

Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe

Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften

Universität Kassel

**Sensorische Erfassung von Grünlandbiomassen als
Grundlage für ein teilflächenspezifisches Manage-
ment im Ökologischen Landbau**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

eines Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

im Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften der Universität Kassel

vorgelegt von

Thomas Fricke

Witzenhausen, im Oktober 2012

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines „Doktors der Agrarwissenschaften“ (Dr. agr.) angenommen.

Erstgutachter: Prof. Dr. Michael Wachendorf

Zweitgutachter: Prof. Dr. Andreas Bürkert

Tag der Disputation: 11. Februar 2013

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig, ohne unerlaubte Hilfe Dritter angefertigt und andere als die in der Dissertation angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Dritte waren an der inhaltlich-materiellen Erstellung der Dissertation nicht beteiligt; insbesondere habe ich hierfür nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Kein Teil dieser Arbeit ist in einem anderen Promotions- oder Habilitationsverfahren verwendet worden.

16.10.12 Thomas Fricke

Für Dorit,
Tilman und Linnea

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift besteht aus drei nachfolgend eingebundenen wissenschaftlichen Publikationen, von denen die erste im Sonderband 038 vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL als Komponente des Ökologischen Landbaus gemeinsam mit den Ergebnissen des interdisziplinären Projektes „preagro“ veröffentlicht wurde (Kapitel 4). Zwei weitere Publikationen befassen sich mit der Evaluation von Ertragssensoren in Leguminosen-Grasgemengen. Einer der beiden Beiträge erschien in der internationalen peer review-Fachzeitschrift „Computers and Electronics in Agriculture“ (Kapitel 5) und der zweite steht kurz vor der Einreichung bei der peer review-Fachzeitschrift „Biosystems Engineering“ (Kapitel 6).

Kapitel 1 liefert eine generelle Einführung in das Thema, während im Kapitel 2 Grundlagen zu Precision Farming und Ertragskarten erläutert werden. Kapitel 3 nennt die Ziele dieser Arbeit. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Kapitel 4, 5 und 6 zusammenfassend diskutiert. Es folgen die Schlussfolgerungen und Zusammenfassung in den Kapiteln 8 und 9. In Kapitel 10 sind die Quellen aufgeführt, die für die Kapitel 1, 2 und 7 verwendet wurden.

Folgende Publikationen sind in die Arbeit eingebettet:

Kapitel 4

Fricke T., Heß J., 2002: „Perspektiven einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau“, in: Precision Agriculture - Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis, Werner, A. u. Jarfe, A. (Hrsg.), Sonderdruck 038 des KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt, S. 465- 480

Kapitel 5

Fricke T., Richter F., Wachendorf M., 2011: Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor. Computer and Electronics in Agriculture, 79, 142-152.

Kapitel 6

Fricke T., Wachendorf M., 2012: Combining ultrasonic sward height and spectral signatures to assess the biomass of legume-grass mixtures. Biosystems Engineering, (in Vorbereitung).

Weitere Arbeiten zur sensorischen Erfassung von Leguminosen-Grasbeständen und Mais wurden in Co-Autorenschaft angefertigt. Sie befassen sich mit der Schätzung von Ertrag und Futterqualität aus hyperspektralen Daten, dem Einfluss von Lichtverhältnissen und Messwinkeln bei deren Messung sowie der bildanalytischen Erfassung von Leguminosenanteilen im binären Gemenge mit Deutschem Weidelgras. Nachfolgend sind die in redigierten Fachjournalen erschienen Publikationen gelistet:

Himstedt, M., Fricke, T., Wachendorf, M. (2012): The Benefit of Color Information in Digital Image Analysis for the Estimation of Legume Contribution in Legume-Grass Mixtures. *Crop Science*, 52, 943-950

Perbandt D., Fricke T., Wachendorf M. (2011): Off-nadir hyperspectral measurements in maize to predict dry matter yield, protein content and metabolisable energy in total biomass. *Precision Agriculture*, 12, 249-265.

Himstedt, M., Fricke, T., Wachendorf, M. (2010): The Relationship between Coverage and Dry Matter Contribution of Forage Legumes in Binary Legume-Grass Mixtures. *Crop Science*, 50, 2186-2193.

Perbandt, D., Fricke, T., Wachendorf, M. (2010): Effects of changing simulated sky cover on hyperspectral reflectance measurements for dry matter yield and forage quality prediction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73, 230-239.

Biewer S., Erasmi S., Fricke T. Wachendorf M. (2009): Prediction of yield and legume contribution in legume-grass mixtures using field spectrometry. *Precision Agriculture* Volume: 10, Issue: 2, Pages: 128-144.

Biewer S., Fricke T., Wachendorf M. (2009): Determination of dry matter yield from legume-grass swards by field spectroscopy, *Crop Science*, 49, 1927-1936.

Biewer S., Fricke T., Wachendorf M. (2009): Development of canopy reflectance models to predict forage quality of legume-grass mixtures, *Crop Science*, 49, 1917-1926.

Himstedt M, Fricke T., Wachendorf M. (2009): Determining the contribution of legumes in legume-grass mixtures using digital image analysis. *Crop Science* 49, 1910-1916.

Mewes T., Erasmi S., Kappas M., Biewer S., Fricke T., Wachendorf M. (2008): Spectral Mixture Analysis (SMA) of reflectance curves from Legume-Grass-Plots for the analysis of species composition in forage production. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*. Issue: 4, Pages: 265-275.

Neben den aufgeführten Beiträgen zur sensorischen Erfassung entstanden, ebenfalls in Co-Autorenschaft, weitere in redigierten Fachjournalen erschienene Arbeiten zu Themen der energetischen Nutzung von extensiven Grünlandaufwüchsen mit dem Ziel einer verbesserten Konversionseffizienz nach dem Verfahren der „Integrierten Produktion von Festbrennstoff und Biogas aus Biomasse – IFBB“. Nachfolgend sind diese Beiträge gelistet:

- Khalsa, J, Fricke, T, Weisser, W.W., Weigelt, A., Wachendorf, M., 2012: Effects of functional groups and species richness on biomass constituents relevant for combustion: results from a grassland diversity experiment. Grass and Forage Science, 20 pages., Online first: doi: 10.1111/j.1365-2494.2012.00884.x
- Richter F., Fricke T., Wachendorf M. (2011): Influence of sward maturity and pre-conditioning temperature on the energy production from grass silage through the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB): 1. The fate of mineral compounds. Bioresource Technology, 102, 4855-4865.
- Richter F., Fricke T., Wachendorf M. (2011): Influence of sward maturity and pre-conditioning temperature on the energy production from grass silage through the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB): 2. Properties of energy carriers and energy yield. Bioresource Technology, 102, 4866-4875.
- Richter, F., Fricke, T., Wachendorf, M. (2010): Utilization of semi-natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass.III. Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dehydration on solid fuel properties and on energy and greenhouse gas balances. Grass and Forage Science, 65, 185-199.
- Richter F., Graß R., Fricke T., Zerr W., Wachendorf M. (2009): Utilization of semi-natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass. II. Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dehydration on anaerobic digestion of press fluids. Grass and Forage Science, 64, 354-363.
- Wachendorf M., Richter F., Fricke T., Graß R., Neff R. (2009): Utilisation of semi-natural grassland through an integrated generation of solid fuel and biogas from biomass I: Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dehydration on mass flows of organic and mineral plant compounds, and nutrient balances. Grass and Forage Science, 64/2, 132-143.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	16
2	Precision Farming	19
2.1	Grundlagen.....	19
2.2	Ertragskarten.....	20
2.3	Sensorik	22
3	Ziele der Arbeit.....	26
4	Perspektiven einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau.....	27
4.1	Einleitung.....	27
4.2	Rahmenbedingungen für Precision Farming im Ökologischen Landbau	28
4.3	Mögliche Ansätze zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung.....	30
4.3.1	Düngung.....	31
4.3.1.1	Grundnährstoffe.....	32
4.3.1.2	Stickstoff	32
4.3.1.3	Bodenfruchtbarkeit und Humusumsatz	35
4.3.1.4	Ausbringung betriebseigenen Düngers.....	36
4.3.2	Pflanzenkrankheiten und -schädlinge.....	38
4.3.3	Beikrautregulierung	40
4.3.4	Selektive Ernteverfahren.....	42
4.3.5	Naturschutz	43
4.4	Ausblick	44
4.5	Literatur.....	47
5	Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor	51
5.1	Introduction	52
5.2	Material and Methods.....	54
5.2.1	Technical description of the ultrasonic sensor	54
5.2.2	Field experiment for static measurements.....	56
5.2.3	Field experiment for on-the-go measurements.....	58
5.2.4	Statistics and interpolation	59
5.3	Results.....	60
5.3.1	Data exclusions	60

5.3.2	Sward characteristics.....	60
5.3.3	Static measurements.....	62
5.3.4	Measurements on-the-go.....	67
5.4	<i>Discussion</i>	71
5.4.1	Shape and variation of height-forage mass relationship	71
5.4.2	Continuous Measurements	72
5.5	<i>Conclusions</i>	74
5.6	<i>References</i>	75
6	Combining ultrasonic sward height and spectral signatures to assess the biomass of legume-grass mixtures	79
6.1	<i>Introduction</i>	80
6.2	<i>Materials and methods</i>	83
6.2.1	Experimental design and management regime.....	83
6.2.2	Sensor measurements.....	84
6.2.3	Hyperspectral reflectance.....	84
6.2.4	Ultrasonic sward height measurements.....	85
6.2.5	Sampling of reference data	86
6.2.6	Processing of spectral data.....	86
6.2.7	Vegetation indices.....	86
6.2.8	Data analysis	90
6.2.9	Wavelength selection	91
6.3	<i>Results</i>	93
6.3.1	Characteristics of experimental swards.....	93
6.3.2	Exclusive use of ultrasonic sward height	94
6.3.3	Exclusive use of vegetation indices	94
6.3.3.1	Existing Indices	94
6.3.3.2	Selected waveband pairs.....	99
6.3.4	Combined sensor use	100
6.3.4.1	USH with existing VIs.....	100
6.3.4.2	USH with NDSI based on different wavelength combination.....	102
6.4	<i>Discussion</i>	111
6.4.1	Biomass prediction using exclusive USH	111
6.4.2	Biomass prediction using exclusive VIs	112
6.4.3	Biomass prediction using a combination of USH and VIs.....	113
6.4.4	Band width variation.....	115
6.5	<i>Conclusions</i>	115

6.6	<i>References</i>	116
6.7	<i>Appendix</i>	125
7	Zusammenfassende Diskussion	142
7.1	<i>Umsetzung von Precision Farming Maßnahmen im Ökologischen Landbau</i>	142
7.2	<i>Selektive Erntestrategie</i>	142
7.3	<i>Bedeutung von Ertragskarten für den Ökologischen Landbau</i>	144
7.4	<i>Ertragsermittlung über Ultraschall und Spektroskopie</i>	145
7.5	<i>Hemmnisse bei der Einführung von Precision Farming</i>	148
8	Zusammenfassung	151
9	Summary	153
10	Literatur	155

Tabellenverzeichnis

Kapitel 5:

Table 5 - 1:	Treatments, Cultivars, Seeding rates and Fertilization of the field experiments	57
Table 5 - 2:	Descriptive statistics of forage mass yield, ultrasonic sward height and proportions of legumes and weeds in the static experiments.....	61
Table 5 - 3:	Regression statistics of measured forage mass yield (FM ^a) and ultrasonic sward height (USH ^b) for common dataset, pure swards and legume-specific mixtures.	63
Table 5 - 4:	Effects of sward characteristic variables on the estimation of forage mass yield (t ha ⁻¹). Results of a general linear model including ultrasonic sward height (USH) and weed proportion (WP; percentage, logit transformed) as metric variables and the effects of sward type (ST) and growth period (GP) as class variables. The Model is reduced to significant effects. Non significant main effects were retained, even they appeared in significant interactions ($p \leq 0.05$).	64
Table 5 - 5:	Sward height and validation characteristic of the on-the-go experiment	69
Table 5 - 6:	Effect of reduced ultrasonic sward height sampling locations on the estimation accuracy of forage mass yield.....	70

Kapitel 6:

Table 6 - 1:	Vegetation indices (VIs) used in this study to predict biomass exclusively and in combination with ultrasonic sward height (USH)	88
Table 6 - 2:	Descriptive statistics of biomass yield and ultrasonic sward height.....	94
Table 6 - 3:	Regression statistics of measured biomass yield as dependent variable with one exclusive vegetation index as independent variable for common dataset, legume-specific mixtures and pure swards. Empty fields indicate none-significant relationships.....	96
Table 6 - 4:	Best fit regression statistics of measured biomass yield calculated with pure NDSI using EQ 3 with sward-specific selected band combinations (A) and sward-specific applied equations based on band combination selected for common swards (B). Empty fields indicate none-significant relationships.	98
Table 6 - 5:	Regression statistics for the sward-specific relationships between measured biomass yields as depended variable and the combination of ultrasonic sward height and published vegetation indices as independent variables. Empty fields indicate none-significant contribution of vegetation indices to ultrasonic sward height.....	101
Table 6 - 6:	Best fit regression statistics of measured biomass yield calculated with the combination of USH and NDSI using EQ 4 with sward-specific selected band combinations (A) and sward-specific applied equations based on band combination selected for common swards (B). Empty fields indicate none-significant relationships.	104
Table 6 - 7:	Results of a cross validation for the relationship between biomass (BM) dry matter yield and the combination of ultrasonic sward height (USH) with the vegetation index NDSI configured as best sward-specific wavelength selection in 1 nm bands.....	106

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 4:

Abb. 4 - 1:	Prototyp eines Exaktstreuers für Kompost mit Exaktdosier- und Verteilsystem. Fotoquelle: Universität Kassel, Fachgebiet Agrartechnik in den Tropen und Subtropen.....	37
Abb. 4 - 2:	Möglicher Verfahrensablauf zum Einsatz eines Biosensors zur Früherkennung von <i>Phytophthora infestans</i> und Applikation gering konzentrierter Wirkstoffe. Fotoquellen: Biosensor aus SCHÜTZ (2001), Kartoffelspritzung aus IRLA (2001).	40
Abb. 4 - 3:	Vereinfachte schematische Darstellung zur selektiven Ernte von Qualitätsgetreide am Beispiel des Backweizens unter Einbezug von standort- und düngungsspezifischer N-Verfügbarkeit sowie Sortenwahl und spektralen Reflektionsdaten eines fortgeschrittenen Entwicklungsstadium des Bestandes.	42
Abb. 4 - 4:	Anlage von Blühstreifen in Klee gras zur Förderung der strukturellen und funktionalen Diversität unter Berücksichtigung der Distelproblematik und Anpassung durch eine differenzierte Nutzung.	44
Abb. 4 - 5:	Umsetzungsperspektiven von Maßnahmen im Rahmen einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau.....	46

Kapitel 5:

Figure 5 - 1:	Description of (A) operating principle of the ultrasonic sensor, (B) static application with measurement replications at five positions on each sample site and (C) on-the-go application as a combined real time measurement of ultrasonic sward height and high precision GPS in movement. During measurement the reflected signal with the shortest distance inside the reflectance area is logged and other farther objects are ignored. Dimensions are given in cm.	55
Figure 5 - 2:	Relationship between sward height measured with an ultrasonic sensor and forage mass for common, pure grass and legume-specific calibrations (legume-specific calibrations are composed by binary legume–grass mixtures, pure legume, and pure grass swards; for regression statistics see Table 5 - 2).	65
Figure 5 - 3:	Relationship between measured and predicted forage mass derived from sward height measured with an ultrasonic sensor for common, pure grass and legume-specific calibrations (legume-specific calibrations are composed by binary legume–grass mixtures, pure legume, and pure grass swards).	66
Figure 5 - 4:	Relationship between forage mass and ultrasonic swards height influenced by different weed proportions.....	67
Figure 5 - 5:	Experiment layout used for on-the-go measurements, including plots and interspaces, respectively. Dots indicate GPS-Locations of ultrasonic height measurements (B) and colours reflect treatments (A) and interpolated height levels in 10cm intervals (B, D). The photograph (C) is taken according to the camera position and direction given in the experimental layout (A).	68
Figure 5 - 6:	Sward height deviations from mean stubble height of cut interspace areas within 25cm distance classes to plot borders (● Mean, □ SE). Calculations were based on all 139 interspace samples. Significant differences to stubble height levels are marked (*** $p \leq 0.001$).	69

Kapitel 6:

Figure 6 - 1:	Hyperspectral signatures of biomass quartiles (Q1 – Q4) derived from all treatments (common swards).....	91
Figure 6 - 2:	Flow chart of data processing and analysis strategy for biomass (BM) prediction on exclusive and combined ultrasonic sward height (USH) and vegetation indices (VI) with a special focus of band selection using the normalized difference spectral index (NDSI).....	92
Figure 6 - 3:	Sward-specific plots showing the coefficient of determination (R^2) between biomass (BM) and all available 1 nm narrow band NDSI combinations along the range of 355 to 2350 nm excluding the water absorption bands (1351–1439 nm and 1791–2019 nm). R^2 -values of 1,759,688 wavelength combinations were reduced to 10 nm mean values to enable visualization.	97
Figure 6 - 4:	Sward-specific plots showing the coefficient of determination (R^2) between biomass (BM) and the combination of ultrasonic sward height with all available 1 nm narrow band NDSI combinations along the range of 355 to 2350 nm excluding the water absorption bands (1351–1439 nm and 1791–2019 nm). R^2 -values of 1,759,688 wavelength combinations were reduced to 10 nm mean values to enable visualization.	103
Figure 6 - 5:	Plot of fit between measured and predicted biomass yield of exclusive ultrasonic sward height (USH) and vegetation index ($NDSI_{exclusive}$), as well as in combination of USH and $NDSI_{combi}$ applied in common swards and mixtures. Wavelength selection for NDSI was conducted sward and application-specific.	108
Figure 6 - 6:	Plot of fit between measured and predicted biomass yield of exclusive ultrasonic sward height (USH) and vegetation index ($NDSI_{exclusive}$) as well as in combination of USH and $NDSI_{combi}$ applied in pure swards. Wavelength selection for NDSI was conducted sward and application-specific.	109
Figure 6 - 7:	Interaction between ultrasonic sward height (USH) and vegetation index (VI) in the range of mean values $\pm$ standard deviation. VI represents reflection values of the NDSI calculated on basis of 50 nm band selected in combination with USH.....	110

Anhangverzeichnis

Kapitel 6:

Appendix 6 - 1:	Equations of the relationships between measured biomass (BM) and ultrasonic sward height (USH).	125
Appendix 6 - 2:	Regression statistics of measured biomass (BM) and existing vegetation indices (VI)	126
Appendix 6 - 3:	Regression statistics of measured biomass (BM), existing vegetation indices (VI) and ultrasonic sward height (USH).....	130
Appendix 6 - 4:	Regression statistics of measured biomass (BM) and the vegetation index NDSI based on sward specific wavelength selections of different bandwidths.....	134
Appendix 6 - 5:	Regression statistics of measured biomass (BM), the vegetation index NDSI based on sward specific wavelength selections of different bandwidths and ultrasonic sward height (USH).	138

Abkürzungen / Abbreviations

A/D:	Analog / Digital
BBCH:	Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie
BFI:	BlattFlächenIndex
BM:	Biomass
BUS:	Leistungs- und Schnittstellendefinition zur Datenübertragung
COM:	COMmunication
DGPS:	Differential Global Positioning System
DM:	Dry Matter
DMY:	Dry Matter Yield
ECa:	Apparent Electrical Conductivity
EM38:	ElectroMagnetic conductivity sensor
EVI:	Enhanced Vegetation Index
FM:	Forage Mass
GIS:	Geographical Information System
GLM:	General Linear Model
GPS:	Global Positioning System
GRI:	Green Ratio Index
ISI:	Infrared Slope Index
ISO:	International Organization for Standardization
LAI:	Leaf Area Index
LN:	Landwirtschaftlich geNutzte Fläche
LBS:	Landwirtschaftliches BUS-System
LG:	Lucerne Grass
LP:	Legume Proportion
MSAVI:	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
MSR:	Modified Simple Ratio
NDVI:	Normalized Difference Vegetation Index
NDSI:	Normalized Difference Spectral Index
NDSI _{vesc} :	Normalized Difference Structural Index
nFkWe:	Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum

NIDI:	Normalized Infrared Difference Index
NIR:	Near Infrared Reflectance
NIRS:	Near Infrared Reflectance Spectroscopy
NPQI:	Normalized Phaeophytinization Index
PRI:	Photochemical reflectance Index
R ² :	Coefficient of determination
R ² _{CV} :	Coefficient of determination of cross validation
RDVI:	Renormalized Difference Vegetation Index
REIP:	Red Edge Inflection Point
RG:	Red clover Grass
RSC:	Ratio of Standard deviation and standard error of Cross validation SE _{CV}
RTK:	Real Time Kinematic
SAVI:	Soil Adjusted Vegetation Index
SD:	Standard Deviation
SE:	Standard Error
SE _{CV} :	Standard Error of Cross Validation
SIPI:	Structural Independent Pigment Index
SR:	Simple Ratio
SWWI:	Shortwave Infrared Water Index
USH:	Ultrasonic Sward Height
VI:	Vegetation Index
VIS:	Visible Reflection
VRA:	Variable Rate Application
WG:	White clover Grass
WI:	Water index
WP:	Weed Proportion

1 Einführung

Der Ökologische Landbau wird nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Erzeugung gesunder Nahrungsmittel, sondern vor allem auch als nachhaltiges System der Nahrungsmittelproduktion betrachtet (Hansen et al., 2001, Rigby and Cáceres, 2001). Im Pflanzenbau gelten im Rahmen der EU-Ökoverordnungen (EC Nr. 2092/91, EC Nr. 834/2007 und EC Nr. 889/2008;) einheitliche Regeln (Dabbert, 2001; EC, 1991; EC 2007), die innerhalb der Anbauverbände mit weitergehenden Qualitätsansprüchen umgesetzt werden (Umweltinstitut München, 2011). Grundlage der Produktionszweige auf dem ökologischen Betrieb ist der Betriebskreislauf der hinsichtlich der Nährstoff- und Energieströme - soweit möglich - geschlossen sein sollte (Lightfouse et al., 2009). Die damit verbundene Minimierung der Nährstoff- und Energieimporte und die ökologisch bedingte Anforderung des Verzichts auf chemisch-synthetisch hergestellte Pflanzenschutzmittel und Dünger erfordert die Beachtung und Förderung ökologischer Regelmechanismen (IFOAM, 1998). Diese finden in erster Linie Beachtung in der Tier- und Pflanzengesundheit, der Beikrautkontrolle sowie der Nährstoffversorgung im Pflanzenbau (Leeb, 2011; Sullivan, 2001; Ghorbani et al., 2008, Kruidhof et al., 2008, Garratt et al., 2011). Das betriebsinterne Düngeraufkommen ist aufgrund vorgegebener Grenzen im Viehbesatz limitiert (Kramer et al., 2006) und kommt vor allem den ökonomisch bedeutsamen Marktfrüchten zu Gute. Eine dominierende Quelle des Stickstoffimports wird über den Anbau von Leguminosen im ein- bis mehrjährigen Leguminosen-Grasanbau, dem sogenannten „Klee gras“, sowie über legume Reinkulturen, wie der Ackerbohne, aber auch über Getreidemischkulturen wie dem „Wick-Roggen“ oder dem Hafererbsengemenge erschlossen (Dreymann et al., 2003; Berntsen et al., 2006, Kayser et al., 2010).

Im Ökologischen Landbau hat der Leguminosen-Grasanbau verschiedene Funktionen. Je nach Betriebsstruktur kann er umfangreiche Anteile in der Fruchtfolge umfassen (Langer, 2001). In einer in der Praxis verbreiteten 6gliedrigen Fruchtfolge stellt das Klee gras als 2jährige Kultur mit ca. 30 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LN) in vielen Betrieben die flächenhaft bedeutendste Kultur dar. Bei intensiver Nutzung von 3 – 6 Schnitten pro Jahr können große Mengen

qualitativ hochwertigen Rauhfutters für die Leistungsfütterung der Wiederkäuer gewonnen werden (Frame, 1992). Neben der Futterproduktion, der phytosanitären Effekte (Langer, 2001) im Zuge der Fruchtfolgeauflockerung sowie der Förderung bodenmikrobiologischer Aktivitäten in Folge der Bodenruhe und intensiven Durchwurzelung (Oehl et al., 2004, van Eekeren et al., 2009) stellt der Residualstickstoff eine essentielle Nährstoffquelle für die Folgekulturen dar. Sowohl für die Futterproduktion der Leguminosengrasgemenge als auch deren Vorfruchtwirkung ist die Ertragsleistung des „Kleegrases“ von großer Bedeutung (Dreyman et al., 2003; Berntsen, et al., 2006, Wachendorf et al., 2004, Topp und Doyle, 2004). Nachfolgend beziehen sich die Begriffe Ertrag und Biomasse im Grünland auf die bei einer durchschnittlichen Stoppelhöhe von 5 cm erntbare Trockenmasse des Aufwuchses.

Innerhalb der Flächen variiert der Ertrag je nach Standort in unterschiedlichem Maß. Ursachen sind bodenbürtige Effekte wie Nährstoffverfügbarkeit und Mineralisationsprozesse, die Bodentextur mit Bezug zu Sorptionsvorgängen, Durchlüftung und Wasserverfügbarkeit und damit verbundener Transferleistungen, Struktur und Gehalt von Humus, die mikrobielle Zusammensetzung und deren Aktivität sowie phytosanitäre Regulationsmechanismen (Stafford, et al., 1996). Auf Grundlage dieser Standortbedingungen gestalten sich die individuellen Wachstumsvoraussetzungen der angesäten und eingewanderten Pflanzen, die unter den Konkurrenzbedingungen im Mischbestand der Leguminosengras-Gemenge die feldinterne Variation der Produktivität widerspiegeln.

Um den Informationsgehalt der feldinternen räumlichen Variabilität des Ertrages für das Management zu nutzen, ist deren ganzflächige Erfassung und eine anschließende Datenbereitstellung notwendige Voraussetzung. Die ortsspezifische Messung der Ertragsleistung in räumlich hoher Dichte kann mit vertretbarem Aufwand nur über technische Sensoren erfolgen. Unter Anwendung geostatistischer Verfahren können die erfassten Werte nachfolgend zu Ertragskarten interpoliert werden. Ertragskarten sind die wichtigste Grundlage für ein optimiertes ortsspezifisches Management im Rahmen der Präzisionslandwirtschaft, des „Precision

Farming“ (Blackmore, 2003). Ziele dieses wissensbasierten Managementsystems sind eine verbesserte Nutzung natürlicher Ressourcen, ein standortangepasster effizienter Einsatz von Betriebsmitteln und damit letztendlich eine Minimierung von Kosten, Energie und negativen Umwelteffekten bei optimiertem Produktionsniveau. Diese Aspekte folgen damit wesentlichen Zielen des Ökologischen Landbaus und erfordern eine Betrachtung der Synergien und Potenziale (Amman, 2009), die mit der Umsetzung des Precision Farming im Ökologischen Landbau möglich wären. Precision Farming stellt somit einen wesentlichen Forschungsbedarf im Ökologischen Landbau dar (Niggli, 1999, Niggli und Leifert, 2007).

2 Precision Farming

2.1 Grundlagen

Der Begriff „Precision Farming“ ist nicht eindeutig definiert und wird mit dem deutschen Ausdruck „Präziser Ackerbau“ als Subeinheit des „Precision Agriculture“ verstanden. Gleichrangig stehen neben dem Precision Farming das „Precision Livestock Farming“ für die „Präzise Tierhaltung“ und das „Precision Pasturing“ für die „Präzise Weidewirtschaft“ als weitere Kategorien der Produktionsrichtungen des Precision Agriculture (Dusseldorp und Rösch, 2004). Das zugrundeliegende Prinzip des Precision Farming ist das Verständnis und das Management der räumlichen und zeitlichen Variabilität innerhalb landwirtschaftlich genutzter Flächen mit dem Ziel der Effizienzsteigerung (Blackmore, 1994). Es beinhaltet eine Reduzierung von Energie, Dünger und Pflanzenschutz über eine klar strukturierte Kontrolle der Maßnahmen auf Basis der Standortvoraussetzungen, um durch die Steigerung der Effizienz negative Umwelteffekte zu minimieren und den ökonomischen Gewinn zu steigern. Wesentliche Grundlage für die ortsspezifische Zuordnung dieser Aspekte ist die Erfassung von Boden- und Pflanzeigenschaften mit technischen Sensoren sowie die Verarbeitung und Umsetzung der Daten und darauf basierender Modellierungsergebnisse mit raumbezogenen geographischen Informationssystemen (GIS). Für die Datenerfassung und Umsetzung von Maßnahmen auf der Fläche erfolgt die Lokalisation über das satellitenbasierte differenzielle globale Positionierungssystem (DGPS) mit Genauigkeiten im Dezimeterbereich (Auernhammer et al., 1995). Neben der Datenerfassung ist die Positionierungsgenauigkeit wichtig für die automatischen Navigationshilfen, die von der verbreiteten Parallelsteuerung von Arbeitsgeräten zur Minimierung von Überlappungen bis zur automatischen Steuerung von Traktoren reichen (Thuilot et al., 2002; Brunnert, 2003; Cariou et al., 2009; Luck et al., 2010).

Die Anpassung produktionstechnischer Maßnahmen erfolgt über ortsspezifisch angepasste Maßnahmen, die „dynamisch angepassten Applikationen“ („variable rate application“ = VRA). Mit ihrer Relevanz für Umwelt und Pflanzenproduktion sind bei Werner et al. (1999) die wichtigsten Bereiche zusammengefasst. Sie be-

treffen unter anderem die Tiefe und Intensität der Bodenbearbeitung, Menge und Art des Düngers, Saatbettbereitung sowie Tiefenablage, Menge und Verteilung des Saatguts. In der Unkrautbekämpfung und im Pflanzenschutz kann vor allem die Höhe der verwendeten Mittel aber auch die Wahl von Wirk- und Zusatzstoffen flexibel eingesetzt werden. Die Umsetzung dieser Maßnahmen nutzt mathematische Modelle, die auf erhobenen Standortfaktoren, Ertragskarten und/oder aktuell erfassten Sensordaten basieren und in der Regel Maschinen über definierte Bus-Systeme (LBS-, ISO-Bus) steuern (Werner et al., 2005).

2.2 Ertragskarten

Die Mehrzahl der landwirtschaftlichen Felder weist räumliche Variabilität in Bezug auf Standorteigenschaften wie Bodentyp, Nährstoffverfügbarkeit, Drainageeigenschaften und Geländere relief auf (Stafford et al., 1996). Die genannten Faktoren stellen zusammen mit der Historie von Ertragskarten die Informationsbasis für ein ortsspezifisches Management dar. Der Ökologische Landbau ist in der Regel mit einem – im Vergleich zum konventionellen Landbau – verringerten Nährstoffimport und einem geringeren Ertragsniveau verbunden (Kirchmann und Bergström, 2001, Korsæth, 2008). Die Produktivitätspotentiale der Flächen auszuschöpfen ist daher eine maßgebliche Aufgabe. Ertragskarten können hierbei als ein wichtiges Instrument zur Kontrolle und zur Identifizierung von Defizit- und Hohertragsbereichen fungieren.

Ertragskarten stellen das wesentliche kumulative Kontrollinstrument aller pflanzenbaulichen Maßnahmen in Verbindung mit Standortfaktoren und Wetterereignissen dar (Stafford et al, 1996). Dabei ist es schwierig, die einzelnen Einflussfaktoren in ihrer Wirkung auf die Ertragsbildung zu entflechten. Beispielsweise stehen Karten der für die Standortkartierung verbreitet eingesetzten „scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit“ (EC_a) in enger Beziehung zu Ertragskarten (Sun et al., 2011; Serrano et al., 2010). Der Parameter spiegelt jedoch einen Komplex aus Bodentextur, Salinität, dem pH-Wert und - eingeschränkt - der Wasserverfügbarkeit wider (Corwin and Plant, 2005, Serrano et al., 2010).

Die Variabilität von Ertragsmustern innerhalb eines Schläges schwankt von Jahr zu Jahr (Pierce and Nowak, 1999, Blackmoore, 2000). Der Historie von Ertragskarten für die Planung von orts- oder teilflächenspezifischen Maßnahmen kommt daher eine besondere Bedeutung zu (Blackmoore, 2000; Auernhammer, 2001), indem Bereiche konstant hoher oder niedriger Produktivität identifiziert werden können. Hier können produktionstechnische Maßnahmen mit einer höheren Sicherheit ihrer Wirkung umgesetzt werden als in Bereichen, die von Jahr zu Jahr starke Ertragsvariationen aufweisen und wo die Ursachen noch nicht eindeutig geklärt wurden.

Zu berücksichtigen ist bei der Interpretation von Ertragskarten, dass sie nicht den realen Zustand der Ertragsverteilung widerspiegeln. Vielmehr ist die Güte der Karten beeinflusst durch die Sensorkalibration, der GPS-Genauigkeit sowie Glättungseffekten bei der Karteninterpolation und Abweichungen zwischen dem Ort der Messung und der zugeordneten Fläche (Dobermann und Ping, 2004). Die genaue Geo-Referenzierung der Ertragswerte ist insbesondere bei der Getreideernte eine Herausforderung (Whelan and McBratney, 2002). So wurden Abweichungen des Ortsbezuges beim Mähdrusch von bis zu 9m festgestellt (Arslan and Colvin, 2002). Direkte Messung an stehenden Beständen wiesen dagegen signifikante Abweichungen im Bereich von 50 cm auf (Fricke et al., 2011). Grundsätzlich entstehen auch bei Überlappungen von Bearbeitungstreifen oder in Randbereichen fehlerhafte räumliche Zuordnungen, die in einer nachgelagerten Datenkorrektur bereinigt werden können, aber auch zwischen 5 und 20 % der Daten eliminieren (Blackmore and Moore, 1999; Thylen et al., 2000). Eine Verbesserung der Ertragskarten oder Korrekturen in der Ertragsmessung bei größeren Fehler oder kleinräumigem Ausfall von Sensoren können über eine Kombination mit satellitenbasierten Vegetationsindices erfolgen (Dobermann und Ping, 2004).

2.3 Sensorik

Während in den Anfängen des Precision Farming weitestgehend homogene Teilflächen definiert und Maßnahmen in diesen einheitlich durchgeführt wurden (teilflächenspezifisches Management), entwickelte sich die Verfahrensadaption zunehmend zu einer ortsspezifischen Anpassung, wie sie derzeit vor allem bei der Stickstoffdüngung als „variable rate application“ (VRA) in der Praxis umgesetzt wird (Heege et al., 2008). Standortkartierungen und historische Ertragskarten allein sind nicht ausreichend, um den aktuellen Wuchsbedingungen der Pflanzen gerecht zu werden (Auernhammer, 2001). Der Einsatz von Sensoren stellt ein geeignetes Instrument zur direkten Messung des Pflanzenbedarfs dar. Voraussetzung hierfür ist die Entwicklung adäquater Sensoren zur Online-Erfassung von Pflanzenbestandszuständen und/oder Bodennährstoffgehalten. So werden Sensoren eingesetzt zur Steuerung der Düngung (Auernhammer, 2001, Heege et al., 2008; Viscaria Rossel and MacBratney, 1997, Schirrmann und Domsch, 2011), Erfassung der Bestandszusammensetzung/-dichte für die Unkrautbekämpfung (Thorp und Thian, 2004; Gerhards and Oebel., 2006) sowie zur Messung des Krankheitsbefalls oder von Risikofaktoren für den Präventiveinsatz von Pflanzenbehandlungsmitteln (Schütz, 2001; Ehlert und Dammer, 2006). Die aktuellen Messungen können direkt zur Steuerung von Applikationsgeräten bei der Befahrung genutzt werden. Sensorische Verfahren für die VRA befinden sich vielfach noch in der Entwicklung (Jensen et al, 2012). Eine Ausnahme stellen Sensoren zur N-Düngung (Heege et al., 2008; Trembley et al., 2009; Ehlert, 2010) und zur Bestandesdichtemessung mit dem Crop-Meter für die variable Fungizidanwendung dar (Ehlert und Dammer, 2006). Gängige Sensoren für passive und strahlungsinziierte NIR-Reflektionen für die VRA von Stickstoffdüngern sind u.a. der Hydro-N-Sensor (<http://www.hydro.com>) und der GreenSeeker (<http://www.greenseeker.com>).

Im Zuge der N-Düngung im Ökologischen Landbau ist die Kenntnis über Mineralisierungsprozess und damit über den Anteil der organischen Substanz im Boden von Bedeutung. Seine Kartierung kann über die NIR-Spektroskopie erfolgen (Adamchuk et al., 2004; Wetterlind et al., 2008), ist im on-the-go Feldeinsatz aber

teilweise schlecht zu kalibrieren (Bricklemeyer and Brown, 2010). Auch die on-the-go Erfassung von pH-Wert oder den Grundnährstoffen P, K und Mg im Boden befindet sich noch in der Entwicklung. Ionenselektive Sensoren oder optische Verfahren weisen aber ein hohes Potential auf, die Standortvariabilität dieser Größen zu kartieren (Sinfield et al., 2010; Lee et al., 2010; Schirrmann und Domsch, 2011). Stehen keine Sensoren für die Erfassung pflanzenverfügbarer Nährstoffe zur Verfügung, können Ertragskarten zur stratifizierten Bodenbeprobung dieser Größen dienen, die im Gegenzug zu einer in der Regel einmaligen Standortkartierung relief- und bodenabhängiger Faktoren regelmäßig erfolgt. In Bereichen gleicher Ertragszonen können in diesen stratifizierten Teilflächen Nährstoffreferenzwerte über eine zuzuordnende Mischprobe erhoben werden (Auernhammer, 2001).

Aufgrund der hohen Bedeutung der Ertragskarten für das Precision Farming hat die Entwicklung entsprechender Ertragssensoren relevanter Kulturen früh begonnen. Auf den heute am Markt erhältlichen Mähdreschern sind Ertragssensoren im Gutstrom ein verbreiteter Standard. In den 1990er Jahren wurden diese für den Mähdrusch von Körnerfrüchten intensiv erforscht (Stafford et al., 1996, Arslan und Colvin, 2002,) und für die daraus entstehenden Ertragskarten Fehlerursachen ermittelt und Korrekturmaßnahmen erarbeitet (Blackmoore und Moore, 1999; Dobermann und Ping, 2004). Auch für Grünlandaufwüchse und Mais wurden Ertragserfassungssysteme unterschiedlicher Genauigkeit für Feldhäcksler, Mähgeräte und Mähaufbereiter entwickelt (Zusammenstellungen bei Kumhála et al., 2007 und Schellberg et al., 2008), von denen heute in selbstfahrenden Feldhäckslern marktreife Systeme angeboten werden.

Zahlreiche nicht-destruktive sensorische Verfahren wurden entwickelt oder sind Gegenstand von Studien und können eine wichtige Grundlage für eine zukünftige Anwendung in Applikationen des Precision Farming sein. So bieten spektroskopische NIR-Systeme neben der Ertragserfassung (Numata et al., 2007; Schino et al., 2003, Biewer et al, 2009a) auch die Möglichkeit, weitere vielfältige quantitative Bestandesparameter im gleichen Arbeitsgang mit zu erheben. Als Beispiele seien

an dieser Stelle genannt: N-Gehalt (Lamb et al., 2002; Mutanga et al., 2003), Wassergehalt (Fitzgerald et al., 2006), Bestandesdeckung (Eastwood et al., 1997) und der Blattflächenindex (BFI) (Ray et al., 2006). Die räumlich zweite Dimension erschließen bildgebende spektroskopische Daten. Sie können zur Erkennung von Ertrag, Qualität und Bestandeszusammensetzung genutzt werden (Schut et al., 2002; Schut et al., 2003) und über bildanalytische Algorithmen ist aus Graustufen- oder Farbbildern die quantitative Erfassung von Unkraut- oder Leguminosenanteilen möglich (Sökefeld et al., 2007; Himstedt et al., 2009; Himstedt et al., 2012). Aktuelle Entwicklungen in der Erkennung von Pflanzenkrankheiten nutzen die bildgebende Spektroskopie zur Früherkennung von Pflanzenkrankheiten im Bestand als Grundlage für einen Präzisionspflanzenschutz (Mahlein et al., 2012).

Neben den spektroskopischen Methoden wurden für die Ertragsmessung weitere nicht-destruktive sensorische Verfahren geprüft. So sind Ertragsschätzungen über die Bestandeshöhe mit Distanzmessungen durch Lasersensoren (Ehlert et al., 2008) oder mit Ultraschall möglich (Scotford and Miller, 2004, Fricke et al., 2011). Unter Einbezug der dritten Dimension kann mit 3D-Lasersensoren eine Volumenänderung im Bestand ermittelt werden, die eng mit der Biomasse korreliert (Radke et al., 2010).

Eine Verbesserung limitierte Schätzgüten bei der Verwendung einzelner Sensoren kann durch deren Kombination erzielt werden, da sich ihre Eigenschaften zur Ermittlung gewünschter Zielparameter ergänzen können (Lan et al., 2009). Auf diese Option wurde mehrfach verwiesen (Corwin and Plant, 2005, Lee et al., 2010), jedoch haben sich bisher nur wenige Studien mit der Kombination von Sensoren befasst. So nutzten Mahmood et al. (2012) ein VIS–NIR-Spektrometer zusammen mit einem EM38-Sensor zur Erfassung mehrerer Bodenparameter wie Textur, Kohlen- und Stickstoffgehalten. Die Analyse dieser Datenfusion erfolgte unter Verwendung verschiedener Regressionsverfahren und der Hauptkomponentenanalyse. Huang et al. (2007) entwickelten eine Methode zur räumlichen (extrinsischen) Kalibrierung multipler dreidimensionaler Sensorendaten und verwiesen dabei auf die Notwendigkeit der räumlichen Übereinstimmung von Daten bei

Nutzung mehrerer Sensoren. In der Pflanzenproduktion nutzten Scotford and Miller (2004) Ultraschalldistanzmessungen in Verbindung mit einem 2-Band-Spektrometer zur zusätzlichen Erfassung des NDVI zur Bestandeshöhe, um das Bestandeswachstum von Weizen genauer zu erfassen. Jones et al. (2004) nutzten die gleiche Sensorkombination zur Messung der Biomasse und konnten die Schätzgüten um 0.05 – 0.1 R^2 -Einheiten bei Mais und Gartenbohnen verbessern, bei Spinat war dagegen keine Veränderung festzustellen.

3 Ziele der Arbeit

Sowohl ein Precision Farming Management System als auch die auf ökologischen Regelmechanismen basierenden Produktionssysteme des Ökologischen Landbaus sind komplex und erschweren eine direkte Übertragung von bestehenden im konventionellen Landbau entwickelten produktionstechnischen Precision Farming-Maßnahmepaketen. Inwieweit speziell für den Ökologischen Landbau ein Precision Farming angepasst werden muss und in welchem Maß bestehende Maßnahmen im Ökologischen Landbau eingesetzt werden, ist weitgehend unbekannt. Vor diesem Hintergrund soll in dieser Arbeit einleitend ein Überblick von Möglichkeiten und Hemmnissen der Integration von Precision Farming Maßnahmen in den Ökologischen Landbau gegeben werden.

Mit Blick auf die besondere Bedeutung von Leguminosen-Grasgemengen ökologischer Betriebe für das Rauhfutteraufkommen und das Nährstoffmanagement in der Fruchtfolge, ist die Kenntnis über die flächeninterne Variation der Produktivität von hoher Relevanz. Der Schwerpunkt der Arbeit widmet sich daher der Ertragskartierung der auf ökologisch wirtschaftenden Betrieben flächenrelevanten Leguminosen-Grasgemengen. Ziel ist die Bereitstellung von Grundlagenwissen für die Entwicklung einer kostengünstigen Ertragssensorik zur flexiblen Montage an Mähgeräten mit Einsatzmöglichkeiten auch auf kleineren Flächen. In diesem Zusammenhang werden die technischen Verfahren der Ultraschalldistanz- und Spektralsensorik zur Schätzung der Biomasse über die Messung von Bestandescharakteristika bei alleiniger Anwendung der Sensoren, und in Kombination miteinander evaluiert.

4 Perspektiven einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau

4.1 Einleitung

Im Zeichen der vom Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft eingeleiteten Agrarwende wird der Ökologische Landbau einen verstärkten Aufschwung erfahren. Auch die bisherige Entwicklung war durch eine positive Tendenz mit zweistelliger Zuwachsrate gekennzeichnet (BMVEL, 2001). Ende 2000 wurden in Deutschland 546.027 ha landwirtschaftlich genutzte Fläche, entsprechend 3,2 % der LN, von 12.732 Betrieben nach den EU-weiten Regelungen des Ökologischen Landbaus bewirtschaftet (ZMP, 2002). Eine Tendenz zu größeren Betrieben im Zuge des Strukturwandels und der Agrarwende ist zu erwarten.

Der Hintergrund einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (Precision Farming) im Sinne einer teilstandortangepassten Landnutzung zur Optimierung der Produktionsverfahren und des wirtschaftlichen Ertrages bei Minimierung der Umweltbelastung gilt für den Ökologischen Landbau ebenso wie für die konventionelle Landwirtschaft. Bisher hat Precision Farming in der Praxis des Ökologischen Landbaus jedoch so gut wie keine Bedeutung. Und auch in der Forschung finden sich noch wenige Publikationen, welche die Kombinationen des Precision Farming und des Ökologischen Landbaus beinhalten, oder in diesem Anbausystem grundlegende Beziehungen zwischen Standortheterogenität und pflanzenbaulichen Aspekten berücksichtigen.

Der folgende Beitrag soll mögliche Perspektiven für die Umsetzung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau aufzeigen und die hierfür notwendigen Entwicklungen skizzieren.

4.2 Rahmenbedingungen für Precision Farming im Ökologischen Landbau

In der EU-Öko-Verordnung (EWG) Nr. 2092/91 sind die Mindestanforderungen für ökologisch erzeugte Nahrungsmittel festgelegt (ANONYMOUS, 1991). Die Richtlinien einzelner Anbauverbände beinhalten teilweise noch strengere Auflagen. Dieser Beitrag befaßt sich mit den Möglichkeiten des Einsatzes von Precision Farming vor dem Hintergrund der Grundprinzipien des Ökologischen Landbaus.

Ökologischer Landbau ist charakterisiert durch eine systemorientierte Betrachtungsweise. Der landwirtschaftliche Betrieb wird als Ökosystem mit entsprechenden Import- und Exportgrößen betrachtet. Die Förderung natürlicher Regulationsmechanismen zur Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Pflanzenbeständen und Boden stehen bei der pflanzlichen Erzeugung im Vordergrund. Der Import von Nährstoffen ist über den streng reglementierten und kontrollierten Zukauf von Futter- und Düngemitteln begrenzt. Eine Stickstoffzufuhr in den Nährstoffkreislauf des Betriebes wird vor allem über die N_2 -Fixierung durch Leguminosen gewährleistet. Der betriebseigene Dünger (Mist, Kompost, Gülle) ist durch einen begrenzten Viehbesatz ebenfalls limitiert. Grunddünger dürfen nur als Rohnährstoffdünger in mittel- bis langfristig umsetzbarer Form zugekauft werden. Ein Hauptaugenmerk richtet sich auf den Erhalt und die Förderung der Bodenfruchtbarkeit, die insbesondere durch intensive Umsetzungsprozesse das Nährstoffangebot der Pflanzenbestände prägt.

Durch präventive pflanzenbauliche Maßnahmen sollen Beikrautbesatz, Krankheitsbefall und Schädlingsaufkommen reduziert werden. Dies geschieht durch die Förderung von Antagonisten und Nützlingen über eine hohe strukturelle und funktionelle Diversität unter anderem in Form von Schlageinteilung und Fruchtfolgegestaltung sowie der Anlage von Blüh- und Brachestreifen. Ein reduziertes Befallsrisiko wird bereits als Nebenaspekt durch das geringe Stickstoffniveau in der pflanzlichen Erzeugung erreicht. Weiterhin werden über die bereits genannte Förderung der Bodenfruchtbarkeit und dem Einsatz von Komposten suppressive Wir-

kungen auf Pflanzenkrankheiten erzielt und das antiphytopathogene Potential im Boden erhöht. Biologische Pflanzenbehandlungsmittel werden in erster Linie zur Förderung der Regulationsmechanismen oder präventiv eingesetzt. Kurative Mittel stehen kaum zur Verfügung bzw. die wenigen zugelassenen Mittel haben nur eine eingeschränkte Wirkung. In der Pflanzenschutzstrategie des Ökologischen Landbaus haben sie ohnehin bislang eine nachgeordnete Priorität.

Standortbedingte Unterschiede können im Ökologischen Landbau weniger kompensiert werden als in der konventionellen Landwirtschaft, wo über schnell wirkende systemexterne Dünge- und Pflanzenbehandlungsmittel Standortunterschiede leichter kompensierbar sind. Der Standortheterogenität kommt somit im Ökologischen Landbau hinsichtlich ihrer Auswirkung auf Qualitäts- und Ertragsparameter der Pflanzenbestände aber auch auf gewünschte Diversitätsmerkmale in den Beständen eine herausragende Bedeutung zu.

4.3 Mögliche Ansätze zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung

Der begrenzte Einsatz systemexterner Betriebsmittel und die begrenzt zur Verfügung stehenden betriebseigenen Düngemittel lassen nur einen engen Handlungsspielraum direkt wirkender teilflächenspezifischer Maßnahmen zu. Wegen der häufig längerfristigen Wirkungen produktionstechnischer Maßnahmen mit zudem komplexen Wirkungszusammenhängen müssen Modelle zur Entwicklung des Handlungsrahmens im Precision Farming den speziellen Bedingungen des Ökologischen Landbaus angepasst werden.

Zusätzlich zu den in der konventionellen Landwirtschaft für Precision Farming bedeutsamen standortbedingten Variationsgrößen kommen im Ökologischen Landbau indirekte und zum Teil langfristige Regulationsmechanismen hinzu, die Nährstofffreisetzung und Beikrautregulierung sowie Pflanzenkrankheiten und -schädlinge betreffen. Zudem unterliegen zahlreiche Prozesse und Pools im Boden anderen Größen und Aktivitätsniveaus, so dass eine Anpassung von Kalkulations-, Maßnahmen- und Applikationsmodellen für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung notwendig wird.

Die Erfassung der Größenordnung und Heterogenität von Standortfaktoren wie zum Beispiel aus Bodenmerkmalen, dem Relief und über vorhandene digitale Karten kann mit den für das Precision Farming erprobten oder in Entwicklung befindlichen Verfahren erfolgen. Ebenso können bisher bei einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung genutzte technische Methoden, z.B. Ertragserfassung auf dem Mähdrescher, prinzipiell auch im Ökologischen Landbau genutzt werden. Die Auswertung der Daten bedarf aber wiederum einer Modellanpassung, um z.B. die Bilanzierung des Nährstofftransfers aus den Ertragsdaten sowie deren in der Regel mittel- und langfristige Wirksamkeit abzuleiten.

Wie unter den speziellen systemorientierten und anbautechnischen Bedingungen des Ökologischen Landbaus eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung umgesetzt werden könnte, sollen nachfolgende Beispiele aufzeigen.

4.3.1 Düngung

Die Ertrags- und Qualitätssicherung pflanzlicher Produkte hat auch im Ökologischen Landbau eine hohe Bedeutung. Stärker als in der konventionellen Landwirtschaft setzt das Management zur Nährstoffversorgung hier bereits in der Planung der Fruchtfolge an. Insbesondere der verlustarme N-Transfer aus Leguminosenbeständen ist innerhalb des Nährstoffkreislaufs bedeutsam. Ergänzt wird das Nährstoffangebot durch betriebseigene Dünger, wie Mist, (Mist-)Kompost oder Gülle und weitgehend schwerlösliche Grunddünger, wie z.B. Rohphosphate, Kaliummagnesia und Karbonatkalke. Zugelassene organische N-betonte Zukaufdünger spielen vorwiegend im Gemüsebau eine größere Rolle, da sie teuer und nur eingeschränkt verfügbar sind. Betriebseigene Dünger aus tierischen Exkrementen sind aufgrund eines reglementierten Viehbesatzes begrenzt.

Die Nährstofffreisetzung aus der organischen Substanz und dem Mineralpool des Bodens sowie aus den genannten Düngern ist neben den Wetterbedingungen in hohem Maße von den Standortfaktoren abhängig. Dies gilt auch für die N-Fixierleistung von Leguminosen und die konservierenden Eigenschaften des Bodens. Die gezielte Applikation des Düngers ist demnach nur unter Kenntnis des Nährstofftransfers aus Vorfrüchten und der Umsetzungsprozesse in Boden und Dünger möglich.

Bei teilflächenspezifischer Düngung ist ebenfalls in Erwägung zu ziehen, ob eine kompensatorische oder differenzierende Wirkung beabsichtigt ist. Für eine kompensatorische Wirkung zur Erzielung eines allgemein hohen Ertragsniveaus und einer homogenen Qualität des Erntegutes ist im Ökologischen Landbau die betriebseigene Düngermenge häufig nicht ausreichend vorhanden. Eine übermäßige Anreicherung auf auswaschungsgefährdeten Standorten könnte Stickstoffverluste

beinhalten, trifft aber vermutlich wegen des allgemein geringen Nährstoffniveaus ökologisch wirtschaftender Betriebe nur im Einzelfall bei kleinräumiger und stark variierender Standortheterogenität zu. Der mit einer Homogenisierung verbundene Verlust an Diversität wäre ein nicht erwünschter Nebeneffekt.

Eine differenziert wirkende Düngung mit verstärkter Profilierung des Standorteinflusses im Erntegut ist bezüglich der daraus resultierenden Flächenanteile minderer und höherer Erträge und Qualitäten zu prüfen. Die damit verbundene Diversifizierung der Bestände würde einem der Grundgedanken des Ökologischen Landbaus entgegenkommen. Bei getrennter Verwertung des Erntegutes könnten auch teilflächenspezifische Qualitätskriterien besser erreicht werden.

4.3.1.1 Grundnährstoffe

Im Ökologischen Landbau zugelassene Grunddünger lassen sich unabhängig von ihrer Umsetzbarkeit mit bestehender Technik teilflächenspezifisch ausbringen. Die Kalkulation der auszubringenden schwerlöslichen Rohnährstoffdünger hängt von der produkt- und standortspezifischen Nährstofffreisetzung ab. Die kurzfristige Umsetzung einer teilflächenspezifischen Applikation von Grunddüngern ist nur unter Einschränkung möglich. Ohne Kenntnisse der Umsetzungsprozesse kann die Dynamik des Nährstoffangebots nur ungenau kalkuliert werden. Von einer fehlerhaften Bedarfskalkulation sind allerdings kaum gravierende ökologische Konsequenzen zu erwarten, können aber bei uneffektivem Einsatz kostenintensiv sein und erschienen daher ohne Modellanpassung wenig sinnvoll.

4.3.1.2 Stickstoff

N-Verluste

Stickstoff ist der limitierende Faktor im Anbausystem (HEß et al., 1992). Daher gilt es, seine Verluste aus dem Nährstoffkreislauf des Betriebes zu minimieren. Hierzu zählt das Vermeiden unproduktiver Senken beim Wirtschaftsdüngereinsatz und Leguminosenumbruch (SCHUMACHER u. STEINBACH, 1995). Das geringe Stickstoffniveau insgesamt begrenzt zwar die Nitratauswaschung (HEß et al., 1992), und im Vergleich zu anderen Landbaumethoden trägt der Ökologische

Landbau mit Abstand das geringste Auswaschungspotential (HAAS u. KÖPKE, 1994). Dennoch besteht die Gefahr einer N-Auswaschung. So empfiehlt KÖNIG (1995) den Verzicht auf Herbstumbruch auf auswaschungsgefährdeten Standorten und ZIHLMANN et al. (2000) stellten eine erhöhten N-Austrag nach vorzeitigem Absterben des Blattapparates bei Kartoffeln infolge eines Krautfäulebefalls fest.

Eine zeitlich bzw. in ihrer Maßnahme teilflächenspezifisch variierende Grundbodenbearbeitung zum Leguminosenumbruch erscheint in der praktischen Umsetzung nicht möglich. Wichtig ist aber die Kenntnis über die standortspezifische N-Dynamik unter Berücksichtigung des Umbruchzeitpunktes, des Umbruchverfahrens und weiterer Bodenbearbeitungsmaßnahmen zur Kalkulation des N-Transfers und für notwendige Modellanpassungen.

N-Import über Leguminosen

Leguminosen werden als vorrangige Stickstoffquelle in Form von Körnerleguminosen und vor allem als Mischungspartner in Leguminosen-/Grasgemengen zur Futtergewinnung bzw. Gründüngung angebaut. Vor allem der 2-jährige Leguminosen-Grasanbau stellt für den Ökologischen Landbau eine wesentliche N-Quelle dar. Der N-Import über N_2 -Fixierung hängt hierbei von der Nutzungsart ab. Die N_2 -Fixierleistung ist bei Futternutzung deutlich höher als bei Gründüngung, da in letzterem Fall die stickstoffreiche gemulchte Biomasse über den nachfolgend höheren N-Gehalt im Boden die N-Fixierung reduziert (LOGES et al., 2000).

Der fixierte Stickstoff steht über den Transfer aus ober- und unterirdischen Pflanzenresten in erheblichem Umfang der Folgefrucht zur Verfügung. Zur Kalkulation des potentiellen N-Depots wäre eine Erfassung der Fixierung schon bei der Ernte des Kleegrases sinnvoll. HEUWINKEL und LOCHER (2000) untersuchten die Variabilität der N_2 -Fixierung innerhalb eines Kleegrasbestandes. Sie stellten eine enge Korrelation der N_2 -Fixierleistung mit dem N-Ertrag der Leguminosen fest. Gleichzeitig zeigten sich starke Variationen der Leguminosenanteile in der Fläche und zwischen den Nutzungen. Über NIRS-Messungen soll zukünftig versucht werden, Ertrags- und Qualitätsparameter sowie den Leguminosenanteil bereits bei

der Ernte zu erfassen. Damit könnte eine erhebliche Verbesserung der standort-spezifischen Kalkulation von N-Frachten in der Fruchtfolge erzielt werden.

Bereits durch das Klee-/Gras-Ansaatverhältnis wird auf den zukünftigen Kleeanteil Einfluss genommen mit einer Variation in breiten Bereichen zwischen den Gemegepartnern (LOGES et al., 1997). Auch die Standorteigenschaften prägen den Leguminosenanteil in einem Leguminosengemenge. HEUWINKEL und GUTSER (1995) fanden auf Lehm höhere Kleeanteile und -erträge als auf Sandboden und vermuten als Einflussgröße ein höheres Nitratangebot im Sandboden infolge eines verstärkten Abbaus der Vorfrucht, das sich hemmend auf die spezifische Bindeleistung auswirkte. Dieses Verhalten beschränkte sich jedoch auf das Ansaatjahr. Bereits ab dem 3. Schnitt hatten sich die Fixierleistungen der beiden Standorte angeglichen. Auch die Wasserversorgung nimmt über Bodentextur und Horizontmächtigkeit Einfluss auf die N_2 -Fixierung. So stellte SCHMIDTKE (1997) auf Standorten mit einer geringen nFkWe eine reduzierte N-Fixierleistung fest, bedingt durch eine geringere Biomassebildung. Höhere N_{min} -Gehalte im Boden förderten hier Nichtleguminosen im Gemengeanbau. Standortunterschiede in der Entwicklung eines Roggen-Rotkleebestandes fand auch HAAS (1995). Flachgründigere Böden führten zu einem höheren Kleeanteil bei gleichzeitig lichterem Deckfrucht. Auch der Blühbeginn des Rotklee trat auf flachgründigen Böden früher ein.

Die genannten Beispiele deuten an, dass die standörtliche und zeitliche Dynamik der Fixierleistung mit teilweise schwer einzubeziehenden Einflussgrößen eine Erfassung des importierten Stickstoffs am Bestand selbst erfordert. Die sensorische Erfassung der Leguminosenanteile und ihrer Stickstoffgehalte kann für einen Bewertungsrahmen daher vermutlich größere Bedeutung haben als die Modellierung der Fixierleistung über den Standorteinfluss.

Für eine Optimierung der Fixierleistung von Leguminosengemengen und des N-Transfers muss überprüft werden, inwie weit eine teilstandortspezifische Anpassung der Gemegepartner über variierende Saatanteile einen Beitrag leistet. Mög-

licherweise werden erwartete Leistungen durch hohe Leguminosenanteile über die Selbstregelung im Agrarökosystem aufgefangen (geringe n_{FkWe} = geringe N-Fixierleistung über geringe Biomassebildung; mehr N_{min} im Boden fördert überproportional Nichtleguminosen im Gemengeanbau (SCHMIDTKE, 1997)).

Als weitere N-Quelle für den Nährstoffkreislauf kann die Produktion von Körnerleguminosen dienen mit dem Ziel, die geschroteten Körnerleguminosensamen als Dünger in anderen Produktionsverfahren wie zum Beispiel dem Gemüse zu verwenden. Die Produktion von Weißlupine war im Vergleich zu den eigenproduzierten Erbsen und Ackerbohnen am kostengünstigsten und die Nährstofffreisetzung im feingeschroteten Zustand nach 49 Tagen mit 53 % am höchsten. Nur die Zukaufdünger Hornmehl und Rhizinusschrot zeigten eine höhere N-Verfügbarkeit, waren aber deutlich teurer (BRAUN et al., 2001). Der bevorzugte Anbau von Lupinen auf leichteren Böden ermöglicht eine Differenzierung in zwei parallel laufende Fruchtfolgen, sofern Betriebsgröße und -flächenstruktur es zulassen. Die Lupine würde auf diese Weise als N-Dünger für die teilflächenspezifische Düngung anderer Kulturen bereitstehen. Die standortspezifische Schlaggestaltung für die Fruchtfolgen setzt eine Standorterfassung und -bewertung mit Techniken des Precision Farming voraus - allerdings mit einer modifizierten Zielrichtung.

4.3.1.3 Bodenfruchtbarkeit und Humusumsatz

„Eine grundlegende Voraussetzung für das Gelingen des Ökologischen Landbaus ist die Absicherung einer naturveranlagten Bodenfruchtbarkeit, die u. a. durch hohe biologische Aktivität, ausreichende Humus-, Nährstoff- und Wassergehalte sowie gute Struktureigenschaften des Bodens gekennzeichnet ist“ (LEITHOLD u. HÜLSBERGEN, 1997). Die Autoren stellen ein auf den Ökologischen Landbau abgestimmtes Humusbilanzierungssystem in erster Linie für ganze Fruchtfolgen vor. Eine Weiterentwicklung der verwendeten Koeffizienten u. a. unter Berücksichtigung von Standortunterschieden eröffnen Möglichkeiten einer standortspezifischen Humus- und Stickstoff-Bilanzierung als Basis für teilflächenspezifische Korrekturen im Rahmen der Düngung.

Modelle zur Umsetzung der organischen Substanz lassen sich nicht direkt von der konventionellen Landwirtschaft in den Ökologischen Landbau übertragen (siehe u.a. KOOPMANN und BOKHORST, 2000; DAVID et al., 2000). Die Pools der organischen Substanz im Boden unterliegen verschiedenen Umsatzzeiten, die jedoch noch nicht eindeutig geklärt sind (FLIEßBACH et al. 1997). Engere C/N-Verhältnisse, höhere C_{org} und N_t -Gehalte insbesondere nach längerer ökologischer Bewirtschaftung sowie höhere Gehalte an mikrobiellem C und N, differenziert nach Bodenart, und Anzeichen für eine höhere mikrobielle Aktivität (FRIEDEL et al., 1997; SCHULTE, 1997, FLIEßBACH et al., 1997) sind Merkmale ökologisch bewirtschafteter Flächen im Vergleich zu konventionellen, die eine Anpassung von Modellen zum Humusumsatz aber auch zur Verfügbarkeit von Nährstoffen aus organischen Düngern und Ernteresten erfordern. Diese Kenntnisse sind für eine zielgerichtete, standortangepasste und teilflächenspezifische Planung der Düngung notwendig. Eine möglichst effiziente Ausnutzung des begrenzten betriebseigenen Düngers verstärkt diese Notwendigkeit. Inwieweit sie zum Nivellieren des Nährstoffniveaus von Schlägen oder zur gezielten Förderung produktiver Bereich eingesetzt werden, bleibt hier offen und muß für einzelne Standorte und Kulturen geprüft werden.

4.3.1.4 Ausbringung betriebseigenen Düngers

Neben dem Boden- und Residualnährstoffmanagement hat die heterogene Gruppe der betriebseigenen Düngemittel (Mist, Kompost, Gülle), welche in unterschiedlichster Zusammensetzung und Aufbereitung anfallen, die größte Bedeutung. Der Anteil kurz-, mittel- und langfristig verfügbarer Stickstofffraktionen muss in Verbindung mit der N-Verfügbarkeit aus der organischen Substanz des Bodens in die Berechnung der zu applizierenden Düngermenge einfließen.

Für die teilflächengenaue Ausbringung vor allem bei kleinräumiger Heterogenität ist eine Technik mit Teilbreitenabschaltung und Regulierung der Düngermenge notwendig. Zur Ausbringung von Flüssigdünger existiert diese seit langem. Für den im Ökologischen Landbau häufiger anfallenden Mist bzw. Kompost müssen die Anforderungen exakter Verteilung an die Breitstreuer gestellt werden.

Breitstreuer verschiedener Hersteller zur Ausbringung von Misten und Komposten haben sich in der Praxis etabliert. Eine Verbesserung der Längs- und Querverteilung ist jedoch bei der Ausbringung von organischem Dünger als dominierende Nährstoffquelle im Ökologischen Landbau für eine kontrollierte Nährstoffverteilung von Bedeutung. Ein an der Universität Kassel entwickelter Prototyp zur Kompostausbringung erreicht bei einer Querverteilung über 4 Streuteller, die über hydraulisch gesteuerte Schnecken versorgt werden, einen Variationsquotienten unter 15 % (STIEG et al. 1998). Über Drehmomentsensoren an den Schnecken wird der Materialnachschub ermittelt und über Kratzbodenvorschub und Drehzahl der Schnecken geregelt.

Die technischen Voraussetzungen für eine teilflächenspezifische Applikation sind bei Breitstreuern praxiserprobt und bei Exaktstreuern auf Prototypenebene gegeben. Eine Praxiseinführung steht für letztere noch aus. Die Notwendigkeit einer hohen Verteilgenauigkeit von Mist- und Kompoststreuern unter Berücksichtigung der standortspezifischen Umsetzungsprozesse muss für eine Anwendung im Precision Farming noch überprüft werden.

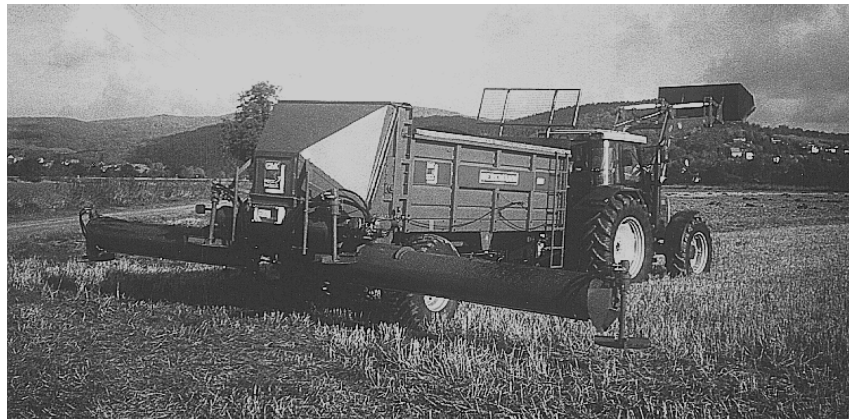


Abb. 4 - 1: Prototyp eines Exaktstreuers für Kompost mit Exaktdosier- und Verteilsystem. Fotoquelle: Universität Kassel, Fachgebiet Agrartechnik in den Tropen und Subtropen

4.3.2 Pflanzenkrankheiten und -schädlinge

Schädlinge der Pflanzenbausysteme sollen unter anderem durch eine Förderung von Nützlingen und Antagonisten in Grenzen gehalten werden. Hierauf zielt eine vielfältige Fruchtfolge und eine prinzipielle Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit ab. Auch aufgrund des geringen Stickstoffniveaus im Ökologischen Landbau ist mit einem verminderten Auftreten der Schaderreger zu rechnen. So stellten auch ODÖRFER und POMMER (1997) bei geringerer N-Versorgung einen reduzierten Mehltau- und Rostbefall fest. Fruchtfolgeeffekte senkten hier auch den Halmbruchbefall.

BRUCKHAUS (1995) empfiehlt neben den pflanzenbaulichen Maßnahmen die Schaffung von Strukturelementen zur Förderung der Nützlinge. Trotz präventiver Maßnahmen treten in einzelnen Beständen umfassende Befallssituationen auf, die ein direktes Eingreifen notwendig machen. Für diese direkten Maßnahmen stehen im Ökologischen Landbau nur eingeschränkte Möglichkeiten und begrenzte Mittel zur Auswahl. Stellvertretend genannt seien an dieser Stelle *Bacillus thuringiensis*-Präparate gegen Maiszünsler und Kartoffelkäfer sowie mit eingeschränkter Zulassung Kupferpräparate gegen *Phytophthora infestans* im Kartoffelbau.

Der *Phytophthora*-befall der Kartoffel ist weit verbreitet und im Ökologischen Landbau sind Kupferpräparate derzeit nahezu die einzige Möglichkeit, auf den Befall zu reagieren. Aufgrund der Akkumulationsgefahr ist der Einsatz aber problematisch und darf nur unter Kontrolle in begrenzter Menge erfolgen. Eine wesentliche Verbesserung könnte erreicht werden, wenn eine Behandlung mit erheblich reduzierten Kupferkonzentrationen oder anderen gering wirkenden Mitteln in einem sehr frühen Befallsstadium möglich wäre. Die Entwicklung eines Biosensors von SCHÜTZ (2001) zum Erkennen verletzungsinduzierter Emissionen der Kartoffelpflanze könnte hierfür die grundlegenden Voraussetzungen bieten.

Vereinfachtes Wirkungsschema:

Der Kartoffelkäfer nutzt die reduzierte Vitalität phytophthorabefallener Kartoffelpflanzen zur Eiablage und ermöglicht damit wegen eines geringeren Fraßwiderstandes der Pflanze eine optimale Entwicklung der Larven. Die Auffindung der Wirtspflanzen erfolgt bei Phytophthora über eine Wahrnehmung des Duftstoffes 2-Ethyl-hexan-1-ol an den Antennen des Käfers. Die dort stattfindende Umsetzung von chemischen in elektrische Signale (Transduktion) wird zur Entwicklung eines Biosensors genutzt. Ergänzt durch Einheiten zur Kalibration und Vitalitätsprüfung der Antennen kann die Sensorapparatur zum Auffinden von Phytophthorabefallsherden in einem sehr frühen Stadium genutzt werden, ohne das bisher visuelle Merkmale erkennbar sind. Die genaue Lokalisierung des Befallsherdes erfolgt über eine parallel zur olfaktorischen Messung durchgeführte Erfassung der Windrichtung. Über die Duftstoffintensität in Verbindung mit der vektoriellen Auswertung der Windrichtung lässt sich der Befallsherd eindeutig ermitteln. Auf der Basis der entstehenden Befallskarte kann der Landwirt teilflächenspezifisch gering konzentrierte Mittel, wie z.B. stark verdünnte Kupferlösungen, ausbringen, die, zum richtigen Zeitpunkt appliziert, eine Ausbreitung der Krankheit verhindert. Zu berücksichtigen sind Folgeinfektionen auch unter Einbezug des Infektionspotentials der Nachbarflächen.

Abb. 4 - 2 stellt einen möglichen Verfahrensablauf dar. Die Funktionsdauer der Käferantennen beträgt je nach Qualität der Montage zwischen 2 und 8 Stunden; die Fahrgeschwindigkeit im Bestand liegt bei 5 km/h (SCHÜTZ, mündl. 2002). Der Einsatz wäre als Dienstleistung über Maschinenringe denkbar.

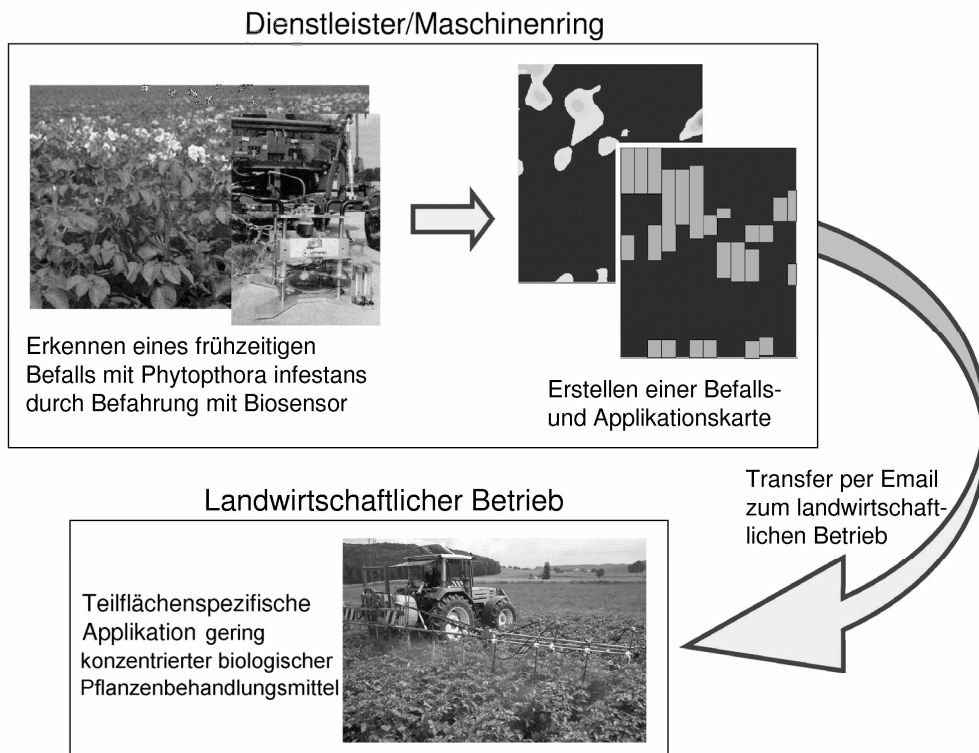


Abb. 4 - 2: Möglicher Verfahrensablauf zum Einsatz eines Biosensors zur Früherkennung von *Phytophthora infestans* und Applikation gering konzentrierter Wirkstoffe. Fotoquellen: Biosensor aus SCHÜTZ (2001), Kartoffelspritzung aus IRLA (2001).

4.3.3 Beikrautregulierung

Vorrangig gilt, auch bei der Beikrautregulierung eine Reduktion des Besatzes durch pflanzenbauliche Maßnahmen wie Fruchtfolge und Grundbodenbearbeitung zu erzielen. Als direkte Maßnahmen zur Unkrautbekämpfung kommen Striegeln, Hacken und Abflammen in Betracht. Striegeln und Hacken zielen zwar in erster Linie auf eine Reduktion des Beikrautbesatzes, erhöhen aber auch die Mineralisation der organischen Substanz und verbessern die Infiltration von Niederschlag. Diese Nebenaspekte sind so bedeutsam, dass eine Begrenzung dieser Arbeitsgänge auf Teilflächen, orientiert am Beikrautbesatz, nicht sinnvoll erscheint.

Am ehesten wäre eine teilflächenspezifische Beikrautregulierung durch das Abflammen denkbar. Über Sensorik und Mustererkennung detektierte Unkräuter könnten selektiv erkannt und über die Abflämmtechnik beseitigt bzw. geschädigt

werden. Die teilflächenspezifische Behandlung würde Betriebsmittel sparen und die Abflammentechnik ließe sich leicht durch entsprechende Steueraggregate ergänzen. Zum Zeitpunkt des Abflammens befinden sich die Beikräuter im Keimstadium oder den ersten Laubblattstadien und sind zum Teil noch nicht über bildverarbeitende Sensoren erkennbar. Ein Aussparen von Bereichen mit gekeimten, aber nicht erkannten Unkräutern hätte dann einen erneuten Arbeitsgang in einem sehr eng verfügbaren Zeitraum mit erhöhten Kosten zur Folge. Ein teilflächenspezifischer Einsatz der Abflammentechnik wäre also nur in Verbindung mit einer wirkungsvollen Sensorik sinnvoll.

Nicht im klassischen Sinne eines der Standortheterogenität angepassten teilflächenspezifischen Managements, aber dennoch selektiv auf Teilflächen begrenzt arbeitet die sensorgesteuerte Querhacke (GRIMM et al. 2000, KIELHORN et al. 2000). Am Beispiel Mais erprobt arbeitet die Querhacke mit rotierenden Werkzeugen selektiv bei einem Beikrautbesatz in der Reihe der Kulturpflanzen und zeigt damit neue Möglichkeiten für diesen Problembereich auf. Bei zunehmender Nachfrage an ökologischen Produkten und größerer Anzahl ökologisch wirtschaftender Betriebe etablieren sich zunehmend auch bisher schwer zu bearbeitende Reihenkulturen wie Mais und Zuckerrüben, so dass neue Techniken zur Beikrautregulierung in der Reihe notwendig sind.

4.3.4 Selektive Ernteverfahren

Die Stickstoffversorgung als wesentliches Kriterium zur Erzeugung von Qualitätsgetreide lässt sich im Ökologischen Landbau nur schwer dem Nährstoffbedarf der Kulturpflanzenbestände anpassen. Eine kompensierende Wirkung durch organische Düngung ist nur begrenzt möglich. Wie soll auf eine steigende Nachfrage nach Qualitätsprodukten reagiert werden?

Die standortspezifischen Bedingungen zur N-Nachlieferung aus der organischen Düngung und der organischen Substanz des Bodens prägen den Rohproteingehalt von Qualitätsgetreide wie Backweizen und Braugerste. Mit Kenntnis über den qualitätsprägenden Einfluss von spezifischen Standortfaktoren, dem Einbezug von Wetterdaten des qualitätsrelevanten Zeitabschnittes, Angaben zu Fruchtfolge und organischer Düngung ließen sich Modelle entwickeln, die ein selektives Beernten qualitativ hochwertiger Partien auf Teilstandorten ermöglichen. Abb. 4 - 3 zeigt einen möglichen Verfahrensablauf.

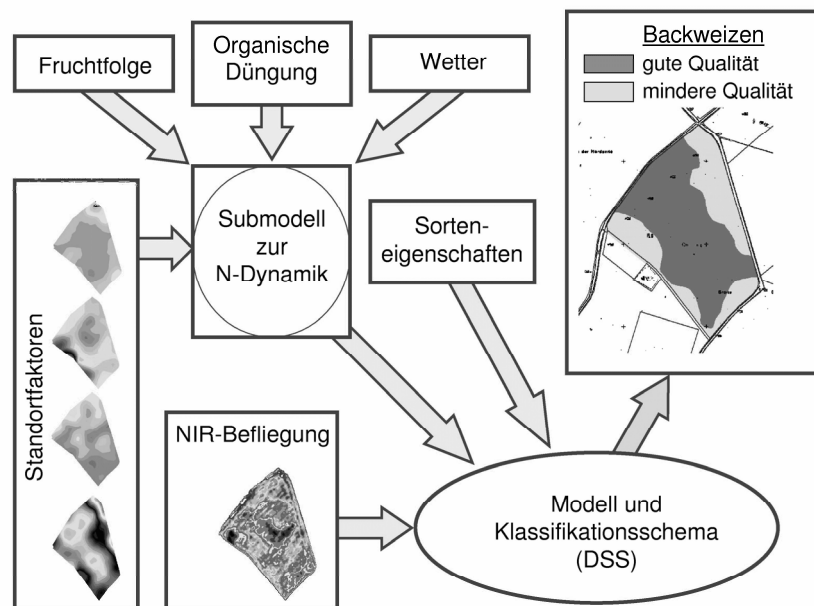


Abb. 4 - 3:

Vereinfachte schematische Darstellung zur selektiven Ernte von Qualitätsgetreide am Beispiel des Backweizens unter Einbezug von standort- und düngungsspezifischer N-Verfügbarkeit sowie Sortenwahl und spektralen Reflektionsdaten eines fortgeschrittenen Entwicklungsstadium des Bestandes.

4.3.5 Naturschutz

Zur Umsetzung von Naturschutzzielen im Ökologischen Landbau kann eine spezielle Nutzung von Lebensräumen für Amphibien oder der Avifauna innerhalb der Kulturpflanzenbestände sinnvoll sein. Beispielsweise ist eine Aussparung der Nutzung von Teilbereichen möglich, in denen die Entwicklung bestimmter Tierarten wie z. B. den Wiesenbrütern zeitgebunden erfolgt. Zu schützende Bereiche würden in einer Maßnahmenkarte als von der Nutzung ausgenommene Bereiche klassifiziert und Bearbeitungsmaßnahmen wie Mahd, Striegeln oder Hacken vor Ort entsprechend angepasst.

Ein anderes Beispiel aus dem Ökologischen Landbau ist die Anlage von Blühstreifen zur Erhöhung der strukturellen und funktionalen Diversität. Das Ausbleiben der Nutzung in diesen Bereichen führt, sofern Unkräuter wie die Distel vorhanden sind, zu einer starken Vermehrung dieser Art. Der Ökologische Landbau verfügt mit dem Kleegrasanbau über eine effiziente Methode, die Distel durch häufige Nutzung zumindest zurückzudrängen. Eine Unterlassung dieses Effektes wäre nicht wünschenswert. Bei einer Anlage von Blüh- bzw. Brachestreifen in den Randlagen eines Kleegrasschlages kann über die Feststellung des Distelbesatzes eine klassifizierte Maßnahmenkarte zur selektiven Nutzung der Distelbereiche erstellt werden. Bei der Klassifizierung ist ein Besatz in den benachbarten Bereichen einzubeziehen, wenn die Gefahr der Ausbreitung in den sonst ungenutzten Blühstreifen besteht. Zur selektiven Mahd des Blühstreifens muss dieser auch im aufgewachsenen Bestand befahren werden. Die hinterlassenen Fahrspuren sind hierbei nicht nachteilig zu bewerten, sondern führen durch die Strukturbereicherung zur Schaffung weiterer Mikro- und Mesohabitate und somit zur gewünschten Bereicherung. Abbildung 4 - 4 zeigt ein mögliches Ablaufschema der selektiven Blühstreifennutzung.

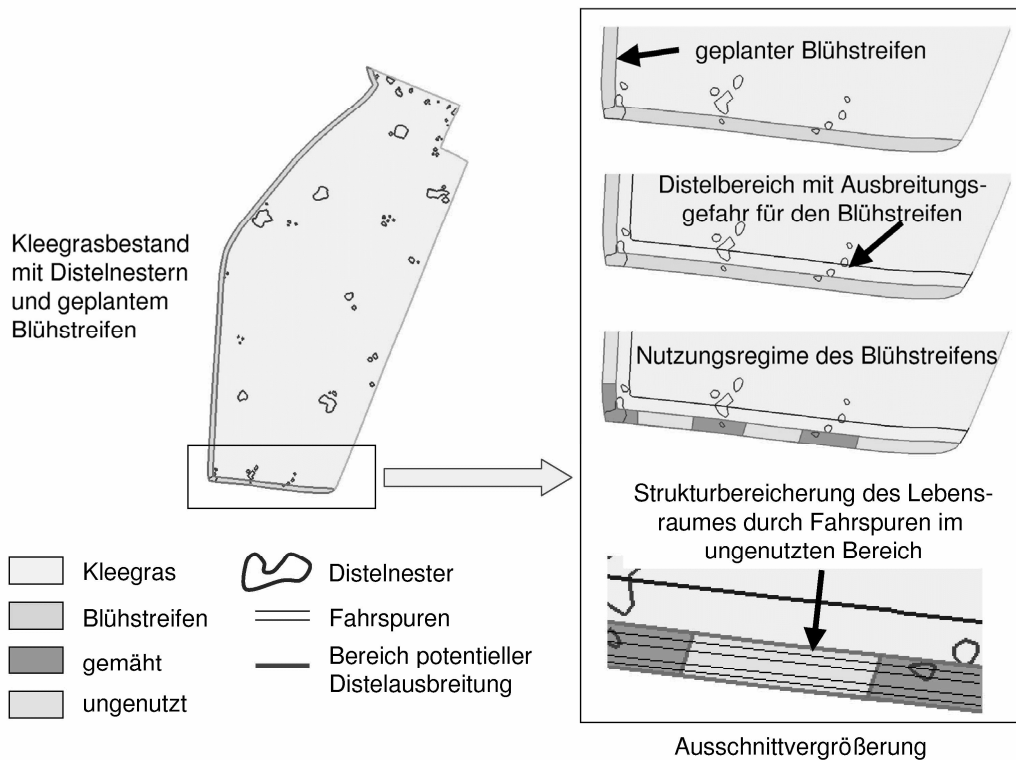


Abb. 4 - 4: Anlage von Blühstreifen in Klee-Gras zur Förderung der strukturellen und funktionalen Diversität unter Berücksichtigung der Distelproblematik und Anpassung durch eine differenzierte Nutzung.

4.4 Ausblick

Eine Etablierung des Precision Farming im Ökologischen Landbau ist auf zwei Ebenen denkbar. Relativ schnell umsetzbare Maßnahmen wie Standortkartierung und Ertragserfassung der Mähdruschfrüchte sowie eine teilflächenspezifische Düngung könnten mit der bestehenden Technik erprobt und die Auswirkungen an Boden und Pflanze langfristig kontrolliert werden. Mögliche Abweichungen in Boden- und Pflanzenparametern von zu erwartenden Daten wären für eine Modellanpassung nutzbar.

Neben dieser eher pragmatischen Vorgehensweise sollten parallel auf langfristiger Ebene Grundlagenuntersuchungen erfolgen, welche u. a. die Auswirkung der Standortheterogenität auf Ertrags- und Produktqualität sowie die Etablierung und Fixierleistung von Leguminosen in Gemengen bei variierenden Zusammensetzungen auf verschiedenen Standorten und in unterschiedlichen Fruchtfolgen bein-

halten. Die zunehmende Kenntnis von Umsetzungs- und Regulationsprozessen ist für eine kontinuierliche Modellanpassung der pflanzenbaulichen Maßnahmen notwendig.

Die technischen Entwicklungen im Bereich der Sensorik werden auch im Ökologischen Landbau weitere Einsatzmöglichkeiten für ein Precision Farming eröffnen. So verspricht die Praxiseinführung und Weiterentwicklung der Biosensorik zur Erkennung von Pflanzenkrankheiten und -schädlingen im Frühstadium eine wesentliche Verbesserung des Behandlungserfolges beim kurativen Einsatz gering dosierter biologischer Mittel. Und auch für den N-Import über Leguminosen ist eine Weiterentwicklung von sensorgestützten und bildverarbeitenden Methoden zur verbesserten Erfassung des Leguminosenanteils von großer Bedeutung.

Die Prioritäten einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung erfahren im Ökologischen Landbau, aufgrund des systemorientierten Handelns mit eher passiven Wirkungszielen, eine andere Gewichtung. Teilweise ergeben sich auch ganz neue Ansätze. Beispiele hierfür sind die selektive Ernte von Qualitätsprodukten, die Beikrautregulierung durch sensorgestützte Querhacken, der Einsatz von Biosensoren im Pflanzenschutz und eine gewünschte Ertrags- und Stickstoffeffassung von Futterflächen.

Mögliche Einsatzgebiete des Precision Farming im Ökologischen Landbau

Existierende bzw. in Entwicklung befind- liche Maßnahmen	konventioneller Einsatz	Umsetzbarkeit im Ökologischen Landbau
Erfassung von Standorteigenschaften	Bodendaten (Mess- u. digit. Daten), Topographie, Fern- erkundung, Standortkarten, etc.	übertragbar , Einschränkung bei abgeleiteten Modellen z. B. zur Ertragssimulation
Ertragserfassung Mähdruschfrüchte	Messung der Erntemenge über den Getreidedurchsatz mit verschiedenen Verfahren.	übertragbar
Mineralische N-Düngung	Streu- u. Spritzverfahren, Teilbreitenregulierung, Einsatz v. N-Sensor möglich.	nicht übertragbar , da keine mineralische N-Düngung möglich
Mineralische Grunddüngung	Streuverfahren, Teilbreitenregulierung.	technisch übertragbar , aber : nicht sinnvoll, da Nähr- stofffreisetzung der Rohnähr- stoffdünger kaum kalkulierbar
Pflanzenschutz	Selektiver Einsatz von synth. Pflanzenbehandlungsmitteln gegen Unkräuter und Krank- heiten über Online-Erkennung.	nicht übertragbar , i.d.R. präventive oder multifunktio- nale pflanzenbauliche Maß- nahmen, kaum kurative Mittel.
Variation der Saatstärke	Anpassung der Saatstärke an Ertragspotentiale der Standorte.	übertragbar , aber : Anpassung der Modelle notwendig.
Naturschutz	selektive Einschränkung pflanzenbaulicher Maß- nahmen zum Artenschutz	übertragbar , zusätzliche Berücksichtigung pflanzen- baulicher Konsequenzen

Zusätzliche Perspektiven für den ökologischen Landbau

	Einsatzbesonderheiten	Entwicklung
Organische Düngung	Düngung von Mist, Kompost, Gülle, Berücksichtigung der Nährstofffreisetzung in Dünger und Boden, Verteilungstechnik	Bewertung der Nährstoffverfü- gbarkeit aus Düngemitteln und Boden, Verbesserung der Ver- teilgenauigkeit b. Ausbringung.
Ertrags- und Qualitätserfassung von Futterpflanzen	Messung der Erntemenge, des Leguminosenanteils und N-Gehaltes zur Kalkulation des N-Transfers.	Mengensensorik, für Ernte- geräte, Mustererkennungsver- fahren f. Leguminosen, Online- Spektralanalyse für N-Gehalte
Biosensorik im Pflanzenschutz	Früherkennung von Pflanzen- krankheiten und -schädlingen zum Einsatz gering wirkender biologischer Mittel.	Praxiserprobung für Kartoffeln (Phytophthora), Analyse und Entwicklung weiterer sensibler Verfahren.
Selektive Ernte von Qualitätspartien	Aus Standortdaten, Nährstoff- haushalt und NIR-Befliegung selektierter Flächen für aus- gewählte Qualitätsmerkmale.	Prüfung von standortgebun- dener Qualitätsheterogenität versch. Produkte, Aufmisch- effekten u. Flächenabgrenzung
Flexible Ansaatmischungen	Angepasste Etablierung von Leguminosen durch Variation des Saatgutanteils. Optimie- rung d. N-Imports ü. Legumin.	Prüfung der standortspezi- fischen Bestandesetablierung versch. Leguminosenanteile i. d. Saatgutmischung

Abb. 4 - 5:

Umsetzungsperspektiven von Maßnahmen im Rahmen einer teil-
flächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau.

In Abb. 5 - 5 ist eine Zusammenstellung möglicher Maßnahmen einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau dargestellt. Auf dem derzeitigen Erfahrungsstand sind die genannten Perspektiven zum Teil spekulativ, sollen an dieser Stelle aber Anreiz zur Prüfung der Umsetzbarkeit sowie zur Entwicklung neuer Einsatzbereiche geben.

4.5 Literatur

ANONYMOUS, 1991:

Verordnung EWG Nr. 2092/91 des Rates vom 24. Juni 1991 über den ökologischen Landbau und die entsprechende Kennzeichnung der landwirtschaftlichen Erzeugnisse und Lebensmittel. Amtsblatt Nr. L 198 v. 22.7.91, S. 1 - 15

BMVEL, 2001:

Agrarbericht der Bundesregierung 2001. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Berlin
<http://www.verbraucherministerium.de/landwirtschaft/ab-2001/ab01/text.htm>

BRAUN, A., MAYER, J. und P. VON FRAGSTEIN, 2001:

Sind Leguminosenschrote für die N-Düngung von Frühgemüse geeignet? - Ergebnisse eines Brutversuches. In: Reets, H.J. (Hrsg.): Von Leit-Bildern zu Leit-Linien. Beiträge zur 6. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau. S. 273 - 276

BRUCKHAUS, A., 1995:

Reichhaltiges Nützlingsvorkommen im Ackerbau - nicht nur Ergebnis des Anbausystems. In: Beiträge zur 3. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau: 21. - 23. Februar 1995 an der Christian-Albrecht-Universität zu Kiel, Hrsg. T.. Dewes u. L. Schmitt, Wissenschaftlicher Fachverlag, Gießen

DAVID, C., JEUFFROY, M.-J., LAURENT, F. and S. RECOUS, 2000:

Nitrogen management on organic winter wheat by the use of Azodyn model - A decision tool to control the spring fertilization. In: IFOAM 2000 - The world grows organic, Proceedings 13th International IFOAM Scientific Conference, p. 60 - 63

FLIEßBACH, A., WOLEWINSKI, OBERSON, A., MÄDER, P. und U. NIGGLI, 1997:

Kohlenstoff und Stickstoffgehalt von Dichtefraktionen der partikulären organischen Substanz aus Böden unter langjährig ökologischer oder konventioneller Bewirtschaftung. In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen

Landbau: 3. - 4. März 1997 an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hrsg. U. Köpke u. J.-A. Eisele, Köster-Verlag, Berlin 1997, S. 571 - 577

FRIEDEL, J. K., DIERENBACH, E. und D. GABEL, 1997:

Die Rolle der mikrobiellen Biomasse im C- und N-Kreislauf ökologisch bewirtschafteter Ackerböden. In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau: 3. - 4. März 1997 an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hrsg. U. Köpke u. J.-A. Eisele, Köster-Verlag, Berlin 1997, S. 77 - 83

GRIMM, J., TRAUTZ, D. und A. KIELHORN, 2000:

Mechanical weed control within row cultures using sensor technique for online crop/weed detection, Proceedings of the 13th International IFOAM Scientific Conference, 2000, page 174

HAAS, G., 1995:

Auswahl von Feldversuchsflächen auf heterogenem Auenboden: Bestandeskartierung - Uniformitätsernten - Luftbildaufnahmen - Exaktvermessung. Dissertation, Schriftenreihe Institut für Organischen Landbau, Rheinische-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hrsg. U. Köpke, Verlag Köster, Berlin

HAAS, G. und U. KÖPKE, 1994:

Vergleich der Klimarelevanz Ökologischer und Konventioneller Landbewirtschaftung. Studie im Auftrag der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.) 1994: Studienprogramm: Band 1 - Landwirtschaft, Teilband 2, Studie H, Economica Verlag Bonn.

HEUWINKEL, H. und R. GUTSER, 1997:

Bestimmung der N₂-Bindung zur N-Bilanzierung von Klee-Luzerne-Gras. In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau: 3. - 4. März 1997 an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hrsg. U. Köpke u. J.-A. Eisele, Köster-Verlag, Berlin 1997, S. 272 - 278

HEUWINKEL, H. and F. LOCHER, 2000:

An approach to describe the variability of nitrogen fixation by a clover-grass mixture within a field. In: IFOAM 2000 - The world grows organic, Proceedings 13th International IFOAM Scientific Conference, p. 90

HEß, J. PIORR, A. und K. SCHMIDTKE, 1992:

Grundwasserschonende Landbewirtschaftung durch ökologischen Landbau. Eine Bewertung des Leguminosenanbaus und des Wirtschaftsdüngereinsatzes im Anbausystem ökologischer Landbau. Dortmunder Beiträge zur Wasserforschung. Veröffentlichung des Instituts für Wasserforschung GmbH Dortmund und der Dortmunder Stadtwerke AG. Heft 45

IRLA, E, 2001:

Verbesserung der Spritztechnik im ökologischen Kartoffelbau. Das TechnoScop, 3/2001, <http://www.technoscop.ch/d/3-2001/fat.htm>

- KIELHORN, A. DZINAJ, T., GELZE, F., GRIMM, J., KLEINE-HARTLAGE, KLEINE -
HÖRSTKAMP, S., KUNTZE, LINZ, A., NAESCHER, J., RUCKELSHAUSEN, A.,
TRAUTZ, D. und E. WISERODT:
Beikrautregulierung in Reihenkulturen - Sensorgesteuerte Querhacke im Mais.
Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz., Sonderheft XX, Stutt-
gart-Hohenheim, 2000
- KÖNIG, U. J., 1995:
Optimierung des N-Umsatzes beim Leguminosen-Zwischenfruchtanbau. In: We-
ge zu dauerfähiger, naturgerechter und sozialverträglicher Landbewirtschaftung,
Beiträge zur 3. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau vom 21. bis 23.
Februar 1995 der Christian-Albrecht-Universität zu Kiel, Hrsg: T. Dewes u. L.
Schmitt, Wissenschaftlicher Fachverlag, Gießen, 1995, S. 181 - 184
- KOOPMANS, C. J. and J. BOKHORST, 2000:
Optimising organic farming systems: nitrogen dynamics and long-term soil fertil-
ity in arable and vegetable production systems in the Netherlands. In: IFOAM
2000 - The world grows organic, Proceedings 13th International IFOAM Scien-
tific Conference, p. 69 - 72
- LEITHOLD, G. und K. J. HÜLSBERGEN, 1997:
Grundlagen und Methoden zur Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. In:
Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau: 3. - 4. März
1997 an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hrsg. U. Köpke
u. J.-A. Eisele, Köster-Verlag, Berlin 1997, S. 56 - 62
- LOGES, R., TAUBE, F. und A. KORNHER, 1997:
Ertrag, N-Fixierleistung sowie Ernterückstände verschiedener Rotklee- und Rot-
klee-grasbestände. In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen
Landbau: 3. - 4. März 1997 an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn, Hrsg. U. Köpke u. J.-A. Eisele, Köster-Verlag, Berlin 1997, S. 265 - 271
- LOGES, R., KASKE, A., INGERWERSEN, K. and F. TAUBE, 2000:
Yield, forage quality, residue nitrogen and nitrogen fixation of different forage
legumes. In: IFOAM 2000 - The world grows organic, Proceedings 13th Interna-
tional IFOAM Scientific Conference, p. 83
- ODÖRFER, A. und G. POMMER, 1997:
Zusammenhänge zwischen Anbauintensität und Befall mit Weizenkrankheiten.
In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau: 3. - 4. März
1997 an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hrsg. U. Köpke
u. J.-A. Eisele, Köster-Verlag, Berlin 1997, S. 302 - 307
- SCHÜTZ, S., 2001:
Der Einfluß verletzungsindizierter Emissionen der Kartoffelpflanze (*S. tubero-
sum*) auf die geruchliche Wirtspflanzenfindung und -auswahl durch den Kartof-
felkäfer (*L. decemlineata*) - Ein Biosensor für die Diagnose von Pflanzenschäden -
. Habilitationsschrift am Fachbereich Agrarwissenschaften und Umweltsicherung,
Institut für Phytopathologie und Angewandte Zoologie, Biologischer und Bio-

technischer Pflanzenschutz der Justus-Liebig-Universität Gießen, Wissenschaftlicher Fachverlag, Gießen

SCHMIDTKE, K., 1997:

Selbstregelung der N-Zufuhr im Ökologischen Landbau - ein Wirkungsmechanismus zum Schutz des Grundwassers? In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau: 3. - 4. März 1997 an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hrsg. U. Köpke u. J.-A. Eisele, Köster-Verlag, Berlin 1997, S. 21 - 27

SCHULTE, G., 1997:

Bodenbiologische Eigenschaften unterschiedlich lange ökologisch bewirtschafteter Ackerflächen in Rheinland-Pfalz. In: Beiträge zur 4. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau: 3. - 4. März 1997 an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hrsg. U. Köpke u. J.-A. Eisele, Köster-Verlag, Berlin 1997, S. 84 - 90

STIEG, D., WAGNER, G. und R. KRAUSE, 1998:

Exaktstreuer für Bioabfallkompost - Entwicklung eines Exaktdosier- und Verteilsystems. Landtechnik, 53, 1, S. 10 - 11

ZIHLMANN, U., WEISSKOPF, P., DUBOIS, D. and S. DAELLENBACH, 2000:

Mineral N-content in a loess soil under organic and integrated cultivation of potatoes. In: IFOAM 2000 - The world grows organic, Proceedings 13th International IFOAM Scientific Conference, p. 171

ZMP, 2002:

Strukturdaten der nach Verordnung (EWG) Nr. 2092/91 des Rates vom 24. Juni 1991 wirtschaftenden Unternehmen in Deutschland nach Unternehmensform sowie der bewirtschafteten Fläche, ZMP Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft GmbH, Rochusstraße 2, 53123 Bonn. <http://www.zmp.de/oekomarkt/unternehmen.pdf>

5 Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor

Abstract

The non-destructive assessment of forage mass in legume-grass mixtures as a tool for yield mapping in precision farming applications has been investigated in two field experiments. An ultrasonic sensor was used to determine sward heights. Forage mass–height relationships were evaluated by carrying out static measurements on binary legume–grass mixtures of white clover (*Trifolium repens* L.), red clover (*Trifolium pratense* L.), and lucerne (*Medicago sativa* L.) with perennial rye grass (*Lolium perenne* L.) across a wide range of sward heights (5.0–104.2 cm) and forage mass (0.15–11.25 t ha⁻¹). Mobile measurements, hereafter referred to as “on-the-go” were conducted by mounting the ultrasonic sensor in combination with a high-precision Differential Global Positioning System (DGPS) on a vehicle. Data were recorded along experimental plots consisting of perennial rye grass and grass–clover mixtures similar to the mixtures that were used for the static experiment. The static experiment revealed a relationship between ultrasonic sward height and forage mass explaining 74.8% of the variance with a standard error (SE) of 1.05 t ha⁻¹ in a common dataset. The type of legume species, weed proportion, and growth period had a significant impact on the above mentioned relationship. Legume-specific regression functions had higher R²-values of up to 0.855 (white clover mixture). Datasets including legume-specific mixtures and pure swards of both components reached comparable R² values between 0.799 and 0.818 but exhibited higher SE values. The abundance of weeds resulted in increased ultrasonic sward heights for the same levels of forage mass. On-the-go measurements across experimental field plots yielded a sward height range of 1.4–70.4 cm. Abrupt forage mass changes at the transition from treatment plots to cut interspaces resulted in a significant deviation from stubble height within a distance of 50 cm to plot borders. When legume-specific equations derived from static measurements were applied to sward heights, forage mass was overestimated

by 21.4% on average. Mean residuals from predicted forage mass ranged between 0.893 (pure grass) and 1.672 (red clover mixture) and increased significantly if the point sampling distance along the track was increased to more than 0.82 m on average across all plots. The prediction accuracy of forage mass from ultrasonic height measurements is promising; however, further modifications to the technique are necessary. One such improvement can be the use of spectral reflectance signatures in combination with the ultrasonic sensor.

Keywords: grassland, forage mass, ultrasonic sensor, sward height, on-the-go, yield maps

5.1 Introduction

Legume–grass mixtures are a dominating factor in the performance of organic agricultural systems. It is important to consider their forage mass productivity when calculating farm-based forage supply and nitrogen cycling on field and farm levels (Berry et al., 2002; Watson et al., 2002; Kayser et al., 2010). Site-specific growth conditions such as soil texture, nutrient supply and disturbances by cutting, frost, and drought account for a within-field variation of yield levels (Stafford et al., 1996; McCormick et al., 2009; Jabro et al., 2010). Assessment by means of yield sensors can generate yield maps which represent both spatial and temporal variations as an indispensable component of precision farming information systems (Blackmore, 2003; Basso et al., 2007).

Several methods have been developed to assess forage mass in grasslands. Schellberg et al. (2008) have reviewed a selection of important sensor-based yield measurement systems for grasslands along with a description of their functioning and constraints. In cutting systems, two main strategies can be distinguished: (i) Assessment of data from harvested material using different mass flow, impact, torque, or displacement sensors on choppers or mower conditioners in addition to weighing systems on mowers, trailer or balers (Auernhammer et al., 1995; Missotten et al., 1997; Godwin et al., 1999; Marcotte et al., 1999; Wild and Auernham-

mer, 1999; Martel and Savoie, 2000; Kumlhála et al., 2007, Schellberg et al., 2008). (ii) Use of non-destructive measurement systems for standing swards, e.g. mechanical sensors for recording the displacement of a pendulum related to biomass density (Ehlert et al., 2003; Ehlert and Dammer, 2006) or contact-free methods such as spectral-radiometric measurements which also provide information concerning forage quality (Schut et al., 2003; Biewer et al., 2009a; Biewer et al., 2009b). Both manual and mobile methods have been developed in pasture management to assess forage mass from height measurements alone or in combination with herbage density using sward sticks, rising plate meters, capacitance sticks, sonic sward sticks, or rapid pasture meters (Hutchings et al., 1990; Murphy et al., 1995; Sanderson 2001; Farmworks, 2010). Ehlert et al. (2008) reported good relationships between sward height and biomass ($R^2 = 0.88\text{--}0.94$) during a spring growth period in botanically undefined grassland swards using laser triangulation for height measurement. Including all three dimension Radtke et al. (2010) investigated volume changes caused by simulated grazing using an overhead 3D-laser scanner in tall fescue and lucerne plots of 1 m². The scanned volumes correlated strongly with the biomass (fescue: $R^2 = 0.96$; lucerne: $R^2 = 0.97$).

Ultrasonic sensors have been used since the late 1980s in tree canopy height and volume measurements (Lee et al., 2010). These sensors are widespread in process applications (Hauptmann et al., 1998) and can provide high efficiency at low cost (Park et al., 2010). Although the accuracy of modern ultrasonic sensors has improved, difficulties in interpreting the data often occurs due to variance in measurement conditions and transducer behaviour (Henning et al., 2000). Across a biomass range of 0.35–2 t ha⁻¹ in areas continuously grazed by sheep, measurements with an ultrasonic sensor underestimated sward height using top canopy heights as reference. In spite of this, biomass estimations were promising having R^2 -values between 0.66 and 0.81 (Hutchings et al., 1990). Sonic reflections for ryegrass-dominated swards were partly weak due to erect leaf orientation. The complex interaction between sward structure and reflection from the ultrasonic sensor is significantly affected by size, angle, and surfaces of leaves. Sensor-specific effects also play a role in the interaction (Hutchings, 1991, 1992). Having

installed the sensor on a tractor, Scotford and Miller (2004) conducted ultrasonic sensor on-the-go studies in different winter wheat varieties with erect leaf canopies.. Deviations between 4.6 and 7.2 cm from the reference crop height values were obtained. Reusch (2009) used a specific configuration of an ultrasonic sensor with an adapted control unit to estimate biomass in winter wheat. With this system it was possible to retrieve multiple echoes from different leave layers and from the ground and thus was independent of the sensors mount height.

The objectives of the present study were (i) to evaluate the capability of ultrasonic distance measurements to estimate forage mass in legume-grass mixtures of different species compositions under field conditions, (ii) to investigate the influence of crop species and sward maturity on the relationship between sward height and forage mass, and (iii) to analyze sensor sensitivity at biomass transition edges and validate forage mass estimations in field applications on-the-go.

5.2 Material and Methods

5.2.1 Technical description of the ultrasonic sensor

Measurements were recorded using an ultrasonic sensor (UC 2000-30GM-IUR2-V15) manufactured by Pepperl and Fuchs (Mannheim, Germany). Ultrasonic sensors determine the distance to/from an object by recording the time difference between the transmission of an ultrasonic signal (burst) and the reception of the signal's echo reflected by the object. The sensor used in this study is a one-headed system having one sonic transducer (frequency 180 kHz) that acts both as transmitter and receiver. There is an unusable distance (0 – 80 mm) that is created because of the pulse duration and the decay time of the transducer. Thus, echoes within this distance will be ignored by the sensor, meaning that objects cannot be detected (Pepperl and Fuchs, 2010). Errors in measurements due to temperature are corrected by an integrated thermometer. The sensing distance ranges from 80 to 2000 mm within a sound cone formed by an opening angle of about 12° (Pepperl and Fuchs, 2010; Fig. 5 - 1A). Ultrasonic pulses are sent and received frequently in a response delay period. In this study factory settings of 195 msec were

used. The sensor automatically checks the reliability of the measurements and exports an output value according to the measured distance after the response delay period. Hence, distance values are recorded at a frequency of about 5 Hz.

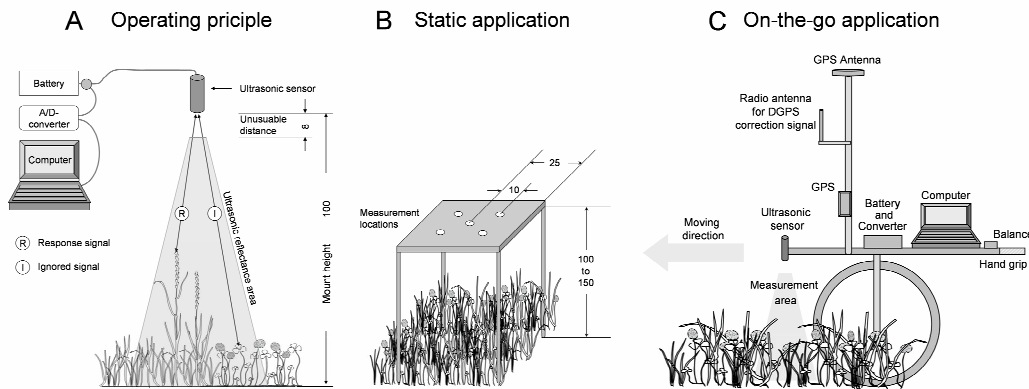


Figure 5 - 1: Description of (A) operating principle of the ultrasonic sensor, (B) static application with measurement replications at five positions on each sample site and (C) on-the-go application as a combined real time measurement of ultrasonic sward height and high precision GPS in movement. During measurement the reflected signal with the shortest distance inside the reflectance area is logged and other farther objects are ignored. Dimensions are given in cm.

The sensitivity area was checked using a wood stick of 10 mm diameter prior to the measurements moving the stick manually through the reflectance area (Fig. 5 - 1A) in 1 m distance perpendicular to the sensor. An object with an angular deviation of more than 3° cannot be detected reliably, as the echo caused by the object does not hit the sensor (Pepperl and Fuchs, 2010). Thus, only parts of the crop which are in a right angle to the ultrasonic beam can be detected as objects. The roughness of an object, together with the sensor-specific transducer frequency, determines whether the echo is reflected or diffused. For the sensor used in this study a surface roughness of <0.4 mm results in reflection, whereas a surface roughness of >10 mm results in diffusion (Pepperl and Fuchs, 2010). The sensor was supplied by a 12-V battery and the ultrasonic echo was converted into an output voltage linear to the measured distance. This voltage was transformed by an A/D converter into numerical values, logged on a PC, and finally converted into sward height values using a linear regression function derived from ultrasonic

distance measurements perpendicular to a flat linoleum surface at 10-cm increments within a range of 20 to 120 cm:

$$y = a - (159.03 + 0.08756x) \quad (\text{EQ 1})$$

Where,

a = mount height (Fig. 5 - 1) of the ultrasonic sensor above soil surface (cm),

x = values from A/D converter (proportional to distance related voltage output),

and y = sward height (cm)

The expression within the brackets corresponds to the distance between sensor and plant canopy.

The logging of output voltage was triggered manually at a user defined moment in the static experiment or continuously at one second intervals in the on-the-go experiment.

5.2.2 Field experiment for static measurements

The field experiment was conducted during 2005 and 2006 on the experimental farm Neu-Eichenberg of the University of Kassel (51°23' N, 9°54' E, 227 m above sea level). In addition to pure swards of red clover (*Trifolium pratense* L.), white clover (*T. repens* L.), and lucerne (*Medicago sativa* L.), binary mixtures of each legume with perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) were tested (Tab. 5 - 1). Pure grass swards were fertilized with five nitrogen (N) treatments—0, 40, 80, 120, and 160 kg N ha⁻¹—to induce additional growth variation in the first year. The nitrogen was supplied as granulated calcium ammonium nitrate on 28 July 2005. The soil was a sandy loam comprising 3.6% sand, 73% silt, 23.4% clay, and 2% humus. Soil analysis indicated optimum levels of phosphorus, magnesium, and potassium, and a pH of 6.4. During the 2-year experiment, the average rainfall and temperature were 550 mm and 9.9°C, respectively. The experimental swards were established in a randomised block design with four replicate plots (29 m² plot⁻¹) on 2nd June 2005. After a clearing cut to reduce the growth of weeds on 26th

July 2005, the first harvest period involved forage mass sampling and recording of ultrasonic sward height on 5th September and 4th October 2005. Forage mass samples were taken from an area of 0.25 m² by hand clipping at a height of 5 cm above the soil surface. In the following year (2006), three main cuts were obtained on 12th June, 25th July, and 14th September. Samples were collected at weekly intervals to determine the effect of growth stage. Forage mass was determined 1 d after ultrasonic measurements. For botanical analysis, herbage was separated into grass, legumes, and weeds. Approximately 500 g of the sample (fresh weight) was dried at 65°C for 48 h to determine the dry matter (DM) yield. Pure stands and mixtures of lucerne were rated in 2006 only at the main harvest dates due to frost damage. Plant development was defined using the BBCH scale (Meier, 2001).

Table 5 - 1: Treatments, Cultivars, Seeding rates and Fertilization of the field experiments

Treatment	Cultivar	Seeding rate (leg- ume/grass) kg ha ⁻¹		Fertilization (kg N ha ⁻¹)
Static experiment		pure	mixture	
Perennial rye grass (G)	Fennema	0/25	-	0/40/80/120/160
White clover / G	Klondike	4/0	4/15	-
Red clover /G	Pirat	8/0	8/15	-
Lucerne / G	Ameristad	16/0	16/15	-
On-the-go experiment				
Perennial rye grass (G)	Fennema	0/25	-	0/150/300/450/600
White clover / G	Klondike	-	4/15	-
Red clover /G	Pirat	-	8/15	-

Ultrasonic distance measurements took place one day prior to cutting on the 0.25 m² subplots used for forage mass sampling. A four-legged frame was placed above the subplot with the legs placed outside the sample area. A panel with 5 holes was mounted at 1 or 1.5 m on the frame depending on sward height, to maintain a distance of at least 20 cm between the top plant organ and the sensor. At each sample site, five measurements were recorded with the ultrasonic sensors placed at five positions on the frame. Readings were taken at the centre of the sample quadrat and at four diagonal positions in an equidistant radius of 14.1 cm

(Fig. 5 - 1B). Thus, the measurement positions assured the placement of an undisturbed measurement cone within the four legs. The five spatial replications ensured the calculation of a representative mean value and the expression of surface heterogeneity, respectively.

5.2.3 Field experiment for on-the-go measurements

The field experiment used for the on-the-go application was established on 21st April 2005 in an unbalanced 2-factorial block design with 4 replications (Tab. 5 - 1). It was located in an adjacent plot neighbouring the location of the static experiment. Identical site conditions were maintained. The plots were cut twice after a clearing cut in 2005 and three times in 2006, according to practical management intervals. N-fertilization took place prior to each growth period deploying one third of the annual rate. The plots had a longish shape (5-m length by 1.5-m width) adequate to allow seven longitudinal transects to pass through each plot (Fig. 5 - 5A). The 2.5 m interspace between the plots and the outside section of up to 1.5 m for plot borders was cut with a lawn mower to a stubble height of about 7 cm two days prior to measurements being conducted. The mown material was left on the stubble.

The sensor was mounted on a two-wheel vehicle at a height of 1 m above soil surface. The continuously measured sward heights according to EQ 1 were logged on a portable computer together with their associated GPS-positions. The ultrasonic data were imported via a USB port using an upstream AD-converter, and the GPS-positions were read via a COM-port. Ports were queried alternately at 1-s intervals using a user-written software based on BASIC. GPS-positions were surveyed using a Leica SR530 dual-frequency geodetic RTK receiver. A GPS AT 502 dual-frequency antenna was mounted on top of a pole at the centre of the vehicle. The DGPS correction signal was received from a reference station by a radio modem. A reference station and a rover, equipped with components having identical technical specifications, provided a horizontal positional accuracy of 1–2 cm. On-the-go sward height measurements were conducted passing through the

plots at a vehicle speed of $0.1\text{--}0.5\text{ m s}^{-1}$. The vehicle was manually balanced by reference to a water-level. The passages followed seven transects from track 1 to 7 in the longitudinal direction of the experimental layout, in a north-west to south-east direction. Each track included the plots, plot interspaces, and the areas within 1.5 m distance in front of the first and behind the last plot border, respectively (Fig. 5 - 5A).

Samples for forage mass determination used as reference data were taken the day after the ultrasonic height measurements at the centre of each plot. Harvesting and sample preparation followed the procedure described for the static experiment (section 5.2.2).

5.2.4 Statistics and interpolation

Weed proportions were transformed to the logit scale before statistical analysis to achieve heteroscedasticity (Connolly and Wachendorf, 2001). Multiple regression analysis and analysis of variance were conducted using the GLM procedure in SAS 9.1 (SAS Institute, 2002). According to the rules of hierarchy and marginality (Nelder, 1994; Nelder and Lane, 1995), non-significant effects were excluded from the model, but were retained if the same variable appeared as part of a significant interaction at an α -level of 5%.

The spatially geo-referenced point dataset of the on-the-go experiment was interpolated using inverse-distance-weighting with the function Potential Mapping in SPANS GIS 7.1 (TYDAC Research Inc.). Values were calculated at a linear gradient between the measured locations including the four nearest neighbours (Ebdon, 1992; Burke, 1998). The interpolation was conducted for each track separately and subsequently compiled as a composite map (Fig. 5 - 5B). A 3D-view was created using IDRISI Taiga (Clark labs; Clark University, Worcester MA, USA).

5.3 Results

5.3.1 Data exclusions

Unusually high weed proportions were observed in the first year due to slow establishment of the sward and a retarded spring growth. Samples with weed proportions above 50 % of DM were deleted to prevent a distortion by high weed abundance. Furthermore, plots with an extremely high forage mass ($> 9 \text{ t DM ha}^{-1}$) were excluded if an obvious lodging of the sward was detected. This applied predominantly to red clover pure swards and mixtures during the later three sampling dates of the first prolonged cut between 2nd and 12th June. As the common harvest date for silage is between 5th and 20th May, the experiment still encompasses the relevant period of common practice in the region.

5.3.2 Sward characteristics

The growth stages of the investigated swards ranged from tillering (BBCH 23) to finishing of flowering (BBCH 67) and covered a wide variation of DM yield from 0.06 to 11.25 t ha⁻¹ (Tab. 5 - 2). Spring growth exhibited the highest yields, whereas summer and autumn growth showed lower levels. Pure grass swards produced high yields in autumn after sowing and in the following spring, but drought in summer and low nutrient supply in the following autumn led to very low yields on both dates. In contrast, legume-based swards showed a stable forage mass production throughout the growing season. While the yield variation in legume-grass mixtures differed among the legume species (white clover < red clover < lucerne), red clover-grass presented the widest yield range covering almost the total span of sampled forage mass values.

Assessment of forage mass using an ultrasonic sensor

Table 5 - 2: Descriptive statistics of forage mass yield, ultrasonic sward height and proportions of legumes and weeds in the static experiments

Growth period:		Autumn 2005				Spring 2006				Summer 2006				Autumn 2006			
		N	Min.	Max.	Mean	N	Min.	Max.	Mean	N	Min.	Max.	Mean	N	Min.	Max.	Mean
All treatments	FM ^a	74	0.39	4.65	2.82	103	1.16	11.25	4.21	66	0.06	10.08	2.99	66	0.15	5.83	1.84
	USH ^b		17.3	57.9	33.2		15.8	104.2	41.9		5.0	98.3	39.6		5.5	80.5	28.2
	LP ^c		0	91.4	11.9		0	100	46.5		0	100	75.4		0	100	75.8
	WP ^d		0.1	47.0	16.2		0.0	11.1	0.72		0.0	34.7	5.4		0.0	21.7	1.5
Grass (G): pure swards	FM	40	1.68	4.65	3.24	21	1.16	6.43	3.62	12	0.06	0.51	0.29	12	0.15	0.9	0.41
	USH		19.8	46.3	32.5		16.0	77.0	36.7		5.0	16.7	10.9		5.5	20.4	13.5
	LP		0	0	0		0	0	0		0	0	0		0	0	0
	WP		0.1	45.6	13.7		0.0	2.3	0.12		0	34.7	18.3		0.0	2.0	0.2
	BBCH ^e (G)		23.0	29.0			25.0	55.0			23.0	25.0			23.0	26.0	
White clover (W): pure swards and mixtures	FM	11	1.16	3.99	2.22	42	1.22	8.79	3.43	24	0.26	4.62	2.32	24	0.98	2.97	1.67
	USH		21.5	34.7	27.6		15.8	70.8	34.4		14.2	36.4	26.8		16.2	33.1	23.6
	LP		0	74.1	12.5		0	100	36.9		0	100	58.8		0	100	61.5
	WP		2.6	47.0	18.9		0.0	4.4	0.65		0.0	9.9	2.5		0.0	16.9	1.7
	BBCH (W)		55.0	67.0			25.0	41.0			65.0	76.0			61.0	71.0	
Red clover (R): pure swards and mixtures	FM	12	1.47	4.16	2.69	34	1.35	11.25	4.74	24	1.19	7.48	4.01	24	0.41	4.45	2.10
	USH		19.0	57.9	39.4		19.7	87.1	45.1		30.2	81.4	53.9		12.8	44.6	28.1
	LP		0	88.4	20.3		0	100	37.5		0	100	63.2		0	100	61.6
	WP		2.1	40.6	17.8		0.0	7.0	0.9		0.0	10.4	2.9		0.0	21.7	2.2
	BBCH (R)		41.0	65.0			25.0	61.0			45.0	65.0			45.0	67.0	
Lucerne (L): pure swards and mixtures	FM	10	0.39	3.72	1.99	6	6.15	10.77	8.73	6	5.53	10.08	7.01	6	2.27	5.83	4.33
	USH		17.3	48.2	34.2		84.5	104.2	94.0		84.8	98.3	91.0		72.7	80.5	76.6
	LP		0	91.4	12.5		0	100	15.0		0	100	32.3		0	100	31.6
	WP		1.8	37.8	21.2		0.0	11.1	2.5		0.0	2.1	1.4		0.0	2.5	0.5
	BBCH (L)		42.0	55.0			51.0	55.0			61.0	66.0			58.0	62.0	

^a FM = Forage mass (t ha⁻¹); ^b USH = Ultrasonic sward height (cm); ^c LP = Legume proportion (% of DMY); ^d WP = Weed proportion (% of DMY); ^e BBCH = phenological growth stages according to Meier (2001).

The measured ultrasonic sward heights (USH¹) ranged from 5.0 to 104.2 cm. In some cases, particularly in autumn growth, red clover- and lucerne-grass-mixtures exhibited a higher growth than the other species at comparable forage mass levels, indicating that the vertical distribution of herbage biomass differs among growth periods and species composition.

The late sowing date (2nd June 2005) and three weeks of drought after sowing, affected the sward establishment resulting in high amounts of bare soil and weeds in the first year. A clearing cut did not significantly eliminate the weed proportion, which ranged from 0.1 to 47% in autumn 2006. In addition to the considerable weed propagation, low temperatures in spring resulted in a dominance of perennial ryegrass. Thus, the average proportion of legumes was low (11.9% of DM) in the first year, whereas it increased to 75% of DM in summer and autumn of 2006.

5.3.3 Static measurements

A quadratic relationship was identified between sward forage mass and USH measurements explaining 74.8% of the variance at a standard error of 1.046 t ha⁻¹ for the common dataset (Tab. 5 - 3, Fig. 5 - 2). Previous studies have reported that legume-specific calibration of biomass predictions improved prediction accuracy (Biewer et al, 2009a), thus the data were separated in subsets of pure swards and mixtures consisting of perennial ryegrass and the respective legume species. In practice legume–grass mixtures contain patterns of almost pure legume or pure grass areas; thus, additional legume-specific datasets were selected which included mixtures and pure swards of perennial ryegrass and of the respective legume species. Most of the legume-specific regressions exhibited linear relation-

¹ USH = Ultrasonic Sward Height; accounting for sward heights measured under terms of sward and sensor specific sound reflection characteristics.

ships. The coefficient of determination was improved from $R^2 = 0.748$ to a maximum of 0.855 by legume specific analysis. R^2 values of mixtures were highest in white-clover mixtures, whereas pure swards of white clover had lower accuracies ($R^2 = 0.598$). Higher accuracies were achieved for pure grass ($R^2 = 0.843$) and pure lucerne swards ($R^2 = 0.791$). Standard errors were highest in all lucerne swards ($1.24\text{--}1.75 \text{ t DM ha}^{-1}$) and lowest in white clover swards ($0.629\text{--}0.730 \text{ t DM ha}^{-1}$). Datasets including pure swards and mixtures had similar prediction accuracy ($R^2 = 0.799\text{--}0.818$), irrespective of legume species, but an increasing SE was observed in pure swards and mixtures in the order: white clover < red clover < lucerne.

Table 5 - 3: Regression statistics of measured forage mass yield (FM^a) and ultrasonic sward height (USH^b) for common dataset, pure swards and legume-specific mixtures.

Treatment	N	SE	R^2	Equation
Common	309	1.046	0.748 *** ^c	FM = -0.9141 + 0.1298 USH – 0.00041 USH ²
Mixtures including pure legumes and grass swards				
White clover (W) ^d	154	0.730	0.818 ***	FM = -1.42 + 0.1589 USH - 0.00062 USH ²
Red clover (R) ^d	147	0.983	0.799 ***	FM = -0.583 + 0.1006 USH
Lucerne (L)	82	1.241	0.799 ***	FM = -0.279 + 0.0831 USH
Pure swards only				
W	48	0.629	0.598 ***	FM = -0.418 + 0.0976 USH
R	42	0.960	0.677 ***	FM = -2.071 + 0.1975 USH – 0.0013 USH ²
L	12	1.521	0.791 ***	FM = -3.961 + 0.1225 USH
Grass (G) ^d	85	0.700	0.843 ***	FM = -1.558 + 0.189 USH – 0.0012 USH ²
Mixtures only				
WG	53	0.723	0.855 ***	FM = -1.326 + 0.1388 USH
RG	52	1.096	0.798 ***	FM = -1.092 + 0.1128 USH
LG	17	1.753	0.662 ***	FM = -0.443 + 0.0820 USH

^a FM = Forage mass (t*ha^{-1}) as dependent variable; ^b USH = ultrasonic sward height (cm) as independent variable; ^c *** significant at the 0.001 probability level; ^d Equations used for validation in the on-the-go experiment

In pure grass swards, the regression line levelled off at higher levels of forage mass, moderately so, in the common dataset and in white clover grass. In contrast, the regression lines for red clover grass and lucerne grass were linear (Fig. 5 - 2). All fitted plots showed a similar deviation from the bisecting line representing an over-estimation at low levels of forage mass, an under-estimation at high levels of

forage mass, and an offset at a forage mass of 0.05–0.65 t ha⁻¹, indicating that sward height is quantified from soil surface, while forage mass is harvested at a stubble height of 5 cm (Fig. 5 - 3).

In order to further quantify the influence of other sward-specific variables on the relationship, sward type, growth period, and weed proportions were included in the model of the common dataset (Tab. 5 - 4). This resulted in various significant interactions with linear or squared USH and raised the coefficient of determination to 0.893. The sward-type (ST) had the highest explanatory power among these co-variables, followed by weed proportion (WP), and the growth period (GP).

Table 5 - 4: Effects of sward characteristic variables on the estimation of forage mass yield (t ha⁻¹). Results of a general linear model including ultrasonic sward height (USH) and weed proportion (WP; percentage, logit transformed) as metric variables and the effects of sward type (ST) and growth period (GP) as class variables. The model is reduced to significant effects. Non significant main effects were retained, even they appeared in significant interactions ($p \leq 0.05$).

	SS	DF	MS	F	P
Model ^a	1187.54	31	38.31	74.53	<0.0001
Error	142.38	277	0.51		

Effects	Type III SS		MS	F	P
USH	27.69	1	27.69	53.88	<0.0001
USH ²	14.68	1	14.68	28.57	<0.0001
ST	8.60	6	1.43	2.79	0.0119
GP	2.87	3	0.96	1.86	0.1369
WP	0.14	1	0.14	0.26	0.6074
USH*ST	14.05	6	2.34	4.56	0.0002
USH ² *ST	20.41	6	3.40	6.62	<0.0001
USH*GP	4.38	3	1.46	2.84	0.0382
USH ² *GP	5.70	3	1.90	3.69	0.0124
USH ² *W	21.75	1	21.75	42.31	<0.0001

^a R² = 0.893; SE = 0.717

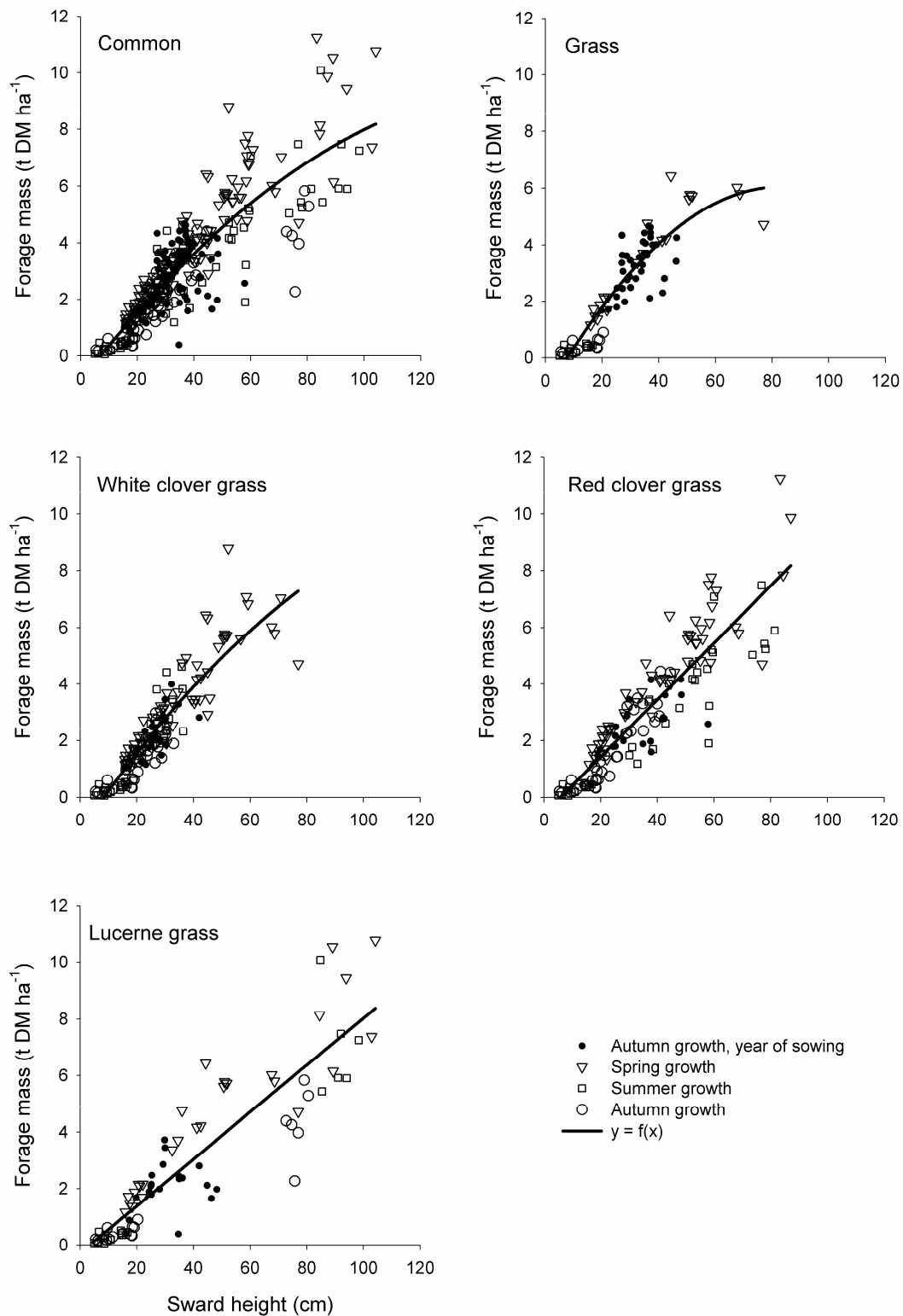


Figure 5 - 2: Relationship between sward height measured with an ultrasonic sensor and forage mass for common, pure grass and legume-specific calibrations (legume-specific calibrations are composed by binary legume–grass mixtures, pure legume, and pure grass swards; for regression statistics see Table 5 - 2).

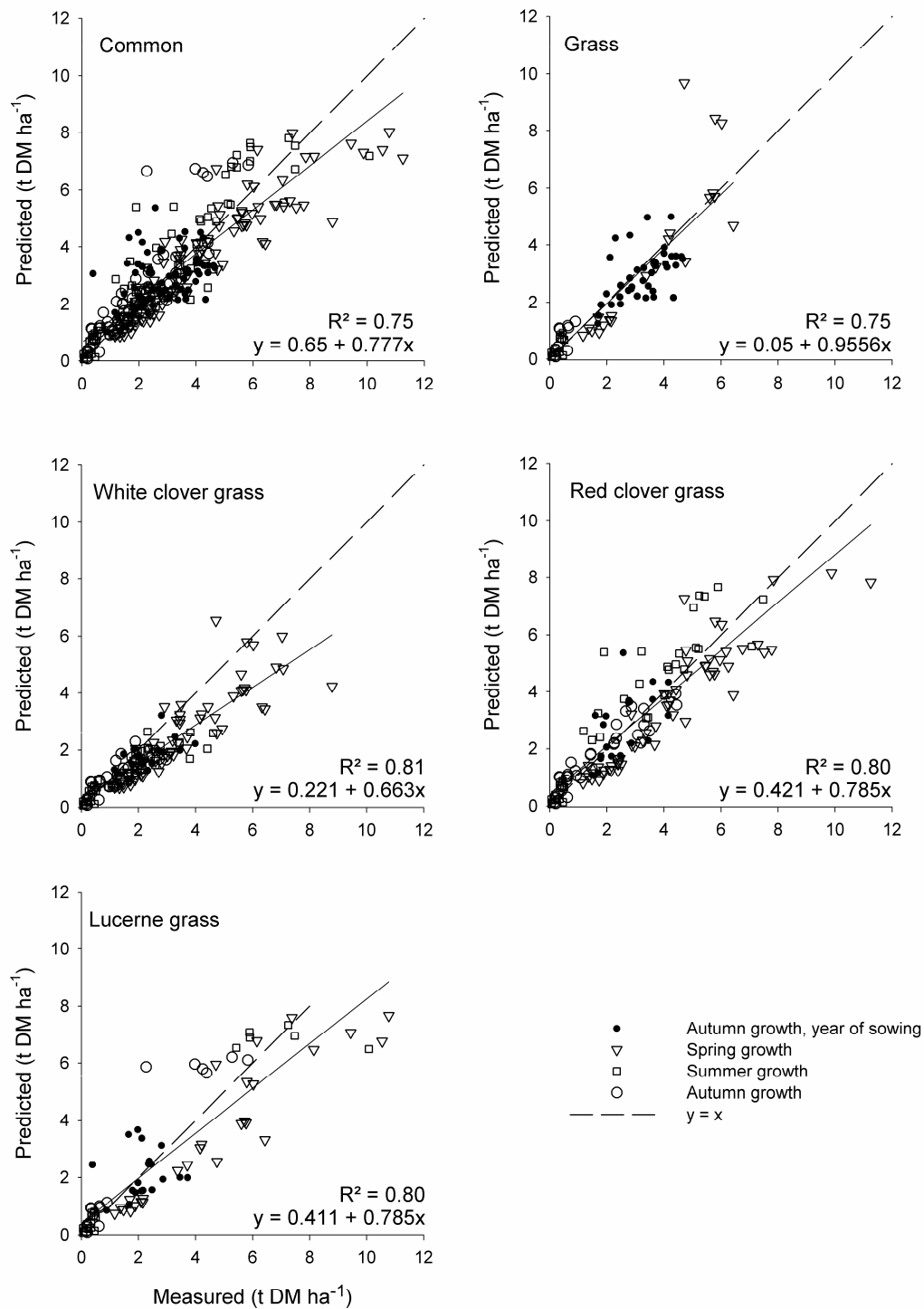


Figure 5 - 3: Relationship between measured and predicted forage mass derived from sward height measured with an ultrasonic sensor for common, pure grass and legume-specific calibrations (legume-specific calibrations are composed by binary legume–grass mixtures, pure legume, and pure grass swards).

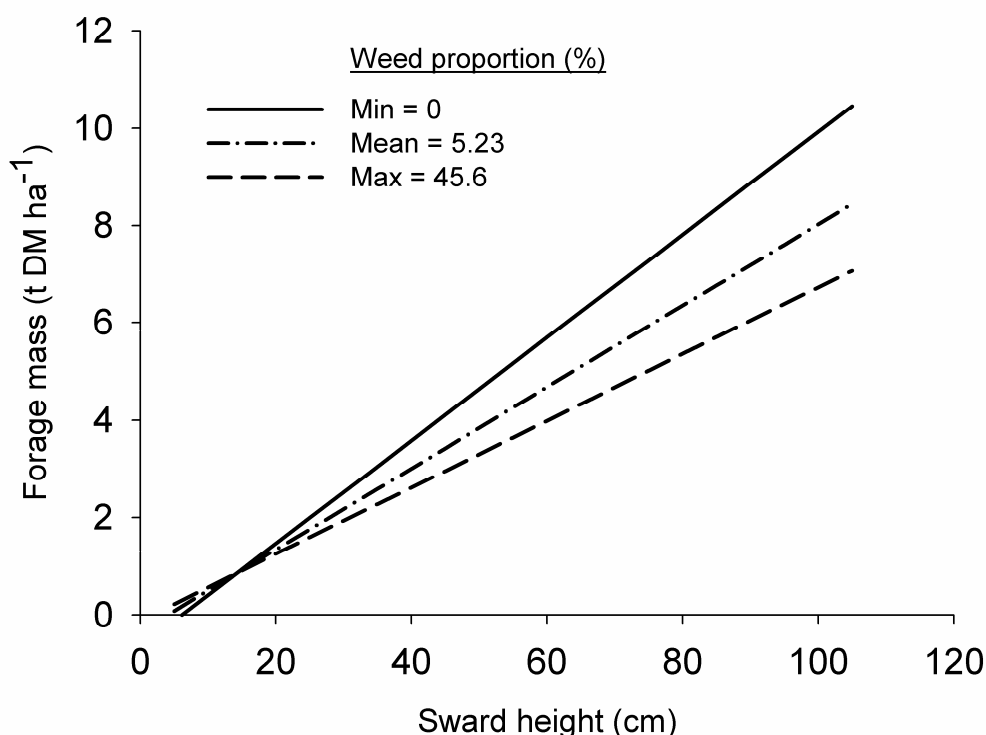


Figure 5 - 4: Relationship between forage mass and ultrasonic swards height influenced by different weed proportions.

5.3.4 Measurements on-the-go

A total of 340 locations were sampled within the plots and 139 locations were in the area between the plots or at the lateral edges of the experimental area. The average distance among sampling locations was 0.39 cm ranging from 0.5 to 218 cm (Tab. 5 - 5, Fig. 5 – 5B). The USH recorded within plots were between 1.4 and 70.4 cm. The subsequently calculated mean sward height according to species composition and fertilization level ranged from 18 cm for unfertilized grass to 59.6 cm for red-clover grass-mixtures. Forage mass and sward height increased with N-fertilization in grass swards to levels of 4.4 t ha⁻¹ and 48.1 cm, respectively. Red clover grass-mixtures had the highest values of 6.7 t ha⁻¹ and 59.6 cm, respectively.

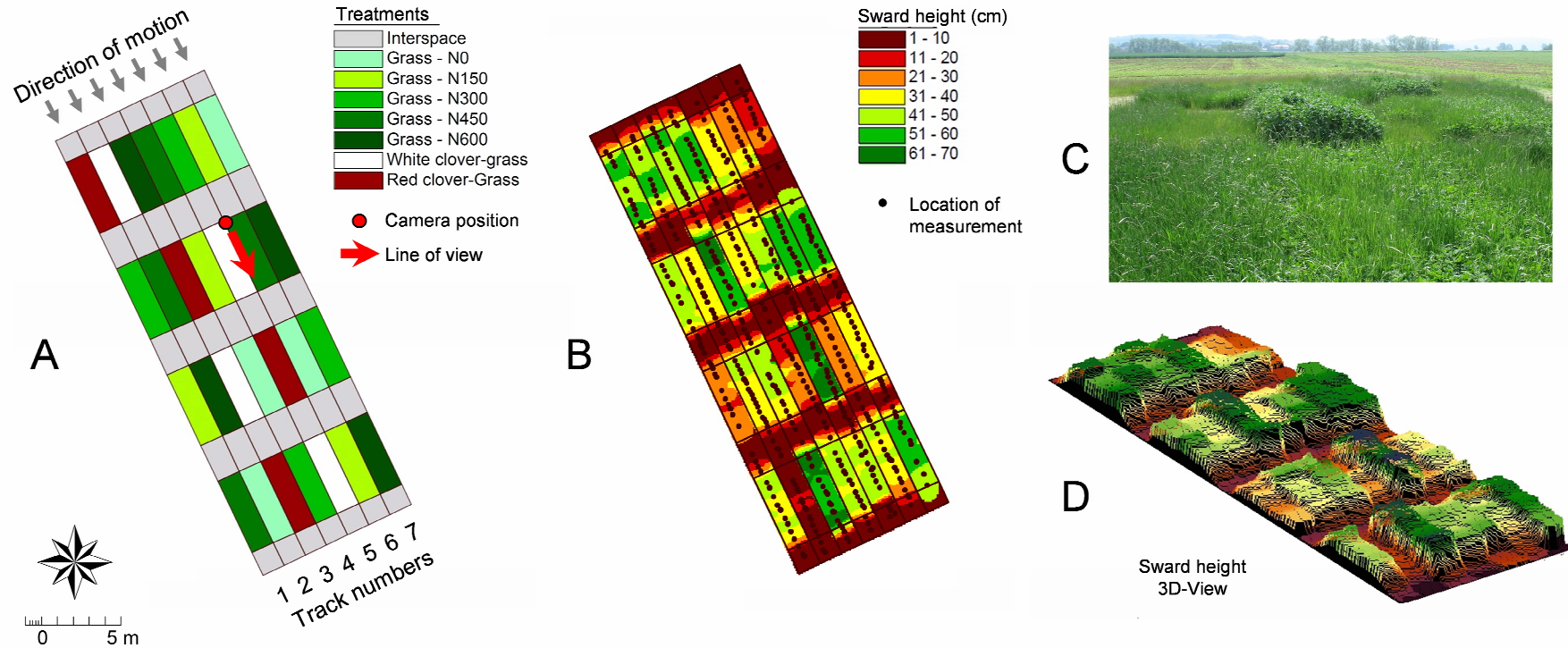


Figure 5 - 5: Experiment layout used for on-the-go measurements, including plots and interspaces, respectively. Dots indicate GPS-Locations of ultrasonic height measurements (B) and colours reflect treatments (A) and interpolated height levels in 10cm intervals (B, D). The photograph (C) is taken according to the camera position and direction given in the experimental layout (A).

Table 5 - 5: Sward height and validation characteristic of the on-the-go experiment

Sward type	N	USH ^a		N	FM ^b validation		
		Mean (cm)	SD		measured (t ha ⁻¹)	predicted (t ha ⁻¹)	deviation (%)
Grass N0	47	18.0	6.9	4	1.11	1.59	40.7
Grass N150	45	31.1	8.6	4	2.60	3.22	35.6
Grass N300	56	38.9	6.0	4	3.28	3.91	22.7
Grass N450	47	42.2	10.1	4	3.84	4.64	20.3
Grass N600	55	48.1	6.6	4	4.37	4.73	12.4
WG ^c mixture	40	44.8	6.5	4	3.50	4.59	35.7
RG ^d mixture	50	59.6	6.5	4	6.73	5.31	-17.5
Grass mean	250	35.7	7.6	20	3.04	3.62	26.3
All treatments	340	40.4	7.3	28	3.63	3.99	21.4

^a USH = Ultrasonic sward height; ^b FM = forage mass yield; ^c WG Mixture = White clover-grass mixture; ^d RG Mixture = Red clover-grass mixture

The interpolated map (Fig. 5 – 5 B and D) illustrates the height variation within plots and rather extensive height gradients within the interspaces and at the edges of the experimental area can be seen, in contrast to the sharp edges of the plots as observed in the field (Fig. 5 – 5 D). Clearly, the increased differences in height among plots and interspaces results in an increased deviation from the stubble height of 5 cm (Fig. 5 - 6) even when close to the centre of interspaces.

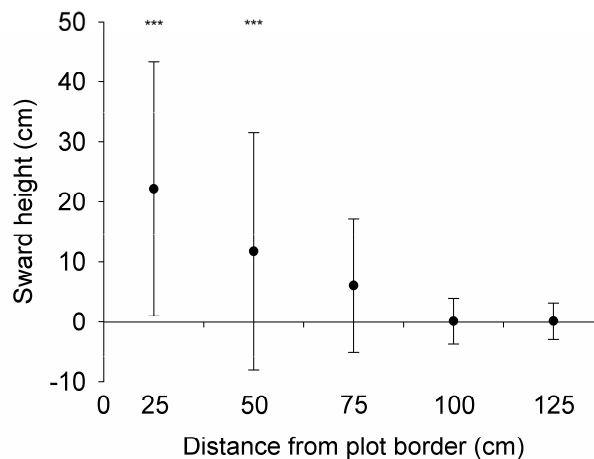


Figure 5 - 6: Sward height deviations from mean stubble height of cut interspace areas within 25cm distance classes to plot borders (● Mean, □ SE). Calculations were based on all 139 interspace samples. Significant differences to stubble height levels are marked (*** $p \leq 0.001$).

Sward-specific regression functions from the static experiment (Tab. 5 - 3) were used to predict the forage mass at each point of height measurement during transit and a mean value for

each plot was subsequently calculated. In the majority of cases, forage mass was over-estimated with lower deviations in high-yielding plots (Tab. 5 - 5). To analyze the effect of different point sampling densities on the accuracy of yield prediction, the sampling density was reduced by a stepwise deletion of points and the mean residual among the density levels was compared. As edge effects may occur within a 50-cm distance of the plot border, sampling locations were reduced to the central 4 m track within each plot. The resulting initial point density ranged between 7 and 19 per plot (total mean = 10.2) with an overall average distance of 0.39 m among sampling locations (Tab. 5 - 6). The reduction of sampling points to a half, a third, and finally a quarter of the initial numbers, led to an increase in the mean point distance to 0.82, 1.27, and 1.81 m, respectively. Mean residuals of predicted forage mass were lowest in pure grass swards (0.89 t DM ha⁻¹; n = 20), slightly higher in white clover grass-mixtures (1.07 t ha⁻¹; n = 4), and significantly higher in red clover grass-mixtures (1.67 t ha⁻¹; n = 4). While halving the number of sampling points did not change mean residue significantly, a further decrease in the number of sampling points with a distance of more than 1 m between them resulted in a strong increase in mean residues.

Table 5 - 6: Effect of reduced ultrasonic sward height sampling locations on the estimation accuracy of forage mass yield

Sward type	N ^b	Initial sampling density of USH			Fraction of ÚSH ^a sampling density				
		D ^c	R ^d	Half		Third		Quarter	
				D	R	D	R	D	R
Grass	20	0.38	0.893	0.80	0.941	1.23	2.821	1.78	2.786
WG ^e Mixture	4	0.47	1.066	1.00	1.174	1.60	3.512	2.29	3.701
RG ^f Mixture	4	0.39	1.672	0.80	1.560	1.23	3.415	1.60	3.805
All	28	0.39	1.029	0.82	1.062	1.27	3.143	1.81	3.062

^a USH = Ultrasonic sward height (cm); ^b N = Number of forage mass reference samples (one sample per treatment plot); ^c D = Mean distance among sampling locations (cm); ^d R = Mean residue of predicted forage mass (t ha⁻¹); ^e WG Mixture = White clover-grass mixture; ^f RG Mixture = Red clover-grass mixture

5.4 Discussion

5.4.1 Shape and variation of height-forage mass relationship

The observed variation in the relationship between USH and DMY has several causes. The sensor technique is itself a major contributor to the variation reported. If a group of objects reflects sonic pulses within the measurement cone, the distance will be calculated to the nearest object that produces a reliable (mirror-like) sonic reflection (Pepperl and Fuchs, 2010; Scotford and Miller, 2004); this usually implies the measurement of leaves, flowers, or seed heads at the top of sward canopies. However, the precision of measurement is affected by signal deflection depending on leaf angle, sward canopy structure, and movements of plant organs, which may give rise to distance values based on subordinate layers instead of top objects (Hutchings, 1991, 1992).

It is well known that forage mass density in upper layers of mixed swards is lower than in bottom layers (Sanderson et al., 2006; Laidlaw and Withers, 1998). Saturation effects in the height-forage mass function, as found in pure grass swards, indicate that forage mass density decreased disproportionately in the upper layers. Primarily, this phenomenon is observed in samples during delayed cutting dates in spring, when advanced phenological stages of grass with elongated stems, inflorescences, and relatively little leafy material, are seen, resulting in low bulk densities. Though the grass is overgrown by non-grass species (e. g. white clover at later stages) the saturation effect still persists in a weakened form. If samples at the most mature stages were excluded from the analysis, all functions were found to be linear. This linear trend was also reported by Hutchings et al. (1990) and Trott et al. (2002), who investigated forage mass-height relationship on permanent grassland with cutting systems. The latter achieved an R^2 value of 0.87 in the prediction of sward height with a plate-meter (34 cm $\times$ 34 cm, 456.2 g) over a yield range of 0.23–4.01 t DM ha⁻¹.

Although pure grass swards had limiting characteristics for prediction at late cutting dates, they performed best in the height–forage mass relationship ($R^2 = 0.843$) implying less variation in stratum composition between samples as compared to pure white clover swards ($R^2 = 0.598$). The mixture of both species resulted in the highest R^2 -value ($R^2 = 0.855$), demonstrating the complementary character of both growth types. While the same trend is present in red-clover grass, the opposite can be observed in lucerne.

Sward type, weed proportion, and growth period significantly impacted forage mass predictions. The sward type can easily be determined by farmers and appropriate regression functions can be chosen prior to measurements. However, continuous assessment of the proportion and composition of weeds using on-the-go sensors is difficult. At a high weed proportion, lower forage masses were associated with a given sward height than at a low proportion of weed. This indicates that weeds developed faster and gained greater heights than the lower and dense growing forage crops (Fig. 5 - 4), which was obvious even at low weed contributions of 5.23% of DM (i.e. the mean weed proportion in this experiment). Remarkably, the impact of weed proportion on forage mass declined over the range of values, indicating that the effect of additional weed dissipated once an initial population was established. The effect of growth period on yield originates from the varying phenological development of species among the different growths over the growing season, which in turn affects sward height. Because the pattern of seasonal growth conditions is complex and undirected, a clear assignment of growth periods to sward development is hardly feasible in practice. Its effect was not considered in more detail because of its relatively low explanatory power for the model.

5.4.2 Continuous Measurements

Data logging varied along transects and showed partly deviations from intended equidistant sampling. This can be attributed to (i) changes in speed of forward motion, which gives rise to small scale variations and (ii) unavailability of GPS-positions, accounting for position outage in large distance intervals. Because GPS-positions may also be affected in practical applications, it is necessary to take into account comparable logging situations under practical field conditions.

Interspace areas are causing sharp thresholds between stubbles with no harvestable biomass and different yield levels of the plot treatments. Under practical conditions these abrupt changes may occur at the field edges and at transitions with previously cut areas. The sensor response did not represent these changes accurately rather it exhibited a delay up to a distance of 75 cm from plot borders. This diffusion characteristic may be explained by the radius of the measurement cone which can reach 25 cm with a vertical distance of 1 m between the sensor and the sward surface (Pepperl and Fuchs, 2010) and thus record objects actually lying outside the sensor centre. In addition, plant parts (e.g. long leaves) may extend out into the interspace and hence may be detected as objects belonging to the cut area. However, this ef-

fect is limited to higher swards and dependant on the bending angle and elasticity of relevant species. Both of these sources of error account for USH deviations which are significant within a 50 cm distance around plot borders. Compared to response delays of 9 m or more documented for combine harvesters (Arslan and Colvin, 2002; Panten et al. 2002), the diffusion observed in this study is significantly lower. This suggests that, direct sensing methods may achieve lower reaction times than mass flow sensors mounted inside harvesters. Such systematic errors contribute to a multitude of error sources in yield data survey.

As the ultrasonic sensor predominantly detects the top height of sward objects, the observed diffusion effect may lead to over-estimations of forage mass, in particular if swards exhibit rapid forage mass changes along the direction of motion. One cause of the overestimation may be the higher frequency of elongated rye grass stems. In the calibration dataset forage masses are associated mainly with the development of plant phenology assessed at different cutting dates within one growth period; however, grass plants in the on-the-go application displayed an advanced phenological development of BBCH 50 – 70, implying that height levels are less associated with expected forage masses based on the calibration dataset. The increase of observed overestimations along decreasing yield levels would seem to confirm this assumption. In contrast to the overestimations reported for pure grass and white clover-grass, the red clover plots were underestimated. This effect is due to higher herbage biomass density at lower layers and is presumably associated with a greater proportion of densely growing clover compared to the calibration dataset.

Continuous measurements of plant canopy structures require reliable measurements at GPS-locations logged along the direction of motion in the field. Small-scale spatial changes in canopy structure seem to be represented very accurately by a triangulation laser sensor. Ehlert et al. (2008) suggest a high repetition rate of measurements for sophisticated sensing and recommend a frequency of greater than 1 kHz to detect single elements on the crop surface at a speed of e.g. 3 m s^{-1} . While data from unidirectional sensors can easily be logged together with GPS-locations, the mobile use of 3D-laser scanners as applied for the static detection of forage mass in pasture plots at high accuracy (Radtke et al, 2010) appears to be difficult, because interactions between time delay for scene acquisition, speed of motion and spatial overlaps might require sophisticated data processing procedures. In contrast, ultrasonic sensors cover a wide response area and hence are not able to precisely reflect sward surfaces. However, because they are relatively inexpensive, it may be feasible to set up a dense array of sen-

sors (on a boom in front of a mower) thus facilitating data collection at a high lateral resolution. Improvements in forage mass prediction may be possible if ultrasonic sensing is combined with radiometer measurements. Such an innovation has been demonstrated by Scotford and Miller (2004) wherein they describe the assessment of crop characteristics in winter wheat using a combination of ultrasonic crop height and spectral measurements.

5.5 Conclusions

The present study was conducted to evaluate ultrasonic distance measurements as a tool for predicting forage mass in grassland. From the results of static and on-the-go experiments on pure swards and binary mixtures of legumes and perennial ryegrass, the following conclusions can be drawn:

- (i) Prediction of forage mass based on ultrasonic sward heights is possible with acceptable accuracies ($R^2 = 0.60\text{--}0.86$).
- (ii) Forage mass-height relationships are affected by sward type, weed abundance, and growth periods.
- (iii) Sward height measurements on-the-go led to significant errors at transitions of abrupt forage mass changes.
- (iv) Overestimation of forage mass predominantly occurs in mature swards having low forage mass.

These preliminary findings are encouraging and show promise with regards to yield mapping in forage swards. However, the limitations of estimating forage mass based solely on ultrasonic sward heights are clear. Thus, to improve the accuracy of this technique, further modifications are necessary e.g. combining ultrasonic sensors with other technical methods that can measure forage mass density.

Acknowledgement

The authors would like to thank Sonja Biewer, Maike Himstedt, and Andrea Gerke for carrying out the practical field and lab work.

5.6 References

- Arslan, S., Colvin, T.S., 2002: An Evaluation of the Response of Yield Monitors and Combines to Varying Yields. *Precision Agriculture* 3, 107-122.
- Auernhammer, H., Demmel, M., Pirro, P.J.M., 1995: Yield measurement on self propelled forage harvesters. ASAE Paper No. 95 1757, ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- Basso, B., Bertocco, M., Sartori, L., Martin, E.C., 2007: Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize–wheat–soybean rotation. *European Journal of Agronomy* 26, 82-91.
- Berry, P.M., Sylvester-Bradley, R., Philipps, L., Hatch, D.J., Cuttle, S.P., Rayns, F.W., Gosling, P., 2002: Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? *Soil Use and Management* 18, 248-255.
- Biewer, S., Fricke, T., Wachendorf, M., 2009a: Determination of dry matter yield from legume-grass swards by field spectroscopy. *Crop Science* 49, 1927–1936.
- Biewer, S., Fricke, T., Wachendorf, M., 2009b. Determination of forage quality in legume–grass mixtures using field spectroscopy. *Crop Science* 49, 1917–1926.
- Blackmore, S. 2003 The role of yield maps in Precision Farming. PhD-Thesis, Cranfield University, 170 pp.
- Burke, D., 1998: Manual SPANS 7.1 Module Prospector, (Ed.: Evans, A.), TYDAC Research Inc., Nepean, Ontario, Canada, PCI Geomatics Group.
- Connolly, J., Wachendorf, M., 2001. Developing multisite dynamic models of mixed species plant communities. *Annals of Botany* 88, 703-712.
- Doerge, T., 1996: Weigh wagon vs. yield monitor comparison. *Crop Insights* 7(17), 1–5.
- Ebdon, D., 1992: SPANS – A quadtree-based GIS. *Computers and Geosciences* 18 (4), 471-475.
- Ehlert, D., Hammen, V., Adamek, R., 2003: On-line sensor pendulum-meter for determination of plant mass. *Precision Agriculture* 4, 139-148.
- Ehlert, D., Dammer, K.-H., 2006: Widescale testing of the crop-meter for site-specific farming. *Precision Agriculture* 7, 101-115.
- Ehlert, D., Horn, H.-J., Adamek, R., 2008: Measuring crop biomass density by laser triangulation. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 117-125.
- Farmworks, 2010: http://www.farmworkspfs.co.nz/cms/docs/rapid_pasture_meter.pdf. Accessed February 8th 2011.
- Godwin, R.J., Wheeler, P.N., O'Dogherty, M.J., Watt, C.D., Richards, T., 1999: Cumulative mass determination for yield maps of non-grain crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 23 (2), 85-101.

- Hauptmann, P., Lucklum, R., Püttmer, A., Henning, B., 1998: Ultrasonic sensors for process monitoring and chemical analysis: state-of-the-art and trends. *Sensors and Actuators A67*, 32-48.
- Henning, B., Prange, S., Dierks, K., Daur, P.-C., 2000: Ultrasonic sensor properties characterized by a PC-controlled scanning measuring system. *Ultrasonics* 38, 852-856.
- Hutchings, N.J., Phillips, A.H., Dobson, R.C., 1990: An ultrasonic rangefinder for measuring the undisturbed surface height of continuously grazed grass swards. *Grass and Forage Science* 45 (2), 119-127.
- Hutchings, N.J. 1991: Spatial heterogeneity and other sources of variance in sward height as measured by the sonic and HFRO sward sticks. *Grass and Forage Science* 46 (3), 277-282.
- Hutchings, N.J. 1992: Factors affecting sonic sward stick measurements: the effect of different leaf characteristics and the area of sward sampled. *Grass and Forage Science* 47 (2), 153-160.
- Jabro, J.D., Stevens, W.B., Evans, R.G., Iversen, W.M., 2010: Spatial variability and correlation of selected soil properties in the AP horizon of a CRP grassland. *Applied Engineering in Agriculture* 26 (3), 419-428.
- Kayser, M., Müller, J. Isselstein, J., 2010: Nitrogen management in organic farming: comparison of crop rotation residual effects on yields, N leaching and soil conditions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 87, 21-31.
- Kumhála F., Kroulík M., Prošek V, 2007: Development and evaluation of forage yield measure sensors in a mowing-conditioning machine. *Computers and Electronics in Agriculture* 58, 154-163.
- Laidlaw, A.S., Withers, J.A., 1998: Changes in contribution of white clover to canopy structure in perennial ryegrass/white clover swards in response to N fertilizer. *Grass and Forage Science* 53 (1), 287-291.
- Lee, W.S., Alchanatis, V., Yang, C., Hirafuji, M., Moshou, D., Li, C., 2010: Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture* 74, 2-33.
- Marcotte, D., Savoie, P., Martel, H., Thériault, R., 1999: Precision agriculture for hay and forage crops: A review of sensors and potential applications. ASAE Paper No. 991049, ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- Martel, H., Savoie, P., 2000: Sensors to measure mass-flow-rate through a forage harvester. *Canadian Agricultural Engineering* 42 (3), 123-129.
- McCormick, S., Jordan, C., Bailey, J.S., 2009: Within and between-field spatial variation in soil phosphorus in permanent grassland. *Precision Agriculture* 10, 262-276.
- Meier, U., 2001: Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. 2nd ed. Federal Biological Research Center for Agriculture and Forestry, Braunschweig, Germany.

- Missotten, B., Strubbe, G., De Baerdemaeker, J., 1996: Accuracy of grain and straw yield mapping. In: Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E. (Eds.) Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, 713–722.
- Missotten, B., Broos, B., Strubbe, G., De Baerdemaeker, J., 1997: A yield sensor for forage harvesters. In: Stafford, J.V. (Ed.), Precision Agriculture. Proceedings of First European Conference on Precision Agriculture, 529–536.
- Murphy, W.M., Silman, J.P., Barreto A.D.M., 1995: A comparison of quadrat, capacitance meter, HFRO sward stick, and rising plate for estimating herbage mass in a smooth-stalked, meadow grass-dominant white clover sward. Grass and Forage Science 50 (4), 452-455.
- Nelder, J.A., 1994: The statistics of linear models: Back to the basics. Statistics and Computing 4, 221-234.
- Nelder, J.A., Lane, P.W., 1995: The computer analysis of factorial experiments. In memoriam: Frank Yates. American Statistician 49, 382-385.
- Panten, K., Haneklaus, S., Schnug, E., 2002: Spatial accuracy of online mapping. Landbau-forschung Völkenrode 52 (4), 205-209.
- Park, J., Je, Y., Lee, H., Moon, W., 2010: Design of an ultrasonic sensor for measuring distance and detecting obstacles. Ultrasonics 50, 340-346.
- Pepperl and Fuchs, 2010: Sensors for the factory automation - Overview Standard Sensors. Online Document: http://files.pepperl-fuchs.com/selector_files/navi/productInfo/doct/tdoct0989a_eng.pdf. Accessed 19th Jan. 2010
- Radtke, P.J., Boland, H.T., Scaglia, G., 2010: An evaluation of overhead laser scanning to estimate herbage removals in pasture quadrats. Agricultural and Forest Meteorology 150 (12), 1523-1528.
- Reusch, S., 2009: Use of ultrasonic transducers for on-line biomass estimation in winter wheat. In proceedings Precision agriculture '09, Eds. E.J. van Henten, D. Goense and C. Lokhorst, Wageningen Academic Publishers, 169-175.
- Reyniers, M., De Baerdemaeker, J., 2005: Comparison of two filtering methods to improve yield data accuracy. Transactions of the ASAE 48 (3), 909-916.
- Robinson, T. P., Metternicht, G., 2005: Comparing the performance of techniques to improve the quality of yield maps. Agricultural Systems 85 (1), 19-41.
- Sanderson, M.A., Rotz, C.A., Fultz, S.W., Rayburn, E.B., 2001: Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter and pasture ruler. Agronomy Journal 93, 1281-1286.
- Sanderson, M.A., Soder, K.J., Brzezinski, N., Taube, F., Klement, K., Muller, L.D., Wachen-dorf, M., 2006: Sward structure of simple and complex mixtures of temperate forages. Agronomy Journal 98, 238-244.

- Schellberg, J., Hill, M.J., Gerhards, R., Rothmund, M., Braun, M., 2008: Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy* 29 (2-3), 59-71.
- Schut, A.G.T., Ketelaars J.J.M.H., 2003: Assessment of seasonal dry-matter yield and quality of grass swards with imaging spectroscopy. *Grass and Forage Science* 58 (4), 385-396.
- Scotford, I.M., Miller, P.C.H., 2004: Combination of spectral reflectance and ultrasonic sensing to monitor the growth of winter wheat. *Biosystems Engineering* 87 (1), 27-38.
- Stafford, J.V., Ambler, B., Lark, R.M., Catt, J., 1996: Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 14, 101-119.
- Trott, H., Ingwersen, B., Wachendorf, M., Taube, F., 2002: Estimation of Dry Matter Yield on Permanent Grassland by Means of Height Assessment (in German). *German Journal of Agronomy* 6 (2), 78-83.
- Watson, C.A., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L.R., Rayns, F.W., 2002: Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18, 239-247.
- Wild, K., Auernhammer, H., 1999: A weighing system for local yield monitoring of forage crops in round balers. *Computers and Electronics in Agriculture* 23 (2), 119-132.

6 Combining ultrasonic sward height and spectral signatures to assess the biomass of legume-grass mixtures

Abstract

Yield measurements in binary mixtures of white clover, red clover and lucerne with perennial ryegrass as well as in pure swards have been investigated measuring ultrasonic distances and spectral-radiometric reflections. To improve biomass (BM) predictions on exclusive ultrasonic sward height (USH) by complementation of vegetation indices (VIs), a wide range of existing and hyperspectral VIs have been evaluated in combination with USH. While red/NIR-based VIs performed suboptimal, indices representing bands related to water absorption or to the NIR-shoulder showed better predictions with maxima in common swards (i.e. a dataset including all sward types) of $R^2 = 0.35$ for existing VIs and $R^2 = 0.42$ for sward-specific selected 1nm bands using the normalized spectral vegetation index (NDSI). The combination of narrow band NDSI with USH improved R^2 -values from 0.75 (USH only) to 0.83 in common swards and from 0.80 – 0.82 to 0.88 - 0.90, respectively, in species-specific mixtures. Both in exclusive use and in combination with USH, spectral water absorption bands performed best in prediction of BM. Broadening of bands up to 100 nm did only marginally reduce prediction accuracies. Similarly, the species-specific development of regression equations for swards based on bands selected for common swards also showed only a slight reduction of R^2 -values in mixtures compared to species-specific selections. These findings have important implications for the development of sensors with fixed spectral broad band configurations. The integration of a spectral sensor could adjust biomass prediction based on USH. If biomass and crop height deviates from each other during crop growth, e.g. through the occurrence of inflorescences, VIs act complementarily and avoid overestimation by the exclusive use of USH. Thus, the reflection characteristic of leaf mass indicated by VIs configured on water absorption bands can contribute positively to improved predictions of BM, based primarily on USH and provide a configuration of low-cost sensors for legume-grass mixtures in a wide range of yield levels. Further investigations are necessary to analyze USH combinations with hyperspectral ratio-indices and the integration of more than two wavelengths e.g. to disentangle pigment and BM related LAI reflections in the VIS/NIR.

Keywords: biomass, legume-gras mixtures, ultrasonic, vegetation index, precision farming

6.1 Introduction

The assessment of field internal yield variations is a key function in precision farming management (Blackmore, 2003; Basso et al., 2007, Stafford et al., 2000). Yield maps are a helpful tool in the management of crops (Larschied et al., 1997) to increase benefits by improving yield and/or by reducing inputs and minimize environmental impacts (Robert, 2002). In the advent of precision farming, yield mapping was developed first for grain crops on combine harvesters and gradually extended to further crops (Godwin et al., 1999; Reyns et al., 2002). Less attention has been paid on crops for farm based forage supply, although it contributes essentially to farm economy. Especially on organic farms legume-grass mixtures are of particular importance for high quality forage production and preceding crop effects accounting for up to 30 % of the crop rotation (Frame, 1992; Ledgard and Steel, 1992; Wachendorf et al., 2004). In this context, information of within-field yield variation can help to calculate forage availability, identify deficiencies of soil-borne growth condition and to improve fertilization management by variable rate application (Heege et al., 2008, Tremblay et al., 2009) of the current and following crop. Furthermore the assessment of yield levels and the involved creation of yield maps serve to monitor the cumulative success of previous farming measures together with spatially variable nutrient supply and moisture availability in the frame of seasonal weather effects (Stafford et al., 1996; Pinter et al., 2003).

The effectiveness of yield mapping is primarily determined by the specification of the sensor system (Schellberg, 2008). One option for yield data acquisition is remote sensing (Schino et al, 2003; Numata et al, 2007; Biewer et al., 2009a). Mounted on vehicles appropriate sensors can enable an online assessment of functional crop properties while standard agricultural measures are conducted (Reusch et al., 2005; Heege et al., 2008; Robertson et al., 2012). Its non-destructive survey character involves the repeatability of measurements as well as a flexible installation independent of mass flows, which is a common implementation on forage harvesters (Schellberg et al., 2008). Different non-destructive remote sensing techniques have been evaluated in grassland swards in the past decades. Particularly spectral-radiometric measurements were of great interest due to their capability to assess a huge range of canopy properties (e.g. Baret et al., 1987; Jaquemoud et al., 1996; Elvidge and Chen, 1995; Broge and Leblanc, 2000). For the accuracy of calibrations the number of wavelengths is of importance. A hyperspectral range between 350 and 2500 nm provides the potential for a high level of accuracy (Starks et al, 2004; Biewer et al., 2009a). A reduction of the wavelength number by

either the limitation of the hyperspectral range or a selection of few wavelengths for vegetation indices (VI) caused a loss of prediction quality (Biewer et al., 2009a). However, other studies pointed out, that plant characteristics can be estimated at high accuracy level also with few specific wavebands (Blackburn and Steel, 1999; Thenkabail et al., 2004, Chen et al., 2009, Vescovo et al., 2011). Because hyperspectral sensors are expensive and remote sensing tools shall be cost-effective (Everitt et al., 1991) the evaluation of qualified low-cost sensors configured for e.g. the calculation of sward adapted VIs are of interest for the prediction of biomass yield.

Existing VIs usually represent the relationship between the reflected radiations in the red- and NIR-band as ratio, difference or other combination, assessing canopy biophysical properties like leaf area index, vegetation fraction, chlorophyll portion and green biomass (Asrar et al., 1984, Sellers, 1985; Jones et al., 2007; Blackburn and Steel, 1999). Predictions of grassland biomass by vegetation indices have been subjected matter in numerous studies (Weiser et al., 1986, Todd et al., 1998; Mutanga and Skidmore, 2004; Boschetti et al., 2007, Numata et al., 2007, Chen et al., 2009, Vescovo et al., 2011, Flynn et al., 2008, Kawamura et al., 2011). The most common index used is the normalized difference vegetation index (NDVI) calculated as $(R_{\text{nir}} - R_{\text{red}}) / (R_{\text{nir}} + R_{\text{red}})$ (Rouse et al., 1974). Traditionally the use of broad bands (> 10 nm) was common, linked to the development of satellite sensors e.g. Landsat Thematic Mapper (Walter-Shea et al., 1997; Price et al., 2002; Wylie et al., 2002). Modifications in the development of indices were e.g. motivated by reducing saturation effects or influences of soil background scattering (Elvidge and Lyon, 1985; Huete et al. 1985; Bannari, et al., 1995; Broge and Leblanc, 2000; Mutanga and Skidmore, 2004; Chen et al. 2009). Improvements have been made by the choice of distinct narrow bands (Blackburn 1998, Thenkabail et al. 2000, Gong et al. 2003, Mutanga and Skidmore 2004). Using the NDVI-formula with reflectance values of selected wavelengths $(R_{\text{band2}} - R_{\text{band1}}) / (R_{\text{band2}} + R_{\text{band1}})$ defined as normalized difference spectral index (NDSI) by Inoue et al., (2008) was used to estimate LAI, biomass and chlorophyll content (Ferwerda et al., 2005, Hansen and Schjoerring 2003), as well as pasture growth rate, pasture P and K (Kawamura, et al., 2011). Saturation of biomass predictions is a common problem of VIs when leaf area index (LAI) values exceed 2.0 – 2.5 (Serrano et al., 2000; Heege et al., 2008) which is frequently exceeded in legume-grass mixtures (Joggi et al., 1983, Virkajärvi, 2003). The use of NDSI calculated on selected narrow bands, can solve the saturation problem in biomass predictions, common for many VIs (Mutanga and Skidmore, 2004; Chen et al., 2009).

Other less extensively investigated options to assess grassland biomass with ground-based remote sensors refer to the correlation between sward height and volume. Ehlert et al. (2008) used laser triangulation for height measurements in botanically undefined grassland swards estimating biomasses with high coefficients of determination between 0.88 and 0.94. The third dimension was integrated by Radtke et al. (2010) using a 3D-laser scanner to estimate biomass from volume changes caused by simulated grazing in tall fescue and lucerne plots attaining correlations of $R^2 = 0.96$ in fescue and $R^2 = 0.97$ in lucerne. Less accurate predictions were achieved measuring sward height with an ultrasonic distance sensor in pure and binary legume-grass mixtures and predicting biomass at a fair to good level with R^2 values between 0.75 and 0.82 depending on sward-specific calibrations (Fricke et al., 2011). (Hereafter, crop height measured with an ultrasonic sensor is referred to ultrasonic sward height USH). In fact, laser sensors seem to be more accurate than ultrasonic distance sensors because of a more precise beam of only few mm in diameter, but ultrasonic sensors are more user-friendly than laser sensors which need special software for an accurate information assessment and are more expensive (Gebbers et al., 2011, Llorens et al., 2011).

In the course of biomass assessment most of the non-destructive remote sensing systems have been evaluated solely, using only one specific sensing technique alone and facing constraints in prediction accuracy. Especially in grassland vegetation it is a challenge to adapt remote sensing measures due to a huge variation in species composition and phenological development (Schellberg et al., 2008). Particularly simple and low cost equipment like ultrasonic distance sensors and 2-band-spectrometers are sensitive to sward-borne variation. Biomass predictions by ultrasonic sward height are influenced by weeds or phenological development like single high growing individuals of weeds or inflorescences which can cause an unbalanced sward density along the height gradient (Fricke et al., 2011). Biomass predictions using VIs are affected by background signals (Elvidge and Lyon, 1985, Huete et al., 1985) or canopy reflectance in the VIS/NIR region is linked to both LAI and biochemical properties like chlorophyll content (Goel, 1988, Jacquemoud et al., 2000). By reason of these complex interactions one option could be a combination of sensors which can complement one another (Lan et al., 2009). Even though a combination of sensors haven been suggested for the assessment of different crop or soil properties (Corwin and Plant, 2005, Lee et al., 2010), only few studies have investigated such strategies. Mahmood et al (2012) used a VIS–NIR spectrometer and an EM38 sensor to assess multiple soil properties as soil texture, total carbon, and total nitrogen using multiple regressions methods and principle component analysis. Huang et al. (2007)

addressed the spatial dimension of sensor integration and developed a method of multi-sensor data fusion with a special focus on extrinsic calibration of 3D-sensors for which position and orientation of the sensors needs to be matched. In crop production Scotford and Miller (2004) used ultrasonic distance measurements in combination with a 2-band spectrometer to assess NDVI in addition to crop height for a better control of crop growth, density and senescence of wheat. Jones et al. (2004) analysed a combination of ultrasonic distance measurements and NDVI and found improvements of R^2 -values compared to exclusive NDVI for corn and snap bean between 0.05 – 0.1 R^2 -scores. To our knowledge, no investigations were performed to estimate BM in legume-grass mixtures with a combination of USH and VIs. Hence, the purpose of the present study is to analyze the potential of ultrasonic distance measurements in combination with spectral-radiometric VIs to compare prediction accuracies to an exclusive use of either sensor. In this context the following main questions are addressed:

- Does a combination of ultrasonic sward height with existing or sward-specific hyperspectral vegetation indices improve prediction in contrast to exclusive sensing data?
- How does bandwidth using a common NDSI configuration affect prediction in a sward specific calibration?
- What is the potential of a sward-specific wavelength selection for a configuration of the NDSI and which spectral regions are of interest for a reliable sensor configuration?

6.2 Materials and methods

6.2.1 Experimental design and management regime

The study is based on a grassland field experiment conducted during 2005 and 2006 on the experimental farm Neu Eichenberg of the University of Kassel (51°23' N, 9°54' E, 227 m above sea level; soil type: sandy loam; soil pH-value: 6.4; average annual rainfall: 550mm; annual mean temperature: 9.9°C). Sward plots of size 29 m² plot⁻¹ were composed of binary mixtures of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L., var. Fenema) with red clover (*Trifolium pratense* L., var. Pirat), white clover (*T. repens* L., var. Klondike) or lucerne (*Medicago sativa* L., var. Ameristand), respectively, as well as pure swards of each species. To increase growth variation in the year of sward establishment (2005), additional pure grass swards were set up and fertilized with five N treatments: 0, 40, 80, 120, 160 kg N ha⁻¹.

The cutting regime was configured with one main cut in the year of sward establishment 2005 and three main cuts in 2006. Within these four growth periods measurements of USH and

spectral reflectance as well as the sampling of reference biomass were taken biweekly in 2005 (n=74) and weekly in 2006 (n=220) at 17 dates between 5th September 2005 and 25th September 2006. Plant development stages ranged from leaf development to heading (ryegrass), flowering (red clover) or development of fruits (white clover), respectively. Alfalfa swards were damaged by frost in winter 2005/2006 and due to a limited availability of intact swards, sampling was defined to the main cutting dates. Here, the range of plant development at sampling dates was reduced from booting to flowering. Further details of the experimental design are given in Biewer et al. (2009).

6.2.2 Sensor measurements

In the course of sampling intervals, sensor measurements took place prior to reference data assessment. Due to unstable weather conditions along the growth periods not all plot could be measured with both sensors at the same time. Hence, for this study only those samples were selected, where both sensor measurements could be properly assessed in order to simulate a combined sensor configuration as it would be used in practical applications.

6.2.3 Hyperspectral reflectance

Spectral measurements were conducted as the first step in the course of sensor measurements one day before sampling on 0.25 m² subplots used for reference data acquisition. Canopy reflectance was assessed using a Spectrometer of type FieldSpec Pro JR (Analytical Spectral Devices, Boulder, CO) measuring irradiance from swards in the range from 350 to 2500 nm with a spectral resolution of 3 nm (350–1000 nm) and 30 nm (1000–2500 nm). Measurements were subsequently interpolated by the Analytical Spectral Devices (ASD) software RS3 to produce readings at an interval of 1 nm. The sensor optic had a field of view of 25°, which was stabilized on a tripod at a height of 1.07 m above soil. Readings were taken on cloudless days with stable lighting conditions between 10:00 and 14:00 h Central European Time. Depending on light conditions, spectral calibrations were performed at least after every sixth measurement using a Spectralon panel (Labsphere, Inc., North Sutton, NH). Each spectrum was composed of four measurements representing a total of 40 replicated scans.

6.2.4 Ultrasonic sward height measurements

Subsequently to the assessment of hyperspectral canopy reflectance, measurements of USH were conducted with an ultrasonic distance sensor of type UC 2000-30GM-IUR2-V15 (Pepperl and Fuchs, Mannheim, Germany). The sensor, a one-headed system with one sonic transducer (frequency 180 kHz), acts both as transmitter and receiver. The sensing distance ranges from 80 to 2000 mm within a sound cone formed by an opening angle of about 12° (Pepperl and Fuchs, 2010). A factory preset response delay of 195 msec was used resulting in a measurement frequency of about 5 Hz. Errors in measurements due to temperature are corrected by an integrated thermometer. The ultrasonic echo was converted into an output voltage linear to the measured distance and subsequently transformed by an A/D converter into numerical values, logged on a personal computer and finally converted into sward height values using the linear regression EQ 1. The function was derived from previous ultrasonic calibration measurements perpendicular to a flat linoleum surface at 10-cm increments within a distance range of 20 to 120 cm:

$$y = a - 159.03 + 0.08756x \quad (\text{EQ 1}) \quad \text{Fricke et al. (2011)}$$

Where,

a = mount height of the ultrasonic sensor above soil surface (cm),

x = values from AD/converter (proportional to distance related voltage output),

and y = sward height (cm)

Ultrasonic distance measurements took place on the 0.25 m² subplots used for biomass sampling. A four-legged frame was placed above the subplot with the legs placed outside the sample area. A panel with 5 holes was mounted at 1 or 1.5 m on the frame depending on sward height, to maintain a distance of at least 20 cm between the top plant organ and the sensor. At each sample site, five measurements were recorded with the ultrasonic sensors placed at five positions on the frame. Readings were taken at the centre of the sample quadrat and at four diagonal positions in an equidistant radius of 14.1 cm. The measurement positions assured the placement of an undisturbed measurement cone within the four legs. The five spatial replications ensured the calculation of a representative mean value and the expression of surface heterogeneity, respectively. The logging of each measurement was triggered manually by the user. The procedure and data references of ultrasonic sward height measurements are in

line with the study published by Fricke et al. (2011) excepting 15 samples which could not be measured with both sensors due to weather limitations.

6.2.5 Sampling of reference data

Biomass yield was determined 1 d after ultrasonic and spectral measurements. Samples for reference data were cut by clipping at a height of 5 cm above the soil surface on the same subplot area of 0.25 m² used for sensor measurements. Approximately 500 g of sample (fresh weight) was dried at 65°C for 48 h to determine the DM yield.

6.2.6 Processing of spectral data

Prior to spectral analysis, spectra were smoothed using 11 convoluting integers and a polynomial of degree five (Savitzky and Golay, 1964, Erasmi and Dobers, 2004). Three wavelengths regions (1351–1439 nm, 1791–2019 nm, and 2351–2500 nm) were visually identified and omitted due to instrument noise, stray light effects or high atmospheric water absorption, remaining 1877 1nm spectral channels in the range of 355 to 2350 nm for the selection of wavelengths to calculate common narrow and broad band vegetation indices as well as for sward-specific wavelength selections fitting best in a regressive prediction of biomass.

6.2.7 Vegetation indices

To evaluate the potential of existing and hyperspectral VIs in combination with USH, a set of VIs recently applied to grassland swards was selected for this study (Biewer et al., 2009a; Kawamura et al., 2011; Vescovo et al., 2011). This selection (Table 6 - 1) comprised common red/NIR-based (SR, NDVI, RDVI, MSR, SAVI, MSAVI) and specific narrow band VIs (PRI, NPQI, GRI, WI, SIPI, SWWI). A set of broadband VIs (SR, EVI, NDVI and REIP) was included, which were calculated according to the spectral bands of Landsat TM Mapper. These VIs have been recently used in legume-grass mixtures by Biewer et al. (2009) of which the present data set is a subset with 294 from the original 459 samples and which were calculated from broad bands with spectral ranges adapted to the Landsat Thematic Mapper (Table 6 - 1). The published results of the original dataset is an important reference to evaluate improvements by using the same VIs as a complement to exclusive USH measurements in a comparable sward type. Finally the infrared slope index (ISI), normalized infrared difference index (NIDI) and normalized difference structural index (NDSI), recently published by Vescovo et al. (2011), were included in the set of VIs. These three indices were located on the NIR-infrared shoulder of hyperspectral data and are based on simulated spectral broad bands of

Chris Proba (mode 5) with H2 $R_{\text{Red}} = 656\text{-}666$ nm, H18 = 745-752 nm and H25 $R_{\text{NIR}} = 863\text{-}881\text{nm}$. The normalized difference spectral index (NDSI) (Inoue et al., 2008) was calculated along the available hyperspectral range using the NDVI formula with arbitrary band combinations according to $(R_{\text{band2}} - R_{\text{band1}})/(R_{\text{band2}} + R_{\text{band1}})$, where Band2 > Band1. The NDSI produced promising results in the assessment of biomass, LAI, chlorophyll content, phosphorus or potassium (Thenkabail et al., 2000; Hansen and Schjoerring 2003; Ferwerda et al., 2005, Kawamura et al., 2011). To avoid confusion with the normalized difference spectral index (NDSI), as defined by Inoue et al. (2008), the NDSI given by Vescovo et al. (2011) hereafter will be referred to as $\text{NDSI}_{\text{vesc}}$.

All VIs reported here have been calculated from the hyperspectral dataset. The selected VIs were analyzed regarding the prediction of biomass both exclusively and subsequently in combination with USH to compare their potential for a combined sensor application with improved prediction accuracy.

Table 6 - 1: Vegetation indices (VIs) used in this study to predict biomass exclusively and in combination with ultrasonic sward height (USH)

VI acronym	Vegetation index	Equation	Reference
Broad band vegetation indices (Red/NIR-based according to Landsat TM-mapper)			
SR	Simple ratio	$R_{760-900} / R_{630-690}$	Birth and McVey (1968); Jordan (1969)
NDVI	Normalized difference vegetation index	$(R_{760-900} - R_{630-690}) / (R_{760-900} + R_{630-690})$	Rouse et al. (1974)
EVI	Enhanced vegetation index	$2.5(R_{760-900} - R_{630-690}) / (R_{760-900} + 6R_{630-690} - 7.5R_{450-520} + 1)$	Huete et al., 2002;
REIP	Red edge inflection point	$700 + 40 \frac{[(R_{670} + R_{780}) / 2] - R_{700}}{R_{740} - R_{700}}$	Guyot and Baret, 1988
Narrow band vegetation indices (Red/NIR-based)			
SR	Simple ratio	R_{830} / R_{660}	Jordan (1969)
NDVI	Normalized difference vegetation index	$(R_{830} - R_{660}) / (R_{830} + R_{660})$	Rouse et al. (1974)
RDVI	Renormalized difference vegetation index	$(R_{830} - R_{660}) / \sqrt{(R_{830} + R_{660})}$	Rougean and Breon (1995)
MSR	Modified simple ratio	$[(R_{830} / R_{660}) - 1] / \sqrt{[(R_{830} / R_{670}) + 1]}$	Chen (1996)
SAVI	Soil adjusted vegetation index	$1.5(R_{830} - R_{660}) / (R_{830} - R_{670} + 0.5)$	Huete (1988)
MSAVI	Modified soil adjusted vegetation index	$[2R_{830} + 1 - \sqrt{(2R_{830} + 1)^2 - 8(R_{830} - R_{670})}] / 2$	Qi et al. (1994)

Table 6 -2 (continued):Vegetation indices (VIs) used in this study to predict biomass exclusively and in combination with ultrasonic sward height (USH)

VI acronym	Vegetation index	Equation	Reference
Specific narrow band vegetation indices			
PRI	Photochemical reflectance index	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	Gamon et al. (1997)
NPQI	Normalized phaeophytinization index	$(R_{415} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435})$	Peñuelas et al. (1995)
GRI	Green ratio index	R_{830} / R_{550}	Inoue et al. (1998)
WI	Water index	R_{900} / R_{970}	Peñuelas et al. (199/)
SIPI	Structural independent pigment index	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	Peñuelas et al. (1995°)
SWWI	Shortwave infrared water index	R_{1650} / R_{850}	Inoue et al. (1993)
Vegetation indices on the NIR-shoulder			
ISI	Infrared slope index	$R_{863-881} - R_{745-752}$	Vescovo et al. (2011)
NIDI	Normalized infrared difference index	$(R_{863-881} - R_{745-752}) / (R_{863-881} + R_{745-752})$	Vescovo et al. (2011)
NDSI _{vesc}	Normalized difference structural index	$NIDI * (R_{863-881} - R_{656-666}) / (R_{863-881} + R_{656-666})$	Vescovo et al. (2011)
Waveband selected vegetation indices			
NDSI	Normalized difference spectral index	$(R_{Band\ 2} - R_{Band\ 1}) / (R_{Band\ 2} + R_{Band\ 1})$ Precondition: Wavelength Band2 > Wavelength Band1	Inoue et al. (2008)

6.2.8 Data analysis

The compilation of 20 VIs (Tab. 6 - 1) were used in ordinary least square regression analysis using the SAS GLM-procedure with BM as the dependent variable and both VI alone or together with USH as independent variables (EQ 3 and 4) including interactions and quadratic terms. As the squared VI term was not significant in the regression analysis based on sole VI (EQ 3) it was omitted in the combined regressions of VI and USH.

Exclusive ultrasonic sward height

$$FM = a_0 + a_1USH + a_2USH^2 \quad (EQ\ 2)$$

Exclusive vegetation index

$$FM = a_0 + a_1VI + a_2VI^2 \quad (EQ\ 3)$$

Combination of ultrasonic sward height and vegetation index

$$FM = a_0 + a_1USH + a_2VI + a_3USH * VI + a_4USH^2 + a_5USH^2 * VI \quad (EQ\ 4)$$

where

BM = biomass dry matter yield (t ha⁻¹)

USH = ultrasonic sward height (cm)

VI = vegetation index derived from hyperspectral data (dimensionless)

According to the rules of hierarchy and marginality (Nelder, 1994; Nelder and Lane, 1995), non-significant effects were excluded from the model, but were retained if the same variable appeared as part of a significant interaction at an α -level of 5%.

For a comparison of validation quality with studies conducted with the same swards (Biewer et al., 2009a; 2009b) a four-fold cross validation was performed. The data set was divided into four groups of similar size selected systematically from a sample list ranked according to their biomass yield to ensure that samples in each group covered the whole range of yield levels. One group was used for prediction, whilst the rest was provided for developing the model. The procedure was performed four-times so that each group served once for prediction. Accuracy of the calibration models was assessed based on the standard error of cross-validation (SE_{CV}), the coefficient of determination for cross validation (R²_{CV}) and the ratio of standard deviation and standard error of cross-validation RSC. This ratio is a stability factor which characterises the robustness of a calibration equation and provides a means for a comparison with other calibrations irrespectively of the units of investigated parameters (Park et al.,

1997). An RSC value greater than three is considered adequate for analytical purposes in most of the laboratory near infrared applications for agricultural products (Cozzolino et al., 2006). However, at field scale variable measurement conditions reduce the prediction accuracy and RSC values higher than two may be regarded as acceptable (Terhoeven-Urselmans et al., 2006). Cross validation was performed exemplarily for models with best fit in the advanced combination of sensor values USH and narrow band NDSI.

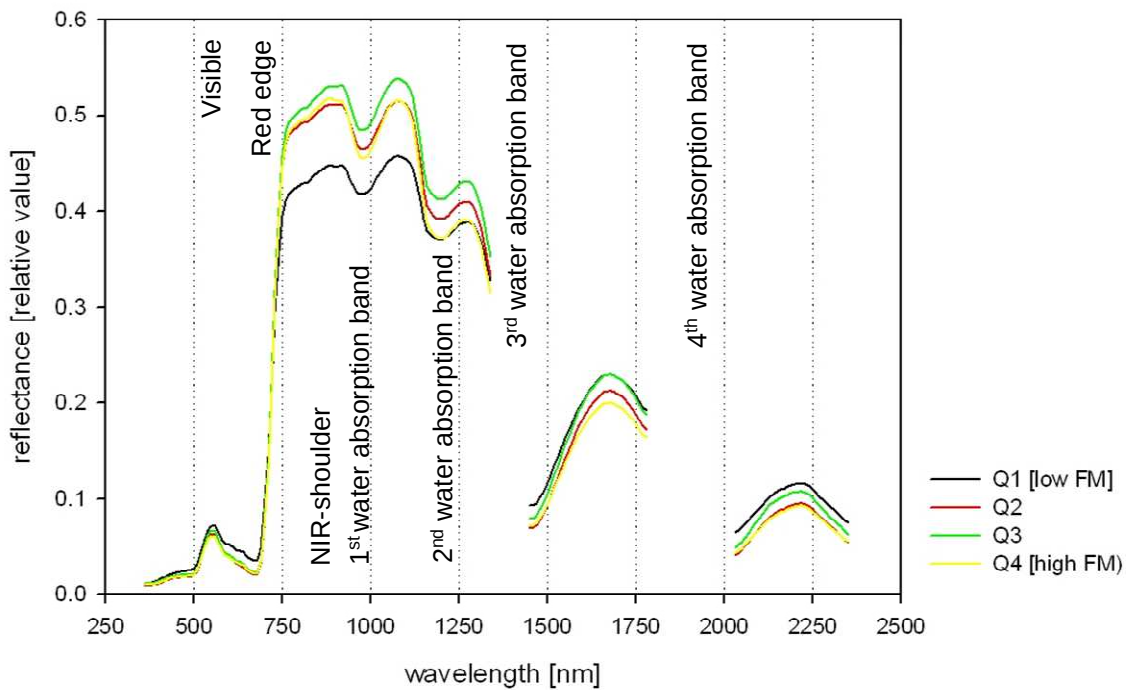


Figure 6 - 1: Hyperspectral signatures of biomass quartiles (Q1 – Q4) derived from all treatments (common swards).

6.2.9 Wavelength selection

Along the range of available 1 nm spectral wavelengths bands between 355 and 2350 nm all possible two band combinations were calculated according to the NDSI (see Table 6 - 1.). This wavelength adapted NDVI was regressed to biomass using EQ 3 for exclusive VI and EQ 4 for a combined application with USH. A total of 1,759,688 combinations were calculated in each passage of all wavelength combinations for each sward-specific dataset including common swards with all treatments, as well as species-specific pure swards and binary mixtures. Water absorption bands three and four (Fig. 6 - 1) at 1351–1439 nm and 1791–2019 nm were excluded due to high signal noise. To analyse band widths effects a similar regression analysis was conducted in common swards using bands widths of 1nm, 5nm, 10nm, 50nm and 100nm. Reflectance values of bands were calculated as mean values of the given

widths from hyperspectral data. For the calculation of NDSI all possible two-band combinations were selected along the spectral gradient moving band centres in 1 nm increments along the spectrum, ensuring that bands do not overlap.

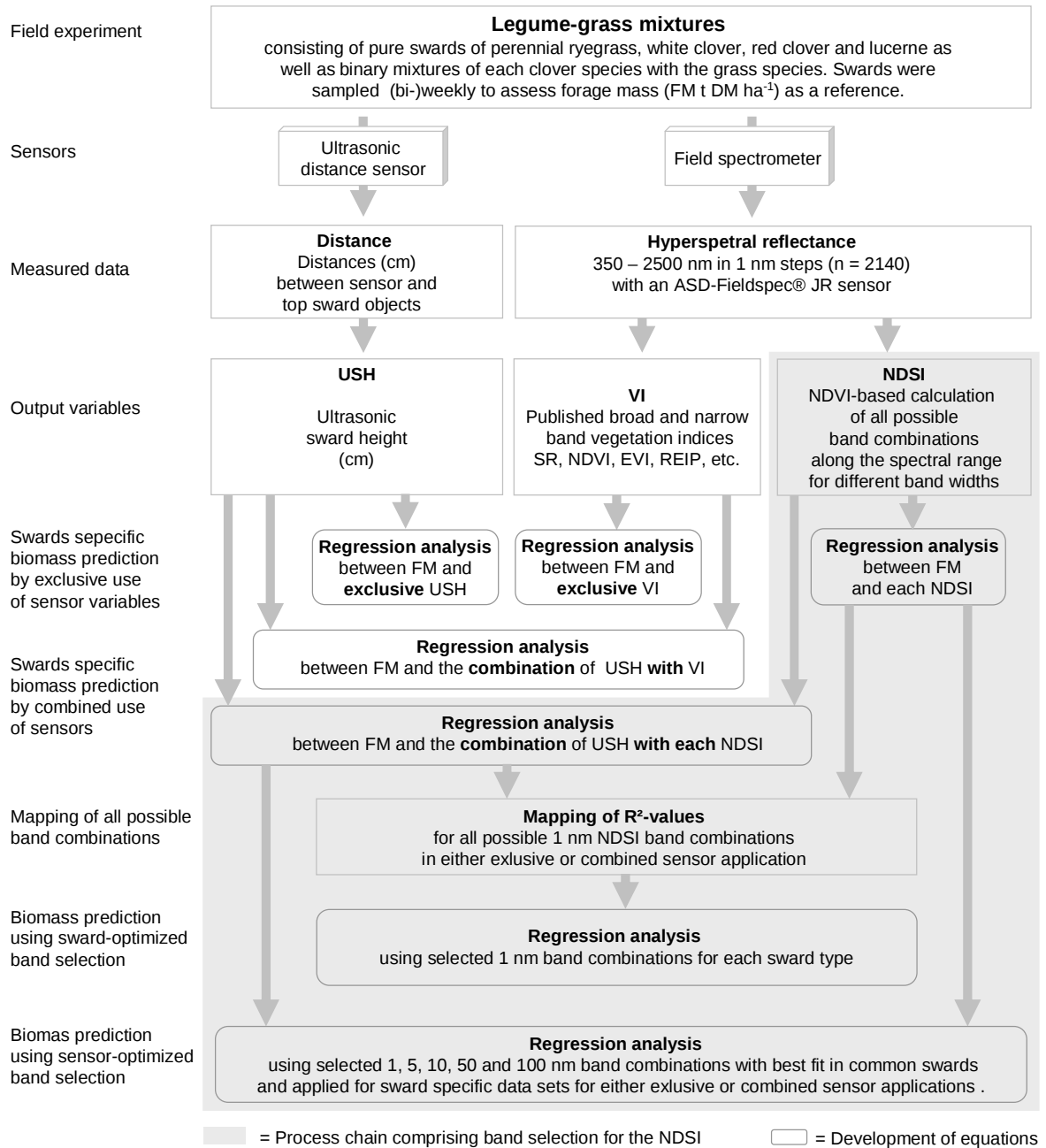


Figure 6 - 2: Flow chart of data processing and analysis strategy for biomass (BM) prediction on exclusive and combined ultrasonic sward height (USH) and vegetation indices (VI) with a special focus of band selection using the normalized difference spectral index (NDSI)

6.3 Results

6.3.1 Characteristics of experimental swards

Although the investigated experimental swards comprised only plots where both sensor systems (USH and VI) were applied and thus represent a subset of an extended experiment, the range of BM yield is very wide (Tab. 6 - 2) and in line with that from a study using the complete sample set from the same field experiment (Biewer et al., 2009a). This chapter describes the underlying variation of biomass and ultrasonic sward height. Overall, BM dry matter yields between 0.06 and 11.25 t ha⁻¹ have been measured corresponding to USHs between 5 and 104.2 cm. Lowest BM and USH were found in grass monocultures (0.06 t DM ha⁻¹ and 5 cm, respectively). While red clover-grass mixture plots showed the highest yield (11.25 t DM ha⁻¹) at 87.1 cm sward height, the top sward height was found in lucerne monocultures with 104.2 cm.

BM in monocultures depicted lowest yields for white clover (0.98 – 4.62 t DM ha⁻¹) at swards height between 16.1 and 45.8 cm followed by red clover and grass swards (0.44 – 6.75 and 0.06 – 6.43 t DM ha⁻¹, respectively) at sward heights between 14.5 – 78.9 cm and 5.0 – 77.0 cm, respectively. Within monocultures, lucerne reached highest values for BM yield (0.39 - 10.77 t DM ha⁻¹) and USH (34.7 - 104.2 cm). In mixture plots the ranking between legume specific binary mixtures corresponded to legume species ranks in monocultures (WG<RG<LG) but with wider ranges of BMs (WG: 0.26 – 8.79, RG: 0.41 – 1.25, LG: 0.88 – 10.54 t DM ha⁻¹) and sward heights (WG: 14.2 – 70.8, RG: 12.8 – 87.1, LG: 17.3 – 94.1 cm).

Under practical field conditions, legume–grass mixtures may develop to swards along the whole range of species fractions from grass monocultures to legume monocultures. Therefore, calibration data sets comprised both mixture plots and pure swards of ryegrass and the respective legume species. Hereafter, these artificially composed data sets were referred to as mixtures.

Table 6 - 2: Descriptive statistics of biomass yield and ultrasonic sward height

Treatments	N	Biomass (t DM ha ⁻¹)				Ultrasonic sward height (cm)			
		Mean	SD	Min	Max	Mean	SD	Min	Max
All treatments (common swards)	294	3.08	2.09	0.06	11.25	36.4	20.1	5.0	104.2
Mixtures including pure legumes and grass swards									
White clover grass (WG)	145	2.37	1.72	0.06	8.79	27.6	13.5	5.0	77.0
Red clover grass (RG)	138	2.94	2.18	0.06	11.25	35.3	19.6	5.0	87.1
Lucerne grass (LG)	79	3.02	2.78	0.06	10.77	40.0	29.9	5.0	104.2
Pure swards only									
White clover (W)	45	2.35	1.00	0.98	4.62	28.5	8.00	16.1	45.8
Red clover (R)	39	3.31	1.55	0.44	6.75	40.5	16.1	14.5	78.9
Lucerne (L)	12	5.58	3.18	0.39	10.77	77.8	23.1	34.7	104.2
Grass (G)	82	2.52	1.75	0.06	6.43	27.9	14.6	5.0	77.0

6.3.2 Exclusive use of ultrasonic sward height

The results found for exclusive USH measurements are in line with the findings presented in Fricke et al. (2011). However, they are listed here again, as values changed slightly due to the reduced data set and as information on the important benchmark for comparisons between exclusive and combined sensor analysis of sward height and reflection data.

Legume-specific mixtures indicated higher R^2 -values (0.80 – 0.82) in the relationship between BM and USH compared to common swards, comprising all treatments ($R^2 = 0.75$). In contrast, SE varied considerably in mixtures depending on legume species. It increased in the sequence white clover- (SE = 0.74), red clover- (SE = 0.99) and lucerne-based mixtures (SE = 1.25). The same order could be observed for SE and R^2 in legume pure swards. Exclusive USH-measurements estimated BM best in pure grass swards ($R^2 = 0.84$; SE = 0.71) (Tab.6 - 5).

6.3.3 Exclusive use of vegetation indices

6.3.3.1 Existing Indices

Prediction accuracy of existing VIs usually was low and showed a big variation depending on the sward type. Legume-specific mixtures reached higher R^2 -values ($R^2 = 0.03 - 0.70$) than common swards ($R^2 = 0.04 - 0.35$). Mostly, pure swards showed higher R^2 -values than mix-

tures. SE-values were comparable for common swards and red clover mixtures ($SE = 1.36 - 2.12 \text{ t ha}^{-1}$), showed lower values for white clover swards ($SE = 0.71 - 1.69 \text{ t ha}^{-1}$) and very high values for lucerne swards ($SE = 1.53 - 2.62 \text{ t ha}^{-1}$). Accuracy for pure grass swards ranked in between ($R^2 = 0.06 - 0.40$; $SE = 1.36 - 1.71 \text{ t ha}^{-1}$) (Tab. 6 - 3).

Clear differences could be observed between VI groups. Broad and narrow band VIs did not show any noticeable variation between the indices for common swards ($R^2 = 0.10 - 0.18$; $SE = 1.90 - 1.98 \text{ t ha}^{-1}$). This also applies to narrow and broad band NDVI and SR, respectively. Variation between groups increased in species-specific mixtures and pure swards. Prediction of BM in white clover mixtures were low and in white clover pure swards not significant. REIP performed best in common swards ($R^2 = 0.18$; $SE = 1.90 \text{ t ha}^{-1}$) but was indifferent in species-specific mixtures and pure swards where SR and NDVI performed better.

The highest prediction qualities were found for VIs calculated on the slope of the first water absorption band (WI) or on the slope of the NIR-shoulder (ISI, NIDI), respectively, as well as with the combination of the latter combined with the red reflection ($NDSI_{\text{vesc}}$). The WI depicted the best prediction for common swards ($R^2 = 0.35$; $SE = 1.69$) and for all mixtures (white clover-grass: $R^2 = 0.40$; $SE = 1.34$; red clover-grass: $R^2 = 0.62$; $SE = 1.36$; lucerne-grass: $R^2 = 0.70$, $SE = 1.53$). In pure white clover, red clover and grass swards, the $NDSI_{\text{vesc}}$ estimated biomass better than the WI. The SWWI, calculated as the ratio of the peak region between the two main water absorption bands and the peak region of the NIR-shoulder, also proved to be a robust index, resulting in high R^2 - values for all sward types. Other indices varied between sward types and either showed very low prediction like the NPQI, calculated exclusively in the blue wavelength range, which interestingly partly applied to e.g. lucerne-based (PRI, GRI) or pure grass swards (NPQI, GRI).

Table 6 - 3: Regression statistics of measured biomass yield as dependent variable with one exclusive vegetation index as independent variable for common dataset, legume-specific mixtures and pure swards. Empty fields indicate none-significant relationships.

	Common swards			Mixtures ^a									Pure swards											
	N = 294			White clover N = 145			Red clover N = 138			Lucerne N = 79			White clover N = 45			Red clover N = 39			Lucerne N = 12			Grass N = 82		
	SE	R ²	Md ^b	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md
Broad band vegetation indices (Red/NIR-based according to Landsat TM-mapper)																								
SR	1.98	0.10	q***	1.63	0.11	q***	1.92	0.23	l***	2.14	0.42	l***	-	-	-	1.29	0.33	l***	-	-	-	1.47	0.32	q***
NDVI	1.97	0.11	l***	1.61	0.12	l***	1.90	0.25	q***	2.19	0.40	q***	-	-	-	1.29	0.33	l***	2.48	0.44	l*	1.46	0.31	l***
EVI	1.96	0.12	q***	1.62	0.13	q***	1.97	0.19	l***	2.17	0.40	l***	-	-	-	1.49	0.11	l*	2.43	0.47	l*	1.53	0.26	q***
REIP	1.90	0.18	l***	1.66	0.08	l***	1.82	0.31	l***	2.24	0.36	l***	-	-	-	1.14	0.48	l***	2.23	0.55	l**	1.59	0.19	l***
Narrow band vegetation indices (Red/NIR-based)																								
SR _{nar}	1.98	0.10	q***	1.63	0.11	q***	1.92	0.23	l***	2.14	0.42	l***	-	-	-	1.30	0.31	l***	-	-	-	1.48	0.31	q***
NDVI _{nar}	1.97	0.11	l***	1.61	0.13	l***	1.90	0.25	q***	2.19	0.40	q***	-	-	-	1.31	0.31	l***	2.51	0.43	l*	1.46	0.31	l***
MSR	1.97	0.11	q***	1.60	0.15	q***	1.90	0.24	l***	2.04	0.41	l***	-	-	-	1.28	0.34	l***	2.62	0.38	l*	1.44	0.34	q***
RDVI	1.96	0.12	q***	1.61	0.14	q***	1.95	0.21	l***	2.17	0.40	l***	-	-	-	1.47	0.13	l*	2.43	0.47	l*	1.51	0.28	q***
SAVI	1.97	0.11	q***	1.63	0.11	q***	1.97	0.19	l***	2.21	0.37	l***	-	-	-	1.48	0.11	l*	2.43	0.47	l*	1.57	0.20	l***
MSAVI	1.97	0.12	q***	1.61	0.13	q***	1.94	0.21	l***	2.17	0.40	l***	-	-	-	1.41	0.19	l**	2.37	0.49	l*	1.50	0.28	q***
Specific narrow band vegetation indices																								
WI	1.69	0.35	q***	1.34	0.40	q***	1.36	0.62	q***	1.53	0.70	q***	0.91	0.20	q**	1.19	0.43	l***	1.72	0.73	l***	1.43	0.34	l***
SWWI	1.83	0.24	q***	1.46	0.29	q***	1.70	0.40	q***	2.02	0.49	q***	0.95	0.14	q*	1.31	0.31	l***	2.21	0.56	l**	1.40	0.37	l***
PRI	2.05	0.04	l***	1.66	0.08	q**	2.08	0.10	l***	2.24	0.37	q***	0.92	0.16	l**	-	-	-	2.21	0.56	l**	1.69	0.08	l*
NPQI	-	-	-	1.69	0.03	l*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.49	0.29	q***
GRI	1.89	0.18	l***	1.62	0.12	q***	1.74	0.37	l***	1.98	0.50	l***	-	-	-	1.14	0.47	l***	2.38	0.49	l*	1.40	0.38	q***
SIPI	1.98	0.10	q***	1.61	0.13	q***	1.96	0.20	q***	2.35	0.31	q***	0.91	0.09	l*	1.44	0.17	l*	2.60	0.39	l*	1.47	0.31	q***
Vegetation indices on the NIR-shoulder																								
ISI	1.87	0.20	q***	1.63	0.10	l***	1.75	0.36	l***	2.39	0.27	l***	0.92	0.17	l**	1.04	0.56	l***	1.72	0.73	l***	1.55	0.22	l***
NIDI	2.03	0.06	q***	-	-	-	2.12	0.07	q**	2.71	0.07	l*	0.71	0.51	l***	0.97	0.62	l***	-	-	-	1.71	0.06	l*
NDSI _{vsc}	1.92	0.16	q***	1.53	0.21	l***	1.91	0.24	l***	2.72	0.06	l*	0.71	0.50	l***	0.94	0.65	l***	2.34	0.51	l**	1.36	0.40	l***

^a Mixtures including pure legumes and grass swards^b Md = type of regression model: l = linear, q = quadratic; significant at * = 0.05, ** = 0.01, *** = 0.001 probability level

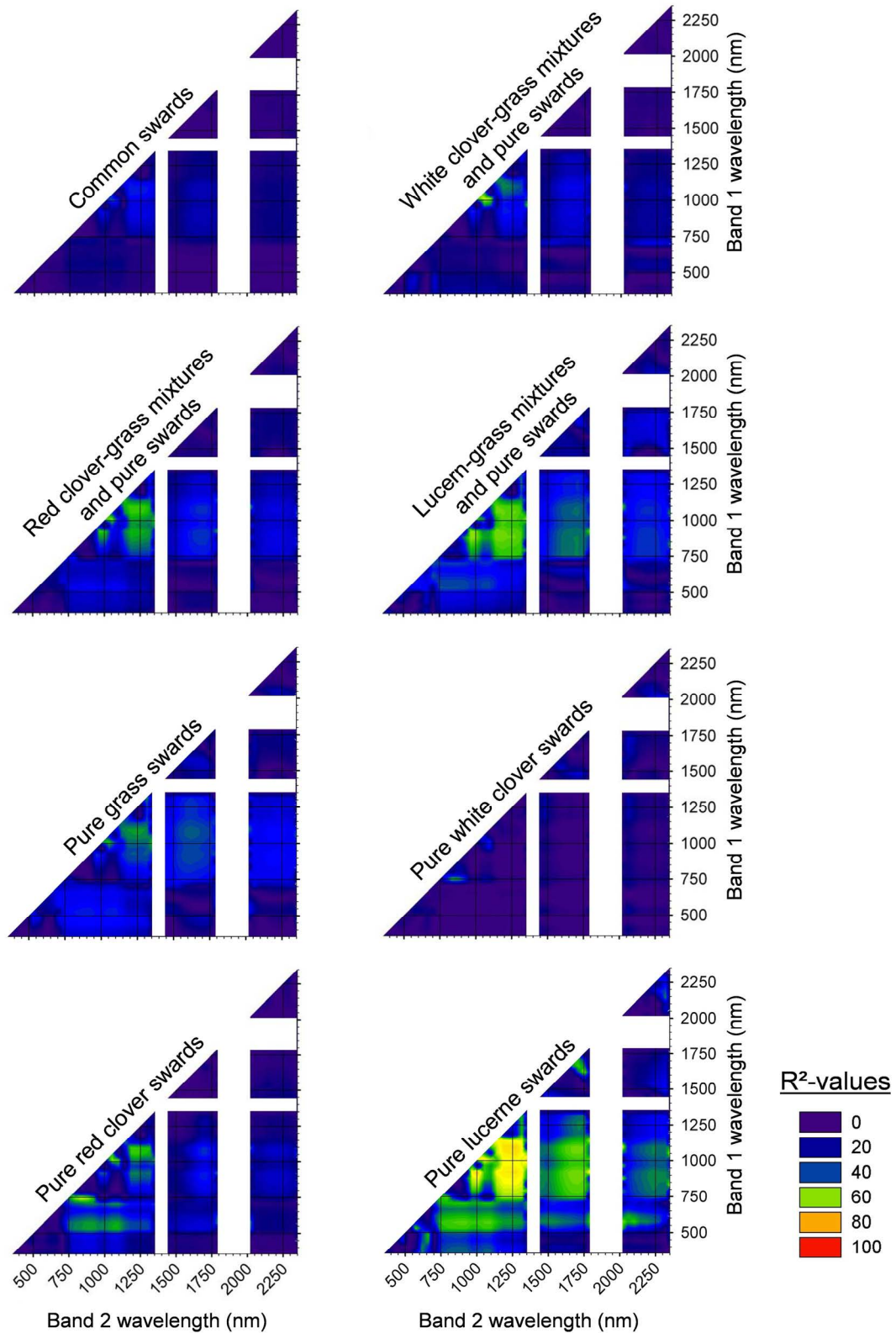


Figure 6 - 3: Sward-specific plots showing the coefficient of determination (R^2) between biomass (BM) and all available 1 nm narrow band NDSI combinations along the range of 355 to 2350 nm excluding the water absorption bands (1351–1439 nm and 1791–2019 nm). R^2 -values of 1,759,688 wavelength combinations were reduced to 10 nm mean values to enable visualization.

Table 6 - 4. Best fit regression statistics of measured biomass yield calculated with pure NDSI using EQ 3 with sward-specific selected band combinations (A) and sward-specific applied equations based on band combination selected for common swards (B). Empty fields indicate non-significant relationships.

Mixtures ^a													Pure swards											
	Common swards N = 294			White clover N = 145			Red clover N = 138			Lucerne N = 79			White clover N = 45			Red clover N = 39			Lucerne N = 12			Grass N = 82		
A Sward-specific selected NDSI band combinations (λ_2 - λ_1) / (λ_2 + λ_1)																								
λ_2 ; λ_1 (nm)	λ_2 1028; λ_1 1019			λ_2 1081; λ_1 1001			λ_2 1032; λ_1 1018			λ_2 944; λ_1 934			λ_2 788; λ_1 759			λ_2 888; λ_1 743			λ_2 1667; λ_1 1664			λ_2 1041; λ_1 1037		
	SE	R ²	Md ^b	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md
NDSI	1.59	0.42	l***	1.00	0.66	l***	1.38	0.60	l***	1.48	0.73	q****	0.67	0.56	l***	0.88	0.69	l***	1.27	0.85	l***	1.17	0.56	l***
B NDSI band combinations (λ_2 - λ_1) / (λ_2 + λ_1) with best fit in common swards as applied to specific sward types using different band widths ^c																								
Band width; central $\lambda_{2;1}$	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md
1 nm λ_2 = 1028 λ_1 = 1019	1.59	0.42	l***	1.02	0.65	l***	1.38	0.60	l***	1.91	0.53	l***	0.89	0.23	l***	1.06	0.55	l***	1.61	0.77	l***	1.19	0.54	l***
5 nm λ_2 = 1026 λ_1 = 1020	1.59	0.42	l***	1.01	0.65	l***	1.38	0.60	l***	1.91	0.54	l***	0.87	0.25	l***	1.06	0.55	l***	1.63	0.76	l***	1.21	0.53	l***
10 nm λ_2 = 1028 λ_1 = 1004	1.59	0.42	l***	1.02	0.65	l***	1.39	0.60	l***	1.96	0.51	l***	0.87	0.26	l***	1.05	0.56	l***	1.81	0.70	l***	1.23	0.51	l***
50 nm λ_2 = 1045 λ_1 = 995	1.61	0.41	l***	1.03	0.64	l***	1.42	0.58	l***	2.03	0.48	l***	0.86	0.27	l***	1.04	0.56	l***	1.95	0.66	l**	1.24	0.51	l***
100 nm λ_2 = 1198 λ_1 = 1093	1.63	0.39	q****	1.19	0.53	q****	1.40	0.59	q****	1.75	0.62	q****	-	-	-	1.09	0.52	l***	1.78	0.71	l***	1.30	0.46	l***

^a Mixtures including pure legumes and grass swards

^b Md = type of regression model: l = linear, q = quadratic; significant at * = 0.05, ** = 0.01, *** = 0.001 probability level

^c Band widths are listed as ranges and central wavelengths in nm

6.3.3.2 *Selected waveband pairs*

Sward-optimized band selection

For all sward-specific datasets a waveband selection analysis was performed using the regression function EQ 3 with the normalized difference spectral index NDSI calculated for every 1nm waveband combination on the basis of the NDVI formula $(\lambda_2 - \lambda_1) / (\lambda_2 + \lambda_1)$. Best fit wavelength combinations were selected (Tab. 6 - 4) and R^2 -values of the whole range of calculations were mapped as 10 nm mean values in order to reduce the data set from 1.76 million to about 176 thousand because of software limitations. The resulting maps express locations and extend of hotspots with high R^2 -values (Fig. 6 - 3). The extent of areas with high correlation indicates the range of relevant wavelengths combinations for a reliable configuration of sensors.

Maximum R^2 -values for common swards, white clover– and red clover mixtures were found on the ascending flank of the 1st water absorption band (Common swards: $R^2_{\max} = 0.42$ at 1028-1019nm; red clover mixture: $R^2_{\max} = 0.60$ at 1032-1018nm; white clover mixture: $R^2_{\max} = 0.66$ at 1081-1001nm; Tab. 6 - 4). Lucerne mixtures deviated slightly and best fit with $R^2_{\max} = 0.73$ at 994-934 nm was found on the descending flank of the same absorption band, although the ascending flank relevant for the above mentioned swards showed high correlations as well (Fig. 6 - 3). Pure swards suggested species-specific characteristics for optimal wavelength combinations, which were located for red clover between the NIR-shoulder and the ascending flank of the 3rd water absorption band with best fits between 743 and 888 nm. While white clover showed very limited hotspots, expanded areas in grass and red clover maps were overlapping in several parts notably between 1000 and 1300 nm for band 1 and between 1000 and 1100 nm for band 2. Large areas of high prediction were obtained in lucerne pure swards with best fit between 1664 and 1667 nm. Merging the hotspot areas of all sward types, the least common denominator is reflected in the band combination of common swards.

Sensor-optimized band selection

The selection of sward-specific pairs of wavelengths as presented above, requires sensors capable to measure multispectral or hyperspectral reflectances, if biomass of different sward types shall be ascertained with only one equipment. With the objective to use a simple two-band spectral sensor for the different sward types, NDSI wavelength combinations were selected from common swards (Tab. 6 - 4). The determined NDSI configuration was subse-

quently applied to sward-specific regression analyses in order to calculate respective equations for an optimized BM prediction. The selection process was conducted with bandwidths of 1, 5, 10, 50 and 100 nm by calculation of mean values from 1 nm hyperspectral reflectance data. The central wavelengths are given in table 6 - 4 and indicated for 1 to 50 nm bands a location at the ascending slope of the 1st water absorption band between 995 and 1045 nm. Bands of 100 nm widths deviated slightly and were located at the descending slope of the 2nd water absorption band between 1093 and 1198 nm central wavelengths.

BM predictions for band widths between 1 and 50 nm showed only little deviation from prediction qualities obtained for sward-specific band selections in common swards and mixtures of red or white clover grass. Losses in prediction accuracy amounted to 0.02 scores of R^2 -values. In contrast, lucerne mixtures deviated thereof with its distinct wavelength combination resulting in a reduction of 0.25 R^2 -scores. Calculation of 100 nm band widths resulted in a stronger reduction of R^2 -values. Here, an observed increase of R^2 -value for lucerne mixtures, compared to the bands of smaller widths, is understandable due to a significant quadratic term. However, the R^2 -value was considerably lower than for the one determined in the sward-specific band selection. This trend also applies to pure legume swards whose species-specific location of bands differed clearly from those selected for common swards. In contrast, pure grass swards were in line with prediction accuracies of mixtures (Tab. 6 - 4).

6.3.4 Combined sensor use

6.3.4.1 USH with existing VIs

The prediction qualities of BM yield depending on exclusive USH measurements were set as a benchmark to evaluate improvements by a complementation with VIs to the regression function (Tab. 6 - 5). Respective sward-specific R^2 -values and SEs of pure USH measurements were deliberately calculated for the data subset of this study and the value-levels presented in table 6 - 5 represent the findings published by Fricke et al. (2011) for an almost similar data set.

In a first step of the combined sensor application, the integration of existing VIs into the regression analysis with to USH measurements was investigated and secondly sward optimized and sensor optimized specific spectral configurations of the NDSI were analyzed.

Table 6 - 5: Regression statistics for the sward-specific relationships between measured biomass yields as depended variable and the combination of ultrasonic sward height and published vegetation indices as independent variables. Empty fields indicate none-significant contribution of vegetation indices to ultrasonic sward height.

	Mixtures ^a												Pure swards											
	Common swards N = 294			White clover N = 145			Red clover N = 138			Lucerne N = 79			White clover N = 45			Red clover N = 39			Lucerne N = 12			Grass N = 82		
	SE	R ²	Md ^b	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md
USH	1.06	0.75	q***	0.74	0.82	q***	0.99	0.80	l***	1.25	0.80	l***	0.64	0.60	l***	0.89	0.69	q***	1.52	0.79	l***	0.71	0.84	q***
Broad band vegetation indices (according to Landsat TM-mapper)																								
SR	-	-	-	0.71	0.83	q***	0.97	0.81	l***	1.23	0.82	q***	0.61	0.65	l***	0.85	0.72	l***	1.27	0.90	q**	-	-	-
NDVI	-	-	-	0.73	0.83	q***	0.98	0.80	l***	-	-	-	0.61	0.64	l***	0.87	0.70	l***	1.29	0.91	q**	0.68	0.86	q***
EVI	-	-	-	0.72	0.83	q***	-	-	-	-	-	-	0.60	0.67	l***	0.71	0.81	q***	-	-	-	0.68	0.86	q***
REIP	1.04	0.75	q***	0.71	0.84	q***	0.95	0.81	l***	-	-	-	-	-	-	0.77	0.77	l***	-	-	-	0.69	0.85	q***
Narrow band vegetation indices (red/NIR-based)																								
SR _{nar}	-	-	-	0.71	0.83	q***	0.97	0.81	l***	1.23	0.82	q***	0.61	0.64	l***	0.85	0.72	l***	1.27	0.90	q**	-	-	-
NDVI _{nar}	-	-	-	0.72	0.83	q***	0.98	0.80	l***	-	-	-	-	-	-	0.88	0.70	l***	1.27	0.91	q**	0.68	0.86	q***
MSR	-	-	-	0.72	0.83	q***	0.97	0.80	l***	-	-	-	0.61	0.64	l***	0.85	0.71	l***	1.27	0.90	q**	0.70	0.85	q***
RDVI	-	-	-	0.72	0.83	q***	-	-	-	-	-	-	0.60	0.67	l***	0.71	0.81	q***	-	-	-	0.68	0.86	q***
SAVI	-	-	-	0.72	0.83	q***	-	-	-	-	-	-	0.60	0.66	l***	0.72	0.81	q***	-	-	-	0.67	0.86	q***
MSAVI	-	-	-	0.72	0.83	q***	-	-	-	-	-	-	0.60	0.67	l***	0.70	0.82	q***	-	-	-	0.68	0.86	q***
Specific narrow band vegetation indices																								
WI	0.91	0.81	q***	0.70	0.84	q***	0.81	0.87	q***	0.96	0.89	q***	0.61	0.65	l***	0.84	0.72	l***	-	-	-	0.67	0.86	q***
SWWI	0.99	0.78	q***	0.67	0.85	q***	0.83	0.86	q***	1.15	0.84	q***	0.58	0.68	l***	0.88	0.70	l***	-	-	-	0.66	0.87	q***
PRI	1.02	0.76	l***	0.70	0.84	q***	0.98	0.81	q***	1.15	0.84	q***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.69	0.85	q***
NPQI	-	-	-	0.70	0.84	q***	0.96	0.81	q***	1.14	0.84	q***	-	-	-	0.86	0.72	l***	-	-	-	-	-	-
GRI	-	-	-	0.72	0.83	q***	0.95	0.81	l***	-	-	-	0.61	0.64	l***	0.80	0.75	l***	-	-	-	0.69	0.85	q***
SIPI	-	-	-	0.71	0.83	q***	-	-	-	-	-	-	0.60	0.66	l***	0.88	0.70	l***	-	-	-	-	-	-
Vegetation indices on the NIR-shoulder																								
ISI	0.96	0.79	q***	0.73	0.82	q***	0.93	0.82	q***	1.20	0.82	q***	-	-	-	0.72	0.81	q***	-	-	-	0.70	0.85	q***
NIDI	0.98	0.78	q***	0.73	0.83	q***	0.96	0.81	q***	1.13	0.84	l***	0.57	0.71	q***	0.85	0.73	q***	-	-	-	0.68	0.86	q***
NDSI _{vpsc}	0.96	0.79	q***	-	-	-	0.93	0.82	q***	1.07	0.86	l***	0.58	0.70	q***	0.87	0.70	l***	-	-	-	0.67	0.86	q***

^a Mixtures including pure legumes and grass swards

^b Md = type of regression model: l = linear, q = quadratic; significant at * = 0.05, ** = 0.01, *** = 0.001 probability level

In for practical applications relevant common swards and mixtures highest increase of R^2 -values was reached by a combination of USH with the WI in common swards (from 0.74 to 0.81), red clover mixtures (from 0.80 to 0.87) and lucerne mixtures (from 0.80 to 0.89). In white clover mixtures the combination with SWWI was marginally higher than with the WI and increased the R^2 -value at most from 0.82 to 0.85. Similarly, in pure grass swards the combination with SWWI showed the best improvement (R^2 from 0.84 to 0.87). The range of improvement for the SWWI in the latter two sward types is only slightly better than the significant effects of all other VIs. In addition to the indices WI and SWWI important improvements of prediction quality were obtained with VIs calculated on reflections of the NIR-shoulder (ISI, NIDI and $NDSI_{vesc}$) reaching levels close to the maximum R^2 -values of the named VIs with best fit. In pure white clover the NIDI contributed even to the highest increase from $R^2 = 0.60$ to 0.71.

In the group of red/NIR-based VIs high improvements were observed only in pure red clover and lucerne swards. In pure red clover swards the MSAVI reached maximum prediction quality of published VIs by increasing R^2 from 0.69 to 0.82 which is slightly higher than the RDVI- and SAVI-level. Also broad band EVI was in line with this group. In pure lucerne swards broad band SR and NDVI as well as the narrow band SR, NDVI and MSR increased R^2 from 0.79 to 0.90 or 0.91, respectively. In contrast, other VIs did not show any significant improvement of prediction quality.

6.3.4.2 USH with NDSI based on different wavelength combination

Sward-optimized band selection

A sward-specific selection of NDSI bands together with USH measurements increased prediction quality in all sward types more than with existing VIs (Tab. 6 - 6). The enhancement of R^2 -values was stronger in pure legume swards (R^2 increase compared to best existing VI: white clover from 0.71 to 0.78; red clover from 0.82 to 0.88, lucerne from 0.91 to 0.99) than in pure grass, common swards or mixtures, respectively. Here, the gain ranged between 0.01 and 0.03 R^2 -scores to $R^2 = 0.83$ in common swards, $R^2 = 0.85$ in white clover mixtures, $R^2 = 0.87$ in red clover mixtures and $R^2 = 0.89$ in lucerne mixtures. The locations in the electromagnetic spectrum of the sward-specific 1 nm NDSI wavelength selection differed for most swards significantly from those found for BM prediction by exclusive NDSI. Only

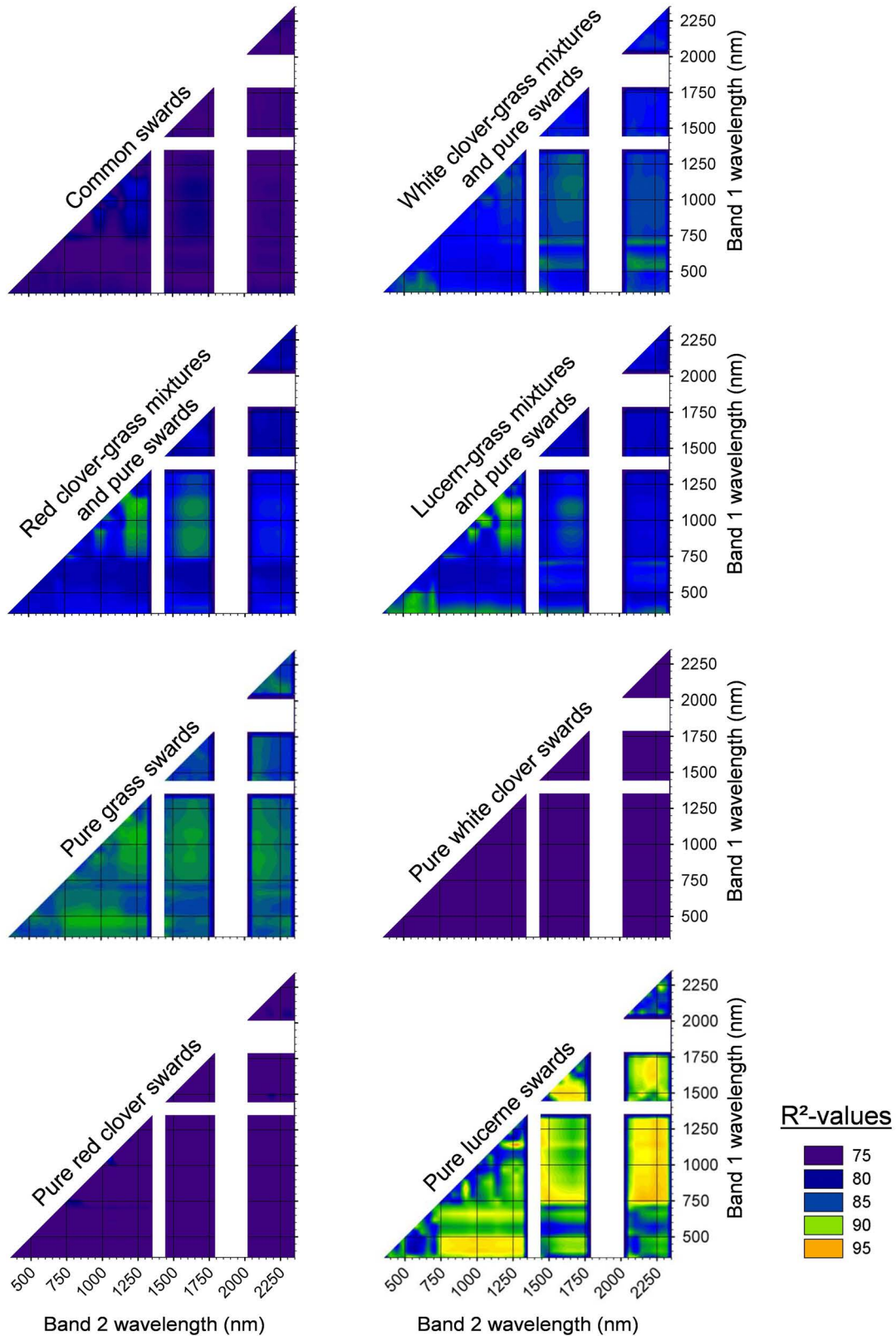


Figure 6 - 4: Sward-specific plots showing the coefficient of determination (R^2) between biomass (BM) and the combination of ultrasonic sward height with all available 1 nm narrow band NDSI combinations along the range of 355 to 2350 nm excluding the water absorption bands (1351–1439 nm and 1791–2019 nm). R^2 -values of 1,759,688 wavelength combinations were reduced to 10 nm mean values to enable visualization.

Table 6 - 6: Best fit regression statistics of measured biomass yield calculated with the combination of USH and NDSI using EQ 4 with sward-specific selected band combinations (A) and sward-specific applied equations based on band combination selected for common swards (B). Empty fields indicate none-significant relationships.

Mixtures ^a													Pure swards											
Common swards N = 294				White clover N = 145			Red clover N = 138			Lucerne N = 79			White clover N = 45			Red clover N = 39			Lucerne N = 12			Grass N = 82		
A Sward-specific selected NDSI band combinations ($\lambda_2 - \lambda_1$) / ($\lambda_2 + \lambda_1$) for use of pure vegetation indices																								
$\lambda_2; \lambda_1$ (nm)	λ_2 1051; λ_1 1049			λ_2 668; λ_1 667			λ_2 1205; λ_1 1181			λ_2 1027; λ_1 1020			λ_2 763; λ_1 762			λ_2 2286; λ_1 2271			λ_2 1749; λ_1 1746			λ_2 1201; λ_1 1182		
	SE	R ²	Md ^b	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md
NDSI	0.88	0.83	q***	0.60	0.88	q***	0.73	0.89	q***	0.88	0.90	l***	0.50	0.78	q***	0.57	0.88	q***	0.45	0.99	q***	0.59	0.89	q***
B Applied NDSI band combinations ($\lambda_2 - \lambda_1$) / ($\lambda_2 + \lambda_1$) with best fit in common swards as applied to specific sward types using different band widths ^c																								
Band width; central $\lambda_{2;1}$	SE	R ²	Md ^d	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md	SE	R ²	Md
1 nm $\lambda_2 = 1051$ $\lambda_1 = 1049$	0.88	0.83	q***	0.68	0.85	q***	0.86	0.85	q***	0.91	0.90	q***	-	-	-	0.78	0.77	q***	-	-	-	0.68	0.86	q***
5 nm $\lambda_2 = 1052$ $\lambda_1 = 1047$	0.89	0.82	q***	0.67	0.85	q***	0.85	0.85	q***	0.92	0.90	l***	-	-	-	0.73	0.80	q***	-	-	-	0.69	0.85	q***
10 nm $\lambda_2 = 1245$ $\lambda_1 = 1099$	0.90	0.82	q***	0.67	0.85	q***	0.77	0.88	q***	0.92	0.90	l***	0.60	0.65	l***	0.86	0.71	q***	-	-	-	0.65	0.87	q***
50 nm $\lambda_2 = 1237$ $\lambda_1 = 1103$	0.90	0.82	q***	0.67	0.85	q***	0.78	0.88	q***	0.91	0.90	q***	0.60	0.65	l***	0.86	0.71	l***	-	-	-	0.65	0.87	q***
100 nm $\lambda_2 = 1225$ $\lambda_1 = 1112$	0.90	0.82	q***	0.67	0.85	q***	0.77	0.88	q***	0.92	0.90	q***	0.60	0.65	l***	0.86	0.71	l***	-	-	-	0.65	0.87	q***

^a Mixtures including pure legumes and grass swards ^b Md = type of regression model: l = linear, q = quadratic; significant at * = 0.05, ** = 0.01, *** = 0.001 probability level

^c Band widths are listed as ranges and central wavelengths in nm

common swards and lucerne mixtures matched the respective spectral regions of exclusive NDSI which were located on the slopes of the 1st water absorption band ($\lambda_2 = 1051$ nm; $\lambda_1 = 1049$ nm and $\lambda_2 = 1027$ nm; $\lambda_1 = 1020$ nm, respectively). Contrarily, for other sward types the individually in combination with USH selected NDSI bands were located on the ascending slope in the visible red (white clover mixture: $\lambda_2 = 668$ nm; $\lambda_1 = 667$ nm) and on the ascending slope of the 2nd water absorption band (red clover mixture: $\lambda_2 = 1205$ nm; $\lambda_1 = 1181$ nm and pure grass: $\lambda_2 = 1201$ nm; $\lambda_1 = 1182$ nm), on the NIR-shoulder (pure white clover: $\lambda_2 = 763$ nm; $\lambda_1 = 762$ nm), the descending slopes of the 5th water absorption band (pure red clover) and on the 4th water absorption band (pure lucerne: $\lambda_2 = 1749$ nm; $\lambda_1 = 1746$ nm).

In common swards and mixtures, the hotspot areas of high R^2 -values as a result of regression functions between biomass and pure NDSI band (λ_2 and λ_1) configurations matched those found in combination with USH, but additional hotspots could be identified in white clover and lucerne mixtures using wavelengths of $\lambda_2 = 500 - 700$ with $\lambda_1 = 355 - 500$ nm, as well as $\lambda_2 = 1440 - 2300$ with two bands between $\lambda_1 = 520 - 730$ (Fig. 6 - 4). While in pure white and red clover swards hotspots were hardly observed, broad areas of high R^2 -values were visible in pure grass and lucerne swards, indicating a flexible configuration of wavelength compositions for use of NDSI and USH.

Cross-validation results indicated only marginal reduction of R^2 -values for common swards and mixtures, respectively, as well as for pure swards of white clover and grass. In pure swards of red clover and particularly lucerne prediction quality was reduced clearly compared to calibration criteria. RSC-values of mixtures and pure grass were grouped around the for practical applications important benchmark of 3.0. Common as well as pure white and red clover swards reached RSC-values between 1.89 – 2.35 and pure lucerne, comprising only 12 samples, achieved a RSC of 1.06.

Table 6 - 7: Results of a cross validation for the relationship between biomass (BM) dry matter yield and the combination of ultrasonic sward height (USH) with the vegetation index NDSI configured as best sward-specific wavelength selection in 1 nm bands.

Sward type	N	Mean t ha ⁻¹	SD t ha ⁻¹	R ²	SE t ha ⁻¹	R ² _{CV}	SE _{CV} t ha ⁻¹	RSC
Common swards	294	3.08	2.09	0.83	0.88	0.82	0.89	2.35
Mixtures								
White clover grass	145	2.37	1.72	0.88	0.60	0.86	0.62	2.77
Red clover grass	138	2.94	2.18	0.89	0.73	0.88	0.76	2.87
Lucerne grass	79	3.02	2.78	0.90	0.88	0.92	0.79	3.51
Pure Swards								
White clover	45	2.35	1.00	0.78	0.50	0.76	0.53	1.89
Red clover	39	3.31	1.55	0.88	0.57	0.81	0.73	2.12
Lucerne	12	5.58	3.18	0.99	0.45	0.53	3.00	1.06
Grass	82	2.52	1.75	0.89	0.59	0.88	0.62	2.82

Sensor-optimized band selection

With the objective to use a common band combination for all swards, a wavelength selection was conducted in the common sward dataset and used for all sward types. A regression analysis was conducted using NDSI and USH according to EQ 4 for all possible band combinations. This procedure was performed for bandwidths of 1, 5, 10, 50 and 100 nm. The selected band combination within each bandwidth level was subsequently used to develop regression equations for each sward type.

Band locations on the hyperspectral range were about the same for the two narrow bands of 1 nm and 5 nm on the ascending slope of the 1st water absorption band (central wavelengths 1 nm bands: $\lambda_2 = 1051$ nm; $\lambda_1 = 1049$ nm; 5 nm bands: $\lambda_2 = 1052$ nm; $\lambda_1 = 1047$ nm). Bands of 10, 50 and 100 nm width were instead of the narrow ones moved to the shortwave infrared and calculated as a difference between the peak areas along the 2nd water absorption band (central wavelengths 10 nm bands: $\lambda_2 = 1245$ nm; $\lambda_1 = 1099$ nm; 50 nm bands: $\lambda_2 = 1237$ nm; $\lambda_1 = 1103$ nm; 100 nm bands: $\lambda_2 = 1225$ nm; $\lambda_1 = 1112$ nm).

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Sward-specific regression functions using the combination of USH with common sward based NDSI band configurations resulted in marginal reduction of prediction accuracy in common swards, mixtures and pure grass swards, whereas prediction was clearly reduced in pure legume swards. Pure lucerne showed in this sensor configuration no significant complementation of NDSI to USH-measurements and pure white clover swards only within broad bands. The reduction of prediction was particularly high, where sward-specific NDSI bands with high correlation to BM were located in spectral regions far away from those of common swards. This counts for white clover mixtures and pure legume swards, notably in pure lucerne swards, which actually showed a broad flexibility of available NDSI wavelength combinations. However, the area of common sward based wavelengths is marked “dark blue” in figure 6 - 4, indicating no increase of prediction by integration of the VI into USH-measurements. Broadening of bands did not show any clear reduction of R^2 -values if combined with USH measurements. It rather, at least partly, improved prediction qualities because of band shifts to spectral regions which were more in line with sward-specific wavelength selections.

Comparison of sensing strategies and integration of sensor data in multiple regression models

The comparison of “plots of fit” based on either exclusive measurement of each sensor or in combination of both, respectively, provides a comprehensive look on the prediction with combined sensors (Figures 6 - 5 and 6 - 6). All sward types depicted an overestimation of low yield levels and an underestimation of high yield levels. This pattern is more pronounced with exclusive NDSI use than with exclusive USH, with the exception of pure lucerne, along with an increase in R^2 -values. An improvement of fit by sensor combination is obvious for all swards and presented by a higher R^2 -value, a reduction of variance and the slope being closer to the bisecting line. Particularly in mixtures and in the common sward data set the sensor combination led to a significant rise of predicted BM at high yield levels which tended to be clearly underestimated by either exclusive sensor use.

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

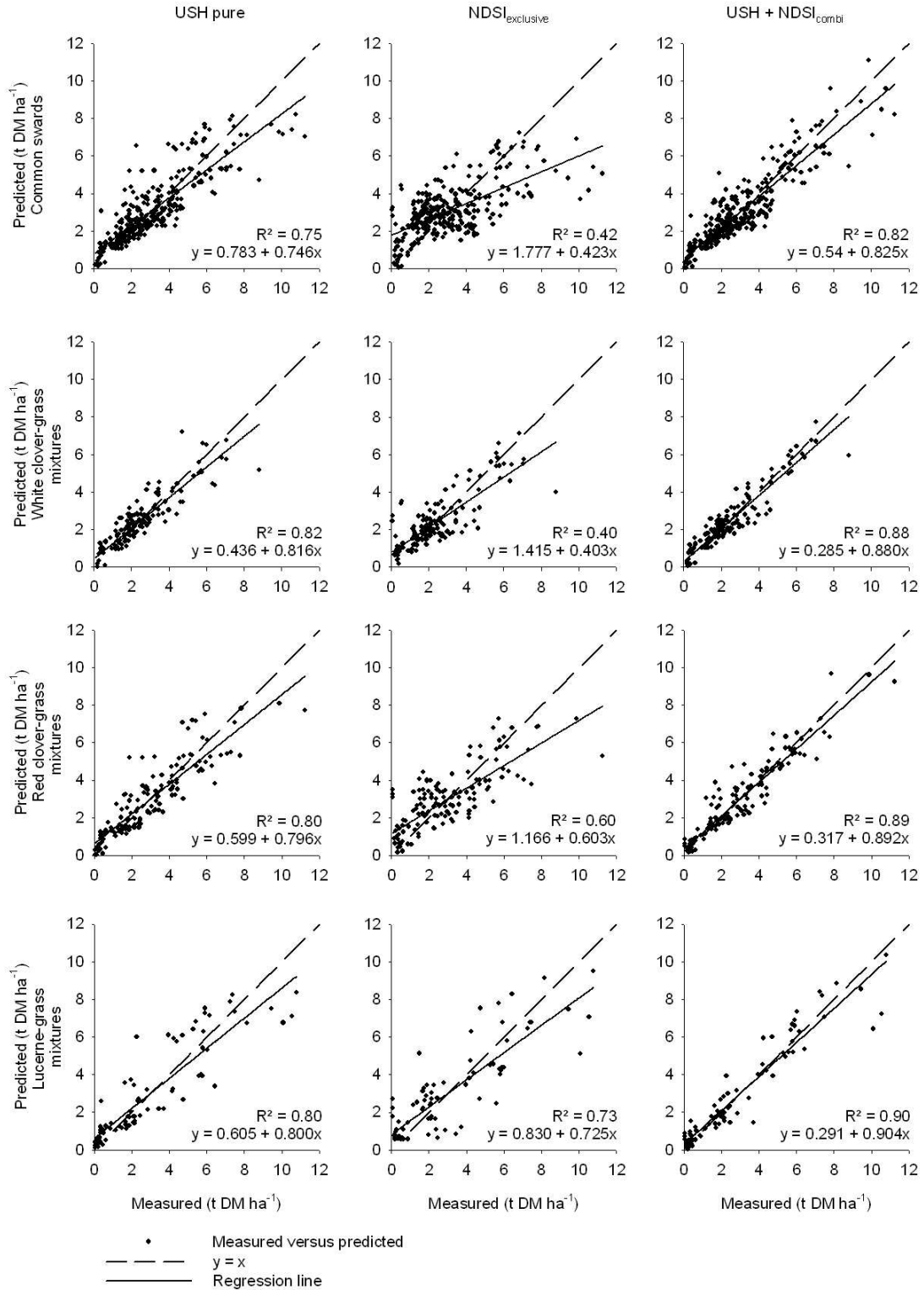


Figure 6 - 5: Plot of fit between measured and predicted biomass yield of exclusive ultrasonic sward height (USH) and vegetation index (NDSI_{exclusive}), as well as in combination of USH and NDSI_{combi} applied in common swards and mixtures. Wavelength selection for NDSI was conducted sward and application-specific.

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

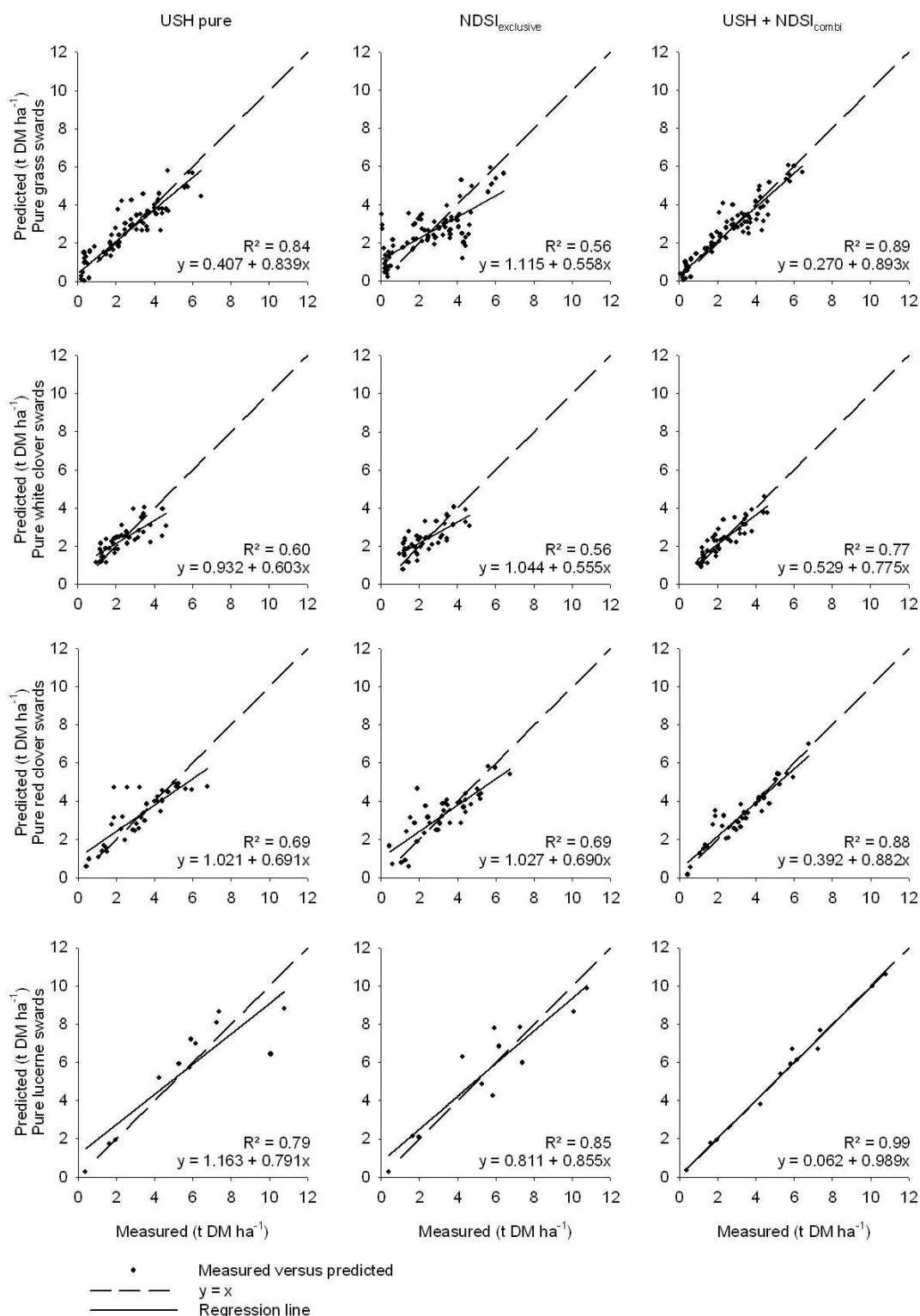


Figure 6 - 6: Plot of fit between measured and predicted biomass yield of exclusive ultrasonic sward height (USH) and vegetation index (NDSI_{exclusive}) as well as in combination of USH and NDSI_{combi} applied in pure swards. Wavelength selection for NDSI was conducted sward and application-specific.

Integration of VIs into USH-based BM prediction led to a linearization of the relationship between sward height and BM which was most pronounced at high levels of biomass and sward height (i.e. low VI reflectance) (Fig 6 - 6), whereas at low USH no effect of VI occurred. The example presented in figure 6 - 6 is based on 50 nm bands in common swards as relevant for practical sensor configurations. The NDSI wavelength combination in this case is negatively correlated to biomass because reflection values at central wavelengths of $\lambda_2 = 1237$ nm in the data sets investigated are predominantly lower than at $\lambda_1 = 1103$ nm (Fig. 6 - 1).

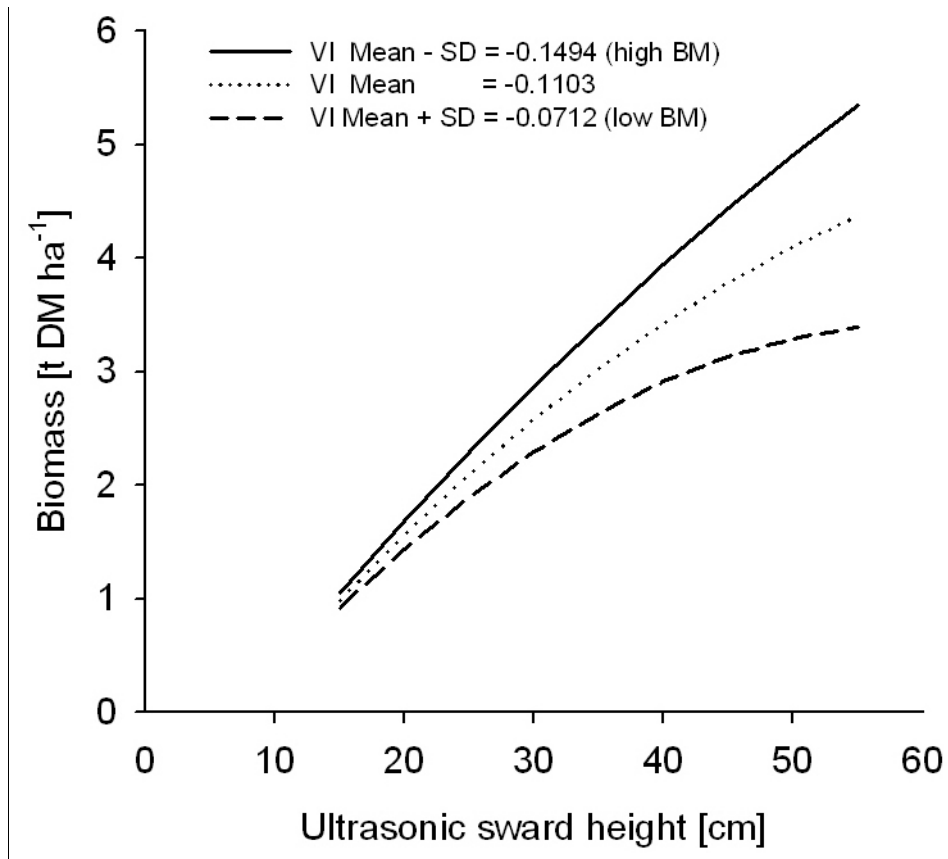


Figure 6 - 7: Interaction between ultrasonic sward height (USH) and vegetation index (VI) in the range of mean values $\pm$ standard deviation. VI represents reflection values of the NDSI calculated on basis of 50 nm band selected in combination with USH.

6.4 Discussion

6.4.1 Biomass prediction using exclusive USH

The main purpose of this study was to evaluate the potential of a combined sensor application measuring USH and VIs in legume-grass mixtures in a wide range of yield levels. Limitations of yield sensors are specific for each single sensor and have been documented in several studies (e.g. Hutchings et al. 1990, Fricke et al., 2011; Scotford and Miller, 2004; Lan et al., 2009). Recently published results of a low-cost ultrasonic distance sensor were promising but could not exceed prediction accuracies ranging between $R^2=0.80$ and 0.82 in legume-grass mixtures relevant for praxis (Fricke et al., 2011). Compared to R^2 -values achieved with traditional red/NIR-based VIs (Psomas et al., 2011; Biewer et al. 2009a; Chen et al., 2009; Vescovo et al., 2011), the accuracy of USH across swards turned out to be higher, implying to use this sensor type for the BM assessment as a first-order equipment and VIs as a complement to overcome sward canopy obstacles for USH. Factors effecting USH measurements are e.g. specific transducer behaviour (Henning et al., 2000) and sward canopy structures characterized by leaf surface, angle and distribution (Hutchings 1991, 1992). Only if parts of the plants are orientated perpendicular to the ultrasonic beam a dependable echo and thus a reliable detection is possible (Pepperl and Fuchs, 2010; Scotford and Miller, 2004). This behaviour may lead to measurements of subordinate layers instead of top surface objects (Hutchings, 1990) where sward heights measured with an ultrasonic rangefinder were about 3 cm lower than top heights measured with the HFRO²-Sward stick. The prediction of BM on sward height depends on the distribution of sward density along the height gradient. Against the background that biomass density in upper layers of mixed swards is lower than in bottom layers (Sanderson et al., 2006; Laidlaw and Withers, 1998), linear relationships between USH and

² HFRO = Hill Farming Research Organisation

BM indicated a linearly descending sward biomass distribution along the height gradient and is obvious for red clover and lucerne mixtures, as well as for pure swards of white clover and lucerne (Fricke et al., 2011). Quadratic effects of USH in functions for other swards were weak, but denoted a saturation effect, as an increasing USH was associated to lower biomass growth especially in very high swards. This phenomenon, which may be brought about by inflorescences of plants, was obvious in pure red clover and grass swards, as well as in common and white clover based swards. It might be confirmed by the comparison of pure grass and white clover swards where maximum heights of grass with 70.8 cm are presumably corresponding to mature stages and thus overgrowing dense white clover with a maximum height of 45.8 cm leading to a maximum height of 77 cm as found in white clover-grass mixtures (Tab. 6 - 2).

6.4.2 Biomass prediction using exclusive VIs

A large variation of R^2 -values and SEs was observed for exclusive use of VIs. Poor prediction by an exclusive use of existing red/NIR based VIs is most probably caused by the occurrence of weeds and bare soil in the year of establishment and a big variation in maturity at the end of the growth periods (Biewer et al., 2009a).

Complexity of sward structure is maximal in the common sward dataset, which is also reflected by the lowest R^2 -values for prediction. Sward-specific calibrations usually produced better prediction with the exception of white clover mixtures. Particularly pure white clover showed a lower slope in the relationship between BM (dependent variable) and USH (independent variable) (Fricke et al., 2011), indicating a more compact growth and probably a higher LAI at the same sward height than the other investigated species. This is in agreement with findings by several authors (Sellers, 1985; Gao et al., 2000; Chen et al., 2009, Vescovo et al., 2011) who regard saturation effects as a major limiting factor in the prediction of biomass with traditional VIs. VIs, such as WI and SWWI, which are based on bands in the shortwave infrared area produced better predictions and point on the close correlation between canopy water content and green biomass (Asner, 1998;

Anderson et al., 2004). The importance of water absorption indicators is also confirmed by investigations of Psomas et al. (2011) on species rich grassland.

Sward-specific selected NDSI wavebands improved the prediction for all swards except red clover mixtures. Here, the ratio index WI performed slightly better, pointing to the fact that ratio based indices may have a potential for better fit than NDVI-based ones. Highest R^2 -values were primarily located on both the NIR-shoulder and on the flanks of the first water absorption between 934 – 1081 nm. The use of 3-band VIs may be one option to further improve the prediction power of VIs, as it was shown that the inclusion of the green band into red/NIR reflections was able to disentangle pigment and LAI characteristics (Haboudane et al., 2004). None of the exclusively tested VIs did achieve the prediction quality of exclusive USH measurements confirming the approach of this study to use USH as the first-order sensor and complement these measurements with appropriate VIs.

6.4.3 Biomass prediction using a combination of USH and VIs

In combination with USH, dominant bands of the NDSI were broader distributed along the electromagnetic spectrum, but still mostly located at the water absorption bands. Thus, the use of VIs for BM prediction in legume-grass mixtures, independent of exclusive or combined operation, is rather associated to water absorption bands than to red/NIR bands. These findings are in line with investigations of Psomas et al. (2011) conducted on species rich grassland, but the dominant bands of best fit found there for swards of the Arrhenatherion to Mesobromion type differ from those found for legume-grass mixtures using exclusive VIs in this study. Psomas et al. (2011) located bands in the areas of 720, 1200, 1700 and 2280 nm which are only partly covered with high R^2 -values in the spectral maps of Fig. 6 - 3. Analogies were mostly found for the 1200 nm region, known as a water absorption band (Asner, 1998; Fig. 6 - 1 in this study), corresponding to all mixtures and common swards. In a comparison of sward-specific hotspots pure grass swards corresponded to spectral band combinations found for mixtures and common swards and thus seem to dominantly affect the characteris-

tics of these mixtures. In contrast, pure legume swards showed best fit band combinations in other spectral regions, but compared to hotspot areas of mixed and pure grass swards, acceptable R^2 values were found, except for pure lucerne. Hence, a species independent selection of wavelength combinations is possible for most of the investigated sward types, which is confirmed by selected bands for common swards ($R^2_{\text{max}} = 0.42$ at 1028-1019nm). The integration of all species-specific sward types in common swards is a compromise and will not achieve such high prediction accuracies as found for maximal wavelength adaption in pure swards, as wavelength combinations in common swards match suboptimal conditions. However, it can be considered as the least common denominator with a comparable robust calibration.

The combination of USH measurements with sward-specific selections of NDSI bands increased prediction accuracy significantly. Compared to regression analysis results, a cross validation showed mostly a slight reduction of prediction accuracy as found for hyperspectral data on comparable swards (Biewer et al., 2009a, 2009b). A major reduction was observed in pure swards of lucerne indicating an over-fitting of calibration due to a small sample size. Hence, results of this sward type must be interpreted carefully. Nevertheless, a potential of combined use of USH and VIs led to a reduction in variance and a linearization of predictions.

Concerning the initially addressed question, how both sensors act together, significant interactions showed that the complement of VIs added to USH can help to overcome limitations of exclusive ultrasonic measurements, regarding inconsistencies in the BM-USH-relationship. The diverging curves in figure 6 - 6 point to a clear influence of the NDSI-contribution to BM predictions. If BM is increasing less strong with increasing sward height, the curve describes a pronounced saturation. This effect may occur with increasing amounts of fertile grass shoots and inflorescences or appearance of single tall weed individuals. In contrast, VI-values associated to high biomass modify the curve towards a more linear relationship with increased slope. Interestingly, at very low sward heights VI variation did hardly differentiate BM predictions. Thus, USH alone represents biomass in a

sufficient proportion in low swards, but the importance of VI complements gets stronger if sward height increases. The sward height offset at zero BM (Fig. 6 - 6) is due to the fact, that sward height is measured from ground and biomass is harvested at 5 cm stubble height, which compares to practice conditions regarding the disparity of sensor mount reference in relation to the ground and the cut height for harvestable biomass.

6.4.4 Band width variation

Increasing band widths did not result in substantial losses in prediction quality, which particularly applies for the combination with USH. This result does not correspond with findings by various authors (Blackburn 1998, Thenkabail et al. 2000, Gong et al. 2003, Mutanga and Skidmore 2004) where narrow bands performed better than broad bands. However, those studies refer to other crops or canopy parameters, respectively, whereas data for high yielding legume-grass mixtures are not available. The relevant water absorption bands identified in this study seem to keep their BM related characteristics over a broad range of wavelengths and thus, allow a representation even in broader bands of sensors. This has important practical implications for the choice of NIR-sensors where the sensitivity range often follows a sinus curve with high sensitivities between 50 and 100 nm (Hewlett Packard, 2012).

6.5 Conclusions

From the study can be concluded, that a combination of vegetation indices and ultrasonic sward height is a useful complementation to overcome sensor-specific limitations which restrict the acquisition of the actual canopy structure. The spectral reflections of the canopy seem to adjust disparities between green biomass and sward height. In fact, VIs compensate biomass overestimations which occur, if single high growing plant parts enhance USH without adequate gain in sward density. Compared to exclusive USH, which always achieved better predictions than exclusive VIs, the combination of sensors improved prediction from $R^2 = 0.80 - 0.82$ to $R^2 = 0.88 - 0.90$ in species-specific mixtures aligned with a reduc-

tion of SE from 0.74 – 1.25 t DM ha⁻¹ to 0.60 – 0.88 t DM ha⁻¹. A main outcome of the study is the strong relationship between biomass and reflections in the water absorption bands of the electromagnetic spectrum and its validity which is rather independent from the bandwidth. NDSI band configurations selected from common swards and used for sward-specific development of regression equations only slightly reduced R²-values compared to predictions based on sward-specific wavelength selection. These findings have important implications for an efficient configuration of measuring units consisting of both ultrasonic and spectral sensors. However, accuracy may be further enhanced by e.g. the use of ratio-based indices and the inclusion of more than two bands in the VI configuration.

Acknowledgements

The authors would like to thank Sonja Biewer, Maike Himstedt and Felix Richter for carrying out the practical lab and field work.

6.6 References

- Anderson, M.C., Neale, C.M.U., Li, F., Norman, J.M., Kustas, W.P., Jayanthi, H., Chavez, J.: 2004, Up-scaling ground observations of vegetation water content, canopy height and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 92, pp. 447–464.
- Asner, G.P., 1998: Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 64, pp. 234–253.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., Hatfield, J.L., 1984: Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76, 300-306
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A.R, 1995: A review of vegetation indices, *Remote Sensing Reviews*, 13:1-2, 95-120
- Baret, F., Champion, I., Guyot, G., Podaire, A., 1987: Monitoring wheat canopies with a high spectral resolution radiometer. *Remote Sensing of the Environment*, 22, 367-378.

- Basso, B., Bertocco, M., Sartori, L., Martin, E.C., 2007. Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize–wheat–soybean rotation. *European Journal of Agronomy* 26, 82–91.
- Biewer, S., Fricke, T., Wachendorf, M., 2009a. Determination of dry matter yield from legume/grass swards by field spectroscopy. *Crop Science* 49, 1927–1936.
- Biewer S., Fricke T., Wachendorf M., 2009b: Development of canopy reflectance models to predict forage quality of legume-grass mixtures, *Crop Science*, 49, 1917-1926.
- Birth, G. S. & G. McVey, 1968: Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal*, 60, 640-643
- Blackburn, G.A., 1998: Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, 66, pp. 273–285.
- Blackburn, G.A., Steele, C.M., 1999: Towards the remote sensing of matorral vegetation physiology: Relationships between spectral reflectance, pigment, and biophysical characteristics of semiarid bushland canopies. *Remote Sensing of Environment*, 70, 278–292.
- Blackmore, S., 2003: The role of yield maps in Precision Farming. Ph.D. Thesis, Cranfield University, p. 170.
- Boschetti, M., Bocchi, S., Brivio, P.A., 2007: Assessment of pasture production in the Italian Alps using spectrometric and remote sensing information. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 267–272
- Broge, N.H., Leblanc, E., 2000: Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76, pp. 156–172.
- Chen, J., 1996: Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22, 229–242.
- Chen, J., Song, G.U., Miaogen, S., Yanhong, T., Matsushita, B., 2009: Estimating aboveground biomass of grassland having a high canopy cover: an exploratory analysis of in situ hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 24, 6497-6517
- Cozzolino, D., Fassio, A., Fernandez, E., Restaino, E., La Manna, A., 2006: Measurement of chemical composition in wet whole maize silage by visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Animal Feed Science and Technology* 129, 329–336.

- Ehlert, D., Horn, H.-J., Adamek, R., 2008: Measuring crop biomass density by laser triangulation. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 117–125.
- Elvidge, C.D. and Chen, Z., 1995: Comparison of broadband and narrowband red and nearinfrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 54, pp. 38–48.
- Elvidge, C.D., Lyon, R.J.P., 1985: Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass. *Remote Sensing of Environment*, 17, pp. 265–279.
- Erasmi, S., Dobers, E.S., 2004: Potential and limitations of spectral reflectance measurements for the estimation of the site specific variability in crops. p. 42–51. *In* M. Owe and G. D’Urso (ed.) *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology V: Proc. of SPIE Vol. 5232*. Barcelona, Spain. 8 Sept. 2003. SPIE, Bellingham, WA.
- Everitt, J. H., Escobar, D. E., Villarreal, R., Noriega, J. R., Davis, M. R., 1991: Airborne video systems for agricultural assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 231–242.
- Ferwerda, J.G., Skidmore, A.K., Mutanga, O., 2005: Nitrogen detection with hyperspectral normalized ratio indices across multiple plant species. *International Journal of Remote Sensing*, 26, pp. 4083–4095.
- Flynn, E.S., Dougherty, C.T., Wendroth, O., 2008: Assessment of Pasture Biomass with the Normalized Difference Vegetation Index from Active Ground-Based Sensors. *Agronomy Journal*, 100, 114–121.
- Frame, J. 1992. *Improved grassland management*. Farming Press Books, Ipswich, UK.
- Fricke T., Richter F., Wachendorf M. (2011): Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor. *Computer and Electronics in Agriculture*, 79, 142–152.
- Gamon, J.A., Serrano, L., Surfus, J.S., 1997: The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112, 492–501.
- Gao, X., Huete, A.R., Wenge, N., Miura, T., 2000: Optical-Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination, *Remote Sensing of Environment*, 74, 609–620.
- Gebbers, R., Ehlert, D., Adamek, R., 2011: Rapid Mapping of the Leaf Area Index in Agricultural Crops. *Agronomy Journal*, 103, 5, 1532–1541.
- Godwin, R.J., Wheeler, P.N., O’Dogherty, M.J., Watt, C.D., Richards, T., 1999. Cumulative mass determination for yield maps of non-grain crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 23 (2), 85–101.

- Goel, N.S., 1989: Inversion of canopy reflectance models for estimation of biophysical parameters from reflectance data. In: Asrar, G. (Ed.), *Theory and applications of optical remote sensing*. Wiley & Sons, New York, pp. 205–251.
- Gong, P., Pu, R., Biging, G.S., Larrieu, M.R., 2003: Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, pp. 1355–1362.
- Guyot, G. and Baret, F., 1988: Utilisation de la haute résolution spectrale pour suivre l'état des 494 couverts végétaux, *Proceedings of the 4th International colloquium on spectral signatures of 495 objects in remote sensing*. ESA SP-287, Assois, France, pp. 279–286.
- Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P., Strachan, I.B., 2004: Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modelling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, 337–352.
- Hansen, P.M., Schjoerring, J.K., 2003: Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment*, 86, 542–553.
- Heege, H.J., Reusch, S., Thiessen, E., 2008: Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. *Precision Agriculture*, 9, 115–131.
- Henning, B., Prange, S., Dierks, K., Daur, P.-C., 2000. Ultrasonic sensor properties characterized by a PC-controlled scanning measuring system. *Ultrasonics* 38, 852–856.
- Hewlett Packard, 2012: Data sheet: High performance T 1 ¾ (5mm), TS AlGaAs Infrared (875 nm) Lamp.
- Huang, Y., Qian, X., Chen, S., 2009: Multi-sensor calibration through iterative registration and fusion. *Computer-Aided Design*, 41, 240–255.
- Huete, A.R., Jackson, R.D., Post, D.F., 1985: Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment*, 17, pp. 37–54.
- Huete, A. R., 1988: A soil vegetation adjusted index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.
- Huete, A.R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, D.P., Gao, X., Ferreira, L.G., 2002: Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 83, 195–213.

- Hutchings, N.J., 1991. Spatial heterogeneity and other sources of variance in sward height as measured by the sonic and HFRO sward sticks. *Grass and Forage Science* 46 (3), 277–282.
- Hutchings, N.J., 1992. Factors affecting sonic sward stick measurements: the effect of different leaf characteristics and the area of sward sampled. *Grass and Forage Science* 47 (2), 153–160.
- Hutchings, N.J., Phillips, A.H., Dobson, R.C., 1990. An ultrasonic rangefinder for measuring the undisturbed surface height of continuously grazed grass swards. *Grass and Forage Science* 45 (2), 119–127.
- Inoue, Y., Morinaga, S., Shibayama, M., 1993: Non-destructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. *Japanese Journal of Crop Science*, 62, pp. 462–469.
- Inoue, Y., Moran, M.S. Horie, T., 1998: Analysis of spectral measurements in paddy field for predicting rice growth and yield based on a simple crop simulation model. *Plant Production Science*, 1, pp. 269–279.
- Inoue, Y., Peñuelas, J., Miyata, A., Mano, M., 2008, Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO₂ flux measurements in rice. *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 156–172.
- Jackson, R. D. (1983), Spectral indices in n-space. *Remote Sensing of Environment*. 13:409–421.
- Jacquemoud, S., Ustin, S. L., Verdebout, J., Schmuck, G., Andreoli, G., Hosgood, B., 1996: Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of the Environment*, 56, 194± 202.
- Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilvé, H., Frangi, J.-P., 2000: Comparison of Four Radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopy Reflectance: Direct and Inverse Mode. *Remote Sensing of Environment*, 74, 471-481.
- Joggi, D., Hofer, U., Nösberger, J., 1983: Leaf area index, canopy structure and photosynthesis of red clover (*Trifolium pratense* L.). *Plant, Cell and Environment*, 6 (8), 611-616.
- Jones, C.L., Maness, N.O., Stone, M.L., Jayasekara, R., 2004: Sonar and Digital Imagery for Estimating Crop Biomass. 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting, Fairmont Chateau Laurier, The Westin, Government Centre, Ottawa, Ontario, Canada, 1 - 4 August 2004.
- Jones, C.L., Weckler, P.R., Maness, N.O., Jayasekara, R., Stone, M.L., Chrz, D., 2007: Remote Sensing to Estimate Chlorophyll Concentration in Spicach Using Multi-spectral Plant Reflectance. *Transactions of the ASABE*, 50, 6, 2267-2273.

- Jordan, C.F., 1969; Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663–666.
- Laidlaw, A.S., Withers, J.A., 1998. Changes in contribution of white clover to canopy structure in perennial ryegrass/white clover swards in response to N fertilizer. *Grass and Forage Science* 53 (1), 287–291.
- Lan, Y., Zhang, H., Lacey, R., Hoffmann, W.C., Wu, W., 2009: Development of an Integrated Sensor and Instrumentation System for Measuring Crop Conditions. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript IT 08 1115. Vol. XI. April, 2009.
- Ledgard, S.F., Steele, K.W., 1992. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant and Soil* 141, 137–153.
- Llorens, J., Gil, E., Llop, J., Escolà, A., 2011: Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods. *Sensors*, 11, 2177–2194.
- Mahmood, H.S., Hoogmoed, W.B., van Henten, E.J., 2012: Sensor data fusion to predict multiple soil properties. *Precision Agriculture*, Online first, DOI 10.1007/s11119-012-9280-7
- Nelder, J.A., 1994: The statistics of linear models: back to the basics. *Statistics and Computing* 4, 221–234.
- Nelder, J.A., Lane, P.W., 1995: The computer analysis of factorial experiments. In memoriam: Frank Yates. *American Statistician* 49, 382–385.
- Numata, I., Roberts, D.A., Chadwick, O.A., Schimel, J., Sampaio, F.R., Leonidas, F.C., Soares, J.V., 2007. Characterization of pasture biophysical properties and the impact of grazing intensity using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 109, 314–327.
- Park, R.S., Gordon, F.J., Agnew, R.E., Barnes, R.J., Steen, R.W.J., 1997: The use of near infrared reflectance spectroscopy on dried samples to predict biological parameters of grass silage. *Animal Feed Science Technology* 68, 235–246.
- Peñuelas, J., Filella, I., Lloret, P., Munoz, F., Vilajeliu, M., 1995: Reflectance assessment of mite effects on apple trees. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2727–2733.
- Peñuelas, J., Piñcol, J., Ogaya, R., Filella, I., 1997: Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18, pp. 2869–1875.
- Pepperl, Fuchs, 2010, *Sensors for the factory automation – Overview Standard Sensors*. Available from: <<http://files.pepperl->

fuchs.com/selector_files/navi/productInfo/doct/tdoct0989a_eng.pdf> (accessed 22.08.12).

- Pinter Jr., P.J., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.M., Moran, M.S., Daugherty, C.S.T., Upchurch, D.R., 2003: Remote Sensing for Crop Management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69, 6, 647–664.
- Price, K.P., Guo, X., Stiles, J.M., 2002: Comparison of Landsat TM and ERS-2 SAR data for discriminating among grassland types and treatments in eastern Kansas. *Computers and Electronics in Agriculture* 37, 157–171.
- Psomas, A., Kneubühler, M., Huber, S., Itten K., Zimmermann, N.E., 2011: Hyperspectral remote sensing for estimating aboveground biomass and for exploring species richness patterns of grassland habitats, *International Journal of Remote Sensing*, 32:24, 9007-9031
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Keer, Y. H., Sorooshian, S., 1994: A modified soil vegetation adjusted index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119–126.
- Radtke, P.J., Boland, H.T., Scaglia, G., 2010: An evaluation of overhead laser scanning to estimate herbage removals in pasture quadrats. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 12, 1523–1528.
- Reusch, S., 2005: Optimum waveband selection for determining the nitrogen uptake in winter wheat by active remote sensing. In J. V. Stafford (Ed.), *Proceedings of the 5th European conference on precision agriculture*, Wageningen, The Netherlands, Academic Publishers, 261–266.
- Reyns, P., Missotten, B., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., 2002: A Review of Combine Sensors for Precision Farming. *Precision Agriculture* 3, 169-182.
- Robert, P.C., 2002. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil* 247, 143–149.
- Robertson, M.J., Llewellyn, R.S., Mandel, R., Lawes, R., Bramley, R.G.V., Swift, L., Metz, N., O’Callaghan, C., 2012: Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry: status, issues and prospects. *Precision Agriculture*, 13, 181–199
- Rougean, J.-L., Breon, F. M., 1995: Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51, 375– 384.
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Shell, J.A. and Deering, D.W., 1974: Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS-1. In *Proceedings 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*, 10–14 December 1974, Washington, DC (Washington: NASA), Vol. 1, pp. 309–317.

- Sanderson, M.A., Soder, K.J., Brzezinski, N., Taube, F., Klement, K., Muller, L.D., Wachendorf, M., 2006. Sward structure of simple and complex mixtures of temperate forages. *Agronomy Journal* 98, 238–244.
- Savitzky, A., Golay, M.J.E., 1964: Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analals of Chemistry*, 36, 1627–1639.
- Schellberg, J., Hill, M.J., Gerhards, R., Rothmund, M., Braun, M., 2008. Precision agriculture on grassland: applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy* 29 (2–3), 59–71.
- Schino, G., Borfecchia, F., De Cecco, L., Dibari, C., Iannetta, M., Martini, S., Pedrotti, F., 2003. Satellite estimate of grass biomass in a mountainous range in central Italy. *Agroforestry Systems* 59, 157–162.
- Scotford, I.M., Miller, P.C.H., 2004. Combination of spectral reflectance and ultrasonic sensing to monitor the growth of winter wheat. *Biosystems Engineering* 87 (1), 27–38.
- Sellers, P.J., 1985: Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6, pp. 1335–1372.
- Serrano, L., Filella, I., Peñuelas, J., 2000: Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science*, 40, 723–731.
- Stafford, J.V., 2000: Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal Agricultural Engineering Research*, 76, 267–275.
- Stafford, J.V., Ambler, B., Lark, R.M., Catt, J., 1996. Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 14, 101–119.
- Starks, P.J., S.W. Coleman, Phillips, W.A., 2004: Determination of forage chemical composition using remote sensing. *Journal of Range Management*, 57, 635–640.
- Terhoeven-Urselmans, T., Michel, K., Helfrich, M., Flessa, H., Ludwig, B., 2006: Nearinfrared spectroscopy can predict the composition of organic matter in soil and litter. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 168–174.
- Thenkabail, P.S., Smith, R.B., De Pauw, E., 2000: Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71, pp. 158–182.
- Todd, S.W., Hoffer, R.M., Milchunas, D.G., 1998: Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 427–438.

- Tremblay, N., Wang, Z., Ma, B.-L., Belec, C., Vigneault, P., 2009: A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable rate nitrogen application. *Precision Agriculture*, 10, 145-161.
- Vescovo, L., Wohlfahrt, G., Balzarolo, M., Pilloni, S., Sottocornola, M., Rodeghiero, M., Gianelle, D., 2011: New spectral vegetation indices based on the near-infrared shoulder wavelengths for remote detection of grassland phytomass, *International Journal of Remote Sensing*, 33, 7, 2178-2195.
- Virkajärvi, P., 2003: Effects of defoliation height on regrowth of timothy and meadow fescue in generative and vegetative phases of growth. *Agriculture and Food Science in Finland*, 12, 177-193.
- Wachendorf, M., Büchter, M., Trott, H., Taube, F., 2004. Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. II. Impact of defoliation system and nitrogen input on nitrate leaching losses. *Grass and Forage Science* 59, 56–68.
- Walter-Shea, E.A., Privette, J., Cornell, D., Mesarch, M.A., Hays, C.J., 1997: Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa. *Remote Sensing of Environment* 61, 162–177.
- Weiser, R.L., Asrar, G., Miller, G.P., Kanemasu, E.T., 1986: Assessing Grassland Biophysical Characteristics from Spectral Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 20, 141-152
- Wylie, B.K., Meyer, D.J., Tieszen, L.L., Mannel, S., 2002: Satellite mapping of surface biophysical parameters at the biome scale over the North American grasslands, a case study. *Remote Sensing of Environment* 79, 266–278.
- Y. Lan, H. Zhang, R. Lacey, C. Hoffman, Wu, W., 2009: Development of an integrated sensor and instrumentation system for measuring crop conditions,” *Agricultural Engineering International*, vol. 11, Manuscript IT 08 1115, 16 p.

6.7 Appendix

Appendix 6 - 1: Equations of the relationships between measured biomass (BM^a) and ultrasonic sward height (USH^b).

Sward type	N	R ²	SE	Equation
Common swards	294	0.75	1.06	$BM = -0.857 + 0.126 \text{ USH} - 0.00038 \text{ USH}^2$
White clover-grass mixtures	145	0.82	0.74	$BM = -1.361 + 0.154 \text{ USH} - 0.00056 \text{ USH}^2$
Red clover-grass mixtures	138	0.80	0.99	$BM = -0.569 + 0.099 \text{ USH}$
Lucern-grass mixtures	79	0.80	1.25	$BM = -0.300 + 0.083 \text{ USH}$
White clover	45	0.60	0.64	$BM = -0.431 + 0.097 \text{ USH}$
Red clover	39	0.69	0.89	$BM = -1.928 + 0.192 \text{ USH} - 0.0013 \text{ USH}^2$
Lucern	12	0.79	1.52	$BM = -3.961 + 0.123 \text{ USH}$
Grass	82	0.84	0.71	$BM = -1.541 + 0.188 \text{ USH} - 0.0012 \text{ USH}^2$

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b USH = ultrasonic sward height (cm) as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 2: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and existing vegetation indices (VI^b) for the common data set (n = 294).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	1.98	0.10	BM = 0.111 + 0.285 VI - 0.0058 VI ²
NDVI	1.97	0.11	BM = -3.360 + 7.380 VI
EVI	1.96	0.12	BM = -4.001 + 17.69 VI - 10.42 VI ²
REIP	1.90	0.18	BM = -339.7 + 0.475 VI
SR _{nar}	1.98	0.10	BM = 0.210 + 0.254VI - 0.0048 VI ²
NDVI _{nar}	1.97	0.11	BM = -3.395 + 7.351 VI
MSR	1.97	0.11	BM = -1.422 + 2.051 VI -0.214 VI ²
RDVI	1.96	0.12	BM = -6.126 + 27.64 VI - 19.94 VI ²
SAVI	1.97	0.11	BM = -7.728 + 29.24 VI -19.12 VI ²
MSAVI	1.97	0.12	BM = -3.175 + 15.54 VI - 9.107 VI ²
WI	1.69	0.35	BM = 123.2 - 246.1 VI - 124.4 VI ²
SWWI	1.83	0.24	BM = 9.893 - 20.16 VI +10.32 VI ²
PRI	2.05	0.04	BM = 3.415 + 16.52 VI
NPQI	-	-	n.s.
GRI	1.89	0.18	BM = -0.715 + 0.510 VI
SIPI	1.98	0.10	BM = 31.30 - 40.11 VI + 12.24 VI ²
ISI	1.87	0.20	BM = -3.635 + 150.8 VI - 698.5 VI ²
NIDI	2.03	0.06	BM = -5.200 + 209.7 VI - 1255 VI ²
NDSI _{vsc}	1.92	0.16	BM = -6.390 + 246.0 VI - 1464 VI ²

Appendix 6 - 2b: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and existing vegetation indices (VI^b) for white clover-grass mixtures (n = 145).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	1.63	0.11	BM = 0.176 + 0.261 VI - 0.0062 VI ²
NDVI	1.61	0.12	BM = -1.783 + 4.880 VI
EVI	1.62	0.13	BM = -2.893 + 15.19 VI - 10.0 VI ²
REIP	1.66	0.08	BM = -166.9 + 0.235 VI
SR _{nar}	1.63	0.11	BM = 0.306 + 0.222 VI - 0.0047 VI ²
NDVI _{nar}	1.61	0.13	BM = -1.855 + 4.916 VI
MSR	1.60	0.15	BM = 1.470 +2.216 VI - 0.283 VI ²
RDVI	1.61	0.14	BM = -4.940 + 24.99 VI - 20.16 VI ²
SAVI	1.63	0.11	BM = -6498 + 27.03 VI - 19.67 VI ²
MSAVI	1.61	0.13	BM = -3.303 +17.56 VI - 12.51 VI ²
WI	1.34	0.40	BM = 78.66 - 161.1 VI + 83.35 VI ²
SWWI	1.46	0.29	BM = 7.272 -14.23 VI + 7.082 VI ²
PRI	1.66	0.08	BM = 2.062 - 44.60 VI - 610.0 VI ²
NPQI	1.69	0.03	BM = 1.636 - 8.020 VI
GRI	1.62	0.12	BM = -2.094 + 1.099 VI - 0.062 VI ²
SIPI	1.61	0.13	BM = 21.21 - 26.35 VI + 7.886 VI ²
ISI	1.63	0.10	BM = 0.0046 + 37.58 VI
NIDI	-	-	n.s.
NDSI _{vsc}	1.53	0.21	BM = -1.734 + 65.32 VI ²

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 2c: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and existing vegetation indices (VI^b) for red clover-grass mixtures (n = 138).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	1.92	0.23	BM = 0.726 + 0.122 VI
NDVI	1.90	0.25	BM = 2.587 – 11.93 VI + 14.24 VI ²
EVI	1.97	0.19	BM = -0.253 + 4.343 VI
REIP	1.82	0.31	BM = -381.6 + 0.533 VI
SR _{nar}	1.92	0.23	BM = 0.817 + 0.106 VI
NDVI _{nar}	1.90	0.25	BM = 2.657 – 12.10 VI + 14.21 VI ²
MSR	1.90	0.24	BM = -0.153 + 0.826 VI
RDVI	1.95	0.21	BM = -1.320 + 7.104 VI
SAVI	1.97	0.19	BM = -1.587 + 6.781 VI
MSAVI	1.94	0.21	BM = -0.611 + 5.102 VI
WI	1.36	0.62	BM = 140.6 - 288.3 VI + 148.4 VI ²
SWWI	1.70	0.40	BM = 11.03 - 23.09 VI + 11.88 VI ²
PRI	2.08	0.10	BM = 3.477 + 21.69 VI
NPQI	-	-	n.s.
GRI	1.74	0.37	BM = -1.738 + 0.655 VI
SIPI	1.96	0.20	BM = 33.64 - 43.46 VI + 13.34 VI ²
ISI	1.75	0.36	BM = -2.213 + 84.29 VI
NIDI	2.12	0.07	BM = -5.692 + 229.4 VI - 1449 VI ²
NDSI _{vsc}	1.91	0.24	BM = -1.949 + 79.54

Appendix 6 - 2d: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and existing vegetation indices (VI^b) for lucerne-grass mixtures (n = 79).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	2.14	0.42	BM = 0.061 + 0.218 VI
NDVI	2.19	0.40	BM = 6.102 -25.65 VI + 26.49 VI ²
EVI	2.17	0.40	BM = -2.00 + 8.221 VI
REIP	2.24	0.36	BM = -515.5 + 0.720 VI
SR _{nar}	2.14	0.42	BM = 0.173 + 0.193 VI
NDVI _{nar}	2.19	0.40	BM = 6.253 – 25.95 VI + 26.42 VI ²
MSR	2.04	0.41	BM = -0.927 + 1.269 VI
RDVI	2.17	0.40	BM = -3424 + 12.35 VI
SAVI	2.21	0.37	BM = -3.992 + 11.92 VI
MSAVI	2.17	0.40	BM = -2.037 + 8.648 VI
WI	1.53	0.70	BM = 215.7 - 439.9 VI + 224.9 VI ²
SWWI	2.02	0.49	BM = 12.54 -26.30 VI + 13.50 VI ²
PRI	2.24	0.37	BM = 5.150 + 92.62 VI + 614.8 VI ²
NPQI	-	-	n.s.
GRI	1.98	0.50	BM = -2.848 + 0.939 VI
SIPI	2.35	0.31	BM = 45.68 - 59.88 VI + 18.54 VI ²
ISI	2.39	0.27	BM = -3.031 + 108.4 VI
NIDI	2.71	0.07	BM = 6.646 - 46.05 VI
NDSI _{vsc}	2.72	0.06	BM = -0.042 + 48.66

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 2e: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and existing vegetation indices (VI^b) for pure white clover swards (n = 45).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	-	-	n.s.
NDVI	-	-	n.s.
EVI	-	-	n.s.
REIP	-	-	n.s.
SR _{nar}	-	-	n.s.
NDVI _{nar}	-	-	n.s.
MSR	-	-	n.s.
RDVI	-	-	n.s.
SAVI	-	-	n.s.
MSAVI	-	-	n.s.
WI	0.91	0.20	BM = 425.3 - 761.9 VI + 342.8 VI ²
SWWI	0.95	0.14	BM = 32.51 - 146.0 VI + 175.4 VI ²
PRI	0.92	0.16	BM = 2.077 - 29.79 VI
NPQI	-	-	n.s.
GRI	-	-	n.s.
SIPI	0.91	0.09	BM = -60.26 + 62.26 VI
ISI	0.92	0.17	BM = 0.012 + 32.25 VI
NIDI	0.71	0.51	BM = -1.976 + 68.69 VI
NDSI _{vesc}	0.71	0.50	BM = -2.107 + 76.21 VI

Appendix 6 - 2f: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and existing vegetation indices (VI^b) for pure red clover swards (n = 39).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	1.29	0.33	BM = -0.997 + 0.181 VI
NDVI	1.29	0.33	BM = -34.58 + 41.40 VI
EVI	1.49	0.11	BM = -0.978 + 4.791 VI
REIP	1.14	0.48	BM = -623.4 + 0.868 VI
SR _{nar}	1.30	0.31	BM = -0.740 + 0.154 VI
NDVI _{nar}	1.31	0.31	BM = -35.27 + 41.80 VI
MSR	1.28	0.34	BM = -3.758 + 1.529 VI
RDVI	1.47	0.13	BM = -2.870 + 8.870 VI
SAVI	1.48	0.11	BM = -2.901 + 8.121 VI
MSAVI	1.41	0.19	BM = -3.853 + 8.619 VI
WI	1.19	0.43	BM = -37.94 + 37.36 VI
SWWI	1.31	0.31	BM = 11.99 - 19.89 VI
PRI	-	-	n.s.
NPQI	-	-	n.s.
GRI	1.14	0.47	BM = -3.471 + 0.831 VI
SIPI	1.44	0.17	BM = 108.4 - 104.9 VI
ISI	1.04	0.56	BM = -1.917 + 82.84 VI
NIDI	0.97	0.62	BM = -3.756 + 119.3 VI
NDSI _{vesc}	0.94	0.65	BM = -3.49 + 123.9 VI

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 2g:

Regression statistics of measured biomass (BM^a) and existing vegetation indices (VI^b) for pure lucerne swards (n = 12).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	-	-	n.s.
NDVI	2.48	0.44	BM = -22.50 + 31.67 VI
EVI	2.43	0.47	BM = -2.853 + 10.58 VI
REIP	2.23	0.55	BM = -795.5 + 1.110 VI
SR _{nar}	-	-	n.s.
NDVI _{nar}	2.51	0.43	BM = -22.90 + 41.80
MSR	2.62	0.38	BM = -1.192 + 1.604 VI
RDVI	2.43	0.47	BM = -5.312 + 17.10 VI
SAVI	2.43	0.47	BM = -4.910 + 14.96 VI
MSAVI	2.37	0.49	BM = -3.066 + 11.602 VI
WI	1.72	0.73	BM = -69.93 + 68.04 VI
SWWI	2.21	0.56	BM = 17.96 - 30.64 VI
PRI	2.21	0.56	BM = 5.724 + 105.3 VI
NPQI	-	-	n.s.
GRI	2.38	0.49	BM = -2.221 + 0.946 VI
SIPI	2.60	0.39	BM = 92.23 - 85.45 VI
ISI	1.72	0.73	BM = -3.114 + 148.1 VI
NIDI	-	-	n.s.
NDSI _{vsc}	2.34	0.51	BM = -7.379 + 229.8 VI

Appendix 6 - 2h:

Regression statistics of measured biomass (BM^a) and existing vegetation indices (VI^b) for pure grass swards (n = 82).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	1.47	0.32	BM = 0.895 + 0.538 VI - 0.0165 VI ²
NDVI	1.46	0.31	BM = -3.032 + 7.063 VI
EVI	1.53	0.26	BM = -3.531 + 17.75 VI - 11.63 VI ²
REIP	1.59	0.19	BM = -233.0 + 0.327 VI
SR _{nar}	1.48	0.31	BM = -0.655 + 0.459 VI - 0.013 VI ²
NDVI _{nar}	1.46	0.31	BM = -3.084 + 7.052
MSR	1.44	0.34	BM = 2.659 + 3.411 VI - 0.490 VI ²
RDVI	1.51	0.28	BM = -4.982 + 24.81 VI - 18.75 VI ²
SAVI	1.57	0.20	BM = -1.089 + 6.162 VI
MSAVI	1.50	0.28	BM = -4.030 + 20.78 - 14.89
WI	1.43	0.34	BM = -17.88 + 19.44 VI
SWWI	1.40	0.37	BM = 5.224 - 4.804 VI
PRI	1.69	0.08	BM = 3.46 + 19.61 VI
NPQI	1.49	0.29	BM = 10.79 + 203.4 VI + 1094.2 VI ²
GRI	1.40	0.38	BM = -6.403 + 2.704 VI - 0.188 VI ²
SIPI	1.47	0.31	BM = 29.08 - 36.80 VI + 11.13 VI ²
ISI	1.55	0.22	BM = -0.284 + 44.89 VI
NIDI	1.71	0.06	BM = -0.282 + 32.24 VI
NDSI _{vsc}	1.36	0.40	BM = -2.664 + 74.46 VI

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 3: Regression statistics of measured biomass (BM^a), existing vegetation indices (VI^b) and ultrasonic sward height (USH^c) for common data set ($n = 294$).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	-	-	n.s.
NDVI	-	-	n.s.
EVI	-	-	n.s.
REIP	1.04	0.75	$BM = -76.23 + 0.113 USH + 0.105 VI - 0.0003 USH^2$
SR _{nar}	-	-	n.s.
NDVI _{nar}	-	-	n.s.
MSR	-	-	n.s.
RDVI	-	-	n.s.
SAVI	-	-	n.s.
MSAVI	-	-	n.s.
WI	0.91	0.81	$BM = -4.599 + 0.552 USH + 3.091 VI - 0.359 USH*VI - 0.013 USH^2 + 0.011 USH^2*VI$
SWWI	0.99	0.78	$BM = -1.181 + 0.148 USH + 0.204 VI + 0.0005 USH^2 - 0.0029 USH^2*VI$
PRI	1.02	0.76	$BM = -0.075 + 0.085 USH + 12.09 VI - 0.540 USH*VI$
NPQI	-	-	n.s.
GRI	-	-	n.s.
SIPI	-	-	n.s.
ISI	0.96	0.79	$BM = -0.991 + 0.127 USH + 2.759 VI - 0.0014 USH^2 + 0.014 USH^2*VI$
NIDI	0.98	0.78	$BM = 1.130 + 0.021 USH - 24.93 VI + 1.287 USH*VI - 0.0002 USH^2$
NDSI _{vsc}	0.96	0.79	$BM = -0.989 + 0.111 USH + 6.568 VI - 0.0012 USH^2 + 0.016 USH^2*VI$

Appendix 6 - 3b: Regression statistics of measured biomass (BM^a), existing vegetation indices (VI^b) and ultrasonic sward height (USH^c) for white clover-grass mixtures ($n = 145$).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	0.71	0.83	$BM = -2.273 + 0.244 USH + 0.0822 VI - 0.0069 USH*VI - 0.002 USH^2 + 0.0001 USH^2*VI$
NDVI	0.73	0.83	$BM = -0.761 + 0.134 USH - 0.434 VI - 0.0023 USH^2 + 0.0024 USH^2*VI$
EVI	0.72	0.83	$BM = -2.573 + 0.279 USH + 2.080 VI - 0.195 USH*VI - 0.0027 USH^2 + 0.0033 USH^2*VI$
REIP	0.71	0.84	$BM = -215.0 + 17.93 USH + 0.297 VI - 0.0025 USH*VI - 0.283 USH^2 + 0.0004 USH^2*VI$
SR _{nar}	0.71	0.83	$BM = -2.218 + 0.238 USH + 0.071 VI - 0.0060 USH*VI - 0.0019 USH^2 + 0.00001 USH^2*VI$
NDVI _{nar}	0.72	0.83	$BM = -0.750 + 0.134 USH - 0.428 VI - 0.0024 USH^2 + 0.0025 USH^2*VI$
MSR	0.72	0.83	$BM = -2.644 + 0.281 USH + 0.485 VI - 0.043 USH*VI - 0.0027 USH^2 + 0.0007 USH^2*VI$
RDVI	0.72	0.83	$BM = -2.864 + 0.309 USH + 2.988 VI - 0.288 USH*VI - 0.0033 USH^2 + 0.005 USH^2*VI$
SAVI	0.72	0.83	$BM = -2.984 + 0.321 USH + 2.819 VI - 0.273 USH*VI - 0.0034 USH^2 + 0.0047 USH^2*VI$
MSAVI	0.72	0.83	$BM = -2.424 + 0.268 USH + 1.970 VI - 0.192 USH*VI - 0.0027 USH^2 + 0.0035 USH^2*VI$
WI	0.70	0.84	$BM = -0.228 + 0.157 USH - 1.003 VI - 0.0052 USH^2 + 0.004 USH^2*VI$
SWWI	0.67	0.85	$BM = -2.115 + 0.222 USH + 2.162 VI - 0.181 USH*VI - 0.0005 USH^2$
PRI	0.70	0.84	$BM = 0.127 + 0.044 USH + 28.50 VI - 2.358 USH*VI + 0.0011 USH^2 + 0.036 USH^2*VI$
NPQI	0.70	0.84	$BM = 1.170 - 0.038 USH + 25.28 VI - 1.92 USH*VI + 0.0022 USH^2 + 0.027 USH^2*VI$
GRI	0.72	0.83	$BM = -2.984 + 0.312 USH + 0.282 VI - 0.025 USH*VI - 0.0031 USH^2 + 0.0004 USH^2*VI$
SIPI	0.71	0.83	$BM = -2.111 + 0.130 USH + 1.005 VI + 0.006 USH^2 - 0.006 USH^2*VI$
ISI	0.73	0.82	$BM = -0.712 + 0.171 USH - 15.49 VI - 0.0014 USH^2 + 0.010 USH^2*VI$
NIDI	0.73	0.83	$BM = 2.374 - 0.135 USH - 46.57 VI + 3.637 USH*VI + 0.004 USH^2 - 0.058 USH^2*VI$
NDSI _{vsc}	-	-	n.s.

^a BM = Biomass ($t*ha^{-1}$) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

^c USH = Ultrasonic sward height as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 3c: Regression statistics of measured biomass (BM^a), existing vegetation indices (VI^b) and ultrasonic sward height (USH^c) for red clover-grass mixtures (n = 138).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	0.97	0.81	$BM = -0.869 + 0.0942\ USH + 0.0267\ VI$
NDVI	0.98	0.80	$BM = -1.677 + 0.095\ USH + 1.493\ VI$
EVI	-	-	n.s.
REIP	0.95	0.81	$BM = -99.82 + 0.091\ USH + 0.138\ VI$
SR _{nar}	0.97	0.81	$BM = -0.857 + 0.094\ USH + 0.0236\ VI$
NDVI _{nar}	0.98	0.80	$BM = -1.683 + 0.095\ USH + 1.484\ VI$
MSR	0.97	0.80	$BM = -1.002 + 0.094\ USH + 0.164\ VI$
RDVI	-	-	n.s.
SAVI	-	-	n.s.
MSAVI	-	-	n.s.
WI	0.81	0.87	$BM = -4.704 + 0.114\ USH + 3.912\ VI - 0.0063\ USH^2 + 0.0053\ USH^2*VI$
SWWI	0.83	0.86	$BM = -0.211 + 0.103\ USH - 0.406\ VI + 0.0013\ USH^2 - 0.0036\ USH^2*VI$
PRI	0.98	0.81	$BM = 0.171 + 0.066 + 22.73\ VI - 1.364\ USH*VI + 0.0003\ USH^2 + 0.014\ USH^2*VI$
NPQI	0.96	0.81	$BM = -1.725 + 0.109\ USH - 11.089\ VI + 0.0003\ USH^2 + 0.0047\ USH*VI$
GRI	0.95	0.81	$BM = -1.415 + 0.090\ USH + 0.166\ VI$
SIPI	-	-	n.s.
ISI	0.93	0.82	$BM = -0.887 + 0.133\ USH - 1.881\ VI - 0.0013\ USH^2 + 0.012\ USH^2*VI$
NIDI	0.96	0.81	$BM = -0.360 + 0.123\ USH - 6.967\ VI - 0.0013\ USH^2 + 0.014\ USH^2*VI$
NDSI _{vsc}	0.93	0.82	$BM = -0.769 + 0.128\ USH - 2.083\ VI - 0.0017\ USH^2 + 0.020\ USH^2*VI$

Appendix 6 - 3d: Regression statistics of measured biomass (BM^a), existing vegetation indices (VI^b) and ultrasonic sward height (USH^c) for lucerne-grass mixtures (n = 79).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	1.23	0.82	$BM = -1.872 + 0.167\ USH + 0.152\ VI - 0.0068\ USH*VI - 0.0008\ USH^2 + 0.00006\ USH^2*VI$
NDVI	-	-	n.s.
EVI	-	-	n.s.
REIP	-	-	n.s.
SR _{nar}	1.23	0.82	$BM = -1.817 + 0.164\ USH + 0.135\ VI - 0.0061\ USH*VI - 0.0008\ USH^2 + 0.000005\ USH^2*VI$
NDVI _{nar}	-	-	n.s.
MSR	-	-	n.s.
RDVI	-	-	n.s.
SAVI	-	-	n.s.
MSAVI	-	-	n.s.
WI	0.96	0.89	$BM = 5.011 - 0.643\ USH - 5.147\ VI + 0.714\ USH*VI - 0.0008\ USH^2$
SWWI	1.15	0.84	$BM = 0.184 + 0.103\ USH - 0.893\ VI + 0.0006\ USH^2 - 0.0024\ USH^2*VI$
PRI	1.15	0.84	$BM = 2.278 - 0.046\ USH + 45.89\ VI - 2.387\ USH*VI + 0.0011\ USH^2 + 0.0182\ USH^2*VI$
NPQI	1.14	0.84	$BM = 1.730 - 0.121\ USH + 23.01\ VI - 2.291\ USH*VI + 0.002\ USH^2 + 0.023\ USH^2*VI$
GRI	-	-	n.s.
SIPI	-	-	n.s.
ISI	1.20	0.82	$BM = -1.028 + 0.128\ USH + 3.425\ VI - 0.0014\ USH + 0.015\ USH^2*VI$
NIDI	1.13	0.84	$BM = 1.227 - 0.0054\ USH - 23.55\ VI + 1.310\ USH*VI$
NDSI _{vsc}	1.07	0.86	$BM = 0.232 - 0.011\ USH - 11.16\ VI + 1.548\ USH*VI$

^a BM = Biomass ($t*ha^{-1}$) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

^c USH = Ultrasonic sward height as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 3e: Regression statistics of measured biomass (BM^a), existing vegetation indices (VI^b) and ultrasonic sward height (USH^c) for pure white clover swards (n = 45).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	0.61	0.65	BM = 0.399 + 0.0993 USH - 0.0035 VI
NDVI	0.61	0.64	BM = 7.492 + 0.098 USH - 8.659 VI
EVI	0.60	0.67	BM = -7.524 + 0.388 USH + 7.276 VI - 0.300 USH*VI
REIP	-	-	n.s.
SR _{nar}	0.61	0.64	BM = 0.350 + 0.099 USH - 0.029 VI
NDVI _{nar}	-	-	n.s.
MSR	0.61	0.64	BM = 0.914 + 0.099 USH - 0.293 VI
RDVI	0.60	0.67	BM = -9.535 + 0.471 USH + 12.10 VI - 0.499 USH*VI
SAVI	0.60	0.66	BM = -10.92 + 0.522 USH + 12.81 VI - 0.521 USH*VI
MSAVI	0.60	0.67	BM = -11.71 + 0.544 USH + 12.71 VI - 0.505 USH*VI
WI	0.61	0.65	BM = 7.534 + 0.110 USH - 7.441 VI
SWWI	0.58	0.68	BM = -4.057 + 0.104 USH + 8.506 VI
PRI	-	-	n.s.
NPQI	-	-	n.s.
GRI	0.61	0.64	BM = 0.859 + 0.106 USH - 0.185 VI
SIPI	0.60	0.66	BM = -49.33 + 0.095 USH + 48.70 VI
ISI	-	-	n.s.
NIDI	0.57	0.71	BM = 15.94 - 1.269 USH - 256.4 VI + 21.31 USH*VI + 0.024 USH ² - 0.377 USH ² *VI
NDSI _{vsc}	0.58	0.70	BM = 15.87 - 1.259 USH - 275.2 VI + 22.79 USH*VI + 0.024 USH ² - 0.401 USH ² *VI

Appendix 6 - 3f: Regression statistics of measured biomass (BM^a), existing vegetation indices (VI^b) and ultrasonic sward height (USH^c) for pure red clover swards (n = 39).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	0.85	0.72	BM = -1.722 + 0.065 USH + 0.1011 VI
NDVI	0.87	0.70	BM = -18.39 + 0.065 USH + 20.84 VI
EVI	0.71	0.81	BM = -0.163 + 0.164 USH - 1.678 VI - 0.0049 USH ² + 0.0046 USH ² *VI
REIP	0.77	0.77	BM = -377.2 + 0.058 USH + 0.524 VI
SR _{nar}	0.85	0.72	BM = -1.596 + 0.066 USH + 0.085 VI
NDVI _{nar}	0.88	0.70	BM = -18.59 + 0.065 USH + 20.86 VI
MSR	0.85	0.71	BM = -3.130 + 0.065 USH + 0.828 VI
RDVI	0.71	0.81	BM = 0.171 + 0.164 USH - 2.587 VI - 0.0061 USH ² + 0.0074 USH ² *VI
SAVI	0.72	0.81	BM = -0.022 + 0.172 USH - 2.263 VI - 0.0062 USH ² + 0.0069 USH ² *VI
MSAVI	0.70	0.82	BM = -0.252 + 0.161 USH - 1.489 VI - 0.0061 USH ² + 0.0062 USH ² *VI
WI	0.84	0.72	BM = -20.78 + 0.060 USH + 19.62 VI
SWWI	0.88	0.70	BM = 4.971 + 0.065 USH - 9.881 VI
PRI	-	-	n.s.
NPQI	0.86	0.72	BM = -2.205 + 0.163 USH - 29.09 VI + 1.085 USH*VI
GRI	0.80	0.75	BM = -2.873 + 0.058 USH + 0.470 VI
SIPI	0.88	0.70	BM = 66.80 + 0.072 USH - 66.24 VI
ISI	0.72	0.81	BM = -2.008 + 0.227 USH - 5.378 VI - 0.0037 USH ² + 0.026 USH ² *VI
NIDI	0.85	0.73	BM = -3.463 + 0.144 USH + 50.57 VI - 0.0011 USH ²
NDSI _{vsc}	0.87	0.70	BM = -2.229 + 0.040 USH + 71.38 VI

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

^c USH = Ultrasonic sward height as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 3g: Regression statistics of measured biomass (BM^a), existing vegetation indices (VI^b) and ultrasonic sward height (USH^c) for pure lucerne swards (n = 12).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	1.27	0.90	BM = -24.576 + 1.137 USH - 0.861 VI - 0.0088 USH ² + 0.0001 USH ² *VI
NDVI	1.29	0.91	BM = -239.2 + 12.09 USH + 204.9 VI - 11.79 USH*VI - 0.105 USH ² + 0.107 USH ² *VI
EVI	-	-	n.s.
REIP	-	-	n.s.
SR _{nar}	1.27	0.90	BM = -24.67 + 1.118 USH - 0.743 VI - 0.0086 USH ² + 0.0001 USH ² *VI
NDVI _{nar}	1.27	0.91	BM = -263.1 + 13.07 USH + 229.71 VI - 12.76 USH*VI - 0.113 USH ² + 0.115 USH ² *VI
MSR	1.27	0.90	BM = -21.29 + 1.423 USH - 7.670 VI - 0.013 USH ² + 0.001 USH ² *VI
RDVI	-	-	n.s.
SAVI	-	-	n.s.
MSAVI	-	-	n.s.
WI	-	-	n.s.
SWWI	-	-	n.s.
PRI	-	-	n.s.
NPQI	-	-	n.s.
GRI	-	-	n.s.
SIPI	-	-	n.s.
ISI	-	-	n.s.
NIDI	-	-	n.s.
NDSI _{vesc}	-	-	n.s.

Appendix 6 - 3h: Regression statistics of measured biomass (BM^a), existing vegetation indices (VI^b) and ultrasonic sward height (USH^c) for pure grass swards (n = 82).

Vegetation index	SE	R ²	Equation
SR	-	-	n.s.
NDVI	0.68	0.86	BM = -0.202 + 0.021 USH - 1.155 VI + 0.169 USH*VI - 0.0008 USH ²
EVI	0.68	0.86	BM = 0.320 - 0.039 USH - 3.553 VI + 0.420 USH*VI + 0.0032 USH ² - 0.0082 USH ² *VI
REIP	0.69	0.85	BM = -80.52 + 0.156 USH + 0.110 VI - 0.0008 USH ²
SR _{nar}	-	-	n.s.
NDVI _{nar}	0.68	0.86	BM = -0.137 + 0.016 USH - 1.225 VI + 0.173 USH*VI - 0.0008 USH ²
MSR	0.70	0.85	BM = -1.700 + 0.166 USH + 0.189 VI - 0.0009 USH ²
RDVI	0.68	0.86	BM = 1.157 - 0.134 USH - 5.586 VI + 0.653 USH*VI + 0.0049 USH ² - 0.012 USH ² *VI
SAVI	0.67	0.86	BM = 2.074 - 0.230 USH - 6.676 VI + 0.754 USH*VI + 0.0068 USH ² - 0.015 USH ² *VI
MSAVI	0.68	0.86	BM = 0.449 - 0.051 USH - 3.878 VI + 0.449 USH*VI + 0.0033 USH ² - 0.0086 USH ² *VI
WI	0.67	0.86	BM = -6.853 + 0.171 USH + 5.515 VI - 0.001 USH ²
SWWI	0.66	0.87	BM = -1.445 + 0.220 USH + 0.538 VI - 0.101 USH*VI - 0.0011 USH ²
PRI	0.69	0.85	BM = -0.829 + 0.195 USH + 12.61 VI - 0.002 USH ² - 0.011 USH ² *VI
NPQI	-	-	n.s.
GRI	0.69	0.85	BM = -1.981 + 0.160 USH + 0.157 VI - 0.0009 USH ²
SIPI	-	-	n.s.
ISI	0.70	0.85	BM = -1.811 + 0.163 USH + 10.72 VI - 0.0009 USH ²
NIDI	0.68	0.86	BM = 0.530 + 0.186 USH - 24.50 VI - 0.0037 USH ² + 0.030 USH ² *VI
NDSI _{vesc}	0.67	0.86	BM = -1.078 + 0.160 USH - 1.64 VI - 0.0026 USH ² + 0.025 USH ² *VI

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

^c USH = Ultrasonic sward height as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 4: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and the vegetation index NDSI^b based on sward specific wavelength selections of different bandwidths for the common data set (n = 294).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1028, \lambda_1=1019$	1.59	0.42	BM = -2.234 + 697.8 VI
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1028, \lambda_1=1019$	1.59	0.42	BM = -2.234 + 697.8 VI
5 nm $\lambda_2=1026, \lambda_1=1020$	1.59	0.42	BM = -2.249 + 1044.9 VI
10 nm $\lambda_2=1028, \lambda_1=1004$	1.59	0.42	BM = -2.639 + 2.877 VI
50 nm $\lambda_2=1045, \lambda_1=995$	1.61	0.41	BM = -2.768 + 170.9 VI
100 nm $\lambda_2=1198, \lambda_1=1093$	1.63	0.39	BM = 0.680 - 0.564 VI + 174.0 VI ²

Appendix 6 - 4b: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and the vegetation index NDSI^b based on sward specific wavelength selections of different bandwidths for white clover-grass mixtures (n = 145).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1081, \lambda_1=1001$	1.00	0.66	BM = -3.395 + 124.3 VI
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	1.02	0.65	BM = -2.602 + 639.4 VI
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	1.01	0.65	BM = -2.668 + 966.8 VI
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	1.02	0.65	BM = -2.958 + 262.2 VI
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	1.03	0.64	BM = -3.182 + 158.7 VI
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	1.19	0.53	BM = 0.564 + 5.846 VI + 177.2 VI ²

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 4c: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and the vegetation index NDSI^b based on sward specific wavelength selections of different bandwidths for red clover-grass mixtures (n = 138).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1032, \lambda_1=1018$	1.38	0.60	BM = -2.802 + 503.7 VI
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	1.38	0.60	BM = -2.690 + 765.8 VI
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	1.38	0.60	BM = -2.723 + 1148.9 VI
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	1.39	0.60	BM = -3.174 + 317.4 VI
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	1.42	0.58	BM = -3.399 + 189.8 VI
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	1.40	0.59	BM = 0.305 - 0.642 VI + 209.9 VI ²

Appendix 6 - 4d: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and the vegetation index NDSI^b based on sward specific wavelength selections of different bandwidths for lucerne-grass mixtures (n = 79).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=944, \lambda_1=934$	1.48	0.73	BM = 0.879 - 182.4 VI + 28194 VI ²
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	1.91	0.53	BM = -3.175 + 861.0 VI
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	1.91	0.54	BM = -3.222 + 1293.8 VI
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	1.96	0.51	BM = -3.591 + 346.2 VI
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	2.03	0.48	BM = -3.809 + 206.3 VI
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	1.75	0.62	BM = 0.291 + 1.271 VI + 251.6 VI ²

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 4e: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths for pure white clover swards ($n = 45$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=788, \lambda_1=759$	0.67	0.56	$BM = -1.092 + 205.6 VI$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	0.89	0.23	$BM = -0.633 + 365.6 VI$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	0.87	0.25	$BM = -0.760 + 569.0 VI$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	0.87	0.26	$BM = -1.172 + 168.0 VI$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	0.86	0.27	$BM = -1.122 + 97.21 VI$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	-	-	n.s.

Appendix 6 - 4f: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths for pure red clover swards ($n = 39$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=888, \lambda_1=743$	0.88	0.69	$BM = -4.692 + 90.01 VI$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	1.06	0.55	$BM = -2.586 + 826.8 VI$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	1.06	0.55	$BM = -2.292 + 1172.9 VI$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	1.05	0.56	$BM = -3.257 + 354.8 VI$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	1.04	0.56	$BM = -3.215 + 204.5 VI$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	1.09	0.52	$BM = -3.075 - 58.85 VI$

^a BM = Biomass ($t \cdot ha^{-1}$) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 4g: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths for pure lucerne swards ($n = 12$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1667, \lambda_1=1664$	1.27	0.85	$BM = 14.17 - 10338 VI$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	1.61	0.77	$BM = -7.430 + 1655.6 VI$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	1.63	0.76	$BM = -6.806 + 2351.9 VI$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	1.81	0.70	$BM = -7.432 + 635.1 VI$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	1.95	0.66	$BM = -6.516 + 351.9 VI$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	1.78	0.71	$BM = -4.869 - 85.71 VI$

Appendix 6 - 4h: Regression statistics of measured biomass (BM^a) and the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths for pure grass swards ($n = 82$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1041, \lambda_1=1037$	1.17	0.56	$BM = -1.793 + 896.4$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	1.19	0.54	$BM = -1.711 + 606.3 VI$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	1.21	0.53	$BM = -1.674 + 898.6 VI$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	1.23	0.51	$BM = -1.877 + 237.0 VI$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	1.24	0.51	$BM = -2.236 + 146.6 VI$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	1.30	0.46	$BM = 0.357 - 25.19 VI$

^a BM = Biomass ($t \cdot ha^{-1}$) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 5: Regression statistics of measured biomass (BM^a), the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths and ultrasonic sward height (USH^c) for the common data set ($n = 294$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	0.88	0.83	$BM = -0.714 + 0.122 USH + 28.87 VI - 0.0012 USH^2 + 0.735 USH^2*VI$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	0.88	0.83	$BM = -0.714 + 0.122 USH + 28.87 VI - 0.0012 USH^2 + 0.735 USH^2*VI$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	0.89	0.82	$BM = -0.873 + 0.116 USH + 121.1 VI - 0.0011 USH^2 + 0.269 USH^2*VI$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	0.90	0.82	$BM = -0.987 + 0.148 USH + 0.447 VI - 0.0018 USH^2 - 0.0088 USH^2*VI$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	0.90	0.82	$BM = -0.979 + 0.145 USH + 0.118 VI - 0.0018 USH^2 - 0.0083 USH^2*VI$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	0.90	0.82	$BM = -0.972 + 0.144 USH + 0.0028 VI - 0.0017 USH^2 - 0.0096 USH^2*VI$

Appendix 6 - 5b: Regression statistics of measured biomass (BM^a), the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths and ultrasonic sward height (USH^c) for white clover-grass mixtures ($n = 145$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=668, \lambda_1=667$	0.60	0.88	$BM = -0.794 + 0.122 USH + 191.8 VI - 14.95 USH*VI - 0.0012 USH^2$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	0.68	0.85	$BM = -0.451 + 0.097 USH - 751.0 VI + 60.42 USH*VI - 0.0011 USH^2$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	0.67	0.85	$BM = -0.444 + 0.091 USH - 282.2 VI + 25.52 USH*VI - 0.0011 USH^2$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	0.67	0.85	$BM = -0.634 + 0.101 USH + 5.140 VI - 0.460 USH*VI - 0.0008 USH^2$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	0.67	0.85	$BM = -0.591 + 0.097 USH + 4.976 VI - 0.462 USH*VI - 0.0008 USH^2$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	0.67	0.85	$BM = -0.612 + 0.099 USH + 5.837 VI - 0.542 USH*VI - 0.0008 USH^2$

^a BM = Biomass ($t*ha^{-1}$) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

^c USH = Ultrasonic sward height as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 5c: Regression statistics of measured biomass (BM^a), the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths and ultrasonic sward height (USH^c) for red clover-grass mixtures ($n = 138$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1205, \lambda_1=1181$	0.73	0.89	$BM = -0.162 + 0.072 USH - 54.76 VI - 0.0002 USH^2 - 0.139 USH^2*VI$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	0.86	0.85	$BM = -1.234 + 0.119 USH + 571.6 VI - 0.001 USH^2 + 0.537 USH^2*VI$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	0.85	0.85	$BM = -1.352 + 0.113 USH + 323.9 VI - 0.001 USH^2 + 0.216 USH^2*VI$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	0.77	0.88	$BM = 0.042 + 0.035 USH + 3.347 VI - 0.684 USH*VI - 0.0004 USH^2$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	0.78	0.88	$BM = 0.014 + 0.034 USH + 2.906 VI - 0.643 USH*VI - 0.0004 USH^2$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	0.77	0.88	$BM = -0.0098 + 0.037 USH + 3.389 VI - 0.749 USH*VI - 0.0004 USH^2$

Appendix 6 - 5d: Regression statistics of measured biomass (BM^a), the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths and ultrasonic sward height (USH^c) for lucerne-grass mixtures ($n = 79$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1027, \lambda_1=1020$	0.88	0.90	$BM = -0.470 + 0.0032 USH + 135.2 VI + 10.23 USH*VI$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	0.91	0.90	$BM = -0.920 + 0.078 USH + 795.2 VI - 0.0007 USH^2 + 0.646 USH^2*VI$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	0.92	0.90	$BM = -0.459 + 0.016 USH + 157.1 VI + 21.67 USH*VI$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	0.92	0.90	$BM = 0.281 + 0.021 USH + 5.352 VI - 0.854 USH*VI - 0.0006 USH^2$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	0.91	0.90	$BM = 0.306 + 0.014 USH + 4.629 VI - 0.803 USH*VI - 0.0005 USH^2$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	0.92	0.90	$BM = 0.289 + 0.015 USH + 5.083 VI - 0.925 USH*VI - 0.0004 USH^2$

^a BM = Biomass ($t*ha^{-1}$) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

^c USH = Ultrasonic sward height as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 5e: Regression statistics of measured biomass (BM^a), the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths and ultrasonic sward height (USH^c) for pure white clover swards ($n = 45$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=763, \lambda_1=762$	0.50	0.78	$BM = -0.802 + 0.169 USH - 1217.1 VI + 74.94 USH*VI - 0.0032 USH^2$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	-	-	n.s.
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	-	-	n.s.
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	0.60	0.65	$BM = 0.979 + 0.115 USH + 16.05 VI$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	0.60	0.65	$BM = 1.075 + 0.116 USH + 16.33 VI$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	0.60	0.65	$BM = 1.036 + 0.117 USH + 19.50 VI$

Appendix 6 - 5f: Regression statistics of measured biomass (BM^a), the vegetation index $NDSI^b$ based on sward specific wavelength selections of different bandwidths and ultrasonic sward height (USH^c) for pure red clover swards ($n = 39$).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=2286, \lambda_1=2271$	0.57	0.88	$BM = -9.983 + 0.740 USH - 251.7 VI + 16.85 USH*VI - 0.010 USH^2 - 0.264 USH^2*VI$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	0.78	0.77	$BM = -1.771 + 0.222 USH - 518.5 VI - 0.0032 USH^2 + 1.358 USH^2*VI$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	0.73	0.80	$BM = -1.592 + 0.236 USH - 352.1 VI - 0.0042 USH^2 + 0.844 USH^2*VI$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	0.86	0.71	$BM = -1.807 + 0.055 USH - 28.21 VI$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	0.86	0.71	$BM = -1.758 + 0.055 USH - 26.20 VI$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	0.86	0.71	$BM = -1.649 + 0.056 USH - 30.28 VI$

^a BM = Biomass ($t*ha^{-1}$) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

^c USH = Ultrasonic sward height as independent variable

Combining ultrasonic sward height and spectral signatures

Appendix 6 - 5g: Regression statistics of measured biomass (BM^a), the vegetation index NDSI^b based on sward specific wavelength selections of different bandwidths and ultrasonic sward height (USH^c) for pure lucerne swards (n = 12).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1749, \lambda_1=1746$	0.45	0.99	$BM = -149.7 + 6.562 \text{ USH} - 30970 \text{ VI} + 1395.5 \text{ USH} \cdot \text{VI} - 0.051 \text{ USH}^2 - 11.07 \text{ USH}^2 \cdot \text{VI}$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	-	-	n.s.
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	-	-	n.s.
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	-	-	n.s.
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	-	-	n.s.
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	-	-	n.s.

Appendix 6 - 5h: Regression statistics of measured biomass (BM^a), the vegetation index NDSI^b based on sward specific wavelength selections of different bandwidths and ultrasonic sward height (USH^c) for pure grass swards (n = 82).

NDSI	SE	R ²	Equation
Bands sward specific selected			
1nm $\lambda_2=1201, \lambda_1=1182$	0.59	0.89	$BM = -0.959 + 0.139 \text{ USH} + 35.06 \text{ VI} - 7.931 \text{ USH} \cdot \text{VI} - 0.0010 \text{ USH}^2$
Bands selected in common swards and equations developed sward specifically (central wavelengths of bands are given)			
1nm $\lambda_2=1051, \lambda_1=1049$	0.68	0.86	$BM = -2.186 + 0.179 \text{ USH} + 937.4 \text{ VI} - 0.0013 \text{ USH}^2$
5 nm $\lambda_2=1052, \lambda_1=1047$	0.69	0.85	$BM = -2.170 + 0.177 \text{ USH} + 375.2 \text{ VI} - 0.0012 \text{ USH}^2$
10 nm $\lambda_2=1245, \lambda_1=1099$	0.65	0.87	$BM = -1.210 + 0.150 \text{ USH} - 0.943 \text{ VI} - 0.268 \text{ USH} \cdot \text{VI} - 0.0012 \text{ USH}^2$
50 nm $\lambda_2=1237, \lambda_1=1103$	0.65	0.87	$BM = -1.248 + 0.150 \text{ USH} - 0.950 \text{ VI} - 0.253 \text{ USH} \cdot \text{VI} - 0.0012 \text{ USH}^2$
100 nm $\lambda_2=1225, \lambda_1=1112$	0.65	0.87	$BM = -1.253 + 0.152 \text{ USH} - 1.011 \text{ VI} - 0.296 \text{ USH} \cdot \text{VI} - 0.0012 \text{ USH}^2$

^a BM = Biomass (t*ha⁻¹) as dependent variable; ^b VI = Vegetation index as independent variable;

^c USH = Ultrasonic sward height as independent variable

7 Zusammenfassende Diskussion

7.1 Umsetzung von Precision Farming Maßnahmen im Ökologischen Landbau

In welchem Umfang Betriebe, die nach den Regeln der EU-Verordnungen ökologisch wirtschaften, in der Pflanzenproduktion Maßnahmen des Precision Farming bisher umgesetzt haben, ist weitgehend unklar. Es kann davon ausgegangen werden, dass Technologien, wie die Ertragsmessung von Druschfrüchten und Parallelfahreinrichtungen, die im Zuge der üblichen Auftragsvergabe an Lohnunternehmen mitgenutzt werden, einen Beitrag zur Informationsgewinnung und Energieeinsparung im Ökologischen Landbau darstellen (Klöble et al., 2007). Andere im Beitrag „Perspektiven einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung im Ökologischen Landbau“ vorgestellte Strategien wurden teilweise Gegenstand weiterer Untersuchungen bzw. technischer Entwicklungen. Beispiele hierfür sind unter anderem mechanische Hacksysteme zur Unkrautbeseitigung innerhalb der Saatreihen, teilweise in Verbindung mit GPS-navigierten automatischen Systemen und einer hierfür notwendigen Präzisionsablage des Saatgutes (Merfield, 2010, Rasmussen, et al., 2012). Im Bereich der Düngung erfolgten Arbeiten zu einer ortspezifischen Kalkung im Rahmen der Produktion von Qualitätsgetreide im Ökologischen Landbau (Kramer et al., 2011) und eine standortangepasste Düngung mit Gülle unter Nutzung einer am Markt angebotenen Steuerung der Güllemenge. Grundlage für deren Berechnung sind Nährstoffapplikationskarten, ein NIR-Pflanzensensor zur Erfassung der N-Versorgung der Bestände und die Online-Messung der Stickstoffgehalts in der Gülle (CLAAS, 2011).

7.2 Selektive Erntestrategie

Das in dieser Arbeit erstmalig in 2002 publizierte Verfahren der teilflächenspezifischen Ernte von Qualitätsgetreide wurde ebenfalls, aber in abgewandelter Form, weiterentwickelt. Auf Grund der Originalität sollen einige Aspekte dieses Verfahrens nachfolgend detaillierter erläutert werden. Vor dem Hintergrund der schwer steuerbaren Mineralisationsprozesse in organischen Düngern und im Boden und

der damit verbundenen unsicheren N-Versorgung und Steuerung von Proteingehalten bei der Produktion von Qualitätsgetreide stellt die selektive Ernte von qualitätsdifferenzierten Partien eine neue Option dar. Der Grundgedanke der sensorbasierten Erntestrategie beinhaltet eine Prozedur auf Basis von Prognosemodellen, bei dem unter Einbezug von Standortkriterien und spektraler Bestandesinformation die Befahrung des Mähdreschers nach Kenntnis der zu erwartenden Proteingehalte gesteuert wird (Fricke und Heß, 2002; Dusseldorp und Rösch, 2004). Hierbei kann bestehende Druschtechnik eingesetzt werden. Zusätzlicher Aufwand entstünde hierbei durch die maximal doppelte Fahrstrecke entlang der Vorgewende unter der Voraussetzung, dass der Ertrag einer Druschstrecke von Feldrand zu Feldrand im Mittel seines Proteingehaltes einer Qualitätspartie zugeordnet und am Feldrand in spezifische Container oder Wagen entleert werden kann..

Der Leitgedanke eines geeigneten Prognosemodells zur Schätzung des Proteingehalts bei der Ernte wurde in den Folgejahren durch weitere Arbeiten unterstützt. So belegten Untersuchungen zu Proteinprognosen in wachsenden Beständen von Weizen und Gerste durch spektrale Bestandesreflektionen diese Strategie. Hierzu erfolgten Befahrungen mit dem Hydro-N Sensor (Börjesson et al., 2003) die als alleinige Bemessungsgrundlage dienten und in einem anderen Ansatz die ergänzende Kombination mit satellitenbasierten Spektraldaten (Söderström et al., 2009). Die positiven Ergebnisse bestätigen den zuvor beschriebenen Ansatz, sind aber - sofern der Online-Sensor zum Einsatz - kommt mit einer zusätzlichen Befahrung verbunden.

Ein modifiziertes selektives Ernteverfahren mit direkter Messung der Proteingehalte beim Drusch wurde durch Risius (2004) aufgegriffen. Das Verfahren basiert auf der Online-Messung des Rohproteingehalts im Gutstrom (Rademacher, 2003) und einer direkt folgenden selektiv getrennten Abbunkerung. Dieses Verfahren setzt allerdings die notwendige Technik zweier Bunker und einen automatischen Wechsel des Getreidetransportes voraus. Hierzu erfolgt derzeit die Entwicklung eines speziell angepassten Mähdreschers zusammen mit der Fa. CLAAS unter

Verwendung einer klappbaren Bunkertrennwand (Risius, 2011). Beim Einsatz bestehender Druschtechnik, die der originäre Entwurf vorsah, könnte die vorgesehene gezielte Beerntung nach Prognosemodellen ergänzt werden durch die Ausrüstung mit einer Online-Proteinsensorik (Zeltex, 2005). Über dieses Kontrollinstrument wären Korrekturoptionen, im Fall nicht zutreffender Prognose, bei der Entladung am Feldrand in entsprechende Container unterschiedlicher Qualitätsstufen möglich. Inwieweit diese Ansätze Praxisreife erlangen bleibt abzuwarten.

7.3 Bedeutung von Ertragskarten für den Ökologischen Landbau

Mit den am Markt verbreiteten Ertragserfassungssystemen für den Mähdrusch können bei einer 3gliedrigen Fruchtfolge des konventionellen Landbaus im Durchschnitt ca. 60 – 70 % teilweise bis zu 100 % der Flächen eines Jahres erfasst werden. Im Ökologischen Landbau dagegen sind es aufgrund der vielfältigen Fruchtfolgen deutlich geringere Anteile. Bezogen auf die gleiche Kultur ist die Wartezeit bis zur erneuten Erfassung innerhalb einer 6gliedrigen Fruchtfolge entsprechend 6 Jahre. Damit verbunden können auch die Effekte veränderter ortsspezifisch zuzuordnender produktionstechnischer Maßnahmen der gleichen Kultur nur in großen Zeitintervallen überprüft werden. Bezogen auf die Dynamik in der Produktivität der Standorte wäre der Einsatz von Ertragsmesssystemen für Kulturen, die nicht mit dem Mähdrescher geerntet werden, eine entscheidende Hilfe. Das trifft besonders für die hohen Flächenanteile der Leguminosen-Grasgemenge zu. Vor allem vor dem Hintergrund eines im Ökologischen Landbau – im Vergleich zum konventionellen Landbau – verringerten Nährstoffimports und einem geringeren Ertragsniveau (Kirchmann und Bergström, 2001; Korsæth, 2008) ist eine maßgebende Aufgabe, die Produktivitätspotentiale der Flächen auszuschöpfen. Ertragskarten können hierbei als ein wichtiges Kontrollinstrument dienen.

Auch vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit des Ökologischen Landbaus in Bezug auf die Kohlenstoffsequestrierung kann die Ertragskartierung bedeutsam sein. In diesem Zusammenhang wird die Nachhaltigkeit des Ökologischen Land-

baus vereinzelt kritisch betrachtet. Aufgrund des im Durchschnitt geringeren Produktionsniveaus im Vergleich zum konventionellen Landbau (Nguyen et al., 1995, Kirchmann et al., 2007) stellt Leifeld (2012) die Frage, wie sich geringere Nährstoffimporte des Ökologischen Landbaus und einer damit verbundenen geringerer Produktivität positiv auf die Kohlenstoffsequestrierung auswirken können. Vielmehr sieht er bei einer umfangreichen Ausweitung des Ökologischen Landbaus Risiken in einer reduzierten Nährstoffpufferwirkung durch geringere Importe externer organischer Dünger aus konventioneller Produktion. Außer Acht gelassen wird an dieser Stelle die Gesamtbilanzierung des Energieaufwandes. Für einen sachgerechten Vergleich beider Landbaumethoden wäre u.a. der Energieaufwand für die Verwendung fossiler Energieträger bei der Produktion mineralischer N-Dünger einem alternativen N-Import legumer Mischkulturen gegenüberzustellen (Niggli et al., 2009). Neben der Einsparung von mineralischem N-Dünger ist hinsichtlich der Kohlenstoffsequestrierung beim Anbau von Leguminosen-Grasgemengen deren Produktivität von Bedeutung. In diesem Zusammenhang spielt die Kenntnis der schlaginternen Variabilität in der Ertragsbildung und einer damit verbundenen Defizitanalyse eine bedeutende Rolle für die Leistungssteigerung der Pflanzenproduktion. Diese ist gekoppelt an eine erhöhte Kohlenstoffsequestrierung und kann über eine Ertragskartierung identifiziert und quantifiziert werden.

7.4 Ertragsermittlung über Ultraschall und Spektroskopie

Entsprechend der großen Bedeutung von Leguminosen-Grasgemengen in den Fruchtfolgen des Ökologischen Landbaus ist deren Ertragskartierung eine wichtige Informationsgrundlage für das Management. Bei der Messung der Biomassen zeigten die technischen Sensoren individuelle Abhängigkeiten von den Bestandeseigenschaften. So beeinflussten die Artenzusammensetzung und die phänologische Entwicklung die Regressionsfunktion zwischen Ultraschallbestandeshöhe und Biomasse. Insbesondere bei Reinsaaten von Gräsern trat bei zunehmender Wuchshöhe ein Sättigungseffekt der Biomasseschätzung auf, wie er durch generative Triebe ohne kontinuierlich mitwachsende Blattmasse hervorgerufen wird.

Dieser Effekt zeigt sich im Datensatz aller Bestände und vor allem im Gemenge mit Weißklee. Hier überlagerte die Höhe der teils generativen Gäser den eher niedrig wachsenden Weißklee. Im Gemenge mit höher wachsenden Arten, wie Rotklee und Luzerne trat dagegen eine Linearisierung der Beziehung ein, da hier sich die Bestandesdichte mit zunehmendem Wuchs kontinuierlich entwickelte. Obwohl der grundsätzliche Trend abnehmender Bestandesdichte in höheren Aufwuchsstraten bekannt ist (Sanderson et al., 2006; Laidlaw and Withers, 1998), kann das Erscheinen der generativen Triebe ebenso wie das Auftreten einzelner hochwachsender Unkräuter diskontinuierliche Veränderungen in der Bestandesdichte hervorrufen. Dieser Zusammenhang zeigt die Grenzen der Biomasseschätzung auf Basis der Bestandeshöhe und erfordert weitere Daten zur Korrektur der genannten Abweichungsursachen. Mit den geprüften Vegetationsindices kann eine gewünschte kompensatorische Wirkung zur Verbesserung der Schätzgüte zum großen Teil erzielt werden. Bestandesspezifische Kalibrationen erreichen ein R^2 zwischen 0.88 und 0.90 bei einem SE von $0.60 - 0.90 \text{ t ha}^{-1}$ in bestandesspezifischen Mischungen. Das Korrektiv der Vegetationsindices führt dabei in einer beide Sensordaten einschließenden Regressionsfunktion zu einer verbesserten Anpassung der Schätzung. Im Fall steigender Bestandeshöhe verbunden mit geringer Biomassezunahme ergibt sich ein saturierter Verlauf der Biomasseschätzung. Steigt mit zunehmender Wuchshöhe auch die Biomasse kontinuierlicher an zeigt sich ein zunehmend linearer Verlauf der Funktion. Über diesen Effekt können in praxisüblichen Gemengen bis zu 90 % der Ertragsvariation erklärt werden. Das Verhalten ist begründet in der engen Beziehung von Vegetationsindices zum Blattflächenindex und damit zur Biomasse (Chen et al., 2009). Allerdings zeigten Indices, die auf Differenzen oder Verhältnisse zwischen der roten und infraroten Reflektion des Bestandes beruhen, keine optimale Komplementarität, da der rote Spektralbereich ebenfalls durch den Pigmentgehalt im Aufwuchs beeinflusst wird (Haboudane et al., 2004). Diese Interaktionen können durch das Einbinden weiterer Wellenlängen, wie z.B. aus dem grünen Spektralbereich entflochten werden. Eine bessere Schätzung der Biomasse mit 2-bandigen Vegetationsindices zeigte sich bei Nutzung von Wellenlängenbereichen, die an Wasserabsorptionsbanden gekoppelt waren. Diese enge Beziehung der Wasserabsorption zur Biomasse, die

auch von Psomas et al. (2011) und Hunt (1991) beschrieben wurden, zeigte in dieser Studie den weiteren Vorteil einer relativ stabilen Reaktion auf die Erweiterung der Bandbreite von 1nm auf 100 nm. Diese Beobachtung ist insofern von Bedeutung, dass einfachere Sensoren mit breiteren Banden zum Einsatz kommen können gegenüber spezifische Wellenlängen detektierende Präzisionsanfertigungen. Die Bandbreitenunabhängigkeit steht im Gegensatz zu Untersuchungen anderer Autoren, in denen schmale Banden bessere Schätzgüten erzielten als breite Banden (Blackburn, 1998, Thenkabail et al., 2000, Mutanga and Skidmore, 2004). Untersucht wurden in diesen Studien allerdings andere Kulturen, Parameter und Wellenlängenbereiche, als in der vorliegenden Arbeit.

Für den Einsatz von Ultraschallsensoren in der Praxis ist dessen Verhalten in der Bewegung von Bedeutung. Die Charakteristik des Sensormessfeldes nimmt hierbei Einfluss auf die ortsspezifische Wiedergabe der Veränderung von Bestandesstrukturen im Verlauf der Bewegungsrichtung. Der verwendete Ultraschallsensor erfasst innerhalb eines konischen Messkegels die oberen Objekte eines Bestandes, die bei einem Öffnungswinkel von ca. 12 ° auch außerhalb des Sensorzentrums liegen können. Dieses Verhalten führt zu einer nacheilenden Erfassung bei Veränderungen von hohen zu niedrigen und zu einer vorausseilenden Erfassung beim Wechsel von niedrigen zu hohen Objekten. Der Überlappungsbereich kann bei Montage in 1 m Höhe über dem Boden bis zu 75 cm betragen, wobei signifikante Abweichungen nur bis 50 cm ermittelt wurden. Darüber hinausgehende Distanzen können beim Übergang von hohen Aufwüchsen zu geschnittenen Bereichen auftreten, wo Halme in den geschnittenen Bereich hineinragen können und eine nicht real existierende Bestandeshöhe vortäuschen. Inwieweit die Kombination mit einem Spektralsensor zur Kompensation der genannten Effekte bei einer Biomasse-schätzung beitragen könnte, wäre in weiteren Untersuchungen zu überprüfen. Gegenüber Verzögerungen in der Ortszuweisung von Ertragswerten, die beim Mähdruch 9 m und mehr betragen können (Arslan and Colvin, 2002; Panten et al., 2002), sind die sensorbedingt räumlichen Fehlerbereiche der Ultraschallsensorik, wie sie in dieser Arbeit ermittelt wurden, eher als gering einzustufen.

Die Kombination von Sensoren zur Ermittlung von Bestandes- oder Bodeneigenschaften ist kein Novum. So empfiehlt Auernhammer (2001) bei der Online-Stickstoffdüngung ebenfalls den Einsatz mehrerer Sensoren. Sofern nur der Chlorophyllgehalt als Grundlage für die Applikationsrate des N-Düngers dient, werden andere Wachstumsbedingungen wie Einschränkung in der Wasserversorgung nicht berücksichtigt und die Verwertung des applizierten Düngers kann zu Überdüngung und damit zu negativen Umwelteffekten über die Verlustpfade führen. Eine Komplementierung mit kontaktfreien Sensoren zur Messung von Wasserstress in der Pflanze oder Wasser- und Stickstoffgehalt im Boden könnten hier zur Verbesserung der Düngungsanpassung führen. Bei der Nutzung mehrerer Sensoren in Echtzeit ist allerdings zu beachten, dass Grenzen in der Menge der zu verarbeitenden Daten sowie in der Genauigkeit der räumlichen Zuordnung von einzelnen Messdaten erreicht werden können (Mahmood et al., 2012).

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist die Identifikation relevanter Wellenlängenbereiche entlang der Wasserabsorptionsbanden in Verbindung mit einer weitgehend stabilen Schätzgüte der Biomasse bei Veränderung der spektralen Bandbreite, wie sie sich vor allem bei der Kombination mit dem Ultraschallsensor zeigte. Diese Bandbreitenstabilität der Vegetationsindices wäre bei zukünftigen Untersuchungen an weiteren Leguminosen-Grasgemengen umfangreich zu validieren und auch in artenreicheren Grünlandbeständen zu überprüfen.

7.5 Hemmnisse bei der Einführung von Precision Farming

Über die genannten pflanzenbaulichen Maßnahmen hinaus zielt der Grundgedanke des Precision Farming nicht nur auf die Variabilität innerhalb der einzelnen Flächen. Vielmehr müssen die Prozesse des gesamten Betriebes verstanden und überwacht werden, um bei Minimierung der gezielt eingesetzten Inputs und unter Beachtung zulässiger Umweltauswirkungen die Optimierung des monetären Betriebserfolgs zu erzielen (Blackmore, 1994). Die Übereinstimmung dieser Aspekte mit nahezu gleichen Zielen im Ökologischen Landbau – wenn auch hier in einer umfassenderen ganzheitlichen (holistischen) Betrachtung – spricht potenziell für

eine Anwendung von Precision Farming im Ökologischen Landbau. Allerdings kann der umfassende Einsatz technischer Ausstattung und daran gekoppelte Datenerfassung und -analyse auf viele, den natürlichen Prozessen verbundenen, ökologisch wirtschaftenden Landwirt eher abschreckend wirken. Auch wenn der Landwirt in erster Linie die verfügbaren Daten zur Defizitanalyse sowie zur Plausibilitäts- und Erfolgskontrolle nutzen kann, wird diese Aufgabe möglicherweise nicht als Hilfestellung zur Betriebsoptimierung, sondern eher als Wechsel der Kompetenz „von der Fläche zum Bürostuhl“ verstanden. Diese Sichtweise erschwert die Integration von Precision Farming in den Ökologischen Landbau. Doch auch in der konventionellen Landwirtschaft entwickelte sich die Einführung von Precision Farming nur zögernd. So hat sich hier die variable N-Düngung am weitesten etabliert, gefolgt von einem Düngemanagement auf Grundlage von Ertragskarten. Maßnahmen im Pflanzenschutz sind dagegen in der Praxis vernachlässigbar. Ursachen liegen unter anderem im Mangel einheitlicher Systeme. Obwohl mit der Standardisierung des ISO-Busses die notwendigen Voraussetzungen für Datenfluss und Maschinensteuerung geschaffen wurden, besteht die Gefahr individueller Lösungen von Herstellern zur Abgrenzung von der Konkurrenz, was besonders durch die weltweiten Konzentrationsprozesse der Anbieter problematisch erscheint (Auernhammer, 2001). Die technische Steuerung der Geräte scheint dennoch nicht ohne Schwierigkeiten zu sein. So wurde in einer Umfrage von Reichardt et al, (2009) deutlich, dass Landwirte mehrfach Probleme bei der Steuerung von Maschinen über den ISO-Bus feststellten.

Ein wesentliches Hemmnis scheint auch der geringe ökonomische Profit eines effektiveren Einsatzes von Betriebsmitteln zu sein, der die aufwendige Technik nur auf großen Flächen sinnvoll macht, solange positive Umwelteffekte nicht monetär lohnenswert sind. Als notwendig für einen ökonomischen Einsatz des Precision Farming sieht Auernhammer (2001) dessen Erweiterung mit einem anerkannten Informationssystem zur Bewertung der Umwelteffekte sowie weitere Einsparungen durch ein effektiveres Flottenmanagement und Einsatz von autonomen Feldrobotern. Strukturelle Probleme in der Flächengröße unter kleinparzellierten Bedingungen ließen sich durch eine Gewannebewirtschaftung (Auernhammer,

2002) lösen, indem größere Schläge über die Eigentümergrenzen hinweg eingerichtet werden mit einer, dem Flächenanteil entsprechenden spezifischen Abrechnung von Kosten und Erlösen.

Ein weiteres hemmendes Kriterium ist der mangelnde Kenntnis- und Ausbildungsstand über Funktionsweisen des Precision Farming (Reichard, et al., 2009). 40 – 50 % befragter Landwirte kannten Precision Farming, doch nur bis zu 11 % wandten deren Maßnahmen an. Vorrangig waren dies Flächenvermessung, Bodenbeprobungen und Ertragserfassung. Weniger etabliert waren dynamisch angepasste Applikationen wie ortsspezifische Aussaat und Düngung. Auffallend wenig jüngere Landwirte hatten Kenntnis von Precision Farming, so dass eine Schlussfolgerung der Studie auf einen verstärkten Wissenstransfer zielt.

Dusseldorp und Rösch (2004) griffen die Perspektiven des Einsatzes moderner Agrartechnik im Ökologischen Landbau in einem Hintergrundpapier des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag auf und kamen zu dem Ergebnis, dass die Markteinführung angesichts der für Precision Farming notwendigen Spezialentwicklung von Maschinen und Informationssystemen für den Ökologischen Landbau mit dem dortigen Bedarf häufig kleiner Stückzahlen und damit verbundener hoher Kosten erschwert wird. Da sich aber auch in der konventionellen Landwirtschaft eine Entwicklung hin zu einer umweltfreundlicheren Produktion abzeichnet, steigt mit der Entwicklung entsprechender Strategien und Technik das Potenzial eines Transfers moderner Technologien wie dem Precision Farming in den Ökologischen Landbau.

8 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der Integration des wissensbasierten Managementsystems Precision Farming in den Ökologischen Landbau wurde die Umsetzung bestehender sowie neu zu entwickelnder Strategien evaluiert und diskutiert. Mit Blick auf eine im Precision Farming maßgebende kosteneffiziente Ertragserfassung der im Ökologischen Landbau flächenrelevanten Leguminosen-Grasgemenge wurden in zwei weiteren Beiträgen die Schätzgüten von Ultraschall- und Spektroskopik in singulärer und kombinierter Anwendung analysiert.

Das Ziel des Precision Farming, ein angepasstes Management bezogen auf die flächeninterne Variabilität der Standorte umzusetzen, und damit einer Reduzierung von Betriebsmitteln, Energie, Arbeit und Umwelteffekten bei gleichzeitiger Effektivitätssteigerung und einer ökonomischen Optimierung zu erreichen, deckt sich mit wesentlichen Bestrebungen im Ökologischen Landbau. Es sind vorrangig Maßnahmen zur Erfassung der Variabilität von Standortfaktoren wie Geländere relief, Bodenbeprobung und scheinbare elektrische Leitfähigkeit sowie der Ertragserfassung über Mähdrescher, die direkt im Ökologischen Landbau Anwendung finden können. Dagegen sind dynamisch angepasste Applikationen zur Düngung, im Pflanzenschutz und zur Beseitigung von Unkräutern aufgrund komplexer Interaktionen und eines eher passiven Charakters dieser Maßnahmen im Ökologischen Landbau nur bei Veränderung der Applikationsmodelle und unter Einbindung weiterer dynamischer Daten umsetzbar. Beispiele hierfür sind einzubeziehende Mineralisierungsprozesse im Boden und organischem Dünger bei der Düngemengenberechnung, schwer ortsspezifisch zuzuordnende präventive Maßnahmen im Pflanzenschutz sowie Einflüsse auf bodenmikrobiologische Prozesse bei Hack- oder Striegelgängen. Die indirekten Regulationsmechanismen des Ökologischen Landbaus begrenzen daher die bisher eher auf eine direkte Wirkung ausgelegten dynamisch angepassten Applikationen des konventionellen Precision Farming. Ergänzend sind innovative neue Strategien denkbar, von denen die qualitätsbezogene Ernte, der Einsatz hochsensibler Sensoren zur Früherkennung von Pflanzenkrankheiten oder die gezielte teilflächen- und naturschutzorientierte Bewirtschaftung exemplarisch in der Arbeit vorgestellt werden.

Für die häufig große Flächenanteile umfassenden Leguminosen-Grasgemenge wurden für eine kostengünstige und flexibel einsetzbare Ertragserfassung die Ultraschalldistanzmessung zur Charakterisierung der Bestandeshöhe sowie verschiedene spektrale Vegetationsindices als Schätzindikatoren analysiert. Die Vegetationsindices wurden aus hyperspektralen Daten nach publizierten Gleichungen errechnet sowie als „Normalized Difference Spectral Index“ (NDSI) stufenweise aus allen möglichen Wellenlängenkombinationen ermittelt. Die Analyse erfolgte für Ultraschall und Vegetationsindices in alleiniger und in kombinierter Anwendung, um mögliche kompensatorische Effekte zu nutzen. In alleiniger Anwendung erreichte die Ultraschallbestandeshöhe durchweg bessere Schätzgüten, als alle einzelnen Vegetationsindices. Bei den letztgenannten erreichten insbesondere auf Wasserabsorptionsbanden basierende Vegetationsindices eine höhere Schätzgenauigkeit als traditionelle Rot/Infrarot-Indices. Die Kombination beider Sensordaten ließ eine weitere Steigerung der Schätzgüte erkennen, insbesondere bei bestandesspezifischer Kalibration. Hierbei kompensieren die Vegetationsindices Fehlschätzungen der Höhenmessung bei diskontinuierlichen Bestandesdichtenänderungen entlang des Höhengradienten, wie sie beim Ährenschieben oder durch einzelne hochwachsende Arten verursacht werden. Die Kombination der Ultraschallbestandeshöhe mit Vegetationsindices weist das Potential zur Entwicklung kostengünstiger Ertragssensoren für Leguminosen-Grasgemenge auf. Weitere Untersuchungen mit hyperspektralen Vegetationsindices anderer Berechnungsstrukturen sowie die Einbindung von mehr als zwei Wellenlängen sind hinsichtlich der Entwicklung höherer Schätzgüten notwendig. Ebenso gilt es, Kalibrierungen und Validationen der Sensorkombination im artenreichen Grasland durchzuführen.

Die Ertragserfassung in den Leguminosen-Grasgemengen stellt einen wichtigen Beitrag zur Erstellung einer Ertragshistorie in den vielfältigen Fruchtfolgen des Ökologischen Landbaus dar und ermöglicht eine verbesserte Einschätzung von Produktionspotenzialen und Defizitarealen für ein standortangepasstes Management.

9 Summary

For an integration of the knowledge-based management system precision farming into organic agriculture the transfer and adaptation of existing as well as the development of new applications were evaluated and discussed in this thesis. The important relevance of legume-grass mixtures in organic agricultural cropping systems and their cost-effective assessment of within-field yield variation was motivation to analyse yield prediction of exclusive and combined use of ultrasonic distance and spectral reflections of sward canopy characteristics.

The main objective of precision farming is a site-specific adaptation of management measures to the within-field variation of growth conditions to achieve both, a reduction of resources as fertilizer, pesticides, energy and labour as well as environmental impacts and to optimize efficiency and economical output. These ambitions are mostly in line with the main intentions of organic agriculture. Existing precision farming measures which directly can be implemented in organic agriculture are mapping of site characteristics as topography, soil sampling strategies, and apparent electric conductivity as well as the assessment of yield with combine or selfpropelled forage harvesters. In contrast, variable rate applications as fertilization, weeding and a more passive character of applied pest regulators are regarding their complex interacting with soil and ecosystem only portable if application models are adapted. Furthermore model extensions might be necessary by use of dynamic data from weather, soil and sward canopy. Examples for the addressed difficulties are e.g. the prediction of mineralization processes to quantify plant available nitrogen (N) from soil and manure needed for the calculation of fertilizer N and site specific weeding with harrow or hoe which would additionally affect mineralization processes. The often passive and complex character of cropping measures in organic agriculture limits the transfer of precision farming measures developed in conventional agriculture with predominantly direct impact on soil and crops. Beside established measures new strategies are suggested, whereof crop quality-based selective yielding, the use of sensible sensors for early detection of plant diseases and a strategy of site-specific cropping measures adapted to nature protected sub-sites are presented.

Legume-grass mixtures frequently cover large areas on organic farms. With a view on the development of inexpensive yield sensors ultrasonic distance measurements and spectral reflections of sward canopies in legume-grass mixtures have been analyzed and both, the exclusive use and the combination of ultrasonic sward height and spectral vegetation indices have been evaluated. A selection of existing vegetation indices was calculated from hyperspectral data as well as the Normalized Difference Spectral Index (NDSI) was configured incrementally for all possible band combinations along the available spectral range. Exclusive use of ultrasonic sward height predicted biomass better than each of the vegetation indices. Within the group of indices those related to water absorption bands achieved better prediction accuracies than those traditionally calculated from NIR and red bands. The combination of ultrasonic sward height with vegetation indices achieved clearly higher prediction accuracies than exclusive sensor operations especially if calibrations were developed sward-specificly. If biomass and crop height deviates from each other during crop growth, e.g. through the occurrence of inflorescences, VIs act complementarily and avoid overestimation appearing by the the exclusive use of USH. The combination of ultrasonic sward height and vegetation indices can provide a configuration of low-cost sensors for legume-grass mixtures within a wide range of yield levels. Further investigations are necessary to analyze USH combinations with hyperspectral ratio-indices and the integration of more than two wavelengths e.g. to disentangle pigment and BM related LAI reflections in the VIS/NIR.

The assessment of biomass in legume-grass mixtures is an important contribution for the creation of a site-specific yield history in manifold organic agricultural crop rotations. Thus, the development of appropriate yield sensors can facilitate the identification of productive or non-productive areas for the analysis of shortcomings and improve crop management in the framework of precision farming.

10 Literatur

- Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K., 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44, 71–91.
- Amman, K., 2009: Why farming with high tech methods should intergrate elements of organic agriculture. *New Biotechnology*, 25, 6, 378-388.
- Arslan, S., Colvin, T.S., 2002. An evaluation of the response of yield monitors and combines to varying yields. *Precision Agriculture* 3, 107–122.
- Arslan, S., Colvin, T.S., 2002: An evaluation of the response of yield monitors and combines to varying yields. *Precision Agriculture* 3, 107–122.
- Auernhammer, H., 2001: Precision farming – the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30, 31-43.
- Auernhammer, H., Muhr, T., Demmerl, M., 1995: GPS and DGPS as a Challenge for Environmentally Friendly Agriculture. *Journal of Navigation* 48, 2, 268-278
- Auernhammer, H., Rothmund, M., 2002: Micro precision-farming. - In: Werner, A. Jarfe, A. [Hrsg.]: *Precision Agriculture: Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis; Tagungsband Precision Agriculture Tage, 13.-15. März 2002 in Bonn: 447-461; Darmstadt (KTBL) (KTBL-Sonderveröffentlichung; 038).*
- Berntsen, J., Grant, R., Olesen, J.E., Kristensen, I.S., Vinther, F.P., Mølgaard, J.P., Petersen, B.M., 2006: Nitrogen cycling in organic farming systems with rotational grass-clover and arable crops. *Soil Use and Management*, 22, 197-208.
- Berntsen, J., Grant, R., Olesen, J.E., Kristensen, I.S., Vinther, F.P., Mølgaard, J.P., Petersen, B.M., 2006: Nitrogen cycling in organic farming systems with rotational grass-clover and arable crops. *Soil Use Management*, 22, 197-208.
- Blackmore, B.S., 1994: Precision Farming: An Introduction. *Outlook on Agriculture*, 23, 275-280.
- Blackmore, S., 2000. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26, 37-51.
- Blackmore, 2003: The role of yield maps in precision farming. PhD-Thesis, Cranfield University, Silsoe, UK.

- Blackmore, S., Moore, M., 1999: Remedial correction of yield map data. *Precision Agriculture*, 1, 53-66.
- BLE, 2012: AMI-Strukturdaten zur Landnutzung und Tierhaltung 2010. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.
www.oekolandbau.de/service/oekolandbau-in-zahlen/landnutzung-und-tierhaltung/. Zugriff am 12.9.2012.
- Börjesson, T., Ivarsson, K., Larsolle, A., Wikström, L., 2002: Kvalitetsprognoser för Brödvete och malkorn med reflektansmätning i växande gröda. *Precisionsodling Sverige, Teknisk Rapport Nr. 1*.
- Börjesson, T., Söderström, M., 2003. Prediction of protein content in cereals using canopy reflectance. In J. V. Stafford & A. Werner (Eds.), *Precision agriculture*, 89–94. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.
- Bricklemeyer, R.S., Brown, D.J., 2010: On-the-go VisNIR: Potential and limitations for mapping soil clay and organic carbon. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70, 209-216.
- Cariou, C., Lenain, R., Thuilot B., Berducat, M., 2009: Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot for accurate field operations. *Journal of Field Robotics*, 26, 504-518.
- Chen, J., Song, G.U., Miaogen, S., Yanhong, T., Matsushita, B., 2009: Estimating aboveground biomass of grassland having a high canopy cover: an exploratory analysis of in situ hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 24, 6497-6517
- Claas, 2011: Natürlichen Dünger optimal dosieren. Pressemitteilung der CLAAS-Gruppe. <http://www.claas.com/cl-gr/de/press/mitteilungen/start,cid=840066,bpSite=33690.html>. Zugriff am 9.10.2012.
- Corvin, D.L., Plant, R.E., 2005: Applications of apparent soil electric conductivity in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 1-10.
- Cozzolino D., Moron, A., 2006: Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. *Soil and Tillage Research*, 85, 78–85.
- Dabbert, S., 2001: Der Öko-Landbau als Objekt der Politik. In Beiträge zur 6. Wissenschaftstagung zum ökologischen Landbau. In: Reents, H.J. (Ed.), *Von Leitbildern zu Leitlinien*, Freising-Weihenstephan. Verlag Dr. Koester, Berlin.
- Dobermann, A, Ping, J.L., 2004: Geostatistical Integration of Yield Monitor Data and Remote Sensing Improves Yield Maps. *Precision Agriculture*, 96, 285-297.

- Dreymann, S., Loges, R., Taube, F., 2003: Einfluss der Kleegrasnutzung auf die N-Versorgung und Ertragsleistung markfähiger Folgefrüchte unter Berücksichtigung einer variierenden organischen Düngung. In: Freyer, B., Ökologischer Landbau der Zukunft, 7. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau, Wien, 24. – 26. Februar, 2003, S. 89-92.
- Dusseldorp, M. und Rösch, C., 2004: Stand und Perspektiven des Einsatzes von moderner Agrartechnik im ökologischen Landbau. TAB - Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. - Berlin : TAB, 2004. - 80 S. - (TAB-Hintergrundpapier ; 12)
- EC, 1991: Council Regulation (EEC) No 2092/91 of 24 June 1991 on organic production of agricultural products and indications referring thereto on agricultural products and foodstuffs. Official Journal of the European Communities L198, 1-15(22.7.91). eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/consleg/1991/R/01991R2092-20070101-en.pdf
- EC, 2007: Council Regulation (EC) No 834/2007 of 28 June 2007 on organic production and labelling of agricultural products and repealing Regulation (EEC) No 2092/91. Official Journal of the European Union L189, 1-23 (20.7.2007)
- Ehlert, D., Dammer, K.-H., 2006: Widescale testing of the Crop-meter for site-specific farming. Precision Agriculture, 7, 101-115.
- Ehlert, D., Horn, H.-J., Adamek, R., 2008: Measuring crop biomass density by laser triangulation. Computers and Electronics in Agriculture 61, 117–125. Electronics in Agriculture, 26, 1, 37-51
- Frame, J., 1992. Improved Grassland Management. Farming Press Books, Ipswich, United Kingdom.
- Garratt, M.P.D., Wright, D.J., Leather, S.R., 2011: The effects of farming system and fertilisers on pests and natural enemies: A synthesis of current research. Agriculture, Ecosystems & Environment, 141, 3-4, 261-270.
- Gerhards, R., Oebel, H., 2006: Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying. Weed Research, 46, 185-193
- Ghorbani, R., Wilcockson, S., Koochecki, A., Leifert, C., 2008: Soil management for sustainable crop disease control: a review. Environmental Chemistry Letters, 6, 149-162.
- Hansen, B., Alrøe, F.H., Kristensen, E.S., 2001: Approaches to assess the environmental impact of organic farming with particular regard to Denmark. Agriculture, Ecosystems and Environment, 83, 11-26.

- Himstedt M, Fricke T., Wachendorf M.: 2009: Determining the contribution of legumes in legume/grass mixtures using digital image analysis. *Crop Science*, 49, 1910-1916.
- Himstedt, M., Fricke, T., Wachendorf, M., 2012: The Benefit of Color Information in Digital Image Analysis for the Estimation of Legume Contribution in Legume-Grass Mixtures. *Crop Science*, 52, 943-950
- Hunt, E.R., 1991: Airborne remote sensing of canopy water thickness scaled from leaf spectrometer data. *International Journal of Remote Sensing*, 12, pp. 643–649.
- IFOAM International Federation of Organic Agricultural Movements, 1998: Basic Standards for Organic Production and Processing. International Federation of Organic Agriculture Movements, Mar del Plata, Argentina, 1998
- Kayser, M, Müller, J., Isselstein, J., 2010: Nitrogen management in organic farming: comparison of crop rotation residual effects on yields, N leaching and soil conditions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 87, 21-31.
- Kirchmann, H., Bergström, L., Katterer, T., Mattsson, L., Gesslein, S., 2007: Comparison of long-term organic and conventional crop-livestock systems on a previously nutrient-depleted soil in Sweden. *Agronomy Journal* 99, 960-972.
- Klöble, U., Fröba, N, Niemann, H., Kielhorn, A., 2007: Parallelfahren mit Lenkhilfen und Lankautomaten – Precision Farming auch im Ökolandbau? *Bioland – Fachmagazin für den ökologischen Landbau* 09/2007, 27-29.
- Kramer, E., Gebbers, R., Schirrmann, M., Palme, S., Borchert, A. F., Trautz, D., Molitor, H. und H. Ludwig, 2011. Teilflächenspezifische Kalkung für eine qualitätsorientierte Getreideerzeugung im ökologischen Landbau. *Proc. „Innowacyjne technologie do produkcji ekologicznej”*, 14. April 2011, Poznań, 28-43.
- Kramer, S.B., Reganold, J.P., Glover, J.D., Bohannan, B.J.M., Mooney, H.A. 2006: Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 103, 4522-4527.
- Kruidhof, H.M., Bastiaans, L., Kropff, M.J., 2008: Ecological weed management by cover cropping: effects on weed growth in autumn and weed establishment in spring. *Weed Research*, 48, 6, 492-502.
- Kumhála, F., Kroulík, M., Prošek, V., 2007. Development and evaluation of forage yield measure sensors in a mowing-conditioning machine. *Computers and Electronics in Agriculture* 58, 154–163.
- Lan, Y., Zhang, H., Lacey, R., Hoffmann, W.C., Wu, W., 2009: Development of an Integrated Sensor and Instrumentation System for Measuring Crop Con-

- ditions. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript IT 08 1115. Vol. XI. April, 2009.
- Langer, V., 2001: The potential of leys and short rotation coppice hedges as reservoirs for parasitoids of cereal aphids in organic agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 87, 81-92.
- Lee, W.S., Alchanatis, V., Yang, C., Hirafuji, M., Moshou, D., Li, C., 2010: Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74, 2-33.
- Leeb, C., 2011: The concept of Animal Welfare at the Interface between Producers and Scientists: The Example of Organic Pig Farming. *Acta Biotheor*, 59, 173-183
- Lightfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Souchere, V., Alberola, C., Menassieu, J., 2009: Agronomy for sustainable Agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 1, 1-6.
- Luck, J.D., Zandonadi, R.S., Luck, B.D., Shaerer, S.A., 2010: Reducing pesticide overlapping with map-based automatic boom section control on agricultural sprayers. *Transactions of the ASABE*, 53, 3, 685-690.
- Mahlein, A.-K., Oerke, E.-C., Steiner, U., Dehne, H.W., 2012: Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology*, 133, 197-209.
- Mahmood, H.S., Hoogmoed, W.B., van Henten, E.J., 2012: Sensor data fusion to predict multiple soil properties. *Precision Agriculture*, Online first, DOI 10.1007/s11119-012-9280-7
- Martel, H., and P. Savoie. 2000. Sensors to measure mass-flow-rate through a forage harvester. *Canadian Agricultural Engineering* 42:123–129.
- Merfield, C.N., 2010: Precision Agriculture for Ecological Farming Systems. *LandWISE Conference 2010, Know your Farm – with Precision Agriculture*, 12-13 May, Havelock, New Zealand.
- Nguyen, M.L., Haynes, R.J., Goh, K.M., 1995: Nutrient budgets and status in 3 pairs of conventional and alternative mixed cropping farms in Canterbury, New Zealand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 52, 149-162.
- Niggli, U., 1999: Holistic approaches in organic farming research and development: a general overview. Presentation held at the first SREN Workshop on Research Methodologies in Organic Farming.
- Niggli, U., Fliessbach, A., Hepperly, P., Scialabba, N., 2009: Low Greenhouse Gas Agriculture: Mitigation and Adaptation Potential of Sustainable Farming Systems, FAO, Rome (Rev. 2 – 2009).

- Niggli, U., Leifert, C., 2007: Improving the quality of organic and low input foods and maximizing the benefits to consumers and producers. 3rd QLIF Congress: Improving Sustainability in Organic and Low Input Food Production Systems. Germany, March 20-23, 2007.
- Oehl, F., Sieverding, E., Mäder, P., Dubois, D., Ineichen, K., Boller, T., Wiemken, A., 2004: Impact of longterm conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia*, 138, 574-583.
- Panten, K., Haneklaus, S., Schnug, E., 2002. Spatial accuracy of online mapping. *Landbauforschung Völkenrode* 52 (4), 205–209.
- Pierce, F.J., Nowak, P., 1999. Aspects of precision agriculture. *Adv. Agron.* 67,1–85.
- Rademacher, J. (2003): Kontinuierliche Messung der Getreidequalität während des Mähdruschs. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik, Forschungsbericht Agrartechnik des VDI-MEG 416
- Radtke, P.J., Boland, H.T., Scaglia, G., 2010: An evaluation of overhead laser scanning to estimate herbage removals in pasture quadrats. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 ,12 , 1523–1528.
- Rasmussen, J., Griepentrog, H.W., Nielsen, J., Henriksen, C.B., 2012: Automated intelligent rotor tine cultivation and punch planting to improve the selectivity of mechanical intra-row weed control. *Weed Research*, 52, 327-337.
- Reichardt, M., Jürgens, C., Klöble, U. Hüter, J., Moser, K., 2009: Dissemination of precision farming in Germany: acceptance, adoption, obstacles, knowledge transfer and training activities. *Precision Agriculture*, 10, 525-545.
- Rigby, D., Cáceres, D., 2001: Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 68, 21-40.
- Risius, H., 2004: Möglichkeiten selektiver Erntetechnik am Beispiel der Proteingehaltsbestimmung von Weizen aus ökologischem Landbau. Seminararbeit im Wahlmodul »Verfahrenstechnik der Pflanzenproduktion«, Humboldt-Universität zu Berlin
- Risius, H., 2011: Qualitätsdifferenzierte Getreideernte: Trennung des Getreidegutstroms während des Mähdruschs. Vortrag auf der Naturland Ackerbautagung am 28.2.2011.
www.naturland.de/fileadmin/MDB/documents/Erzeuger/Tagungsbeitraege/Ackerbautagung_Nord-Ost/2011_04_20_Risius_Getreideernte.pdf. Zugriff: 14.9.2012
- Schirrmann, M, Domsch, H., 2011: Sampling procedure simulating on-the-go sensing for soil nutrients. *Journal for Plant Nutrition and Soil Science*, 174, 333-343.

- Schut, A.G.T., Ketelaars, J.J.M.H., 2003: Assessment of seasonal dry-matter yield and quality of grass swards with imaging spectroscopy. *Grass and Forage Science*, 58, 385–396.
- Schut, A.G.T., Ketelaars, J.J.M.H., Meuleman, J., Kornet, J.G., Lokhorst, C., 2002: Novel Imaging Spectroscopy for Grass Sward Characterization. *Biosystems Engineering*, 82, 131-141.
- SCHÜTZ, S, 2001: Der Einfluß verletzungsindizierter Emissionen der Kartoffelpflanze (*S. tuberosum*) auf die geruchliche Wirtspflanzenfindung und -auswahl durch den Kartoffelkäfer (*L. decemlineata*) - Ein Biosensor für die Diagnose von Pflanzenschäden -. Habilitationsschrift am Fachbereich Agrarwissenschaften und Umweltsicherung, Institut für Phytopathologie und Angewandte Zoologie, Biologischer und Biotechnischer Pflanzenschutz der Justus-Liebig-Universität Gießen, Wissenschaftlicher Fachverlag, Gießen
- Scotford, I.M., Miller, P.C.H., 2004. Combination of spectral reflectance and ultrasonic sensing to monitor the growth of winter wheat. *Biosystems Engineering* 87 (1), 27–38.
- Serrano, J.M., Peça, J.O., Marques da Silva, J.R., Shaidian, S., 2010:, Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73, 7-16.
- Sinfield, J.V., Fagerman, D., Colic, O., 2010: Evaluation of sensing technologies for on-the-go detection of macronutrients in cultivated soils. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70, 1-18.
- Sökefeld, M., R. Gerhards, H. Oebel, Therburg, R, 2007: Image acquisition for weed detection and identification by digital image analysis. p. 523–528. *In* J.V. Stafford (ed.) *Precision agriculture*. Academic Publishers, Wageningen, the Netherlands.
- Stafford, J.V., Ambler, B., Lark, R.M., Catt, J., 1996. Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 14, 101–119.
- Sullivan, P., 2001: Sustainable management of soil-borne plant diseases. ATTRA, USDA's Rural Business Cooperative Service, www.attra.org
- Sun, Y., Druecker, H., Hartung, E., Hueging, H., Cheng, Q., Zeng, Q., Sheng, W., Lin, J., Roller, O., Paetzold, S., Schulze Lammers, P., 2011: Map-based investigation of soil physical conditions and crop yield using diverse sensor techniques. *Soil and Tillage Research*, 112, 149-158.
- Thorp, K.R, Thian, L.F., 2004: A Review on Remote Sensing of Weeds in Agriculture. *Precision Agriculture* 5, 477-508.
- Thuilot, B., Cariou, C., Martinet, P, Berducat, M., 2002: Automatic guidance of a farm vehicle relying on a single CP-GPS. *Autonomous Robots*, 13, 2, 53-71.

- Thylen, L., Algerbo, P.A., Giebel, A., 2000: An expert filter removing erroneous yield data. In P.C. Robert et al. (ed.) Precision agriculture. Proceedings of the 5th Int. Conference, Minneapolis, MN, 16-19 July 2000
- Topp, C.F.E., Doyle, C.J., 2004: Modelling the comparative productivity and profitability of grass and legume systems of silage production in northern Europe. *Grass and Forage Science*, 59, 274-292.
- Tremblay, N., Wang, Z., Ma, B.-L., Belec, C., Vigneault, P., 2009: A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable rate nitrogen application. *Precision Agriculture*, 10, 145-161.
- Umweltinstitut München, 2011: Unterschiede zwischen der EU-Verordnung Ökologischer Landbau und den Richtlinien der Anbauverbände Bioland, Naturland, Demeter. Stand 11.2011. Umweltinstitut München e.V. umweltinstitut.org/download/vergleich_richtlinien.pdf. Zugriff am 2.9.2012
- Van Eekeren, N., Van Liere, D., De Vries, F., Rutgers, M., De Goerde, R., Brussaard, L., 2009: A mixture of grass and clover combines the positive effects of both plant species on selected soil biota. *Applied Soil Ecology*, 42, 254-263.
- Wachendorf, M., Büchter, M., Trott, H., Taube, F., 2004. Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. II. Impact of defoliation system and nitrogen input on nitrate leaching losses. *Grass and Forage Science* 59, 56–68.
- Werner, A., Dreger, F., Schwarz, J., 2005: Fulfilling Economic and Ecological Demands in Crop Production with Information Driven Technologies in Land Use – Precision Farming as a Key-Stone for Integrated Land- and Water Management. ICID 21st European Conference 2005. 15-19 May 2005. Frankfurt (Oder) and Slubice – Germany and Poland.
- Werner, A., Jarfe, A., Roth, R., Pauly, J., 1999: Precision Farming, a new Technology in Crop Production – will it enhance Sustainable Development. *Rocz.. AR Pozn. CCCX. Melior-Inz. Srod.* 20, ISSN: 1230-7394, Band 1: 327-342.
- Wetterlind, J., Stenberg, B., Jonsson, A., 2008: Near infrared reflectance spectroscopy compared with soil clay and organic matter content for estimating within-field variation in N uptake in cereals. *Plant and Soil*, 302, 317-327.
- Whelan, B.M., McBratney, A.B., 2002: Aparametric transfer function for grain-flow within a conventional combine harvester. *Precision Agriculture*, 3:123–134.
- Zeltex, 2005: Accuharvest: On-combine grain analyser. Protein, Moisture and Oil analysis while you harvest. Data sheet Zeltex, Hagerstown, MD, USA