. Deshalb wurde schon nach kurzer Projektlaufzeit damit begonnen, eine Software zu entwickeln, welche alle Daten in einer zentralen Datenbank speichern kann, die Daten in

einer Oberfläche selektierbar und visualisierbar macht und letztendlich die gesamte Auswertung (statistische Analyse und indexbasierte Auswertung der Spektren) mit entsprechend implementierten Funktionen begleitet.

Daraus entstand der SpectroAnalyst, dessen Oberfläche in *Abbildung 54* dargestellt ist. Mit diesem Werkzeug ist es möglich, Rohdaten aus den HandySpec-Erhebungen direkt in die Datenbank zu importieren. Bereits im Zuge des Imports können eine ganze Reihe von Metadaten eingegeben werden, die ebenfalls in der Datenbank abgelegt werden können. Die Spektren einer Messreihe (Runs) werden automatisch zusammengefasst, worauf dann in der Folge Mittelwertkurven, Glättungskurven und Sensor-Shift-Korrekturen erstellt werden, die ebenfalls in der Datenbank gespeichert werden.

Messreihen können zu Varianten zusammengefasst werden und diese wiederum zu Analyse-Sets, die mit deskriptiver Statistik ausgewertet werden. Dazu werden die ausgewählten Daten dem Statistikpaket R übergeben, dort im Hintergrund berechnet und die Ergebnisse wieder in die Datenbank zurückgegeben. Sämtliche Rohdaten und davon abgeleitete Verarbeitungsergebnisse können als Spektralsignaturen grafisch dargestellt werden.

Da zu jedem Spektrum auch eine fotografische Aufnahme erstellt wird, können den einzelnen Daten die jeweiligen Fotos ebenfalls über Einträge in der Datenbank zugeordnet werden. Gibt es bei der Interpretation einer Kurve Unsicherheiten kann damit per Knopfdruck das dazugehörige Foto geöffnet und betrachtet werden. Dies erleichtert die Ursachenfindung bei ungewöhnlichen Signaturen.

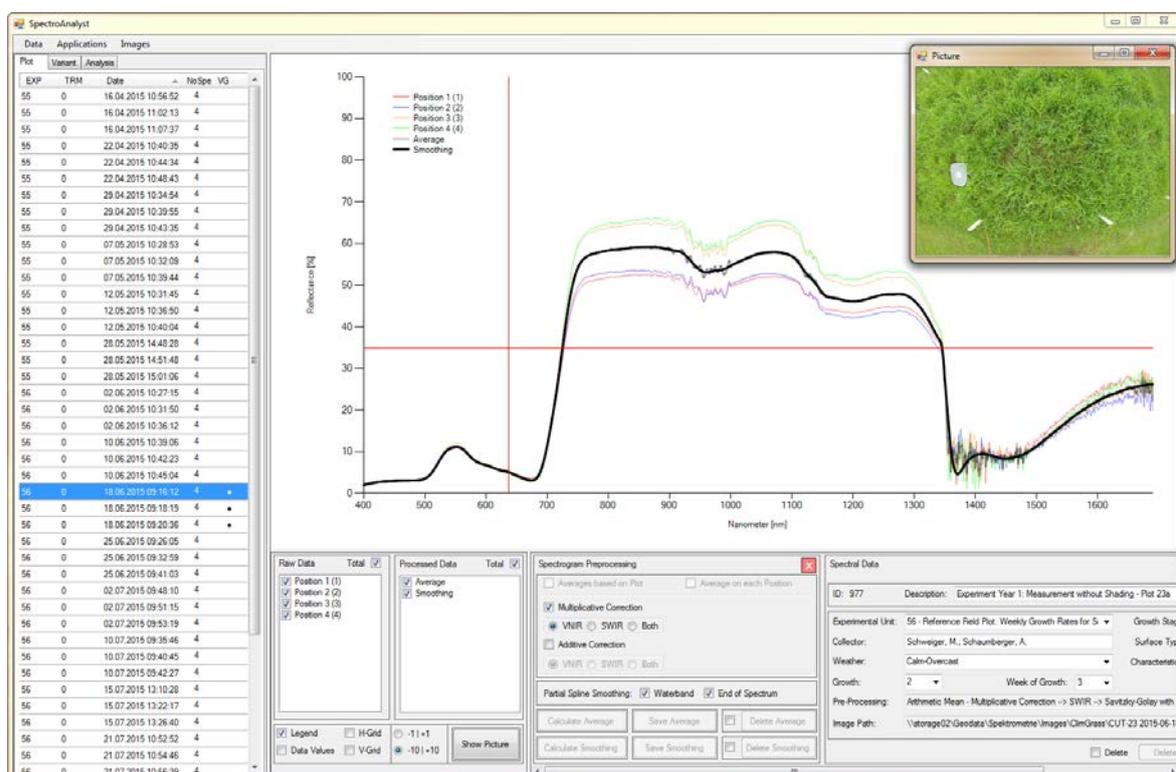


Abbildung 54: Benutzerschnittstelle des SpectroAnalyst

Mit dem SpectroAnalyst ist es neben der Kurvenanalyse auch möglich, Indizes zu berechnen und diese ebenfalls in die Datenbank abzulegen. Sämtliche Daten (Rohdaten sowie alle davon abgeleiteten Daten) können mit Hilfe des SpectroAnalyst aus der Datenbank in CSV-Dateien exportiert werden, die in diesem Standardformat dann in anderen Programmen weiterverwendet bzw. mit Kollegen ausgetauscht werden können.

5.1.4 Datenmodellierung

Der SpectroAnalyst ist im Wesentlichen eine Schnittstelle zu einer zentralen Datenbank, in der sämtliche Spektraldaten, davon abgeleitete Ergebnisse sowie damit verbundene Metadaten abgelegt werden. Dem Datenmodell, welches die Struktur der Datenablage im Datenbankmanagementsystem definiert, kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu.

Abbildung 55 zeigt das Schema dieses Modells, in dem nur die Hauptkomponenten und deren Verbindungen abgebildet sind. Die Spektraldaten werden in drei Haupttabellen verwaltet. In die Tabelle RawSpectra werden ausschließlich die Rohdaten gespeichert. Die Tabelle PlotSpectralData stellt eine Struktur dar, welche Rohdaten (RawSpectra), die davon abgeleiteten Daten (Mittelwert, Glättung, Statistik, usw. in der Tabelle PlotSpectra) sowie diverse Metadaten (Weather, Editor, SurfaceType, Plot-Treatment, Project) miteinander verbindet. PlotSpectralData können in Varianten zusammengefasst werden. Die Informationen über die Plots einer Variante werden in der Tabelle VariantSpectralData verwaltet, wobei abgeleitete Spektren auf der Basis der Variantengruppierung (z.B. Mittelwertspektren über alle PlotSpectra einer Variante) in der Tabelle VariantSpectra gespeichert und mit den Metadaten verknüpft werden.

Als dritte Hierarchieebene besteht die Möglichkeit, mehrere Varianten zu Analyse-Sets zusammenzufassen (beispielsweise alle Spektren eines bestimmten Aufwuchses). Wird ein solches Analyse-Set erstellt, erfolgt automatisch die Berechnung sämtlicher deskriptiver Statistikwerte, welche ebenfalls in einer entsprechenden Tabelle gespeichert werden.

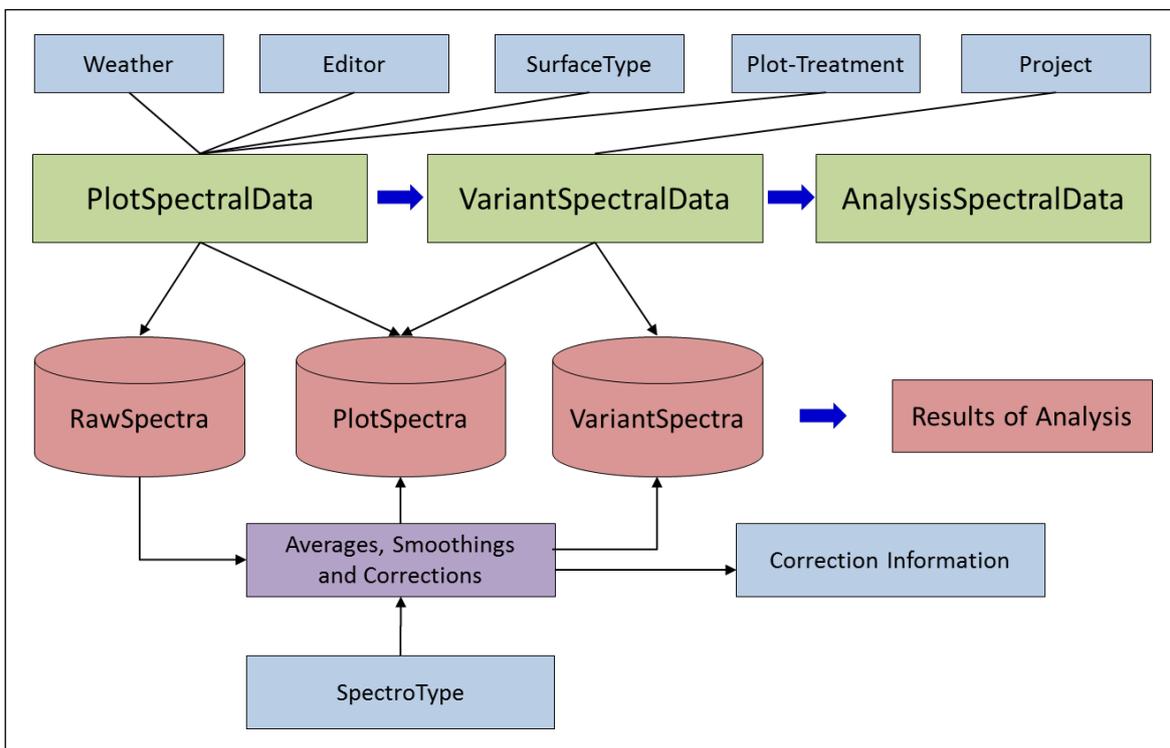


Abbildung 55: Übersicht über das Datenschema des SpectroAnalyst

Eine detaillierte Darstellung des Datenmodells findet sich in *Abbildung 56*. Es handelt sich um ein relationales Modell, bei dem versucht wurde, Datenstrukturen hierarchisch aufeinander aufzubauen (Einzelspektren – Varianten – Analyse-Sets) und dennoch eine möglichst hohe Auftrennung in objektähnlicher Form zu erreichen. Die Spektraldaten selbst sind in sehr schlanken Datentabellen (RawSpectrogram, PlotSpectrogram, VariantSpectrogramm,

usw.) konsequent von den Metadaten (PlotSpectralData, VariantSpectralData, usw.), die Informationen über die Rahmenbedingungen der Messungen beinhalten, getrennt. Damit ist sowohl das Datenmodell als auch die einzelnen Tabellen relativ leicht zu erweitern bzw. an neue Anforderungen anzupassen. Die strenge relationale Ausrichtung des Datenmodells ist auch die Voraussetzung für eine effiziente Implementierung der Nutzerschnittstelle, der Einbindung von externen Prozessen, wie zum Beispiel das Statistikpaket R für die Berechnung sämtlicher Statistiken, der Berechnung und Speicherung von Indizes sowie die Zusammenstellung von einzelnen Datenpaketen für den Export zur weiteren Verarbeitung.

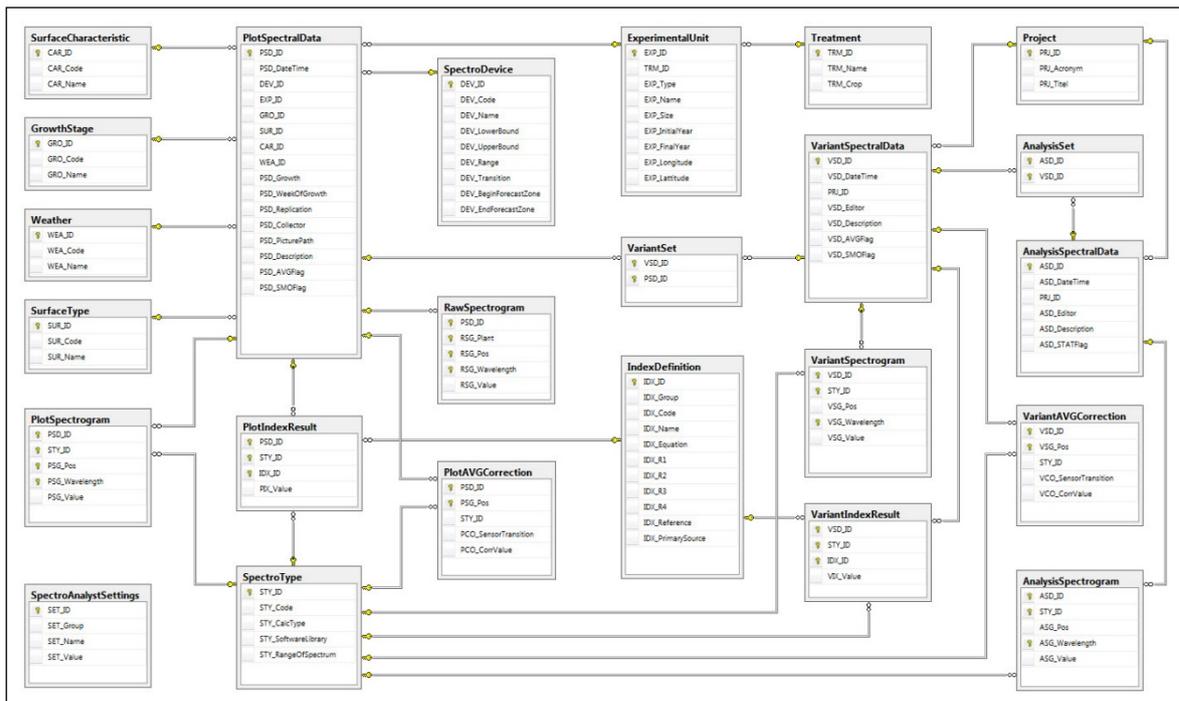


Abbildung 56: Detailliertes Datenmodell zur Speicherung der Spektren im SpectroAnalyst

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Feldspektroskopie ermöglicht zerstörungsfreie messtechnische Beobachtungen an lebenden Pflanzenbeständen, die in Kombination mit anderem Messdaten die physiologische Entwicklung beschreiben können. Wenn über statistische Modelle zwischen Spektralsignaturen und Zielparametern signifikante Zusammenhänge hergestellt werden können, ist es möglich, bereits während des Wachstums Informationen über Nährstoffversorgung, Schädlingsbefall, Inhaltsstoffe und Qualitätsentwicklung von Pflanzenbeständen zu erhalten. Der praktische Nutzen dieser Information ist beträchtlich, da notwendige und geeignete Managementmaßnahmen sehr gezielt und zeitgerecht gesetzt werden können.

Damit die für die praktische Nutzung relevanten Zusammenhänge verlässlich hergestellt und wissenschaftlich abgesichert werden können, ist es notwendig, eine große Menge an Daten zu erheben und diese mittels statistischer Verfahren auszuwerten. Das Projekt SpectroGrass diente der Implementierung von Grundlagen für die Datenerhebung in pflanzenbaulichen Versuchen und der Bereitstellung einer verlässlichen technischen Infrastruktur für die Verarbeitung der bei der Spektroskopie entstehenden großen Datenmenge. Dazu gehört die Schaffung von effizienten Algorithmen zur Rohdatenverarbeitung mit Fehlerkorrektur und Glättung, zur Mittelwertbildung über Versuchsvarianten, zur Generierung beliebig vieler Indizes, zur effizienten Anwendung statistischer Verfahren auf Spektralsignaturen sowie zur

visuellen Darstellung von Spektren. Mit der im Projekt SpectroGrass entwickelten Software „SpectroAnalyst“ wird eine Vielzahl von Bearbeitungsmöglichkeiten bereitgestellt, ohne die eine ambitionierte Auseinandersetzung mit der Spektroskopie nicht möglich ist. Neben der Entwicklung von digitaler Infrastruktur und Messequipment wurden im Projekt SpectroGrass zahlreiche Daten auf bestehenden Versuchsanlagen, aber auch auf eigens für die Feldspektroskopie eingerichteten Experimenten erhoben. Damit ist eine breite Datenbasis verfügbar, auf die in Folgeprojekten aufgebaut werden kann. Wesentliche Schlussfolgerungen aus der mehrjährigen intensiven Auseinandersetzung mit dem Thema Feldspektroskopie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Spektroskopische Messungen sind zwar einfach durchzuführen, jedoch braucht es viel Erfahrung, um in den Spektralsignaturen Fehler zu erkennen, diese den vielfältigen Einflussfaktoren zuzuordnen und damit unbrauchbare Messungen zu identifizieren und auszuschneiden.
- Die Entwicklung einer Messausstattung, welche die effiziente Arbeit im Feld unterstützt ist entscheidend dafür, in welchem Umfang Spektren erhoben werden können. Eine Voraussetzung für die Interpretation von Spektren sind viele tausend Beobachtungen. Der Optimierung von Arbeitsabläufen und die Anpassung des Messequipments an einen möglichst geringen Personalbedarf ist somit von großer Bedeutung.
- Spektroskopische Beobachtungen benötigen eine ausreichende starke Sonnenstrahlung mit möglichst geringer Variabilität, d.h. nach Möglichkeit keine Wolkenbedeckung. Die Planung von Messkampagnen unter diesem Gesichtspunkt entscheidet maßgeblich über die Qualität der Daten und über die für die Messung erforderliche Arbeitszeit.
- Um eine repräsentative Spektralsignatur eines Pflanzenbestandes zu erhalten, ist es notwendig, die Messung in einer Parzelle mehrfach zu wiederholen. Fotografische Aufnahmen erleichtern die Interpretation der Spektren enorm, vor allem dann, wenn es darum geht, unter den Wiederholungen Ausreißer zu detektieren und diese dann aus der Mittelwertbildung auszuschließen.
- Die Rohdatenverarbeitung muss aufgrund der großen Datenmenge, die in einem Projekt mit spektroskopischen Messungen anfällt, so weit wie möglich automatisiert werden, da sonst mit einem enormen Zeitbedarf für diese Tätigkeit gerechnet werden muss. Wir konnten beispielsweise den Zeitbedarf für die Verarbeitung der Rohdaten einer Messkampagne mit unserer Software SpectroAnalyst von etwa vier Stunden auf 10 Minuten herabsenken.
- Die Speicherung der Daten in einer geeigneten Datenbank, das Zusammenfassen von Spektren zu Varianten und Analyse-Sets sowie die automatisierte Erstellung von Statistiken und Indizes ist die Voraussetzung für den systematischen Einsatz der Feldspektroskopie in der Forschung. Da die Datenstruktur von Spektren aufgrund der zusammengehörigen und geordneten Abfolge von Einzelwerten speziell ist, braucht es auch spezielle Algorithmen zur Verarbeitung, die ohne softwaretechnische Unterstützung nur mit großem Aufwand umzusetzen sind.

Während mit Feldspektrometern hyperspektrale Daten in kleinem Maßstab gesammelt werden, bieten moderne Satellitenbeobachtungssysteme wie Copernicus die Möglichkeit, multispektrale Daten über die ganze Erdoberfläche in hoher zeitlicher wie räumlicher Auflösung zu liefern. Die Übertragbarkeit von spektralen Feldbeobachtungen und ihres Zusammenhangs mit biophysikalischen Größen auf eine regionale bzw. überregionale Ebene über satellitenbasierte Fernerkundung hält sowohl für Praxis wie auch für Forschung ein riesiges Potenzial an Möglichkeiten bereit. Der Verknüpfung von Feldspektroskopie und multispektraler Fernerkundung ist ein Fachbereich, der viele Disziplinen nachhaltig beeinflussen wird.

7 Literatur

- Aasen, H.; Gnyp, M.L.; Miao, Y. und Bareth, G. (2014): Automated Hyperspectral Vegetation Index Retrieval from Multiple Correlation Matrices with HyperCor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **80** (8), 785-795.
- BMLFUW (2017): Richtlinie für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland, 7. Auflage, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 115 S.
- Buchgraber, K. (1997): Der Einfluss des Schnitzeitpunktes auf den Mineralstoffgehalt des Grünlandfutters. Conference on nutrition of domestic animals „Zdravec-Erjavec-Days“, Radenci, Zivinorejsko-Veterinarski zavod za Pomurje Murska Sobota, 27.-28. Oktober 1997, 57-62.
- Buchgraber, K. und Pötsch, E.M. (1999): Einfluss der Höhenstufen auf Futterertrag, Futterqualität, Tierbesatz und Milchleistung: Landkalender 2000, 63. Jahrgang, *Leopold Stocker Verlag*, Graz, 133-138.
- Clevers, J.G.P.W. (1999): The use of imaging spectrometry for agricultural applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54** (5-6), 299-304.
- Daughtry, C.S.T.; Vanderbilt, V.C. und Pollara, V.J. (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.; Bachmann, M. und Heldens, W. (2006): AS Toolbox & Processing of field spectra, User's manual, German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, 31 S.
- Fricke, T. und Wachendorf, M. (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.; Richter, F. und Wachendorf, M. (2011a): Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* **79** (2), 142-152.
- Fricke, T.; Richter, F. und Wachendorf, M. (2011b): Störungsfreie Erfassung von Biomassen in Leguminosen/Gras-Beständen mit einem Ultraschallsensor. 55. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau der Gesellschaft für Pflanzenwissenschaften "Nachhaltigkeit in der intensiven Futtererzeugung", Oldenburg, AGGF, Band 12, 25.-27. August 2011, 73-78.
- Govender, M.; Chetty, K. und Bulcock, H. (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.
- HBLFA Raumberg-Gumpenstein (2014): Grünland im Klimawandel: Szenarien, Prozesse, Forschungsansätze. Klimasymposium 2014, Irdning-Donnersbachtal, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 40 S.
- Jespersen, N. (2006): Chapter 5 General principles of spectroscopy and spectroscopic analysis. In Ahuja und Jespersen (Eds.): *Comprehensive Analytical Chemistry*, Volume 47, *Elsevier*, 111-155.
- Jung, A.; Götze, C. und Gläßer, C. (2009a): 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.
- Jung, A.; Götze, C. und Gläßer, C. (2009b): Untersuchung der Variabilität der Messsignale von vier hyperspektralen Labor- und Feldmessgeräte. 29. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Jena, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 18, 24.-29. März 2009, 267-275.
- MacArthur, A. (2011): Introduction to Field Spectroscopy, NERC Field Spectroscopy Facility, Monte Bondone, Italy, Course Handbook - COST Action ES0903, 63 S.

- Milton, E.J. (1987): Principles of field spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing* **8** (12), 1807-1827.
- Milton, E.J.; Schaepman, M.E.; Anderson, K.; Kneubühler, M. und Fox, N. (2009): Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* **113** (Supplement 1), S92-S109.
- Muharam, F.; Maas, S.; Bronson, K. und Delahunty, T. (2015): Estimating Cotton Nitrogen Nutrition Status Using Leaf Greenness and Ground Cover Information. *Remote Sensing* **7** (6), 7007-7028.
- Perbandt, D.; Fricke, T. und Wachendorf, M. (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 „Zdravec-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.; Schellberg, J. und Hejcman, M. (2015): Langzeitversuche im Grünland - mehr als nur ressourcenzehrende Nostalgie? 20. Alpenländisches Expertenforum zum Thema "Bedeutung und Funktionen des Pflanzenbestandes im Grünland", Gumpenstein, 1.-2. Oktober 2015, 77-83.
- Pötsch, E.M.; Resch, R.; Schaumberger, A. und Buchgraber, K. (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.
- Rollin, E.M.; Milton, E.J. und Emery, D.R. (2000): Reference panel anisotropy and diffuse radiation - some implications for field spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing* **21** (15), 2799-2810.
- Schellberg, J.; Hill, M.J.; Gerhards, R.; Rothmund, M. und Braun, M. (2008): Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy* **29** (2-3), 59-71.
- Sims, D.A. und Gamon, J.A. (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.
- Smith, K.L.; Steven, M.D. und Colls, J.J. (2004): Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. *Remote Sensing of Environment* **92** (2), 207-217.
- Thenkabail, P.S.; Enclona, E.A.; Ashton, M.S. und Van Der Meer, B. (2004): Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. *Remote Sensing of Environment* **91** (3-4), 354-376.
- Thenkabail, P.S.; Gumma, M.K.; Teluguntla, P. und Mohammed, I.A. (2014): Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation and Agricultural Crops. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **80** (8), 697-709.
- Tsai, F. und Philpot, W. (1998): Derivative Analysis of Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment* **66** (1), 41-51.