



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften  
**Fachgebiet Agrarwirtschaft**

Studienarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science

## **Masterarbeit**

**Quantifizierung der Strohbedeckung und Strohmenge von  
Ackerböden mit Hilfe von hyperspektralen Messungen und  
Bildauswertung**

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2024-0178-2

von  
Julia Johannes

Juni 2024

Erstprüfer: Prof. Dr. Eike Stefan Dobers  
Hochschule Neubrandenburg  
Fachbereich Pflanzenbau

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. agr. Detlev Dölger  
Geschäftsführer und Berater  
Hanse-Agro – Beratung und Entwicklung GmbH

Vorgelegt von: Julia Johannes

## Abstract

Agricultural machinery has become increasingly more powerful in recent decades. Large cutterbar widths and big machines ensure high output in the field. However, this also makes straw distribution more difficult, as the light straw cannot be sufficiently distributed across the entire width. In order to achieve uniform field emergence, optimum erosion protection and improved soil bearing capacity, it is necessary to include straw management in the working cycle. In order to operate good straw management in the field, it is necessary to be able to assess the amount of straw and its distribution. The aim of this work was to investigate whether non-contact, visual and hyperspectral data are suitable for determining the amount of straw and the straw cover on the soil surface. In a laboratory experiment, wheat straw from 0-55 dt/ha was spectrally measured and analysed on three different soils with different moisture contents. The Cellulose Absorption Index (CAI; Daughtry et al., 1996), the Normalized Difference Index (NDI; McNairn and Protz, 1993), the Dead Fuel Index (DFI; Cao et al., 2010) and the Straw Quantity Index (SQI) were determined for evaluation. In addition, the amount of straw was determined using an image analysis method. For this purpose, the skewness and kurtosis of a distribution of the RGB images as well as in the red, green and blue channels were determined. Finally, the images were digitised manually and the degree of ground cover was determined.

The best results were provided by CAI and SQI ( $R^2 = 0.99$ ). The DFI ( $R^2 = 0.86$ ) also achieved high correlations, but could only be successfully applied to dry soil. NDI7 and NDI5 can be neglected. If the straw is sprayed with dew ( $0.07 \text{ l/m}^2$ ), the values of the indices flatten out. When it rains ( $5 \text{ l/m}^2$ ), the measurements are unusable. Using the CAI, it was found that a narrower bandwidth leads to more accurate results. Bands 1-10 nm wide provide more accurate results than bands 40-50 nm wide. However, this distinction is only necessary when considering small differences in straw coverage. Skewness and kurtosis of the image analysis provided plausible results in the red and green channels and in the RGB images, but only up to approx. 15 dt/ha. Skewness and kurtosis are strongly influenced by the soil colour. The digitisation of the images indicates that at 20 dt/ha, more than 80 % of the soil is already covered with straw.

# Inhalt

Abkürzungsverzeichnis.....	7
Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	11
Formelverzeichnis .....	12
1. Einleitung.....	13
2. Stand des Wissens.....	15
2.1 Abbildende Verfahren.....	15
2.2 Nichtabbildende Verfahren .....	20
2.2.1 CAI.....	23
2.2.2 NDI.....	26
2.2.3 DFI.....	26
3. Zielstellung.....	28
4. Material und Methoden.....	29
4.1 Ernterückstände und Bodenproben.....	29
4.2 Messplatz.....	32
4.3 Streuungsursachen .....	33
4.4 Versuchsdurchführung .....	36
4.5 Versuchsauswertung .....	37
4.5.1 Spektraldaten.....	38
4.5.2 Bildanalyse .....	42
4.5.3 Zusammenhang zwischen Strohmenge und Bodenbedeckungsgrad.....	44
5. Ergebnisse.....	46
5.1 Spektraldaten.....	46
5.1.1 CAI.....	47
5.1.2 NDI.....	56
5.1.3 DFI.....	58
5.1.4 SQI.....	59
5.1.5 Beregnung .....	60
5.2 Bildanalyse .....	62
5.2.1 Skewness .....	62
5.2.2 Exzess .....	65
5.3 Zusammenhang zwischen Strohmenge und Bodenbedeckungsgrad.....	67
6. Diskussion .....	72
6.1 Spektraldaten .....	72
6.2 Bildanalyse .....	78

6.3 Zusammenhang zwischen Strohmenge und Bodenbedeckungsgrad.....	82
7. Zusammenfassung .....	86
8. Ausblick .....	88
Literaturverzeichnis .....	90
Anhang .....	102
Anhang 1: Visuelle Methoden.....	102
Eidesstaatliche Erklärung .....	108

## **Gender-Hinweis**

Die in dieser Hausarbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich immer gleichermaßen auf weibliche und männliche Personen. Auf eine Doppelnennung und gegenderte Bezeichnungen wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet.

## Abkürzungsverzeichnis

CAI	Cellulose Absorption Index
CRIM	Crop Residue Index Multiband
DFI	Dead Fuel Index
LAI	Leaf Area Index
LCA	Lignocellulose Absorption Area
LCD	Lignocellulose Absorption Depth
MDFI	Modified Dead Fuel Index
MSACRI	Modified Soil Adjusted Crop Residue Index
NDI	Normalized Difference Index
NDSVI	Normalized Difference Senescent Vegetation Index
NDTI	Normalized Difference Tillage Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
NPV	Non-photosynthetic vegetation
OBIA	Objektbasierte Bildanalyse
PAR	Photosynthetically Active Radiation
PV	Photosynthetic vegetation
RGB	Rot Grün Blau
SACRI	Soil Adjusted Corn Residue Index
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SINDRI	Shortwave Infrared Normalized Difference Residue Index
SQI	Strohmenge-Index/Straw Quantity Index
STI	Soil Tillage Index
SWIR	Short Wavelength Infrared
TM	Landsat Thematic Mapper
VIA	Video Image Analysis
VIS	Visible Radiation

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anwendung der OBIA-Methode mithilfe der Software eCognition; a) originales RGB-Bild; b) segmentiertes Bild; c) durchgeführte Klassifizierung mit verschiedenen Klassen (schwarz Boden, dunkelgrau-lebende Vegetation, hellgrau-Rückstände, weiß - unsicher) ...	18
Abbildung 2: Spektrale Antwortkurven von NPV (Dead vegetation), PV (Green vegetation) und reinem Boden (Bare soil) von einem Versuch Mitte Juni 2004 im Grasslands National Park, Kanada, gemessen mit einem ASD (Analytical Spectral Devices)-Spektralradiometer .....	21
Abbildung 3: a) Spektren eines Lehmbodens in Ames, Iowa (Soil), von Maisrückständen (Crop residue) und eines grünen Maisbestandes (Live corn) mit den dazugehörigen CAI-Bändern (braune Punkte) und ASTER-Bändern 6 und 7 (blaue Rauten); b) 11 nm breite Bänder bei 2.030, 2.100 und 2.210 nm (CAI) und die ASTER-Bänder 6 und 7 (SINDRI).....	24
Abbildung 4: NDVI-CAI Beziehungsdreieck von nicht-fotosynthetischer Vegetation (NPV), fotosynthetischer Vegetation (PV) und reinem Boden.....	25
Abbildung 5: Weizen-Stroh (Triticum aestivum L.) mit 2-6 cm Häcksellänge .....	29
Abbildung 6: Entnahme der Bodenproben an drei Standorten anhand von verschiedenen Bodenarten/-farben .....	30
Abbildung 7: Das Munsell-Farbsystem .....	30
Abbildung 8: Die drei verschiedenen Bodenarten jeweils frisch vom Feld (oben) und nach der Trocknung und dem Siebvorgang (unten); von links nach rechts: Hellbraun (2.5Y 5/6), Braun (2.5Y 4/3), Dunkelbraun (7.5R 3/2).....	31
Abbildung 9: Messplatz mit der Messschale in dem mit Moosgummi ausgekleideten Karton, zwei Halogenlampen und dem Sensor des Spektrometers.....	32
Abbildung 10: Messungen der Fallzahlschätzung an 9 Messorten mit einem Radius der Kegelgrundfläche von 5,43 cm .....	34
Abbildung 11: SEM am ersten Messort in der Variante trockener Boden und wenig Stroh nach vier Messungen von sieben verschiedenen Wellenlängen.....	34
Abbildung 12: Standardfehler des Mittelwertes (SEM) für alle 4 Varianten an bestimmten WL und des CAI .....	35
Abbildung 13: Aufnahmen aus dem Beregnungsversuch; links: Nahaufnahme nachdem Tau in Form von 0,07 l/m <sup>2</sup> auf 5 dt/ha Stroh gesprüht wurde; rechts: 20 dt/ha Stroh nach der Beregnung mit 5 l/m <sup>2</sup> .....	37
Abbildung 14: Absorptionsbanden von Wasser, Cellulose und Aluminium-Hydroxid im Reflexionsverlauf von Weizen-Stroh, Cellulose und Boden im Wellenlängenbereich von 1.900-2.500 nm .....	39
Abbildung 15: Reflexionsverlauf von Weizen-Stroh, Cellulose und Boden von 350-2.500 nm mit den Wasserbanden (blau) und den drei Wendepunkten des SQIs (rot) .....	41

Abbildung 16: Auswertung der Fotos in Fiji (ImageJ): a) originales RGB-Bild, b) beispielhaftes Bild im Rotkanal, c) ausgewerteter Bildausschnitt (gelb umrandet).....	43
Abbildung 17: Digitalisierung der Stroh- und Bodenteilchen zur Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades; a) Polygon (blau), in das die Boden- und Strohteilchen hineindigitalisiert wurden, b) Digitalisierung der Strohteilchen in der Nahaufnahme, c) 5 dt/ha Stroh vollständig digitalisiert, d) 25 dt/ha Stroh vollständig digitalisiert.....	44
Abbildung 18: Spektrale Signaturen von Boden, Weizen-Stroh und Cellulose .....	46
Abbildung 19: CAI <sub>D</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den zwei Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> .....	47
Abbildung 20: CAI <sub>N</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> .....	49
Abbildung 21: CAI <sub>S</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> .....	52
Abbildung 22: CAI <sub>J</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> .....	54
Abbildung 23: NDI <sub>5</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> .....	57
Abbildung 24: NDI <sub>7</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> .....	58
Abbildung 25: DFI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> .....	59
Abbildung 26: SQI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> .....	59
Abbildung 27: CAI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha im Berechnungsversuch auf zwei verschiedenen Böden (Punkte: Dunkelbraun 1; Quadrate: Dunkelbraun 2).....	61
Abbildung 28: DFI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha im Berechnungsversuch auf zwei verschiedenen Böden (Punkte: Dunkelbraun 1; Quadrate: Dunkelbraun 2).....	61
Abbildung 29: SQI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha im Berechnungsversuch auf zwei verschiedenen Böden (Punkte: Dunkelbraun 1; Quadrate: Dunkelbraun 2).....	62
Abbildung 30: Skewness (Schiefe) der Verteilung der pixelbasierten Auswertung der RGB-Bilder sowie des Rot-, Grün- und Blaukanals in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha.....	64
Abbildung 31: Exzess (Wölbung) der Verteilung der pixelbasierten Auswertung der RGB-Bilder sowie des Rot-, Grün- und Blaukanals in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha.....	66
Abbildung 32: Bodenbedeckungsgrad in % der anhand der RGB-Fotos der Variante Dunkelbraun, Trocken von 0-55 dt/ha ermittelt wurde.....	67
Abbildung 33: CAI <sub>J</sub> in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad in % der drei Böden in den zwei Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup> .....	68

Abbildung 34: DFI in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad in % der drei Böden in den zwei Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß $R^2$ .....	68
Abbildung 35: SQI in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad in % der drei Böden in den zwei Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß $R^2$ .....	69
Abbildung 36: Skewness und Exzess der RGB-Bilder in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad.....	70
Abbildung 37: Skewness und Exzess der RGB-Bilder geschätzt aus dem Strohfächer und der Strohmenge der Variante Dunkelbraun, Trocken.....	71
Abbildung 38: Histogramme der RGB-Bilder der Variante Dunkelbraun, Trocken von 0-25 dt/ha .....	81
Abbildung 39: Probleme der pixelbasierten Bildanalyse durch gleiche Boden- und Strohfärbungen .....	85
Abbildung 40: Güte der Querverteilung im Verlauf der Schneidwerksbreite am Beispiel einer schlechten Strohverteilung .....	88
Abbildung 41: Übersicht und Nahaufnahme der Perlenschnurmethode.....	103
Abbildung 42: Meterstick-Methode .....	104
Abbildung 43: Vier verschiedene Varianten der "Residue Wheels" mit Spikes und Zählbox .....	105
Abbildung 44: "Treffer" einer stichprobenartigen Zählung der Bestimmung des Bedeckungsgrades.....	107

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die vier Varianten der Fallzahlschätzung .....	33
Tabelle 2: Niederschlagshöhe in l/m <sup>2</sup> in Trollenhagen (Neubrandenburg), Mecklenburg-Vorpommern für die Monate Juli und August 2023 mit der durchschnittlichen Niederschlagshöhe ( $\bar{\emptyset}$ ) in l/m <sup>2</sup> aller Regentage pro Monat mit einer Niederschlagshöhe > 0,3 l/m <sup>2</sup> .....	37
Tabelle 3: Im Versuch verwendete Indizes zur Bestimmung der Strohmenge .....	38
Tabelle 4: CAI <sub>D</sub> der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht, negative Werte sind rot unterlegt .....	47
Tabelle 5: Konfidenzintervalle des CAI <sub>D</sub> der drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand sowie die Überlagerungen zwischen den 5 dt-Schritten ( $U_n - O_{n-1}$ ), Überlagerungen sind rot gekennzeichnet, $\alpha = 0,05$ , $n = 8$ .....	48
Tabelle 6: CAI <sub>N</sub> der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht, negative Werte sind rot unterlegt .....	50
Tabelle 7: Konfidenzintervalle des CAI <sub>N</sub> der drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand sowie die Überlagerungen zwischen den 5 dt-Schritten ( $U_n - O_{n-1}$ ), Überlagerungen sind rot gekennzeichnet, $\alpha = 0,05$ , $n = 8$ .....	51
Tabelle 8: CAI <sub>S</sub> der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht, negative Werte sind rot unterlegt .....	52
Tabelle 9: Konfidenzintervalle des CAI <sub>S</sub> der drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand sowie die Überlagerungen zwischen den 5 dt-Schritten ( $U_n - O_{n-1}$ ), Überlagerungen sind rot gekennzeichnet, $\alpha = 0,05$ , $n = 8$ .....	53
Tabelle 10: CAI <sub>J</sub> der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht, negative Werte sind rot unterlegt .....	55
Tabelle 11: Konfidenzintervalle des CAI <sub>J</sub> der drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand sowie die Überlagerungen zwischen den 5 dt-Schritten ( $U_n - O_{n-1}$ ), Überlagerungen sind rot gekennzeichnet, $\alpha = 0,05$ , $n = 8$ .....	56
Tabelle 12: CAIS und CAIJ für die Strohmenen 0 dt/ha, 5 dt/ha und 20 dt/ha der drei Feuchtigkeitsstufen Trocken, Tau und Regen .....	60

# Formelverzeichnis

Formel 1: Cellulose Absorption Index .....23  
Formel 2: Normalized Difference Index .....26  
Formel 3: Dead Fuel Index .....27  
Formel 4: Straw Quantity Index .....41

# 1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten sind Landmaschinen immer leistungsstärker geworden. Der erste selbstfahrende Mähdrescher mit einer Schneidwerksbreite von 4,20 m wurde 1953 eingesetzt (CLAAS KGaA mbH). Seitdem hat sich die Landtechnik erheblich weiterentwickelt. Große Schneidwerksbreiten und Maschinen mit über 800 PS sorgen in der Landwirtschaft heutzutage für eine hohe Schlagkraft auf dem Feld. Damit geht allerdings auch eine erschwerte Strohverteilung einher, da das leichte Stroh nicht ausreichend über die gesamte Breite verteilt werden kann. Durch den Anstieg der reinen Marktfruchtbetriebe, die pfluglose Bodenbearbeitung und die ertragsreicheren und somit strohreichereren Sorten verbleibt oberirdisch immer mehr Stroh auf den Flächen. Um trotz der hohen organischen Substanz einen gleichmäßigen Feldaufgang und eine gute Herbstentwicklung erreichen zu können, ist das Strohmanagement mit einer optimalen Strohverteilung unabdingbar. Zusätzlich sorgt sie für einen optimalen Erosionsschutz und verbessert die Tragfähigkeit. Wird das Stroh nur unzureichend verteilt, kommt es an den unbedeckten oder kaum bedeckten Stellen zu einem hohen Bodenabtrag, Evaporation und Infiltration. Im Gegensatz dazu kann es an Stellen mit hohen Strohmenge zu Deformationen am Keimling sowie zu einer geringeren Stickstoffverfügbarkeit kommen (KREITMAYER, 2004). Eine ungenügende Strohverteilung sorgt darüber hinaus für einen hohen technischen Aufwand und somit Kosten. Kombinierte Geräte mit verschiedenen Werkzeuggruppen oder tiefe Bodenbearbeitungsgeräte mit breiten Scharen sind mit teuren Geräte-Investitionen, einer hohen Schlepperleistung, einem hohen Dieserverbrauch und einer geringen Fahrgeschwindigkeit verbunden (STEMANN, 2009). Daher ist es wichtig, das Strohmanagement von vornherein mit in die Planung einzubeziehen und eine gute Strohverteilung zu gewährleisten. Sowohl in der Landtechnik als auch auf den Flächen der Betriebe gibt es nur unzureichende Möglichkeiten, um diese fachgerecht und qualitativ beurteilen zu können. Erst durch die Rückkopplung der Situation auf dem Feld ist es möglich, auf die weitere Produktion entscheidend Einfluss zu nehmen. Ein limitierender Faktor ist dabei der hohe zeitliche Aufwand einer manuellen Erfassung der Strohverteilung. Die Methoden sind i.d.R. mühsam und subjektiv. Um eine deutlich höhere Wirtschaftlichkeit bei der Erhebung der Strohverteilung zu erreichen, ist das Bestreben im Agrarbereich hoch, die Begutachtung mithilfe technischer Lösungen wie Fernerkundung oder Sensorik durchzuführen. Die berührungs- und zerstörungsfreie Methode ermöglicht gegebenenfalls neben rein ökonomischen Vorteilen auch eine Steigerung der Analysegenauigkeit. Aktuell ist eine Erfassung der Strohverteilung durch die Strohmenge in  $\text{kg/m}^2$  oder das Schwadvolumen auf dem Feld nur durch händische Methoden (VOSSHENRICH, 2003) oder durch die Erstellung eines Höhenmodells mit vorausgegangener händischer Arbeit möglich (JOHANNES, 2022). Bei der Erfassung der Strohmenge in  $\text{kg/m}^2$  kommen computergestützte Bildanalyse- und satellitengestützte Verfahren dagegen schnell an ihre Grenzen. Häufig wird

der Bodenbedeckungsgrad als Maß für die Strohmenge genutzt. Bisherige Forschungen nahmen die Bodenerosion (BIARD und BARET, 1997; DAUGHTRY et. Al, 2004; ARSENAULT und BONN, 2005; uvm.), die Kohlenstoffdynamik (GUERSCHMAN et. Al 2009; REN und ZHOU, 2012, CHAI et. Al, 2020, uvm.) oder den Wasser- und Nährstoffhaushalt im Boden (STRECK et al., 2002) zum Anlass, den Bodenbedeckungsgrad zu bestimmen. Jedoch sollte nicht nur der Bodenbedeckungsgrad als Maß für die Strohverteilung genutzt, sondern auch die Strohmenge im Zusammenhang untersucht werden. Da sich hohe Strohmenen direkt hinter dem Mähdrescher ansammeln und zum Rande abflachen, geht der Bodenbedeckungsgrad vor allem im mittleren Bereich über einen Wert von 100 % hinaus. Für eine fachgerechte Bodenbearbeitung und um mögliche Probleme wie eine Stickstoffsperre oder mechanische Barrieren zu umgehen, ist die Schätzung der Strohmenge notwendig.

Sensorgestützte Technologien finden im Zusammenhang mit der Präzisionslandwirtschaft immer mehr Anwendungsgebiete. Vor allem die Anwendung visueller und hyperspektraler Sensoren zur Beurteilung von vitalen Pflanzenbeständen ist etabliert. Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, ob berührungsfreie, visuelle und hyperspektrale Daten zur Ermittlung der Strohbedeckung und der Strohmenge geeignet sind. In einem Laborversuch wurden dazu verschiedene Böden mit unterschiedlichen Strohmenen und Feuchtigkeiten spektral vermessen und ausgewertet.

## 2. Stand des Wissens

Die Strohmenge in kg/m<sup>2</sup> lässt sich auf dem Feld schwer messen und kann bisher nur über händische Methoden bestimmt werden (VOßHENRICH, 2003; JOHANNES, 2022). Der Bodenbedeckungsgrad bietet dabei i.d.R. eine besser zugängliche Alternative, um das Verhältnis von Stroh und Boden abschätzen und somit Rückschlüsse auf die Strohverteilung schließen zu können. Der Bodenbedeckungsgrad spiegelt den prozentualen Anteil des Bodens wider, „welcher bei senkrechter Beobachtungsrichtung von Stroh bedeckt wird“ (PFORTE, 2010).

Es gibt eine Reihe visueller Methoden (siehe Anhang 1), die vor allem Mitte und Ende des 20. Jahrhunderts entwickelt wurden (z.B. die Perlenschnurmethode von SLONEKER und MOLDENHAUER (1977), die Meterstick-Methode von HARTWIG und LAFLEN (1978) u.v.m.). Die visuellen Methoden werden standardgemäß verwendet, jedoch wird weiterhin nach kostengünstigeren und zeitsparenderen Methoden gesucht. Es gibt mittlerweile zahlreiche computergestützte abbildende und nicht abbildende Verfahren und die Entwicklung und Forschung hält bis heute an. Die visuellen Verfahren tragen in dieser Arbeit keine entscheidende Rolle, sind aber, neben den folgenden Verfahren, ein gutes Hilfsmittel um den Bodenbedeckungsgrad schätzen zu können. Daher werden diese in Anhang 1 näher erläutert.

### 2.1 Abbildende Verfahren

Im Vergleich zu den visuellen Methoden nutzen die moderneren Verfahren eine computergestützte Analyse aufgenommener Bilder. Die Bodenbedeckungsgrade werden fotografiert und mithilfe einer entsprechenden Software ausgewertet. Unterschieden wird dabei grundsätzlich in pixelbasierte und objektbasierte Analysen. PFORTE (2010) ging noch einen Schritt weiter und entwickelte einen Online-Ansatz. Verwandt mit den herkömmlichen Bildanalyseverfahren ist auch die computergestützte Auswertung von aus hyperspektralen oder Fluoreszenzsignalen erstellten Bildern.

Die Verfahren werden im Folgenden erläutert.

CORAK, KASPAR und MEEK (1993) entwickelten mit ihrem Verfahren einen Übergang von den visuellen zu den computergestützten Methoden. Bei der **Tracing-Methode** werden die Bilder mit den unterschiedlichen Bedeckungsgraden auf einen Bildschirm projiziert. Vor dem Bildschirm wird ein Acetatfilm befestigt und der Strohanteil wird mit einem blauen Marker flächig markiert. Das daraus entstandene „Binärbild“ wird am Computer mit einer geeigneten Software ausgewertet. Die Autoren verglichen die Ergebnisse mit der Dotscreen-Methode, woraus sich keine signifikanten Unterschiede ergaben. Bei dem Vergleich mit dem Grauwert-Thresholding ergab dieses kleinere Bedeckungsgrade, da eine völlig fehlerfreie Segmentierung als nicht möglich charakterisiert wird.

Die bekanntesten **pixelbasierten Analyseverfahren** sind **RGB- und Grauwert-Thresholding**. Diese sind Segmentierungsverfahren, die sich an einem bestimmten Schwellenwert (Threshold) orientieren. Sie gelten als einfachstes und schnellstes Segmentierungsverfahren. Durch eine bestimmte Helligkeitskonstante oder Schranke ist es möglich, die Objekte vom Hintergrund zu trennen. Farbbilder werden nach den drei Farbkanälen Rot, Grün, Blau mit den Farblevels von 0-255 analysiert. Auf der RGB-Farbskala wird jedem Farbton ein charakteristischer Wert zugeordnet. Bestimmte Bereiche entsprechen dem Hintergrund (Boden) und andere Bereiche dem Vordergrund (Strohreste). Ist es möglich, solche Zuordnungen vorzunehmen, werden im nächsten Schritt passende Schwellenwerte gesetzt, um ein Binärbild erstellen zu können. Somit kann der Hintergrund wahlweise schwarz und der Vordergrund weiß oder andersherum dargestellt werden. Die weiße Fläche (Bsp. Strohreste) im Verhältnis zur Gesamtfläche ergibt den Bodenbedeckungsgrad. Bei Schwarz-Weiß-Bildern wird die Grauwertskala (Grauwert-Levels von 0-255) analysiert und analog ausgewertet.

MEYER et al. beschäftigten sich bereits 1988 mit der Methode. Sie werteten Schwarz-Weiß-Bilder mit einem Sperrfilter aus, der den sichtbaren Bereich blockierte, sodass nur die Wellenlängen des nahen Infrarots übrig blieben. Zusätzlich verarbeiteten sie RGB-Bilder und verglichen die Ergebnisse des Roten Kanals mit denen des Infrarotbands.

MORRISON und CHICHESTER (1991) griffen diese Methode erneut auf. Bei dem sogenannten „Video-Image-Analysis“- („VIA“)-Verfahren werden die einzelnen Rot-, Grün-, und Blauwerte zu einem Gesamt-„Grauwert“ aufaddiert. Durch die Auswahl eines kleinen Bereichs im Hintergrund ohne Bedeckungsmaterial, wird eine Hintergrundreferenz festgelegt. Die Autoren beschreiben dazu drei Segmentierungskriterien: 1) alle Pixel mit einer RGB-Summe innerhalb des Minimal- und Maximalwertes der Hintergrundreferenz werden dem Hintergrund zugeordnet, 2) alle Pixel, deren RGB-Summe zwischen Null und dem Maximalwert der Hintergrundreferenz liegen, werden dem Hintergrund zugeordnet und 3) alle Pixel, die eine RGB-Summe mit  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$  Standardabweichungen vom Mittelwert der Hintergrundreferenz haben, werden dem Hintergrund zugeordnet. Der tatsächliche Bodenbedeckungsgrad ist bei dieser Methode bekannt, da die Autoren mit Holzstäben bekannter Größe auf schwarzem Untergrund arbeiten. Unter Laborbedingungen kommen die Forscher zu einem Variationskoeffizienten von 1% im Zusammenhang zur bekannten Bedeckung, was auf eine ausreichende Genauigkeit zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades hindeutet. Sie kamen jedoch zu dem Schluss, dass die Rolle der Hintergrundfarbe des Bodens bei der Unterscheidung zu Ernterückständen noch ausreichend untersucht werden muss. Laut MORRISON und CHICHESTER (zitiert nach PFORTE, 2010) deutet ein umfänglicherer Versuch (5 Bodentypen, jeweils nass und trocken) auf signifikante Unterschiede von Boden zu einem schwarzen Untergrund hin. Bei dem schwarzen

Hintergrund wird der Bodenbedeckungsgrad leicht überschätzt, wohingegen die Bodenbedeckungsgrade der anderen Hintergrundfarben fast immer unterschätzt werden. Dieses Problem weist darauf hin, dass es bereits unter vereinfachten Laborbedingungen zu Schwierigkeiten bei der Farbklassifizierung kommt.

Im Gegensatz zur pixelbasierten Analyse orientiert sich die **objektbasierte Bildanalyse (OBIA)** nicht nur an einzelnen Pixeln, sondern zusätzlich an dazugehörigen Kanten. Die Pixel werden im Kontext der Nachbapixel betrachtet. Mithilfe bestimmter objektbasierter Analyseprogramme können Bilder durch verschiedene Segmentierungsverfahren, wie z.B. Quad-Tree-, Kontrastsplit-, Multiresolution-, Spektraldifferenz-, Multi-Threshold und Kontrastfilter-Segmentierung aufgeteilt werden (BAUER und STRAUSS, 2013). Dabei werden Pixel segmentiert und im folgenden Schritt in „Regionen“ eingeteilt. Bei dieser Zusammenführung werden beispielsweise Maßstab, Form und Kompaktheit beachtet. Durch verschiedene Parameter lassen sich scharfe Umrisse oder die Glätte der Regionen einstellen. Es werden Klassen wie beispielsweise Schatten, grüne Vegetation, tote organische Substanz und Steine definiert. Die Klassen können sich sowohl an Helligkeit und Farben, aber auch an Längen-Breiten-Verhältnissen, Rechteckigkeit oder Homogenität orientieren. BAUER und STRAUSS (2013) verglichen die Methode mit der Gitter raster-Methode (HARTWIG und LAFLEN, 1978; VOSSHENRICH et al., 2003) und erreichten ähnliche Ergebnisse ( $R^2 = 0,78$  für die Gesamtbedeckung,  $R^2 = 0,75$  für die Rückstandsbedeckung,  $R^2 = 0,82$  für die Vegetationsbedeckung). Sie betonen, dass die manuelle Analyse 10-mal länger dauert als die OBIA-Methode. Weiterhin spricht ein hoher Grad an Objektivität für das OBIA-Verfahren. Von Nachteil sind jedoch die hohen Softwarekosten und bei der Festlegung von Regelschwellen ist ein gewisses Maß an Subjektivität notwendig. KAMPTNER (2014) kam ebenfalls zu plausiblen Ergebnissen in einem Bodenbearbeitungsversuch. Der Autor wies jedoch ebenfalls daraufhin, dass eine vollautomatisierte Analyse anzustreben sei.

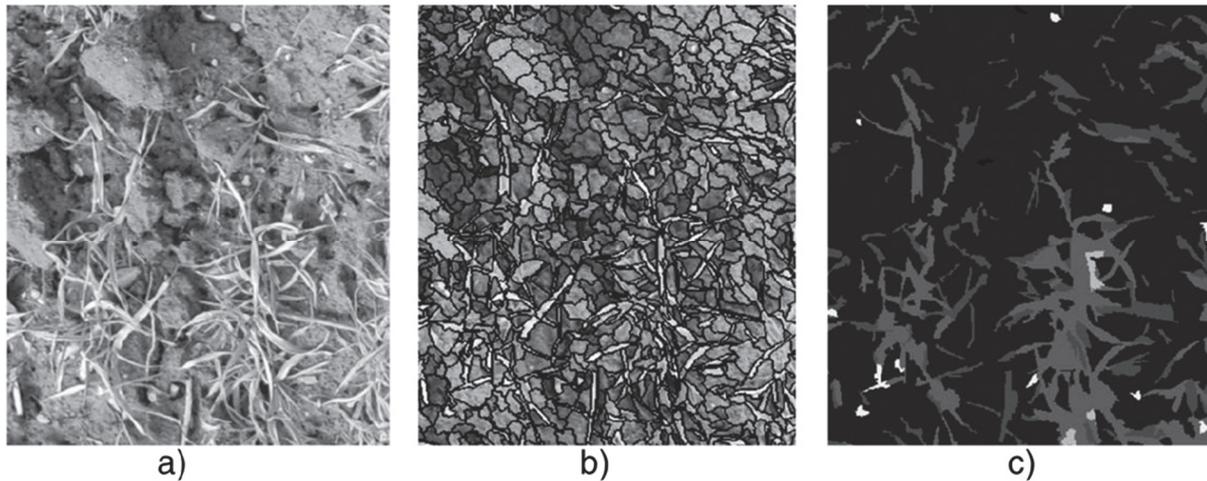


Abbildung 1: Anwendung der OBIA-Methode mithilfe der Software eCognition; a) originales RGB-Bild; b) segmentiertes Bild; c) durchgeführte Klassifizierung mit verschiedenen Klassen (schwarz Boden, dunkelgrau-lebende Vegetation, hellgrau-Rückstände, weiß - unsicher)

Quelle: Bauer und Strauss, 2013

PFORTE (2010) entwickelte darüber hinaus einen **Online-Ansatz** zur Schätzung der Bodenbedeckung. Der Forscher nutzt zwei auf Kantendetektion und Schwellenwertsetzung basierende Algorithmen. Der Kamerasensor wird an einem bereits zur teilflächenspezifischen Bodenbearbeitung geeigneten System angebracht. In dem Versuch konnte der Sensor erfolgreich integriert werden. Das größte Problem bilden weiterhin eine stark wechselnde Beleuchtung und Schattenwurf. Außerdem schreibt der Autor, „gilt es noch belastbare Kriterien für die Vorgabe von Tiefen-Sollwerten in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad zu entwickeln“ (PFORTE, 2010).

Die zunehmende Verfügbarkeit von **Satelliten** bietet die Möglichkeit, **Karten** zur Schätzung von Rückständen für große räumliche Bereiche anhand von Spektraldaten zu erstellen (DE PAUL, 2012). Die Entwicklung effizienter Methoden zur Überwachung von Ernterückständen ist jedoch eine anspruchsvolle Aufgabe. Bei der Analyse von Fernerkundungsdaten wird zum Beispiel überwiegend eine Klassifizierung pro Pixel vorgenommen (JU et al., 2003). Bei diesem Ansatz werden die inhärenten Unterschiede, die durch Mischungen verschiedener Materialien innerhalb eines Pixels entstehen, wie Unterschiede in Form, Größe, Farbe, Textur und Kompaktheit, wie bereits beschrieben, nicht genau erfasst. In jüngster Zeit wurden Modelle zur Schätzung des Bedeckungsgrads von Ernterückständen entwickelt und mit gemischtem Erfolg getestet (BANNARI et al, 2012; DAUGHTRY et al., 2006; SERBIN et al., 2009).

Als weiteres Verfahren gibt es den **Fluoreszenzansatz**. MCMURTREY et al. (1993) wiesen erstmals nach, dass Ernterückstände stärker fluoreszieren als Böden, wenn sie mit

ultravioletter Strahlung bei 337 nm beleuchtet werden. DAUGHTRY et al. (1996) kamen zu dem Schluss, dass Fluoreszenztechniken für die Unterscheidung von Ernterückständen von Böden weniger zweideutig sein könnten als visuelle und Nahinfrarot-Reflexionsverfahren. Problematisch bleibt jedoch, dass die Anregungsenergie auch auf dem Feld zugeführt werden muss, um die Fluoreszenz zu induzieren und dass das Fluoreszenzsignal im Vergleich zum normalen Sonnenlicht zu gering ist (DAUGHTRY, 2001).

Die Ansätze der Bildanalyseverfahren entwickeln sich stetig weiter. Laut MEYER et al. (1988) liefert die Computer gestützte Auswertung deutlich mehr Knotenpunkte, was zu schnelleren und genaueren Ergebnissen führen sollte. Die pixelbasierte Analyse funktioniert schnell und unkompliziert, orientiert sich allerdings lediglich an händisch festgelegten Schwellenwerten. Das große ungeklärte Problem dieser Verfahren sind die Lichtverhältnisse (MEYER et al., 1988). Bei jeder Änderung der Lichteinflüsse müssen Anpassungen vorgenommen werden, wodurch ein hoher Gesamtaufwand entsteht. Die Autoren empfehlen für jede Messung mit unterschiedlichen Bedingungen, erst die Pixelinhalte der Bilder zu analysieren und im Anschluss die Klassifizierungsregeln entsprechend anzupassen. Außerdem ist die Zuordnung geeigneter Thresholds in einigen Fällen schwierig, da die Farbwerte von Stroh und Boden teilweise übereinstimmen.

Eine genauere Analyse erfolgt durch die OBIA-Methode. Durch die Texturinformationen gelingt eine Segmentierung auch unabhängig von Farbunterschieden.

Die meisten Autoren gehen davon aus, dass die Bildanalyseverfahren, v.a. das OBIA-Verfahren, die schnellsten und genauesten Messverfahren sind (MEYER et al., 1988; KAMPTNER, 2014). Der Grad der Subjektivität nimmt mit den abbildenden Verfahren immer weiter ab. Trotzdem wird weiterhin ein Beobachter benötigt, der die Bildklassifizierung vornimmt.

RIBEIRO et al. (2011) gehen davon aus, dass Satellitenbilder für eine Schätzung des Bedeckungsgrades wenig sinnvoll scheinen, da die räumliche Auflösung zu gering sei. Oft kommt es laut DE PAUL (2012) durch die zu erwartende Verwechslung der spektralen Signaturen von Böden, Rückständen und stehenden Pflanzen zu ungenauen Kartenprodukten. So ist es beispielsweise praktisch unmöglich, aus Spektralmessungen, die auf einem Feld mit einer Mischung aus stehenden Pflanzen und Rückständen durchgeführt wurden, reine Endglieder zu ermitteln. Fehler treten demzufolge in Situationen auf, in denen die spektralen Unterschiede zwischen Klassen wie Böden und Rückständen für eine Unterscheidung nicht groß genug sind (DE PAUL, 2012).

## 2.2 Nichtabbildende Verfahren

Im Gegensatz zu abbildenden Verfahren werden bei den nichtabbildenden Verfahren keine Fotos oder Binärbilder, sondern spektrale Signaturen ausgewertet. Der Großteil dieser Verfahren basiert auf der Messung reflektierter Strahlung. Die Daten stammen aus der Fernerkundung und können sowohl durch Satelliten, als auch von Drohnen oder bodennahen Sensoren erhoben werden. Entscheidend ist dabei die Genauigkeit der erhobenen Daten. Während Satelliten nur mit Bändern arbeiten und somit Mittelwerte aus mehreren Wellenlängen bilden, können beispielsweise einige Feldspektrometer auch punktuell messen. Neben dem Vergleich der einzelnen spektralen Signale, erfolgt die Auswertung vorrangig anhand von Indizes. Im Laufe der Zeit wurden viele Indizes entwickelt, die zur Quantifizierung der Bodenbedeckung herangezogen werden können, wie z.B. der Normalized Difference Index (NDI; MCNAIRN und PROTZ, 1993), der Soil Adjusted Corn Residue Index (SACRI; BIARD et al., 1995) oder der Cellulose Absorption Index (CAI; DAUGHTRY et al., 1996) u.v.m.

Zur Messung der Bedeckung durch Ernterückstände anhand reflektierter Strahlung konzentriert sich die Forschung auf die Unterscheidung nicht fotosynthetischer Vegetation (NPV) von fotosynthetischer Vegetation (PV) und reinem Boden. Untersuchungen, vorwiegend im sichtbaren und infraroten Spektrum von Pflanzenmaterialien, haben sich anfangs vor allem auf PV beschränkt (GATES et al., 1965; WESTMAN und PRICE, 1988). Wichtige Prozesse wie die Fotosynthese und die Transpiration und damit auch das Vorhandensein von Chlorophyll erleichterten das Entwickeln von passenden Indizes wie dem Leaf Area Index/Blattflächen-Index (LAI) und dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, TUCKER, 1977).

Abbildung 2 zeigt beispielhaft den Verlauf der spektralen Signaturen von NPV, PV und reinem Boden, entnommen aus dem Grasslands National Park in Kanada, einem Gebiet mit gemischten Gräsern und einem semiariden Klima (LI und GOU, 2015).

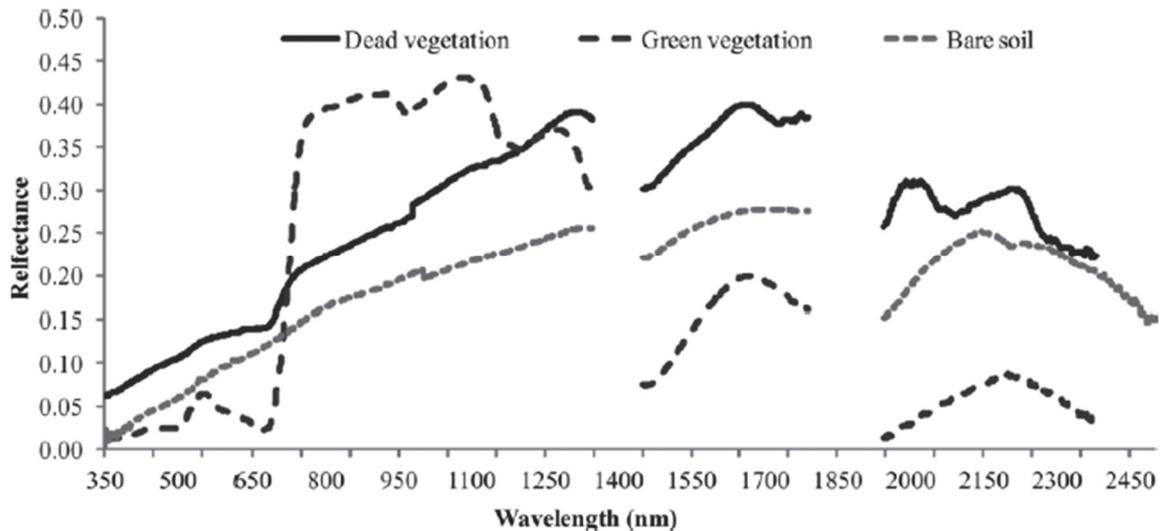


Abbildung 2: Spektrale Antwortkurven von NPV (Dead vegetation), PV (Green vegetation) und reinem Boden (Bare soil) von einem Versuch Mitte Juni 2004 im Grasslands National Park, Kanada, gemessen mit einem ASD (Analytical Spectral Devices)-Spektralradiometer

Quelle: Li und Guo, 2015

NPV (Dead vegetation) hat einen viel niedrigeren Chlorophyll- und Wassergehalt als PV (Green vegetation) (ASNER, 1998; NUMATA et al., 2008; SERBIN et al., 2013) und im Vergleich zum Boden (Bare soil) weist NPV einen hohen Cellulose- und Ligningehalt auf (ASNER, 1998; SERBIN et al., 2009). In diesem Zusammenhang ist es hilfreich, bestimmte Wellenlängenbereiche näher zu untersuchen. NPV kann in den Wellenlängenbereichen des sichtbaren Lichts (VIS, 420-780 nm) und des nahen Infrarots (NIR, 780-1400 nm) von PV getrennt werden. Im visuellen Bereich verändern sich die Reflexionskurven durch die fehlende Absorption von Pigmenten, wodurch der Reflexionsgrad erhöht wird (ASNER, 1998; CAO et al., 2010; zitiert nach LI und GUO, 2015). Im NIR-Bereich sorgt die Veränderung der Blattstruktur dagegen für einen Abfall des Reflexionsgrades (LI und GUO, 2015). Im kurzwelligen Infrarotbereich (SWIR, 1400-3000 nm) werden die Absorptionseigenschaften von PV stark durch den Wassergehalt der Blätter beeinflusst. Durch das Wasser verwischen die Absorptionseigenschaften von Cellulose und Lignin. Bei NPV ist es jedoch möglich, sich genau diese Eigenschaften zu Nutze zu machen und somit NPV von PV zu trennen (DAUGHTRY et al., 1995; ELVIDGE, 1990).

Im Gegensatz dazu lässt sich NPV im VIS- und NIR-Bereich deutlich schwerer von Boden unterscheiden, da sie ähnliche und weniger aussagekräftige Reflexionskurven liefern (AASE und TANAKA, 1991; DAUGHTRY et al., 1996; NAGLER et al., 2000).

Problematisch wird es bei Veränderungen durch Feuchtigkeit oder Verwitterung. Im Allgemeinen gibt es kaum eindeutige spektrale Signale, da die Strohreste dunkler oder heller als der jeweilige Boden sein können und das auch innerhalb eines Feldes (AASE und

TANAKA, 1991; DAUGHTRY et al., 1995; MCMURTREY et al. 1993). Die Messungen im sichtbaren und nahinfraroten Bereich erfordern demzufolge häufige Kalibrierungen und Anpassungen, um zwischen Boden und Ernterückständen unterscheiden zu können (DAUGHTRY et al. 1997). Im kurzwelligen Infrarotbereich dagegen kann NPV aufgrund der einzigartigen Absorptionsmerkmale von Lignin und Cellulose bei 2090 nm und 2300 nm von Boden unterschieden werden (ASNER, 1998; ELVIDGE, 1990; NAGLER et al., 2000; STONER und BAUMGARDNER, 1981). Die Absorptionsmerkmale von Lignin und Cellulose wurden bei der Entwicklung verschiedener Indizes, z.B. dem Cellulose Absorption Index (CAI) verwendet, um NPV von reinem Boden zu trennen (DAUGHTRY et al., 1996; NAGLER et al., 2000).

LI und GUO (2015) gehen darüber hinaus auf den Übergang vom VIS- zum NIR-Bereich (680-780 nm), den sogenannten „Red-Edge“-Bereich ein. Dieser Bereich reagiert besonders empfindlich auf Änderungen des Chlorophyllgehaltes, weshalb sich der Red-Edge-Chlorophyll-Index als leistungsstärker als der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) erwiesen hat (WONG und HE, 2013; CHAVEZ et al., 2013; VINA et al., 2011; zitiert nach LI und GUO, 2015). Demzufolge könnte auch der Red-Edge-Bereich Aufschluss über Unterschiede zwischen PV und NPV unter Berücksichtigung des Chlorophyllgehaltes geben. Zusätzlich ist die Steigung der spektralen Signale von NPV in diesem Bereich größer als von Böden.

Der Wassergehalt und die Verwitterung des abgestorbenen Materials, der Wassergehalt des Bodens, das Vorhandensein von organischem Bodenkohlenstoff und die Bodenmineralogie beeinflussen das spektrale Signal von NPV und erhöhen die Schwierigkeit NPV von Boden zu trennen (DAUGHTRY et al., 1996; NAGLER et al., 2000; LI und GUO, 2015). Dementsprechend kann sich die Gesamtreflexion bei allen Wellenlängen (350-2500 nm) verändern und die Wasserabsorption bei 1400 nm und 1900 nm verbreitern (DAUGHTRY und HUNT, 2008; NAGLER et al., 2000). Dennoch konnten GAO und GOETZ (1994) beobachten, dass trotz der Auswirkungen von Wasser auf die Spektren NPV immer noch anhand der Cellulose-Absorptionsmerkmale von Boden getrennt werden konnte. LI und GUO (2015) unterstreichen diese Aussage und kommen zu dem Schluss, dass die hyperspektralen Daten, den multispektralen Daten überlegen sind. Es wurden eine Reihe von nicht fotosynthetischen Vegetationsindizes entwickelt, wie der Normalized Difference Index (NDI; MCNAIRN und PROTZ, 1993), der Normalized Difference Senescent Vegetation Index (NDSVI; QI et al., 2002), der Normalized Difference Tillage Index (NDTI; VAN DEVENTER et al., 1997), der Soil Tillage Index (STI; VAN DEVENTER et al., 1997), das Kurzwellen-Infrarot-Verhältnis (SWIR32; GUERSCHMAN et al., 2009) und der Dead Fuel Index (DFI; CAO et al., 2010). Diese Indizes gelten jedoch nur für das Vorhandensein von NPV und reinem Boden ohne PV.

Es ist unklar, wie sich die spektralen Signale beim Zusammenspiel aller drei Komponenten beeinflussen (WANG et al., 2018)

Hinzu kommt, dass die Eignung der Indizes bisweilen Grenzen aufweist. LILIENTHAL (2014) untersuchte mehrere Indizes, beispielsweise den Blattflächenindex (LAI), den Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) und den Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), zur Bestimmung von Bestandsparametern in Weizen auf Praxisschlägen. Mit Zunahme der Blattmasse (LAI) nimmt die Empfindlichkeit der Indizes ab. Ab einer bestimmten Blattmasse können Veränderungen durch die Indizes nicht mehr abgebildet werden. Die meisten der untersuchten Indizes reagieren bis zu einem LAI von ca. 3,5 sensitiv. Bei größeren Blattmassen kann keine Aussage mehr abgeleitet werden (LILIENTHAL, 2014).

Im Allgemeinen will die Forschung den Bodenbedeckungsgrad schätzen, wodurch sich viele Studien sowohl auf Indizes für PV als auch für NPV konzentrieren. Oft werden CAI und NDVI (NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY et al., 2004; GUERSCHMAN et al., 2009) sowie CAI und NDI (STRECK et al., 2002; CAO et al., 2010; REN und ZHOU, 2012) gleichzeitig in einer Studie untersucht. Ernterückstände und nicht fotosynthetische Vegetation bestehen hauptsächlich aus Cellulose und Lignin. Diese Eigenschaft versuchen sich die Forscher bei der Entwicklung der Indizes zu Nutze zu machen.

Im Folgenden werden einige Indizes näher beschrieben:

### **2.2.1 CAI**

Der CAI geht aus verschiedenen Studien als vielversprechendster Index zur Unterscheidung von Boden und NPV hervor (DAUGHTRY, 2001; CAO et al., 2010; REN und ZHOU, 2012; BAI et al. 2021). Alle Verbindungen, die eine alkoholische OH-Gruppe aufweisen, wie Zucker, Stärke und Cellulose, zeigen sehr breite Absorptionen, die bei 2100 nm zentriert sind (MURRAY und WILLIAMS, 1988; zitiert nach DAUGHTRY, 2001). DAUGHTRY et al. (1996) beobachteten diese Absorptionsbande bei 2100 nm in den Reflexionsspektren trockener Pflanzenreste und entwickelten den Cellulose Absorption Index (CAI).

Der CAI wird anhand der folgenden Gleichung bestimmt (REN und ZHOU, 2012; zitiert nach DAUGHTRY et al., 1996):

$$CAI = 0,5 \times (R_{2.0} + R_{2.2}) - R_{2.1}$$

*Formel 1: Cellulose Absorption Index*

Dabei wurden in verschiedenen Studien unterschiedlich breite Bänder verwendet. Sowohl CAO et al. (2010), REN und ZHOU (2012) als auch BAI et al. (2021) verwendeten wie

ursprünglich DAUGHTRY et al. (1996) 50 nm breite Bänder wobei  $R2.0$ ,  $R2.1$  und  $R2.2$  jeweils dem mittleren Reflexionsgrad bei 2.000-2.050 nm, 2.080-2.130 nm bzw. 2.190-2.240 nm entspricht ( $CAI_D$ ). NAGLER et al. (2000) nutzen 40 nm breite Bänder zentriert um die Wellenlängen 2.020 nm, 2.100 nm und 2.220 nm ( $CAI_N$ ). SERBIN et al. (2013) orientierten sich an NAGLER et al. (2000) und verrechneten 11 nm breite Bänder um die Wellenlängen 2.030 nm, 2.100 nm und 2.210 nm ( $CAI_S$ ).

Abbildung 3 zeigt den Verlauf eines Lehmbodens in Ames, Iowa (Soil), von Maisrückständen (Crop residue) und eines grünen Maisbestandes (Live corn). Die braunen Punkte entsprechen den  $CAI$ -Bändern und die blauen Rauten den ASTER-Bändern 6 und 7 zur Berechnung des SINDRI. Laut SERBIN et al. (2013) sind  $CAI$ -Werte positiv für Ernterückstände, negativ für Böden und etwa Null für lebende Vegetation. Generell gilt, dass positive  $CAI$ -Werte auf das Vorhandensein von Cellulose hinweisen. Während einige Bodenminerale positive  $CAI$ -Werte aufweisen, wurden keine Bodenarten mit positiven  $CAI$ -Werten gefunden (SERBIN et al. 2009a). Darüber besitzen Schichtsilikattone häufig ein Absorptionsmerkmal um 2.210 nm, das mit Al-OH-Bindungen zusammenhängt (Abbildung 3) (HUNT und SALISBURY, 1970; CLARK, 1999; WORKMAN und WEYER, 2008), was die Konvexität des Spektralsignals an dieser Stelle erhöht und zu klar definierten Kontrasten zwischen Böden und Rückständen führt. (SERBIN et al., 2013).

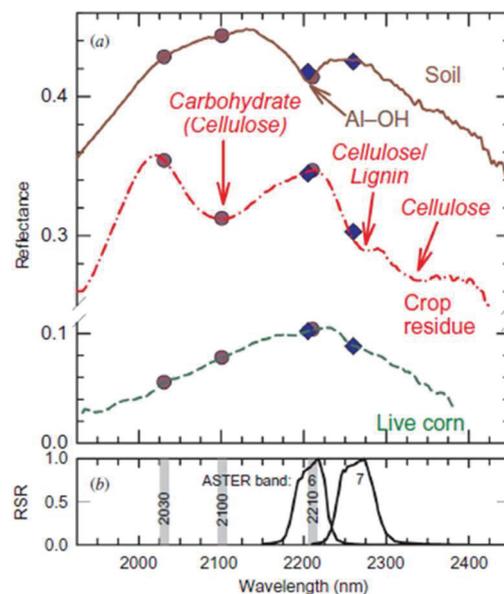


Abbildung 3: a) Spektren eines Lehmbodens in Ames, Iowa (Soil), von Maisrückständen (Crop residue) und eines grünen Maisbestandes (Live corn) mit den dazugehörigen  $CAI$ -Bändern (braune Punkte) und ASTER-Bändern 6 und 7 (blaue Rauten); b) 11 nm breite Bänder bei 2.030, 2.100 und 2.210 nm ( $CAI$ ) und die ASTER-Bänder 6 und 7 (SINDRI)

Quelle: Serbin et al., 2013

Auch NAGLER et al. (2000) und GUERSCHMAN et al. (2009) kommen zu dem Schluss, dass CAI-Werte von trockener NPV deutlich höher sind als die CAI-Werte von Böden. Außerdem nimmt der CAI im Allgemeinen mit der Zersetzung der Pflanzenreste ab (NAGLER et al., 2000). Wasser spielt bei der Berechnung ebenfalls eine entscheidende Rolle. Die Wasserabsorption dominiert die spektralen Eigenschaften und reduziert den CAI erheblich. Trotzdem ist der CAI der nassen Rückstände deutlich höher als der des nassen Bodens (NAGLER et al. 2000). Weiterhin stellen DAUGHTRY et al. (2004), SERBIN et al. (2009) sowie REN und ZHOU (2012) fest, dass mit einem zunehmenden Anteil an PV die Fehler bei der Schätzung des CAI zunehmen.

Im Vergleich zu anderen Indizes (NDI, NDTI, SACRI, MSACRI, DFI, LCA, LCD, SINDRI) beweist sich der CAI als bestes Mittel zur Schätzung von Strohresten und abgestorbenem Pflanzenmaterial (SERBIN et al., 2009; REN und ZHOU, 2012; SERBIN et al., 2013; SONMEZ und SLATER, 2016).

DAUGHTRY et al. (2004) gehen davon aus, dass die CAI- und NDVI-Werte von NPV, NPV und Boden ein Dreieck bilden. Wie in Abbildung 10 dargestellt, hat NPV aufgrund des Vorhandenseins von Cellulose einen hohen CAI und einen niedrigen NDVI. PV hat dank des Chlorophylls einen hohen NDVI und einen mittleren CAI. Reiner Boden dagegen enthält weder Cellulose noch Chlorophyll und hat daher einen niedrigen CAI und NDVI.

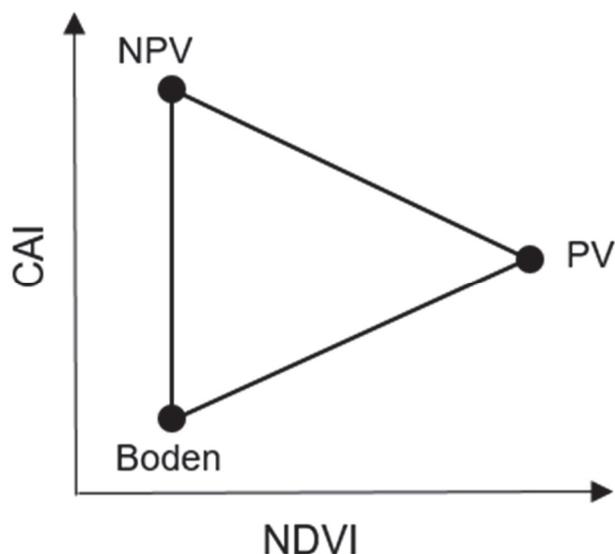


Abbildung 4: NDVI-CAI Beziehungsdreieck von nicht-fotosynthetischer Vegetation (NPV), fotosynthetischer Vegetation (PV) und reinem Boden

Quelle: In Anlehnung an Guerschman et al. 2009

### 2.2.2 NDI

MCNAIRN und PROTZ (1993) arbeiteten mit den Bändern des Landsat Thematic Mapper (TM), entwickelten den Normalized Difference Index (NDI) und erstellten auf dessen Grundlage TM-Karten für Maisrückstände auf drei unterschiedlichen Böden. Der NDI basiert auf dem gleichen Konzept wie der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), bei dem jedoch die roten (TM3) und nahen Infrarotbänder (TM4) durch die nahen Infrarot- (TM4) und kurzwelligen Infrarotbänder (TM5) ersetzt werden. Der NDI wird anhand der folgenden Gleichung berechnet wird:

$$NDI = (TM4 - TM5)/(TM4 + TM5)$$

*Formel 2: Normalized Difference Index*

wobei *TM4* der NIR-Reflexionsgrad ist, der dem Band TM4 (760-900 nm) und *TM5* der SWIR-Reflexionsgrad, der dem Band TM5 (1.550-1.750 nm) entspricht. Die Forscher erweiterten ihre Berechnungen um den Index  $(TM4 - TM7)/(TM4 + TM7)$  und den Index  $(TM5 - TM7)/(TM5 + TM7)$  und konnten somit die Ergebnisse verbessern.

Die pixelbasierte Auswertung ergab, dass die Maisrückstände auf lehmigen Boden generell gut und besser als auf sandigem Boden vorhergesagt werden konnten. Die Erweiterung durch einen der beiden oben beschriebenen Indizes konnte auch die Schätzung des Bedeckungsgrades auf sandigem Boden steigern. Trotzdem kamen sie zu dem Schluss, dass die pixelbasierte Bildauswertung im Vergleich zur händischen Perlenschnurmethode den prozentualen Anteil der Bodenbedeckung auf stark mit Maisrückständen bedeckten Flächen unterschätzt. Mehrere Studien weisen darauf hin, dass der NDI für die Schätzung des Bodenbedeckungsgrades womöglich ungeeignet sei (BIARD und BARET, 1997; ARSENAULT und BONN, 2005; CAO et al., 2010; REN und ZHOU, 2012). SERBIN et al. (2009) stellten fest, dass sie die NDI-Werte von Böden und Ernterückständen häufig überlappen, trotzdem können in einigen Gebieten ausreichende Kontraste für eine erfolgreiche Klassifizierung des Bodenbedeckungsgrades erzielt werden. In jedem Fall sollten die Werte mithilfe des NDVI um die grüne Vegetation bereinigt werden.

### 2.2.3 DFI

Mit dem Hintergrundgedanken, die Brandgefahr eines Gebietes anhand des toten Brennmaterials abschätzen zu können, wurde der Dead Fuel Index (DFI) entwickelt. Viele Forschungen weisen in diesem Zusammenhang auf das Potential des DFIs zur Unterscheidung von Boden und NPV hin (CAO et al., 2010; WANG et al., 2016; CHAI et al., 2019; CHAI et al., 2020; BAI et al., 2021; LUMEN et al., 2023).

CAO et al. (2010) nutzen für den Index die MODIS-Bänder 1, 2, 6 und 7. Sie wollten ursprünglich totes Brennmaterial (DF) von Boden und PV trennen und begründen ihre Auswahl folgendermaßen:

1. Das Reflexionsvermögen von DF und Boden ändert sich zwischen 650 nm (MODIS-Band 1) und 850 nm (MODIS-Band 2) gleichmäßiger als das von PV.
2. In MODIS-Band 6 und -Band 7 ist die Reihenfolge von hoch nach niedrig zwischen PV, DF und Boden umgekehrt, d. h. die Steigung von DF liegt zwischen der von PV und Boden. Die Veränderung der Reihenfolge von hoch zu niedrig kann laut NAGLER et al. (2003) jedoch auch nach DF und Bodentyp variieren.
3. Bei allen Proben (DF, PV und Boden) sind die spektralen Veränderungen fast gleichlaufend und verhältnismäßig.

Die oben genannten Merkmale können laut CAO et al. (2010) die Eigenschaften von DF einzeln nicht ausreichend abbilden, weshalb ein vierstufiger Index entwickelt wurde. Der Index, der alle Merkmale beinhalten soll, ist wie folgt definiert:

$$DFI = 100 \times \left(1 - \frac{R7}{R6}\right) \times \frac{R1}{R2}$$

*Formel 3: Dead Fuel Index*

wobei  $R1$ ,  $R2$ ,  $R6$  und  $R7$  die Reflexionen der MODIS-Bänder 1 (620-670 nm), 2 (841-876 nm), 6 (1.628-1.652 nm) und 7 (2.105-2.155 nm) sind. Der Skalierungsfaktor von 100 wurde festgelegt, um Diskrepanzen zu vergrößern. Da in der Verrechnung von Band 6 und 7 die Absorptionsmerkmale der Cellulose zum Tragen kommen, können unterschiedliche Cellulosevorkommen oder ein langfristiger Abbau zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (CAO et. Al, 2010).

### 3. Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, ob berührungsfreie, visuelle und hyperspektrale Daten zur Ermittlung der Strohbedeckung und der Strohmenge geeignet sind. In einem Laborversuch unter definierten Bedingungen werden die Spektralreflexionen von Weizen-Stroh auf drei verschiedenen Böden mit jeweils zwei Feuchtigkeitsstufen und nach Beregnung gemessen. Daraus ergeben sich folgende Zielstellungen:

- I. Es gilt zu testen, ob
  - die Variabilität der Hintergrundfarbe,
  - die Variabilität der Bodenfeuchte und
  - Tau oder Beregnungdie Reflexion zur Erkennung der Strohmenge und des Bodenbedeckungsgrades beeinträchtigen.
- II. Es soll untersucht werden, ob die Strohmenge in dt/ha durch die Indizes CAI, NDI, DFI und SQI abgebildet werden kann.
- III. Zusätzlich soll die Strohmenge anhand einer Bildanalysemethode ermittelt werden.
- IV. Es soll geklärt werden, inwieweit sich der reale Bodenbedeckungsgrad aus den beiden angewandten Methoden schätzen lässt.

## 4. Material und Methoden

### 4.1 Ernterückstände und Bodenproben

Der Weizen (*Triticum aestivum* L.) stammt aus einer Handernte im Juli 2021 im Osten des Landkreises Mecklenburgische Seenplatte in Mecklenburg-Vorpommern. Er wurde anschließend auf 2-6 cm gehäckselt und für 1,5 Jahre in einem Gewächshaus gelagert. Der gehäckselte Weizen soll die tatsächlichen Rückstandbedingungen simulieren und gewährleistet eine gute Verteilung im Laborversuch. Die Proben wurden kurz vor Versuchsbeginn für 48 Stunden bei 105°C getrocknet, um Ungleichheiten durch unterschiedliche Strohfeuchten ausschließen zu können.



Abbildung 5: Weizen-Stroh (*Triticum aestivum* L.) mit 2-6 cm Häcksellänge

Quelle: Eigene Darstellung

Die Bodenproben stammen ebenfalls von einem Feld aus dem Landkreis Mecklenburgische Seenplatte in Mecklenburg-Vorpommern. Abbildung 6 zeigt die Standorte, auf denen Oberboden für den Versuch entnommen wurde. Wichtig für den Versuch waren unterschiedliche Bodenarten, denn STONER und BAUMGARDNER (1981) und STONER et al. (1980) weisen darauf hin, dass die Variabilität der Böden in Form von Farbe und Textur einen Einfluss auf die Fähigkeit haben kann, Ernterückstände von Böden zu unterscheiden bzw. die Menge der Ernterückstände zu erkennen. In diesem Versuch wurde der Boden anhand unterschiedlicher Farben ausgewählt, um Variabilität erzeugen zu können.



Abbildung 6: Entnahme der Bodenproben an drei Standorten anhand von verschiedenen Bodenarten/-farben

Quelle Kartenmaterial: Bing Maps

Um die drei Böden besser voneinander unterscheiden zu können, wurden die feuchten Böden im Labor mit den Farbtafeln der „Munsell Soil Color Charts“ abgeglichen. Die Böden wurden demnach anhand des Farbtons (Hue), des Grauwertes (Value) und der Farbsättigung (Chroma) unterschieden (Abbildung 7).

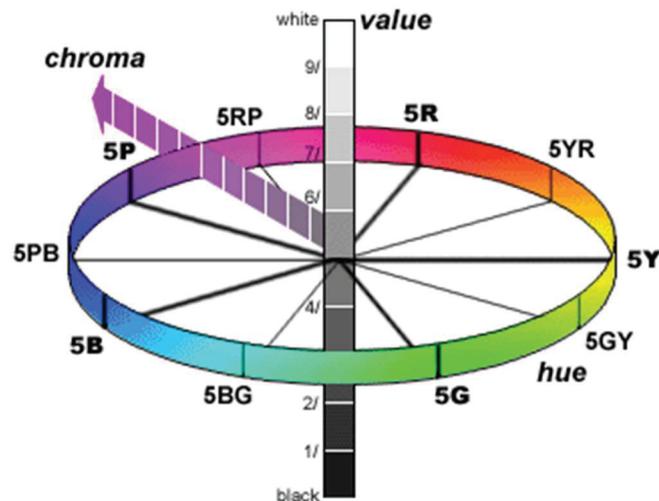


Abbildung 7: Das Munsell-Farbsystem

Quelle: John Kopplin, 2004

Für die feuchten Bodenproben (Abbildung 8, oben) ergaben sich folgende Hue-Value-Chroma-Kombinationen:

- Standort 1, **Hellbraun, 2.5Y 5/6 (light olive)**
- Standort 2, **Braun, 2.5Y 4/3 (olive brown)**
- Standort 3, **Dunkelbraun, 7.5R 3/2 (dark brown).**

Zur Übersichtlichkeit wurden im Laufe der Arbeit die Bezeichnungen **Hellbraun**, **Braun** und **Dunkelbraun** verwendet.

Die gesammelten Bodenproben (Abbildung 8, oben) wurden samt Strohresten (aus der vorangegangenen Bodenbearbeitung) für 48 Stunden bei 105°C getrocknet, um Messfehler durch unterschiedliche Bodenfeuchten ausschließen zu können. Anschließend wurden die Proben gesiebt, um die Strohreste zu entfernen (Abbildung 8, unten).



Abbildung 8: Die drei verschiedenen Bodenarten jeweils frisch vom Feld (oben) und nach der Trocknung und dem Siebvorgang (unten); von links nach rechts: **Hellbraun (2.5Y 5/6)**, **Braun (2.5Y 4/3)**, **Dunkelbraun (7.5R 3/2)**

Quelle: Eigene Darstellung

Neben den Materialien Stroh und Boden wurde auch Cellulose im Versuch betrachtet. Außerdem wurde für einen weiteren Versuch ein vierter Boden (**2.5Y 3/2 – very dark grayish**

**brown)** – *Dunkelbraun 2* – mit in die Versuchsreihe aufgenommen. Der Oberboden stammt von einer Fläche in Sachsen-Anhalt aus dem Raum Dessau-Roßlau.

Für die Versuchsdurchführung wurden Schalen mit einer Fläche von 35,5 cm x 21,5 cm verwendet.

## 4.2 Messplatz

Die Ansprüche an die Beschaffenheit des Messplatzes stellten eine besondere Herausforderung dar, da die Einflüsse von Störgrößen bei der Messung der spektralen Signale auf ein Minimum beschränkt werden sollten. Das Messsystem bestand aus einem Detektor (Spektrometer oder Digitalkamera) und einer definierten Lichtquelle. Das Ziel war es, einen abgedunkelten Messplatz zu errichten, an dem weder Fremdlicht noch Schatten, die Messungen beeinflussen konnten. Dafür wurde eine Abzugshaube in einem Labor mit schwarzer Folie abgedunkelt. Zusätzlich befand sich unter der Abzugshaube eine Kiste, die von allen vier Seiten mit schwarzem Moosgummi ausgekleidet wurde. Unter der Abzugshaube wurden ein Stativ und zusätzlich zwei Halogenlampen installiert. Die Halogenlampen befanden sich mittig über der Messschale, sodass der gesamte Messplatz ohne Schatten ausgeleuchtet werden konnte. Zwischen beiden Lampen befand sich der Sensor des Spektrometers. An gleicher Stelle wurden die RGB-Fotos aufgenommen.



Abbildung 9: Messplatz mit der Messschale in dem mit Moosgummi ausgekleideten Karton, zwei Halogenlampen und dem Sensor des Spektrometers

Quelle: Eigene Darstellung

Für den durchgeführten Versuch zur Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades wurde eine Digitalkamera der Marke Olympus aus der Tough TG-Reihe und das Feld-Spektrometer NaturaSpec™ von Spectral Evolution verwendet. Die dazugehörige Software ist DARWin™ SP Data Acquisition.

Der Messbereich des Spektrometers liegt zwischen 350 nm und 2500 nm. Gemessen wurde mit der FIBR Optic (FIBR15). Für den Versuch wurden zwei KKL-300 Halogenfluter von eurolite mit den Lampen OMNILUX 230V/230W R7s 118mm Stabbrenner H verwendet. Die Lampen mit 2700 K entsprechen warmweißem Licht. Der Lichtstrom liegt bei 4605 lm und der Abstrahlwinkel liegt bei 360°. Während der Messungen wurde die Temperatur auf Höhe des Strohs gemessen. Die Temperaturen lagen durchgängig zwischen 55°C und 60°C.

### 4.3 Streuungsursachen

Ein Laborversuch unterliegt vielen Streuungsursachen, die auf ein Minimum reduziert werden sollten. Der Messplatz wurde wie oben beschrieben vorbereitet, um Fremdlicht und Schatten ausschließen zu können. Ab der Inbetriebnahme der Halogenlampen und des Spektrometers verändern sich die Spektren im zeitlichen Verlauf. Daher empfiehlt der Hersteller, das Spektrometer 30 min warm laufen zu lassen. Das gleiche Problem tritt bei der Benutzung der Halogenlampen auf. Auch diese wurden 30 min vor Versuchsbeginn eingeschaltet.

Vor Versuchsbeginn wurde zudem eine Fallzahlschätzung durchgeführt. Da das Stroh händisch in der Schale verteilt wurde, konnte nicht in jedem Abschnitt der Schale exakt die gleiche Strohmenge erwartet werden. Da der Radius pro Messung bei 5,43 cm lag und der Umfang der Schale 35,5 cm x 21,5 cm betrug, konnte mit einer Messung nicht die gesamte Schale abgebildet werden. Um signifikante Daten auswerten zu können, müssen ausreichend Messungen durchgeführt werden. Dafür wurden vier Varianten des dunkelbraunen Bodens vorbereitet und untersucht. Tabelle 1 zeigt die vier untersuchten Varianten.

Tabelle 1: Die vier Varianten der Fallzahlschätzung

<b>Bodenfeuchte</b>	<b>Strohbedeckung</b>
Trocken	Gering
Trocken	Hoch
Feucht	Gering
Feucht	Hoch

Quelle: Eigene Darstellung

In der Schale wurde an neun verschiedenen Orten gemessen und jede Messung wurde viermal durchgeführt. Der Abstand zwischen Sensor und Messobjekt lag bei 24,5 cm, was einer Kegelgrundfläche mit einem Radius von 5,43 cm entspricht.

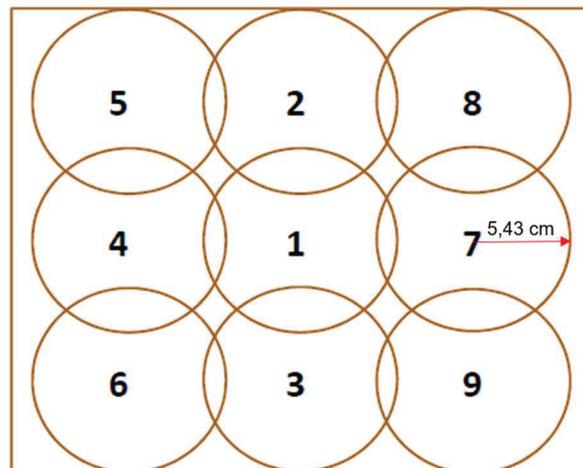


Abbildung 10: Messungen der Fallzahlschätzung an 9 Messorten mit einem Radius der Kegelgrundfläche von 5,43 cm

Quelle: Eigene Darstellung

Im ersten Schritt wurde der Standardfehler des Mittelwertes (SEM) für die vier Messungen in einer Variante errechnet. Abbildung 11 zeigt den SEM der vier aufeinanderfolgenden Messungen am ersten Messort in der Variante trockener Boden und wenig Stroh beispielhaft an sieben Wellenlängen. Der SEM ist im Bereich der Wasserbanden bei den hier dargestellten Wellenlängen 1450 nm und 1928 nm am größten. Bei keiner Messung wird ein SEM von 0,2 überschritten.

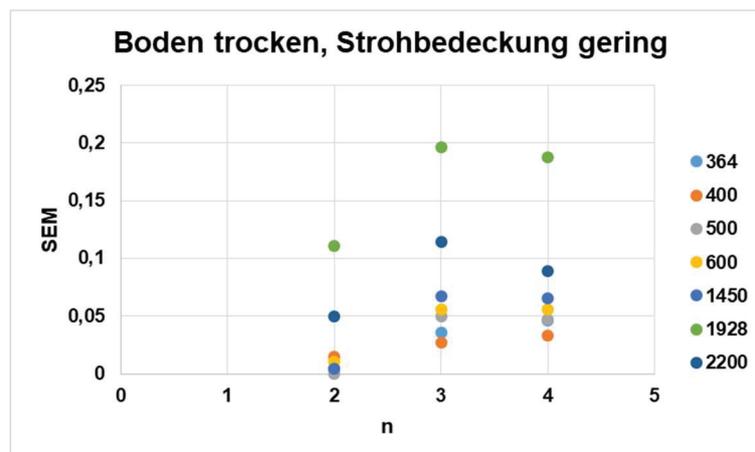


Abbildung 11: SEM am ersten Messort in der Variante trockener Boden und wenig Stroh nach vier Messungen von sieben verschiedenen Wellenlängen

Quelle: Eigene Darstellung

Im Vergleich dazu wurde der SEM an mehreren Messorten ermittelt. Die vier Diagramme zeigen den Verlauf des SEMs nach neun Messungen in der jeweiligen Variante bestimmter Wellenlängen und des CAIs. In der ersten Variante (Boden trocken, Strohbedeckung gering) fällt der SEM schnell und verändert sich mit einem Maximalwert der Wellenlänge 600 nm von 0,65 kaum noch ab der sechsten Messung. Bei den Varianten Boden trocken, Strohbedeckung hoch und Boden feucht, Strohbedeckung gering pendelt sich der SEM ab der achten Messung ein. In der Variante feuchter Boden, Strohbedeckung hoch schwankt der SEM kaum merklich ab der siebten Messung zwischen 0,7 und 0,66.

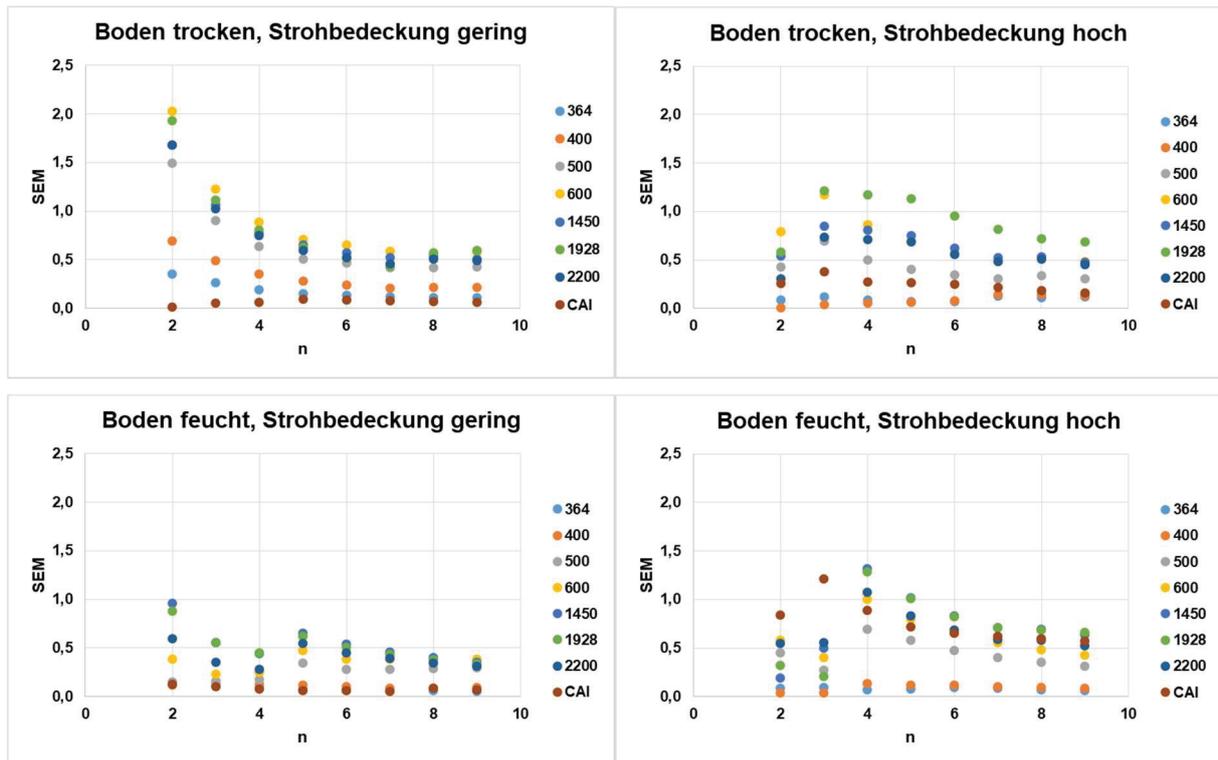


Abbildung 12: Standardfehler des Mittelwertes (SEM) für alle 4 Varianten an bestimmten WL und des CAI

Quelle: Eigene Darstellung

Im Verhältnis liegen die Schwankungen an einem einzigen Messort deutlich unter den Schwankungen an mehreren Messorten. Da der SEM an einem Messort maximal einen Wert von 0,2 erreicht und i.d.R. zwischen 0,025 und 0,075 liegt, deutet das darauf hin, dass das Gerät sehr genau misst und Schwankungen kaum spürbar sind. Mögliche Messfehler liegen demzufolge nicht auf Geräteebene. Mehrere Messungen an einem Messort können daher außenvorgelassen werden. Wichtiger ist die Messung an mehreren Messorten, sodass beispielhaft für die Variante ein signifikantes Ergebnis erzielt werden kann. Um brauchbare Daten für die Auswertung sammeln zu können, wurde daher in den Versuchen an acht Messorten gemessen, um Fehler auf Raumebene ausschließen zu können.

#### 4.4 Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn liefen die Lampen und das Spektrometer jeweils 30 Minuten, um eine homogene Strahlungscharakteristik und die notwendige Kühlung des Spektrometers zu gewährleisten. Die Temperaturen im Messfeld lagen durchgängig bei 55-60°C. Der Sensor des Spektrometers befand sich in einer Höhe von 24,5 cm, was einem Messradius von 5,43 cm entsprach. Vor jeder neuen Variante wurde die Weißreferenz gemessen. Gemessen wurde jeweils einmal an acht Messorten (n=8).

Der Versuch lässt sich in zwei Versuche unterteilen. Als erstes fand ein umfangreicher Versuch zu unterschiedlichen Strohmenngen auf verschiedenen Böden statt. Dafür wurden reines Weizen-Stroh, Cellulose und die drei Böden (*Dunkelbraun*, *Braun* und *Hellbraun*) im trockenen und im feuchten Zustand gemessen. Anschließend wurde auf allen drei Böden in beiden Feuchtigkeitsstufen Stroh in 5 dt-Schritten/ha verteilt. Gemessen wurden 0-55 dt/ha Stroh, jedes Mal achtmal pro vorbereiteter Schale. Von jeder Schale wurde ein RGB-Bild aufgenommen. Fotografiert wurde direkt zwischen den beiden Lampen auf Sensorhöhe. Die Böden *Dunkelbraun* und *Hellbraun* hatten eine Bodenfeuchte von 15 Vol.-% und der Boden *Braun* eine Feuchte von 19 Vol.-%.

Anschließend fand ein weniger umfangreicher Versuch zur Beregnung statt, um den Einfluss von Wasser auf die Messungen beurteilen zu können. Es wurde ein vierter Boden verwendet (*Dunkelbraun 2*) und dieser im reinen Zustand, bzw. mit 5 dt/ha und 20 dt/ha Stroh bedeckt, gemessen. In dem Versuch wurde die Reflexion der Strohbedeckung im morgendlichen Tau (0,07 l/m<sup>2</sup>) und nach einem Regenschauer (5 l/m<sup>2</sup>) ermittelt. Schwache Taubildung beginnt unter 0,1 l/m<sup>2</sup> und bei starkem Tau können Werte von 0,3 l/m<sup>2</sup> und mehr erreicht werden (HOFMANN, 1955). In Ostpreußen wurden in den Monaten Mai und Juni der Jahre 1936 bis 1939 an 51 % der Tage, an denen Tau fiel, weniger als 0,1 l/m<sup>2</sup> Tau gemessen (STEPHAN, 1954; zitiert nach HOFMANN, 1955). Als repräsentative Taumenge wurde ein Wert von 0,07 l/m<sup>2</sup> angenommen.

Die folgende Tabelle zeigt zudem die Niederschlagshöhen in l/m<sup>2</sup> der Ernte-Monate Juli und August 2023 am Standort Trollenhagen (Neubrandenburg) in Mecklenburg-Vorpommern. Zusätzlich wurde die durchschnittliche Niederschlagshöhe in l/m<sup>2</sup> aller Regentage pro Monat mit einer Niederschlagshöhe > 0,3 l/m<sup>2</sup> ermittelt. 0,3 l/m<sup>2</sup> entsprechen einer starken Taunacht und werden daher außenvorgelassen. Die durchschnittlichen Niederschlagshöhen lagen somit bei 4,2 l/m<sup>2</sup> (Juli 2023) und 3,2 l/m<sup>2</sup> (August 2023). Da die Niederschläge auch deutlich höher ausfallen können und um einen deutlichen, optischen Unterschied im Vergleich zum Tau hervorrufen zu können, wurde das Stroh mit 5 l/m<sup>2</sup> Niederschlag besprüht.

Tabelle 2: Niederschlagshöhe in l/m<sup>2</sup> in Trollenhagen (Neubrandenburg), Mecklenburg-Vorpommern für die Monate Juli und August 2023 mit der durchschnittlichen Niederschlagshöhe (Ø) in l/m<sup>2</sup> aller Regentage pro Monat mit einer Niederschlagshöhe > 0,3 l/m<sup>2</sup>

### Niederschlagshöhe in l/m<sup>2</sup>

Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Jul 23	4,9	0	0,2	2,9	1,8	0	0	0	0	7,9	1,7	0	4,3	0	1,2	0
Aug 23	3,7	8,5	5,8	0,1	0	14,7	2,4	2,1	3,4	0	0	1,9	0	0	11,7	0

Tag	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Ø
Jul 23	0,8	0,2	0,3	0,5	0,9	3,3	1,1	6,2	0,1	0,3	1,9	0,4	10	0	5	4,2
Aug 23	1,7	0	0	0	0	0	0	0,8	1	2,9	0	0	0,5	2	0	3,2

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an DWD

Mithilfe einer Sprühflasche wurden 0,07 l/m<sup>2</sup> Tau und ein 5 l/m<sup>2</sup> Regenschauer simuliert. Die Messungen fanden direkt nach dem Besprühen des Stroh statt. Abbildung 13 zeigt eine Nahaufnahme der Varianten 5 dt/ha Stroh und Tau, sowie 20 dt/ha Stroh und Beregnung.



Abbildung 13: Aufnahmen aus dem Beregnungsversuch; links: Nahaufnahme nachdem Tau in Form von 0,07 l/m<sup>2</sup> auf 5 dt/ha Stroh gesprüht wurde; rechts: 20 dt/ha Stroh nach der Beregnung mit 5 l/m<sup>2</sup>

Quelle: Eigene Darstellung

## 4.5 Versuchsauswertung

Zur Versuchsauswertung wurden zwei verschiedene Methoden herangezogen. Erst erfolgte die Untersuchung der Spektralmessungen mithilfe von Indizes. Im zweiten Schritt wurden die dazugehörigen Fotos per Bildanalyse am Computer ausgewertet. Um den Zusammenhang der Strohmenge in dt/ha zu bestimmten Bodenbedeckungsgraden bestimmen zu können,

wurden im Anschluss die Stroh- und Bodenteilchen der aufgenommenen Fotos digitalisiert und ins Verhältnis gesetzt.

#### 4.5.1 Spektraldaten

Die Reflexionskurven von Boden (BS) und Stroh bzw. Cellulose (NPV) weisen in einigen Wellenlängenbereichen deutliche Unterschiede auf. Indizes bieten die Möglichkeit Änderungen in den Kurvenverläufen auszudrücken.

Da sich bei 1400 nm und 1900 nm Wasserbanden befinden, die ein starkes Rauschen und Absinken des Reflexionsgrades verursachen, wurden diese Wellenlängenbereiche bei der Betrachtung außenvorgelassen.

Es wurden folgende Indizes ermittelt und verglichen: CAI, NDI, DFI, SQI. Tabelle 3 zeigt die errechneten Indizes, welche in diesem Kapitel näher erläutert werden.

Tabelle 3: Im Versuch verwendete Indizes zur Bestimmung der Strohmenge

Index	Formel	Quelle
Cellulose Absorption Index (CAI)	$CAI = 0,5 \times (R2.0 + R2.2) - R2.1$	Daughtry et al., 1996
Normalized Difference Index (NDI)	$NDI_5 = (TM4 - TM5)/(TM4 + TM5)$ $NDI_7 = (TM4 - TM7)/(TM4 + TM7)$	McNaim und Potz, 1993
Dead Fuel Index (DFI)	$DFI = 100 \times \left(1 - \frac{R7}{R6}\right) \times \frac{R1}{R2}$	Cao et al., 2010
Straw Quantity Index (SQI)	$SQI = 10 \times \left(\left(\frac{R1.1 + R1.3}{2}\right) - R1.2\right)$	

Quelle: Eigene Darstellung

#### CAI

Auf Grundlage einer Absorptionsbande von Cellulose bei 2.100 nm entwickelten DAUGHTRY et al. (1996) den Cellulose Absorption Index (CAI). Im Bereich von 2.000 nm bis 2.200 nm unterscheiden sich der Kurvenverlauf von NPV und der Kurvenverlauf von Boden stark voneinander (Abbildung 14). Die Eigenschaft macht sich der CAI zu Nutze. Dabei werden die drei Wellenlängenbereiche um 2.000 nm, 2.100 nm und 2.200 nm verrechnet.

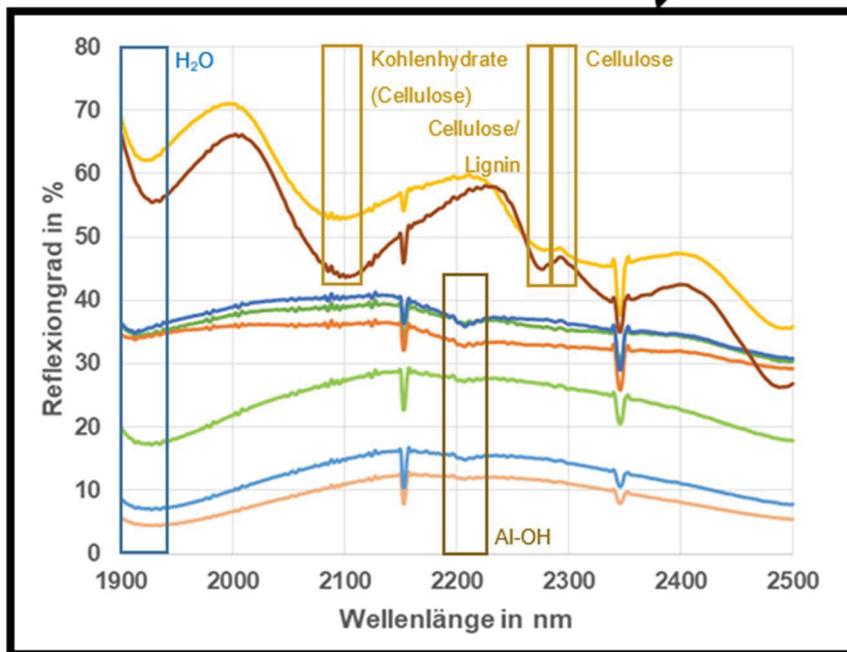
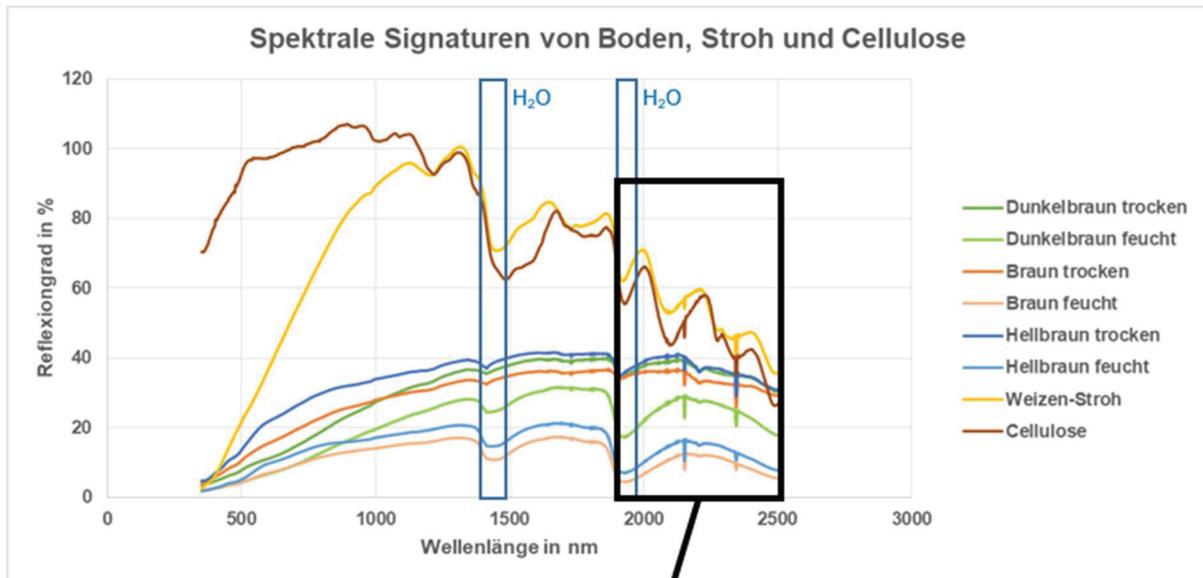


Abbildung 14: Absorptionsbanden von Wasser, Cellulose und Aluminium-Hydroxid im Reflexionsverlauf von Weizen-Stroh, Cellulose und Boden im Wellenlängenbereich von 1.900-2.500 nm

Quelle: Eigene Darstellung, angelehnt an SERBIN et al., 2013

Jedoch wurden zur Ermittlung des CAIs in vergangenen Forschungen unterschiedlich breite Wellenlängenbereiche herangezogen. Während DAUGHTRY et al. (1996) 50 nm breite Bänder der Wellenlängen 2.000-2.050 nm, 2.080-2.130 nm und 2.190-2.240 nm nutzten (CAI<sub>D</sub>), verrechneten NAGLER et al. (2000) 40 nm breite Bänder, zentriert um die Wellenlängen 2.020 nm, 2.100 nm und 2.220 nm (CAI<sub>N</sub>). SERBIN et al. (2013) verrechneten 11 nm breite Bänder um die Wellenlängen 2.030 nm, 2.100 nm und 2.210 nm (CAI<sub>S</sub>).

Als vierter Index wurde der  $CAI_j$  hinzugefügt, der die Maximal- bzw. Minimalwerte der Wellenlängenbereiche jeweils aus nur einem Band einschloss und somit die Reflexionen der Wellenlängen 2.008 nm, 2.095 nm und 2.210 nm umfasste.

Da die Wellenlängenbereiche verhältnismäßig nah beieinanderliegen, stellt sich die Frage, ob breitere Bänder zu ungenaueren Ergebnissen führen, da sie die eigentlichen Maximalwerte bei 2.000 nm und 2.200 nm verringern bzw. den Minimalwert bei 2.100 nm erhöhen. Außerdem ist unklar, ob sich Werte aus unterschiedlichen Strohmengen innerhalb der Indizes überlagern. Daher wurde für alle Indizes die dazugehörige Standardabweichung, das Konfidenzintervall und das Bestimmtheitsmaß berechnet und miteinander verglichen. Dafür wurden die jeweiligen Konfidenzintervalle mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % ( $\alpha = 0,05$ ) unter Einbezug der acht Messwerte pro Strohmenge ermittelt. Um die Überschneidungen der Wertebereiche für die 5 dt-Schritte darstellen zu können, wurde jeweils die Differenz aus der Untergrenze ( $U_n$ ) und der vorausgegangenen Untergrenze ( $U_{n-1}$ ) gebildet. Die negativen Werte stellen Überlagerungen dar.

## **NDI**

MCNAIRN und PROTZ (1993) stellten fest, dass die Bedeckung durch Maisrückstände mit einem NDVI-ähnlichen, normalisierten Reflexionsgrad der TM-Bänder 4 und 5 zusammenhängt und schlugen daraufhin den Normalized Difference Index (NDI) vor. In der Annahme, dass sich der Index auf eine Bedeckung durch Strohrückstände übertragen lässt, wurde der NDI mit in den Versuch aufgenommen. MCNAIRN und PROTZ (1993) nutzten standardmäßig den  $NDI_5$  mit den oben beschriebenen Bändern TM4 und TM5. In den Versuchen erweitern sie die Auswertung um die Indizes  $NDI_7$  (TM4 und TM7) und  $NDTI$  (TM5 und TM7) und konnten diese somit noch verbessern. In diesem Versuch wurden die Indizes  $NDI_5$  und  $NDI_7$  ermittelt und die Korrelationen zur Strohmenge in dt/ha untersucht.

## **DFI**

Da viele Forschungen auf das Potential des DFIs zur Unterscheidung von Boden und NPV hinweisen (CAO et al., 2010; WANG et al., 2016; CHAI et al., 2019; CHAI et al., 2020; BAI et al., 2021; LUMEN et al., 2023), wurde dieser als dritter Index in den Versuch aufgenommen. Es wurden die MODIS-Bänder 1, 2, 6 und 7 verrechnet. Es wurden jedoch 10 nm breite Bänder für die Berechnungen verwendet.

## **SQI**

Bei der Untersuchung der spektralen Reflexionen ist ein weiterer Wellenlängenbereich aufgefallen, in dem sich die Verläufe von Weizen-Stroh/Cellulose und Boden klar voneinander unterscheiden. Der Strohmengen-Index/Straw Quantity Index (SQI) wurde auf Grundlage einer

Absorptionsbande bei 1.200 nm entwickelt. Es werden drei Wendepunkte verrechnet, die in Abbildung 15 mit drei roten Pfeilen dargestellt sind.

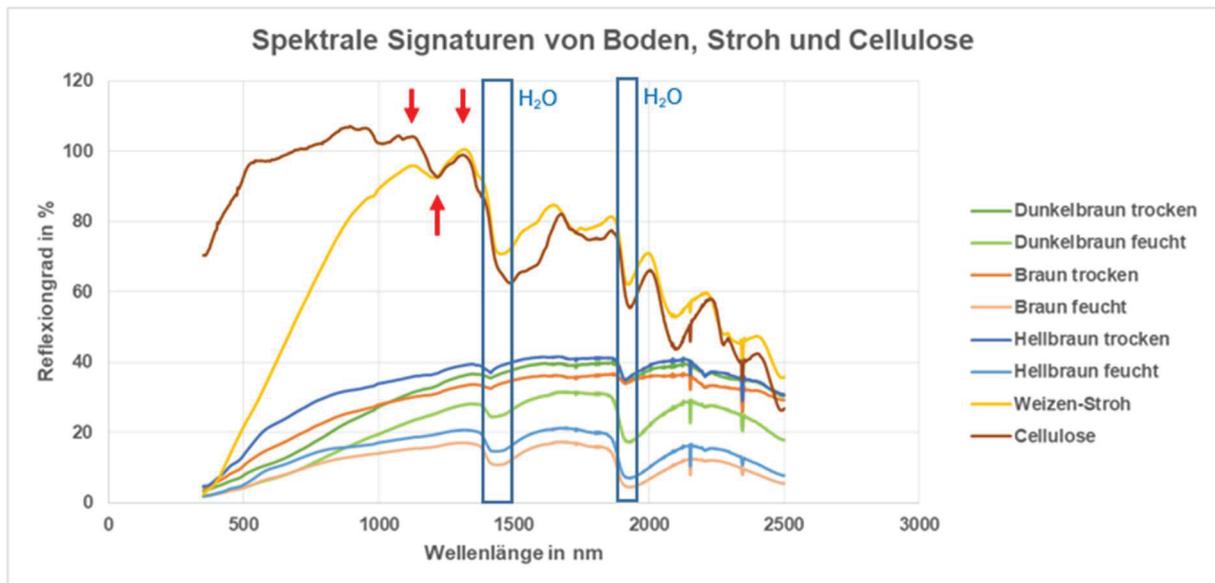


Abbildung 15: Reflexionsverlauf von Weizen-Stroh, Cellulose und Boden von 350-2.500 nm mit den Wasserbanden (blau) und den drei Wendepunkten des SQIs (rot)

Quelle: Eigene Darstellung

Der Index soll die Strohmenge abbilden und lautet wie folgt:

$$SQI = 10 \times \left( \left( \frac{R1.1 + R1.3}{2} \right) - R1.2 \right)$$

Formel 4: Straw Quantity Index

wobei R1.1 dem Wellenlängenbereich 1.120-1.130 nm, R1.2 dem Wellenlängenbereich 1.200-1.350 nm und R1.3 dem Wellenlängenbereich 1.350-1.360 nm entspricht.

In dem Versuch wurde, wie bereits beschrieben, Weizen-Stroh in 5 dt-Schritten von 0-55 dt/ha auf drei verschiedenen Böden (*Dunkelbraun*, *Braun* und *Hellbraun*) im trockenen und feuchten Zustand gemessen. Da der SEM ab acht Messungen in der Fallzahlschätzung konstant war, wurde pro Variante achtmal gemessen. Für die Indexberechnung wurde für alle acht Messungen der Index bestimmt und daraus der Mittelwert gebildet. Im nächsten Schritt wurde das dazugehörige Bestimmtheitsmaß ermittelt. Die Berechnung erfolgte für alle Indizes anhand einer polynomischen Funktion zweiten Grades, da mit dem Anstieg der Strohmenge von einem Sättigungsprozess ausgegangen werden kann. Wie LILIENTHAL (2014) bereits erwähnte, nimmt die Empfindlichkeit des LAI, mit zunehmender Blattmasse ab. Diese

Erkenntnis kann womöglich auf die Berechnung des Bodenbedeckungsgrades anhand der beschriebenen Indizes übertragen werden. Auch in diesem Fall kommt es zur vollständigen Bedeckung des Bodens durch NPV, wodurch ein geringerer Anstieg der Werte zu erwarten ist.

Die Auswertung des Berechnungsversuches erfolgte auf die gleiche Weise. Es wurden alle oben erläuterten Indizes angewandt.

#### **4.5.2 Bildanalyse**

Die Bildauswertung erfolgte anhand des Programmes Fiji (ImageJ 1.54f).

Von jeder Variante wurde jeweils mittig über den Halogenlampen von der gesamten Schale ein RGB-Foto aufgenommen. Wie in Kapitel 2.1 erläutert, deuten MEYER et al. (1988) darauf hin, dass die Bildanalyse durch das Setzen geeigneter Treshholds einem hohen Gesamtaufwand unterliegt. Auch bei der OBIA-Methode muss weiterhin ein Beobachter die Bildklassifizierung vornehmen (KAMPTNER, 2014). Um eine Bildanalyse zur Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades möglicherweise zu vereinfachen, wurden für alle Fotos die Skewness und der Exzess ermittelt. Skewness und Exzess geben Auskunft über die Schiefe (Skewness) und die Wölbung (Exzess) einer Verteilung. Es stellt sich die Frage, ob sich die Strohmenge möglicherweise an den ermittelten Zahlenwerten erkennen lässt. Die Skewness einer Verteilung kann links- oder rechtsschief sein und verdeutlicht im Verlauf, ob die Anzahl der hellen Pixel im Vergleich zu den dunklen Pixeln sinkt oder steigt. Als Grundlage wird bei dieser Methode davon ausgegangen, dass Strohpixel deutlich heller sind als Bodenpixel und somit einer Veränderung der Skewness bei unterschiedlichen Strohmenen eintritt. Der Exzess bildet die Wölbung einer Verteilung ab und gibt an, ob diese spitz- oder flachgipflig ist. Da die Wölbung die Breite der Werte wiedergibt, steht die Annahme im Raum, dass reine Boden- und Strohpixel steilgipflig sind und verschiedene Strohmenen durch eine andere Verteilung der Werte flachgipfliger sind.

Alle Fotos wurden dafür in Fiji geladen und in einzelne Stufen verschiedener Farbräume aufgeteilt. Auf dem jeweiligen Bild wurde ein Ausschnitt gewählt, so dass die komplette Schale samt Boden und Stroh, allerdings ohne Ränder selektiert wurde. Der Prozess ist in Abbildung 16 dargestellt.

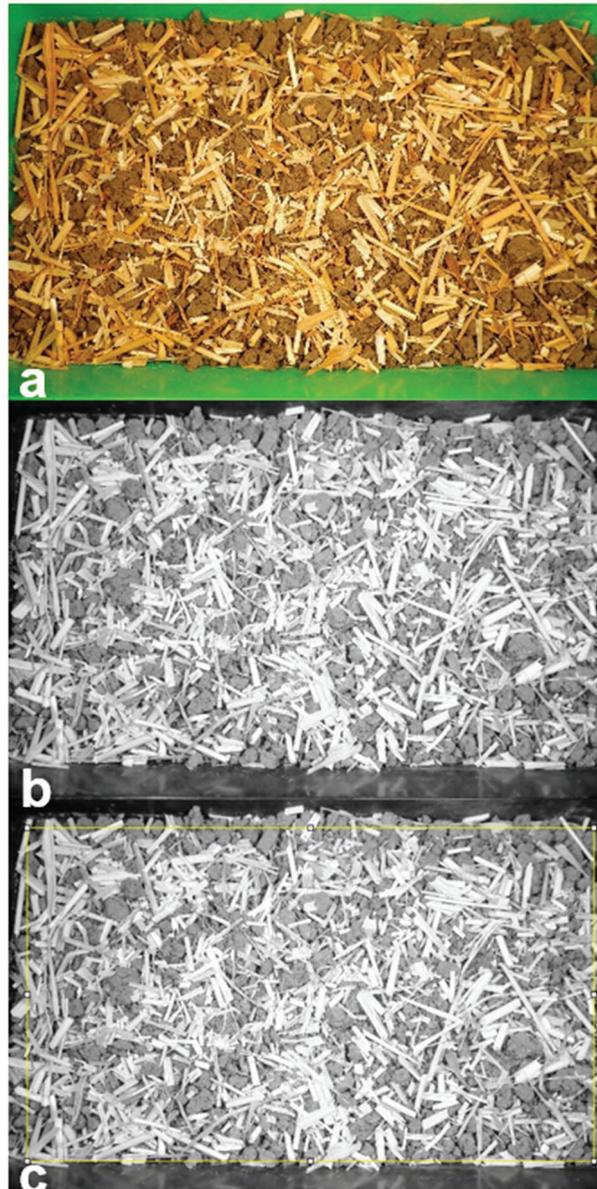


Abbildung 16: Auswertung der Fotos in Fiji (ImageJ): a) originales RGB-Bild, b) beispielhaftes Bild im Rotkanal, c) ausgewerteter Bildausschnitt (gelb umrandet)

Quelle: Eigene Darstellung

Für den gelb umrandeten Ausschnitt wurde die Area (Anzahl der Pixel), die Skewness (Schiefe) und der Exzess (Wölbung) der Verteilung der Farbpixel, sowie Minimal- und Maximalwerte ermittelt. Unterstützend dazu lässt sich in Fiji für jeden Bereich oder das gesamte Bild ein passendes Histogramm erstellen.

Ausgewertet wurden das RGB-Bild sowie die drei einzelnen Kanäle (Rot, Grün und Blau).

Zur weiteren Analyse wurden die Zusammenhänge zwischen Skewness bzw. Exzess der Varianten und der Strohmenge in dt/ha ermittelt.

### 4.5.3 Zusammenhang zwischen Strohmenge und Bodenbedeckungsgrad

Da der Bodenbedeckungsgrad als Maß für die Strohmenge gilt und i.d.R. in Forschungen verwendet wird, wurde im letzten Schritt die Beziehung zwischen Strohmenge in dt/ha und Strohbedeckungsgrad in % näher untersucht.

Dafür wurden die aufgenommenen Bilder der Variante *Dunkelbraun, Trocken* von 5-55 dt/ha vollständig digitalisiert. Die Digitalisierung fand mit dem Programm QGIS 3.16 statt. Die Bilder wurden jeweils als Rasterlayer in das Programm geladen. Daraufhin wurde ein neuer Polygon-Vektorlayer angelegt. Innerhalb eines festgelegten Polygons, das den Inhalt der jeweiligen Schale beschreiben sollte, wurden die Stroh- bzw. Bodenteilchen mithilfe der Funktion „Ring füllen“ digitalisiert. Durch das Verhältnis der Stroh- und Bodenpixel konnte der Bodenbedeckungsgrad in % ermittelt werden.

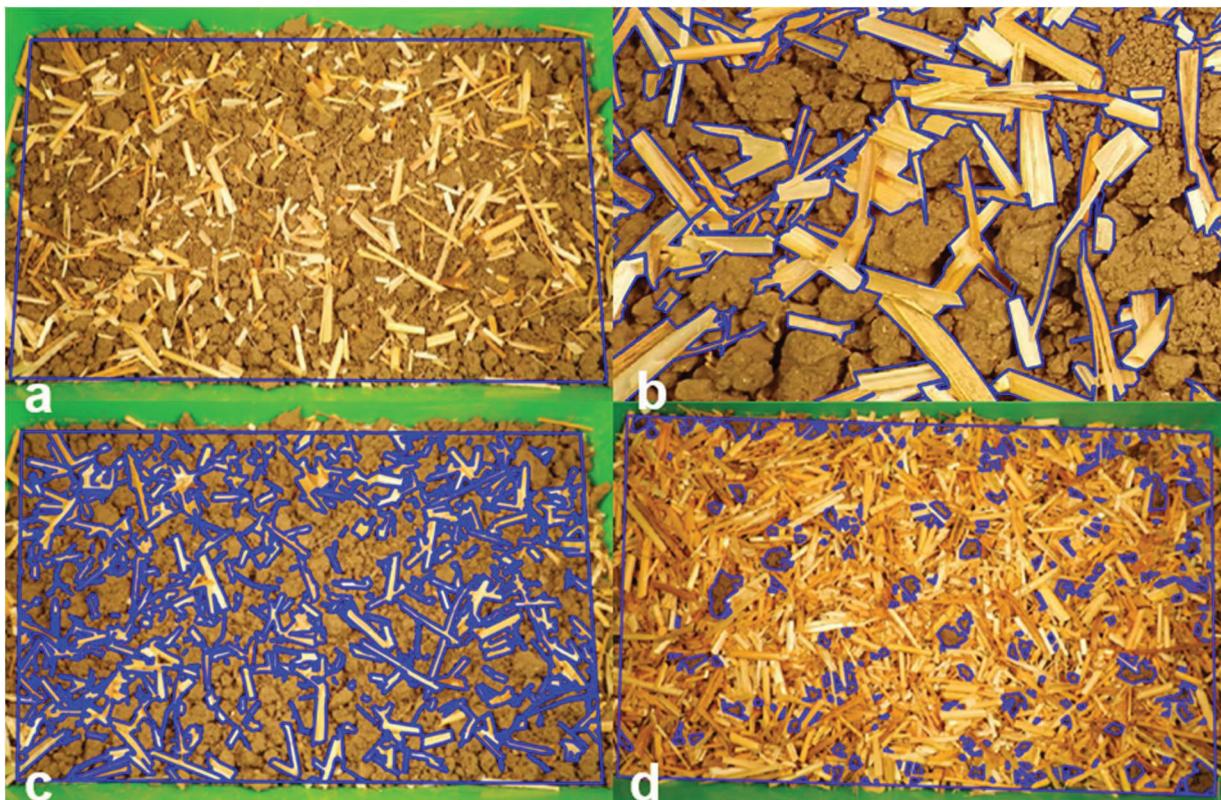


Abbildung 17: Digitalisierung der Stroh- und Bodenteilchen zur Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades; a) Polygon (blau), in das die Boden- und Strohteilchen hineindigitalisiert wurden, b) Digitalisierung der Strohteilchen in der Nahaufnahme, c) 5 dt/ha Stroh vollständig digitalisiert, d) 25 dt/ha Stroh vollständig digitalisiert

Quelle: Eigene Darstellung

Als zweites wurde der „Fächer zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades durch organische Rückstände“ der Forschungsanstalt für Landwirtschaft – Institut für Betriebstechnik und Bauforschung (BRUNOTTE und ORTMEIER, 2007) ebenfalls bildtechnisch analysiert. Für die definierten Strohbedeckungsgrade von 0-90 % in 10 %-Schritten wurde die Skewness ermittelt und mit den Daten der vorhergegangenen Bildanalyse verglichen.

Im letzten Schritt wurden die Ergebnisse der Indexberechnungen und der Bildanalyse auf die Bodenbedeckungsgrade übertragen, indem die Korrelationen untersucht wurden.

Mithilfe des analysierten Strohfächers und den digitalisierten Bodenbedeckungsgraden der eigens aufgenommenen Bilder sollen die Ergebnisse der Versuche, die auf den Strohmenge in dt/ha basieren, besser eingeordnet werden können. Die Auswertung soll als Brücke zwischen den Methoden sowie der Strohmenge und dem Strohbedeckungsgrad dienen.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Spektraldaten

Die spektralen Signaturen, die im Labor mithilfe des Spektrometers gemessen wurden, ergeben sowohl für die Böden als auch für Cellulose und Stroh stark voneinander abgrenzbare Kurvenverläufe. Die folgende Abbildung zeigt die Reflexion in % in Abhängigkeit von der Wellenlänge in nm der drei Böden im trockenen und feuchten Zustand sowie von Cellulose und Weizen-Stroh.

Die sechs Bodenvarianten lassen sich deutlich von Weizen-Stroh und Cellulose trennen. Im Allgemeinen ist der Verlauf der Böden flacher als der der cellulosehaltigen Materialien und weist weniger Kurven auf. Die einzigen starken Einbrüche sind in den Bereichen rund um 1.400 nm und 1.900 nm zu erkennen, die jedoch bei der Betrachtung außenvorgelassen wurden, da diese als Wasserbanden gelten. Die feuchten Böden reflektieren dabei weniger als die trockenen Böden. Die höchsten Reflexionswerte erreicht der hellbraune, trockene Boden und die niedrigsten Werte der braune, feuchte Boden.

Der Reflexionsgrad des Weizen-Strohs steigt dagegen vom Blauen über den Grünen bis hin zum Roten Bereich mit Werten bis 80 % Reflexion deutlich steiler an. Der Reflexionsgrad ist in jedem Wellenlängenbereich deutlich höher, trotzdem kommt es teilweise zu starken Schwankungen. Große Einbrüche sind neben den Wasserbanden in den Wellenlängenbereichen rund um 1.200 nm, 1.800 nm, 2.100 nm und 2.300 nm zu sehen.

Der Verlauf der Cellulose ähnelt der Kurve des Weizen-Strohs, erreicht lediglich im Visuellen Bereich schon sehr hohe Reflexionsgrade.

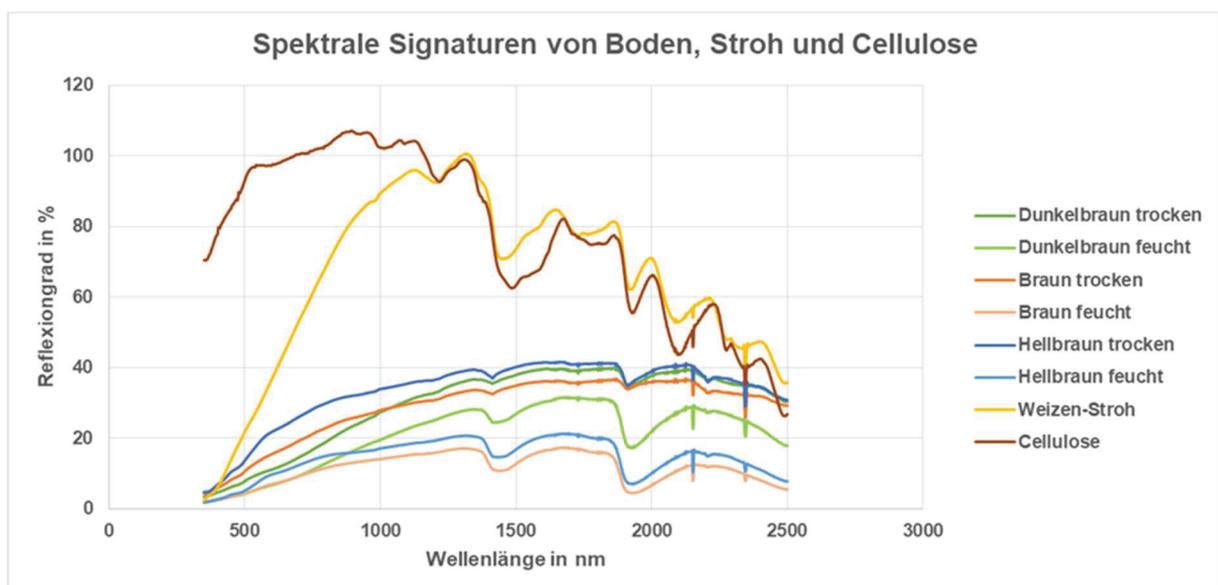


Abbildung 18: Spektrale Signaturen von Boden, Weizen-Stroh und Cellulose

Quelle: Eigene Darstellung

### 5.1.1 CAI

Die folgenden Grafiken bilden den CAI berechnet nach Daughtry et al. (1996) in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha für die drei Böden (*Dunkelbraun, Braun, Hellbraun*) jeweils im trockenen und feuchten Zustand ab.

Der CAI<sub>D</sub> liegt bei 0 dt/ha unter 0 und steigt mit zunehmender Strohmenge anfangs stark an. Bei 25 dt Stroh/ha liegt der CAI<sub>D</sub> in allen Varianten bei ca. 6. Ab 30 dt Stroh/ha schwanken die Wachstumsraten nur noch um ca. 10 % und der CAI<sub>D</sub> wächst deutlich langsamer. Bei 55 dt/ha erreicht der CAI<sub>D</sub> in allen Varianten einen Wert von 9. Die Kurvenverläufe sind in allen Fällen ähnlich und die Bestimmtheitsmaße erreichen überall Werte von 0,99. Der einzig auffallende Wert ist der CAI<sub>D</sub> der Variante hellbraun, feucht bei 5 dt/ha. Der Wert ist im Vergleich zu allen anderen Stroh-Werten negativ und liegt mit -0,1 knapp unter 0.

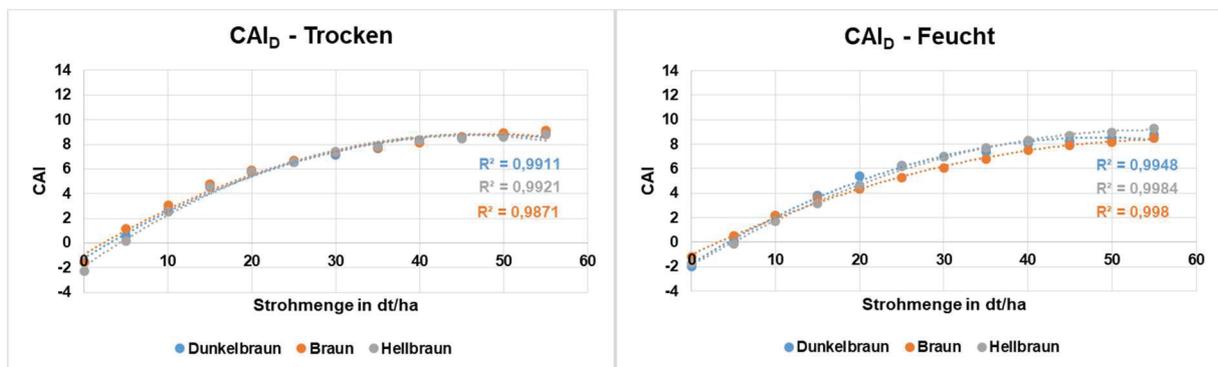


Abbildung 19: CAI<sub>D</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den zwei Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup>

Quelle: Eigene Darstellung

Die dazugehörige Tabelle 4 zeigt den CAI<sub>D</sub> der verschiedenen Varianten im Zahlenformat.

Tabelle 4: CAI<sub>D</sub> der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht, negative Werte sind rot unterlegt

Strohmenge	CAI <sub>D</sub>					
	Trocken			Feucht		
	Dunkelbraun	Braun	Hellbraun	Dunkelbraun	Braun	Hellbraun
0 dt	-1,55	-1,57	-2,26	-1,96	-1,21	-1,70
5 dt	0,53	1,16	0,16	0,14	0,50	-0,14
10 dt	2,71	3,06	2,52	2,19	2,15	1,70
15 dt	4,71	4,76	4,52	3,81	3,52	3,13
20 dt	5,75	5,87	5,79	5,43	4,32	4,61
25 dt	6,56	6,66	6,57	6,28	5,28	6,19
30 dt	7,15	7,33	7,43	6,98	6,08	7,01
35 dt	7,64	7,77	7,87	7,38	6,81	7,72
40 dt	8,33	8,11	8,35	8,05	7,51	8,31
45 dt	8,58	8,57	8,47	8,22	7,91	8,72
50 dt	8,72	8,90	8,57	8,48	8,15	8,95
55 dt	8,91	9,10	8,76	8,73	8,52	9,25

Quelle: Eigene Darstellung

In allen Varianten liegt der  $CAI_D$  bei 0 dt/ha (reiner Boden) im negativen Bereich zwischen -2,26 und -1,21. Sobald der Boden nur gering mit Stroh (5 dt/ha) bedeckt ist, werden die Werte positiv. Wie bereits erwähnt bildet die Variante *Hellbraun, Feucht* bei 5 dt/ha mit einem Wert von -0,14 die Ausnahme. Die Variante erreicht außerdem den höchsten  $CAI_D$  mit einem Wert von 9,25.

Da die Werte erst stark und dann geringer ansteigen, sind in der folgenden Tabelle die Konfidenzintervalle und die Überlagerungen zwischen den 5 dt-Schritten dargestellt. Die Konfidenzintervalle wurden mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % ( $\alpha = 0,05$ ) unter Einbezug der acht Messwerte pro Strohmenge ermittelt. Die Spalte  $U_n - O_{n-1}$  stellt die Differenz aus der Untergrenze in einer bestimmten Strohmenge und der Obergrenze in der vorher ermittelten Strohmenge dar. Negative Werte stehen für Überlagerungen und sind rot gekennzeichnet.

Tabelle 5: Konfidenzintervalle des  $CAI_D$  der drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand sowie die Überlagerungen zwischen den 5 dt-Schritten ( $U_n - O_{n-1}$ ), Überlagerungen sind rot gekennzeichnet,  $\alpha = 0,05$ ,  $n = 8$

CAI <sub>D</sub> - Konfidenzintervalle ( $\alpha = 0,05$ )									
Trocken									
Dunkelbraun			Braun			Hellbraun			
Strohmenge	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$
0 dt	-1,61	-1,50		-1,62	-1,53		-2,32	-2,20	
5 dt	0,36	0,70	1,86	0,93	1,40	2,45	-0,12	0,44	2,08
10 dt	2,54	2,88	1,84	2,83	3,29	1,43	2,27	2,77	1,83
15 dt	4,45	4,97	1,57	4,59	4,94	1,29	4,28	4,77	1,51
20 dt	5,47	6,03	0,50	5,47	6,28	0,53	5,55	6,02	0,78
25 dt	6,41	6,72	0,38	6,37	6,94	0,10	6,44	6,70	0,42
30 dt	6,90	7,41	0,18	7,15	7,50	0,21	7,27	7,58	0,57
35 dt	7,52	7,76	0,11	7,53	8,01	0,03	7,80	7,95	0,21
40 dt	8,25	8,41	0,49	7,97	8,25	-0,04	8,23	8,46	0,29
45 dt	8,48	8,69	0,07	8,50	8,64	0,25	8,33	8,61	-0,13
50 dt	8,61	8,82	-0,07	8,81	8,99	0,17	8,39	8,76	-0,23
55 dt	8,79	9,03	-0,03	9,00	9,20	0,01	8,65	8,87	-0,11
Feucht									
Dunkelbraun			Braun			Hellbraun			
Strohmenge	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$
0 dt	-1,99	-1,93		-1,23	-1,20		-1,73	-1,67	
5 dt	-0,06	0,34	1,87	0,39	0,61	1,59	-0,45	0,18	1,23
10 dt	1,76	2,62	1,41	1,89	2,41	1,28	1,42	1,97	1,25
15 dt	3,46	4,16	0,84	3,39	3,65	0,98	2,75	3,51	0,78
20 dt	5,13	5,73	0,97	4,12	4,52	0,47	4,40	4,82	0,89
25 dt	6,04	6,53	0,31	4,97	5,59	0,45	6,01	6,38	1,19
30 dt	6,73	7,23	0,20	5,85	6,32	0,26	6,84	7,18	0,46
35 dt	7,21	7,55	-0,02	6,58	7,03	0,26	7,61	7,82	0,44
40 dt	7,87	8,23	0,32	7,24	7,77	0,21	8,18	8,43	0,36
45 dt	8,02	8,41	-0,21	7,76	8,05	-0,01	8,56	8,88	0,13
50 dt	8,31	8,65	-0,10	7,91	8,39	-0,13	8,75	9,16	-0,13
55 dt	8,58	8,89	-0,07	8,30	8,73	-0,08	9,07	9,44	-0,09

Quelle: Eigene Darstellung

Vorrangig gibt es zwischen den letzten beiden Intervallen (45 und 50 dt/ha, 50 und 55 dt/ha) Überschneidungen von 0,03 bis maximal 0,23. In den Varianten *Hellbraun*, *Trocken* sowie *braun*, *feucht* kommen Überschneidungen zwischen 40 und 45 dt/ha hinzu und in der Variante *Dunkelbraun*, *Feucht* sogar geringfügig mit 0,02 zwischen 30 und 35 dt/ha. Die kleinsten Überlappungen treten in den Varianten *Dunkelbraun* und *Braun* im trockenen Zustand auf. Anschließend sind die Diagramme des CAI<sub>N</sub>, berechnet nach Nagel et al. (2000), in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha für die drei Böden (*Dunkelbraun*, *Braun*, *Hellbraun*) im trockenen und feuchten Zustand dargestellt.

Der CAI<sub>N</sub> liegt in jeder Variante bei 0 dt/ha unter 0 und steigt erst stärker und ab ca. 40 dt/ha nur noch langsam an. Bei 55 dt/ha liegt der CAI<sub>N</sub> in allen Varianten etwa zwischen 9 und 10. Die Kurvenverläufe sind in allen Fällen ähnlich und die Bestimmtheitsmaße erreichen überall Werte von 0,99. Die Ausnahme bildet der CAI<sub>N</sub> der Variante *Hellbraun*, *Feucht* bei 5 dt/ha. Der Wert liegt mit -0,04 entgegen der anderen Varianten als einziger unter 0.

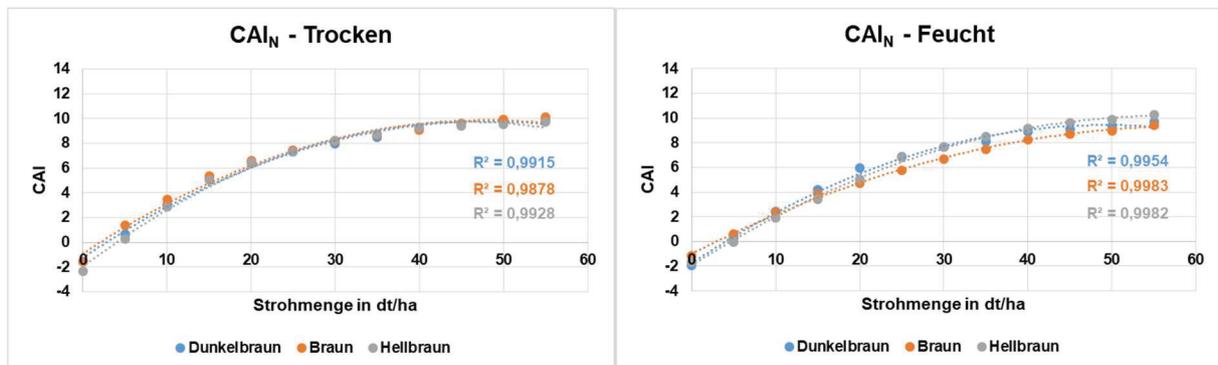


Abbildung 20: CAI<sub>N</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup>

Quelle: Eigene Darstellung

Passend dazu, zeigt die Tabelle den jeweiligen CAI im Zahlenformat.

Tabelle 6: CAI<sub>N</sub> der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht, negative Werte sind rot unterlegt

Strohmenge	CAI <sub>N</sub>					
	Trocken			Feucht		
	Dunkelbraun	Braun	Hellbraun	Dunkelbraun	Braun	Hellbraun
0 dt	-1,56	-1,59	-2,32	-1,95	-1,17	-1,68
5 dt	0,67	1,37	0,28	0,25	0,62	-0,04
10 dt	3,04	3,46	2,85	2,43	2,37	1,90
15 dt	5,25	5,34	5,03	4,18	3,85	3,44
20 dt	6,40	6,56	6,43	5,95	4,71	5,04
25 dt	7,30	7,44	7,30	6,89	5,78	6,78
30 dt	7,95	8,19	8,25	7,67	6,66	7,68
35 dt	8,48	8,68	8,75	8,12	7,46	8,47
40 dt	9,26	9,05	9,28	8,87	8,25	9,14
45 dt	9,57	9,53	9,43	9,06	8,72	9,61
50 dt	9,72	9,92	9,54	9,37	8,99	9,89
55 dt	9,93	10,14	9,75	9,67	9,42	10,26

Quelle: Eigene Darstellung

Die Werte der Variante 0 dt/ha schwanken zwischen -2,32 und -1,17. Den geringsten Wert erreicht dabei die Variante *Hellbraun, Trocken*. Sobald der Boden von Stroh bedeckt ist (5 dt/ha), liegen die Werte im positiven Bereich. Auffällig ist jedoch auch beim CAI<sub>N</sub>, dass der Wert der Variante *Hellbraun, Feucht* mit -0,04 im negativen Bereich liegt. Im Vergleich zum CAI<sub>D</sub> weist der CAI<sub>N</sub> eine größere Spanne zwischen den Werten auf. Vergleichsweise liegt der geringste Wert des CAI<sub>N</sub> in der Variante *Hellbraun, Trocken* bei -2,32 und der Maximalwert in der Variante *Hellbraun, Feucht* bei 10,26, wohingegen der Minimal- und Maximalwert des CAI<sub>D</sub> in den gleichen Varianten bei -2,26 und 9,25 liegt (vergleiche Tabelle 7). Die Werte der feuchten Variante liegen vergleichsweise unter denen der trockenen Variante.

Tabelle 7: Konfidenzintervalle des  $CAI_N$  der drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand sowie die Überlagerungen zwischen den 5 dt-Schritten ( $U_n - O_{n-1}$ ), Überlagerungen sind rot gekennzeichnet,  $\alpha = 0,05$ ,  $n = 8$

CAI <sub>N</sub> - Konfidenzintervalle ( $\alpha = 0,05$ )									
Trocken									
	Dunkelbraun			Braun			Hellbraun		
Strohmenge	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$
0 dt	-1,63	-1,49		-1,64	-1,54		-2,39	-2,26	
5 dt	0,49	0,85	1,99	1,12	1,62	2,67	-0,02	0,59	2,24
10 dt	2,86	3,23	2,00	3,21	3,71	1,59	2,58	3,12	1,98
15 dt	4,97	5,53	1,74	5,15	5,52	1,44	4,76	5,31	1,64
20 dt	6,09	6,70	0,56	6,12	7,00	0,60	6,18	6,69	0,87
25 dt	7,13	7,48	0,42	7,13	7,75	0,12	7,15	7,44	0,47
30 dt	7,66	8,25	0,18	8,00	8,37	0,25	8,08	8,42	0,63
35 dt	8,35	8,61	0,10	8,42	8,94	0,05	8,67	8,84	0,25
40 dt	9,16	9,36	0,55	8,90	9,21	-0,04	9,15	9,41	0,31
45 dt	9,45	9,69	0,10	9,44	9,61	0,24	9,27	9,58	-0,14
50 dt	9,60	9,84	-0,09	9,82	10,02	0,21	9,33	9,76	-0,25
55 dt	9,79	10,07	-0,05	10,03	10,26	0,00	9,63	9,88	-0,13
Feucht									
	Dunkelbraun			Braun			Hellbraun		
Strohmenge	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$
0 dt	-1,99	-1,91		-1,19	-1,15		-1,71	-1,65	
5 dt	0,04	0,47	1,95	0,51	0,74	1,66	-0,38	0,29	1,27
10 dt	1,96	2,89	1,50	2,09	2,65	1,35	1,60	2,19	1,31
15 dt	3,80	4,56	0,91	3,71	3,99	1,06	3,03	3,85	0,84
20 dt	5,62	6,28	1,06	4,49	4,93	0,50	4,81	5,27	0,96
25 dt	6,63	7,15	0,35	5,43	6,13	0,49	6,58	6,98	1,31
30 dt	7,39	7,94	0,24	6,38	6,93	0,26	7,48	7,87	0,51
35 dt	7,93	8,31	-0,01	7,19	7,72	0,27	8,35	8,59	0,48
40 dt	8,67	9,06	0,36	7,94	8,56	0,22	8,99	9,29	0,40
45 dt	8,84	9,29	-0,23	8,55	8,89	-0,01	9,41	9,81	0,11
50 dt	9,18	9,56	-0,11	8,71	9,26	-0,18	9,65	10,14	-0,16
55 dt	9,49	9,85	-0,07	9,16	9,68	-0,11	10,04	10,47	-0,10

Quelle: Eigene Darstellung

Die häufigsten Überschneidungen treten in den letzten drei Intervallen 40 und 45 dt/ha, 45 und 50 dt/ha sowie 50 und 55 dt/ha auf. Die höchsten Überlappungsbereiche liegen in den zwei Varianten *Hellbraun*, *Trocken* (-0,25) und *Dunkelbraun*, *Feucht* (-0,23). Die kleinsten Überschneidungen treten in den Varianten *Dunkelbraun* und *Braun* im trockenen Zustand mit Werten kleiner als -0,1 auf.

Anschließend sind die Diagramme des CAIs, berechnet nach Serbin et al. (2013), in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha für die drei Böden (*Dunkelbraun*, *Braun*, *Hellbraun*) im trockenen und feuchten Zustand dargestellt.

Der CAIs liegt in jeder Variante bei 0 dt/ha unter 0. Bis 30 dt/ha steigen die Kurven verhältnismäßig stark an, wohingegen die Kurven ab 30 dt/ha nur noch langsam anwachsen. Bei 55 dt/ha liegt der CAIs in allen Varianten zwischen 9 und 10. Die Kurvenverläufe sind kaum zu unterscheiden und die Bestimmtheitsmaße erreichen überall Werte von 0,98 und 0,99.

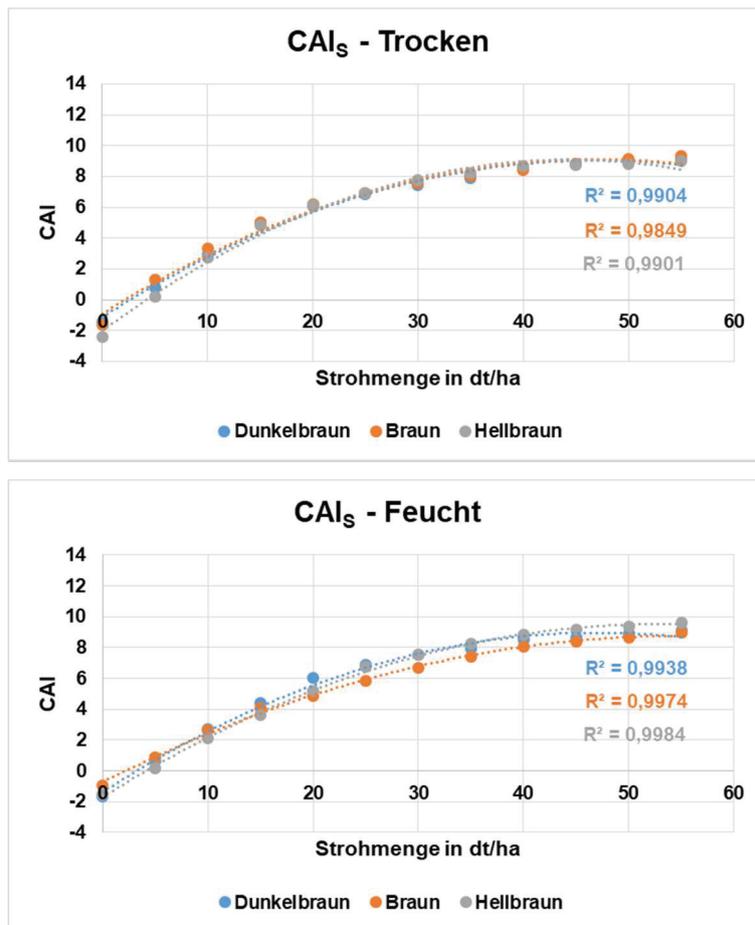


Abbildung 21: CAI<sub>S</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup>

Quelle: Eigene Darstellung

In der dazugehörigen Tabelle sind die Werte noch einmal im Zahlenformat aufgeführt.

Tabelle 8: CAI<sub>S</sub> der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht, negative Werte sind rot unterlegt

Strohmenge	CAI <sub>S</sub>					
	Trocken			Feucht		
	Dunkelbraun	Braun	Hellbraun	Dunkelbraun	Braun	Hellbraun
0 dt	-1,46	-1,62	-2,42	-1,64	-0,97	-1,51
5 dt	0,76	1,31	0,21	0,62	0,91	0,18
10 dt	2,96	3,30	2,73	2,72	2,64	2,12
15 dt	4,98	5,04	4,85	4,38	4,07	3,63
20 dt	6,07	6,18	6,16	6,01	4,87	5,17
25 dt	6,87	6,91	6,94	6,87	5,86	6,76
30 dt	7,47	7,60	7,77	7,52	6,68	7,57
35 dt	7,93	8,05	8,22	7,90	7,38	8,25
40 dt	8,63	8,39	8,68	8,55	8,05	8,81
45 dt	8,83	8,83	8,75	8,65	8,39	9,19
50 dt	8,94	9,14	8,81	8,88	8,62	9,37
55 dt	9,17	9,33	9,02	9,10	8,94	9,62

Quelle: Eigene Darstellung

Im Gegensatz zu den ersten beiden CAIs ( $CAI_D$  und  $CAI_N$ ) liegen die Werte ab 5 dt/ha vollständig im positiven Bereich. Die Werte im negativen Bereich sind ähnlich. Auch die Höchstwerte bei 55 dt/ha sind bei allen drei bisher betrachteten Indizes vergleichbar. Den größten Wert erreicht die Variante *Hellbraun, Feucht* mit einem  $CAI_S$  von 9,62. Die Werte der feuchten Variante liegen jeweils geringfügig unter denen der trockenen Variante.

Tabelle 9 zeigt die Konfidenzintervalle der sechs Varianten. Die Überschneidungsbereiche sind rot gekennzeichnet.

Tabelle 9: Konfidenzintervalle des  $CAI_S$  der drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand sowie die Überlagerungen zwischen den 5 dt-Schritten ( $U_n - O_{n-1}$ ), Überlagerungen sind rot gekennzeichnet,  $\alpha = 0,05$ ,  $n = 8$

CAI <sub>S</sub> - Konfidenzintervalle ( $\alpha = 0,05$ )									
Trocken									
	Dunkelbraun			Braun			Hellbraun		
Strohmenge	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$
0 dt	-1,53	-1,39		-1,67	-1,58		-2,49	-2,35	
5 dt	0,59	0,93	1,98	1,06	1,56	2,63	-0,11	0,52	2,25
10 dt	2,79	3,13	1,86	3,04	3,57	1,48	2,46	2,99	1,94
15 dt	4,71	5,26	1,58	4,84	5,25	1,27	4,61	5,10	1,62
20 dt	5,80	6,34	0,55	5,74	6,62	0,49	5,91	6,40	0,81
25 dt	6,73	7,02	0,39	6,63	7,20	0,01	6,81	7,07	0,40
30 dt	7,22	7,72	0,20	7,43	7,78	0,23	7,61	7,92	0,54
35 dt	7,82	8,04	0,09	7,80	8,29	0,02	8,14	8,29	0,22
40 dt	8,55	8,70	0,51	8,24	8,55	-0,05	8,57	8,78	0,28
45 dt	8,73	8,94	0,03	8,75	8,90	0,21	8,61	8,89	-0,17
50 dt	8,85	9,03	-0,08	9,05	9,24	0,15	8,62	9,00	-0,27
55 dt	9,05	9,28	0,02	9,22	9,43	-0,02	8,93	9,12	-0,07
Feucht									
	Dunkelbraun			Braun			Hellbraun		
Strohmenge	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$
0 dt	-1,70	-1,58		-0,99	-0,94		-1,54	-1,49	
5 dt	0,40	0,85	1,98	0,80	1,02	1,74	-0,16	0,52	1,33
10 dt	2,27	3,17	1,42	2,35	2,93	1,32	1,82	2,42	1,30
15 dt	3,98	4,77	0,81	3,92	4,22	0,99	3,21	4,04	0,79
20 dt	5,69	6,32	0,92	4,67	5,08	0,45	4,94	5,40	0,90
25 dt	6,60	7,14	0,28	5,56	6,16	0,48	6,56	6,96	1,16
30 dt	7,26	7,78	0,12	6,47	6,89	0,31	7,40	7,73	0,44
35 dt	7,73	8,07	-0,06	7,18	7,58	0,29	8,15	8,35	0,42
40 dt	8,36	8,74	0,29	7,83	8,27	0,24	8,71	8,92	0,36
45 dt	8,45	8,85	-0,29	8,27	8,52	0,00	9,06	9,31	0,15
50 dt	8,71	9,04	-0,14	8,42	8,83	-0,10	9,19	9,55	-0,13
55 dt	8,94	9,26	-0,10	8,78	9,11	-0,05	9,44	9,80	-0,12

Quelle: Eigene Darstellung

Vergleichsweise gibt es beim  $CAI_S$  weniger Überschneidungen als beim  $CAI_D$  und  $CAI_N$ . Die meisten Überlappungen treten in den Varianten *Hellbraun, Trocken* und *Dunkelbraun, Feucht* auf. Die negativen Werte in der Tabelle reichen von -0,02 bis -0,29, was für verhältnismäßig geringe Überlappungen steht. In den Varianten *Dunkelbraun, Trocken* und *Braun, Trocken* sind die Überschneidungsbereiche am geringsten.

Als letztes wurde der  $CAI_J$  für alle sechs Varianten berechnet. Die Abbildungen zeigen den  $CAI_J$  in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha.

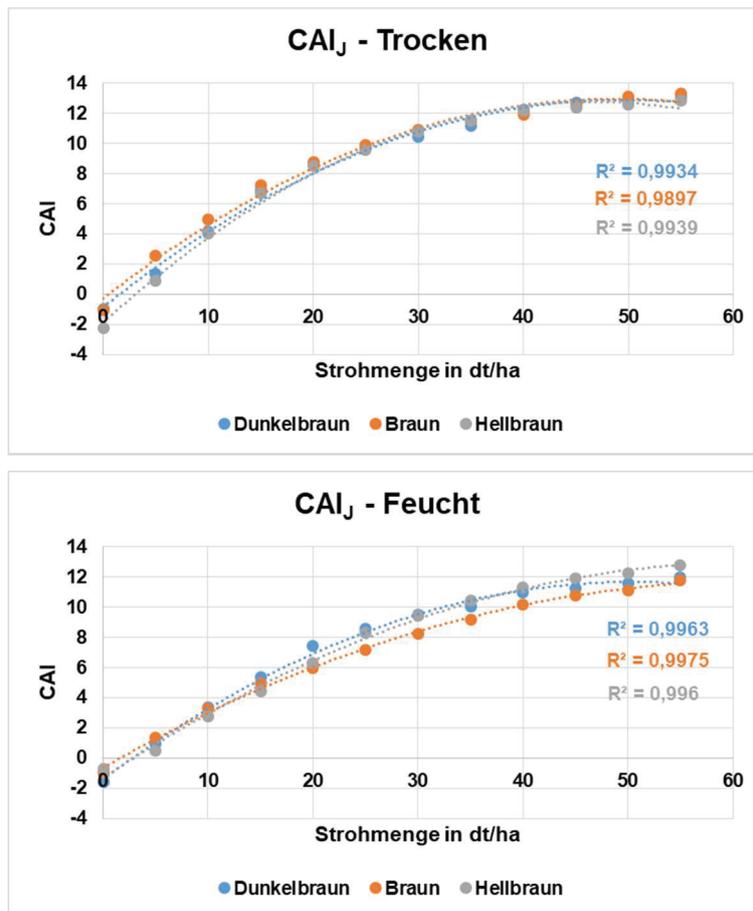


Abbildung 22:  $CAI_J$  in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Quelle: Eigene Darstellung

Der  $CAI_J$  hat von den insgesamt vier betrachteten CAIs den größten Wertebereich. Bei 0 dt/ha liegen die Werte im negativen Bereich und reichen von -0,74 bis -2,26. Die Kurve steigt daraufhin stark an. In den trockenen Varianten scheint die Kurve ab 35 dt/ha deutlich abzufachen. Im feuchten Bereich steigen die Werte dagegen etwas langsamer an. Alle Varianten erreichen bei 55 dt/ha Werte von ca. 12 bis 13.

Tabelle 10 bildet die dazugehörigen Werte zu den obenstehenden Diagrammen ab.

Tabelle 10: CAI<sub>J</sub> der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht, negative Werte sind rot unterlegt

Strohmenge	CAI <sub>J</sub>					
	Trocken			Feucht		
	Dunkelbraun	Braun	Hellbraun	Dunkelbraun	Braun	Hellbraun
0 dt	-1,00	-1,05	-2,26	-1,59	-0,96	-0,74
5 dt	1,37	2,53	0,88	0,92	1,33	0,49
10 dt	4,17	4,93	4,02	3,34	3,30	2,74
15 dt	6,88	7,26	6,74	5,35	4,97	4,44
20 dt	8,63	8,76	8,50	7,41	5,94	6,28
25 dt	9,69	9,89	9,58	8,55	7,19	8,33
30 dt	10,48	10,91	10,81	9,50	8,24	9,45
35 dt	11,16	11,50	11,51	10,05	9,17	10,43
40 dt	12,24	11,94	12,19	10,96	10,20	11,32
45 dt	12,70	12,50	12,42	11,22	10,79	11,93
50 dt	12,84	13,11	12,61	11,61	11,11	12,26
55 dt	13,13	13,31	12,88	11,99	11,77	12,81

Quelle: Eigene Darstellung

Auch in diesem Fall ist zu sehen, dass die Werte der feuchten Variante jeweils unter denen der trockenen Variante liegen. Den größten Wert bei 55 dt/ah mit 13,31 erreicht die Variante *Braun, Trocken*.

In der anschließenden Tabelle sind die dazugehörigen Konfidenzintervalle aufgeführt. Durch die Differenzen der Minimal- und Maximalwerten der angrenzenden Messungen können die Überlagerungsbereiche ermittelt werden. Sie sind rot gekennzeichnet.

Tabelle 11: Konfidenzintervalle des  $CAI_J$  der drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand sowie die Überlagerungen zwischen den 5 dt-Schritten ( $U_n - O_{n-1}$ ), Überlagerungen sind rot gekennzeichnet,  $\alpha = 0,05$ ,  $n = 8$

CAI <sub>J</sub> - Konfidenzintervalle ( $\alpha = 0,05$ )									
Trocken									
	Dunkelbraun			Braun			Hellbraun		
Strohmenge	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$
0 dt	-1,09	-0,90		-1,12	-0,98		-2,33	-2,19	
5 dt	1,13	1,61	2,03	2,21	2,85	3,19	0,50	1,25	2,68
10 dt	3,93	4,41	2,32	4,61	5,25	1,77	3,69	4,35	2,43
15 dt	6,54	7,23	2,12	7,07	7,44	1,82	6,40	7,08	2,05
20 dt	8,24	9,02	1,00	8,22	9,30	0,78	8,15	8,86	1,07
25 dt	9,48	9,89	0,47	9,52	10,26	0,23	9,36	9,80	0,51
30 dt	10,07	10,88	0,18	10,70	11,13	0,43	10,59	11,03	0,79
35 dt	10,94	11,39	0,05	11,20	11,81	0,07	11,41	11,62	0,38
40 dt	12,07	12,40	0,67	11,73	12,14	-0,08	12,02	12,36	0,40
45 dt	12,55	12,85	0,14	12,33	12,66	0,19	12,20	12,63	-0,16
50 dt	12,69	12,99	-0,16	12,98	13,25	0,32	12,32	12,89	-0,31
55 dt	12,96	13,31	-0,03	13,11	13,50	-0,13	12,66	13,10	-0,23
Feucht									
	Dunkelbraun			Braun			Hellbraun		
Strohmenge	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$	Untergrenze	Obergrenze	$U_n - O_{n-1}$
0 dt	-1,63	-1,54		-0,99	-0,94		-1,59	-1,52	
5 dt	0,69	1,15	2,23	1,19	1,46	2,13	0,08	0,90	1,60
10 dt	2,82	3,86	1,67	2,98	3,62	1,52	2,41	3,06	1,51
15 dt	4,89	5,81	1,04	4,79	5,15	1,17	3,95	4,93	0,89
20 dt	7,04	7,78	1,23	5,69	6,20	0,54	6,02	6,54	1,09
25 dt	8,23	8,88	0,45	6,76	7,61	0,56	8,07	8,59	1,53
30 dt	9,17	9,83	0,29	7,89	8,58	0,28	9,22	9,69	0,62
35 dt	9,82	10,29	-0,01	8,81	9,54	0,23	10,26	10,59	0,57
40 dt	10,71	11,22	0,42	9,73	10,66	0,19	11,11	11,52	0,51
45 dt	10,93	11,51	-0,28	10,54	11,04	-0,12	11,62	12,25	0,10
50 dt	11,34	11,89	-0,17	10,70	11,52	-0,34	11,90	12,62	-0,34
55 dt	11,74	12,23	-0,14	11,39	12,15	-0,13	12,54	13,09	-0,08

Quelle: Eigene Darstellung

Die meisten Überschneidungen gibt es in den Varianten *Hellbraun*, *Trocken* sowie *Dunkelbraun*, *Feucht* und *Braun*, *Feucht*. Von 50 zu 55 dt/ha gibt es in jedem Fall Überlagerungen und auch von 40 zu 45 dt/ha und 45 zu 50 dt/ha sind Überschneidungen wahrscheinlich.

### 5.1.2 NDI

Aus den Spektraldaten wurden der  $NDI_5$  und der  $NDI_7$  berechnet.

Abbildung 23 zeigt den Verlauf des  $NDI_5$  in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha sowohl auf den trockenen als auch den feuchten Böden. Die Kurvenverläufe steigen grundsätzlich in allen Varianten an. Die Werte bei 0 dt/ha sind am geringsten und liegen bei -0,32 (*Dunkelbraun*), -0,2 (*Braun*) und -0,15 (*Hellbraun*). Die Kurvenverläufe beginnen mit einer zunehmenden Strohmenge zu steigen, jedoch sind die Werte ab 10 dt/ha kaum noch zu unterscheiden. In allen trockenen Varianten liegen die Werte daraufhin zwischen -0,04 und -0,08. Die Bestimmtheitsmaße liegen zwischen 0,82 und 0,89. Die feuchten Varianten

unterscheiden sich kaum davon. Auch dort liegen die Werte ab 10 dt/ha zwischen -0,03 und -0,08. Die einzelnen Varianten lassen sich innerhalb der Strohmenngen-Steigerung von 0-10 dt/ha voneinander unterscheiden, jedoch liegen die Werte unterschiedlicher Varianten bei verschiedenen Strohmenngen teilweise auf dem gleichen Niveau. Das trifft sowohl auf die trockenen als auch auf die feuchten Varianten zu. In der feuchten Variante liegen die Bestimmtheitsmaße leicht unter denen der trockenen Variante und reichen von 0,70-0,82.

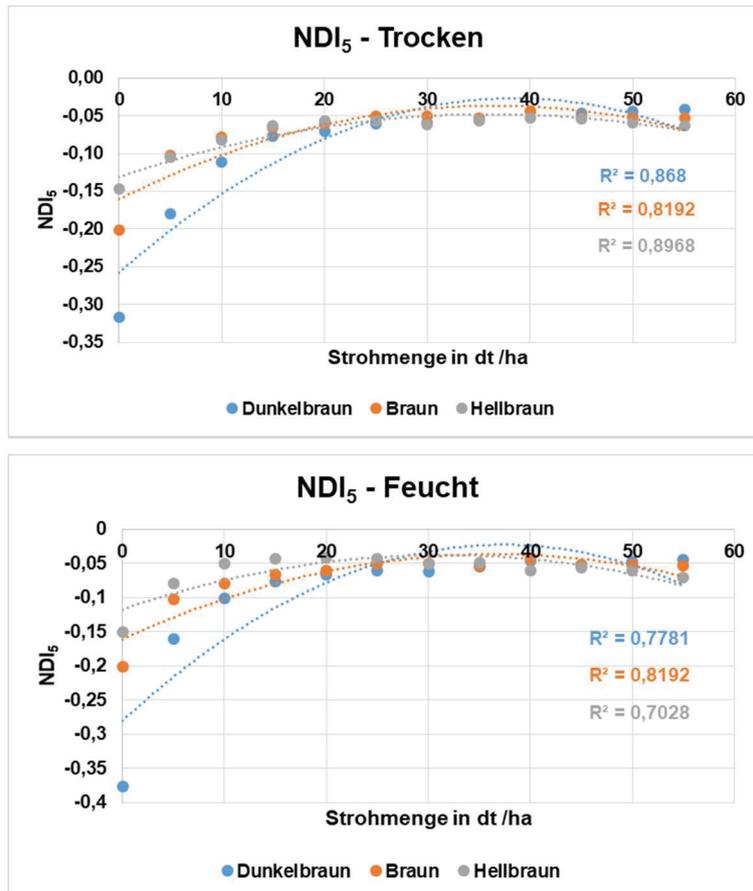


Abbildung 23: NDI<sub>5</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup>

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 24 bildet den Verlauf des NDI<sub>7</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha für den trockenen und feuchten Bodenzustand ab. Die Kurvenverläufe steigen grundsätzlich in allen Varianten an. In der trockenen Variante liegen die Werte für alle drei Böden bei 0 und 5 dt/ha im negativen Bereich. Die Kurven steigen bis 20 dt/ha verhältnismäßig stark an und schwanken daraufhin leicht zwischen 0,10 und 0,16. Der hellbraune und braune Boden ähneln sich in ihrem Verlauf, der dunkelbraune Boden liegt mit seinem Wert leicht darunter. In den feuchten Varianten verlaufen die Kurven flacher außer die des dunkelbraunen Bodens. Die Werte liegen bei dem hellbraunen und braunen Boden in jedem Fall im positiven Bereich, steigen ab 0 dt/ha bis 20 dt/ha und vergrößern sich daraufhin nur noch in äußerst kleinen

Schritten mit Werten zwischen 0,11 und 0,16. Wie schon beim  $NDI_5$  lassen sich die einzelnen Varianten innerhalb der Strohmenge-Steigerung von 0 bis 10 dt/ha voneinander unterscheiden, jedoch liegen die Werte unterschiedlicher Varianten bei verschiedenen Strohmenge teilweise auf dem gleichen Niveau. Das trifft sowohl auf die trockenen als auch auf die feuchten Varianten zu.  $R^2$  ist in allen Fällen mit Werten zwischen 0,81 und 0,98 verhältnismäßig hoch.

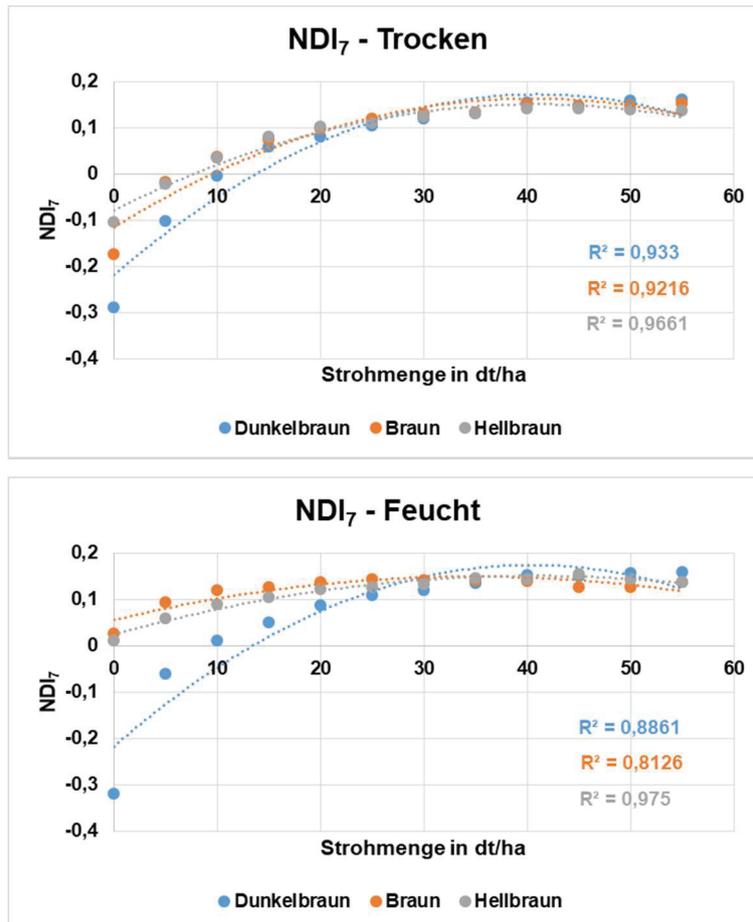


Abbildung 24:  $NDI_7$  in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Quelle: Eigene Darstellung

### 5.1.3 DFI

Als nächstes wurde der DFI näher untersucht. Dargestellt sind in den Diagrammen die Werte des DFIs in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha auf den drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand. Beide Varianten unterscheiden sich deutlich voneinander. Im trockenen Zustand wachsen die Kurven erst steil von 1 (0 dt/ha) auf 15 (15 dt/ha) und ab 15 dt/ha nur noch langsam bis maximal 20 (55 dt/ha). Die Bestimmtheitsmaße sind dabei sehr hoch und liegen zwischen 0,93 und 0,96. Der braune, feuchte Boden ähnelt dem Verlauf der trockenen Varianten. Der Verlauf startet bei einem Wert von 5 (0 dt/ha) und steigt bis 15 dt/ha auf 15 an,

bevor er nur noch geringfügig zunimmt. *Braun* und *Hellbraun* unterscheiden sich davon jedoch deutlich. Unabhängig von der Strohmenge liegt der DFI immer zwischen 15 und 20.  $R^2$  reicht in der feuchten Variante von 0,55 über 0,78 bis hin zu 0,96.

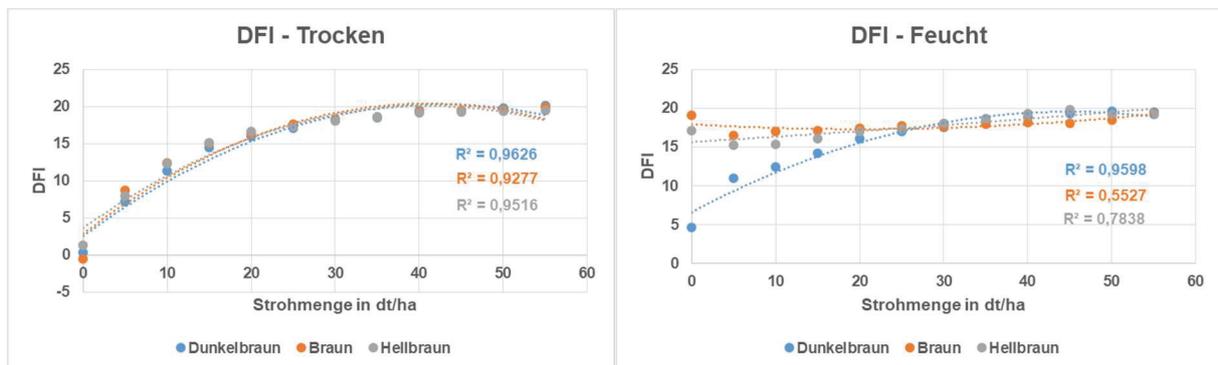


Abbildung 25: DFI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Quelle: Eigene Darstellung

#### 5.1.4 SQI

Als letztes wurde der SQI untersucht. Auch in diesem Fall zeigen die Diagramme den Index in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha für die drei Böden im trockenen und im feuchten Zustand. Im trockenen Zustand sind die Kurven des dunkelbraunen und des hellbraunen Bodens nahezu identisch. Die Kurven steigen von 0-55 dt/ha gleichermaßen an und wachsen beinahe linear. Sie beginnen bei 0 dt/ha mit 10 und wachsen bis 55 dt/ha auf 31 bzw. 32 an. Der Verlauf des braunen Bodens ist ähnlich. Nur ab 40 dt/ha scheint die Kurve etwas abzuflachen und endet bei 55 dt/ha mit einem Wert von 28.  $R^2$  liegt in allen Fällen bei 0,99. In der feuchten Variante steigen die Böden ebenfalls stark und fast linear an. Sie verlaufen in etwas parallel zu den trockenen Kurven, weisen jedoch geringere SQI-Werte auf. *Braun* und *Hellbraun* starten bei 1 (0 dt/ha) und enden bei 22 (55 dt/ha). Der dunkelbraune Verlauf weist mit 5 einen höheren Startwert und mit 20 einen geringeren Endwert auf und verläuft damit geringfügig flacher. Die Bestimmtheitsmaße liegen ebenfalls bei 0,99.

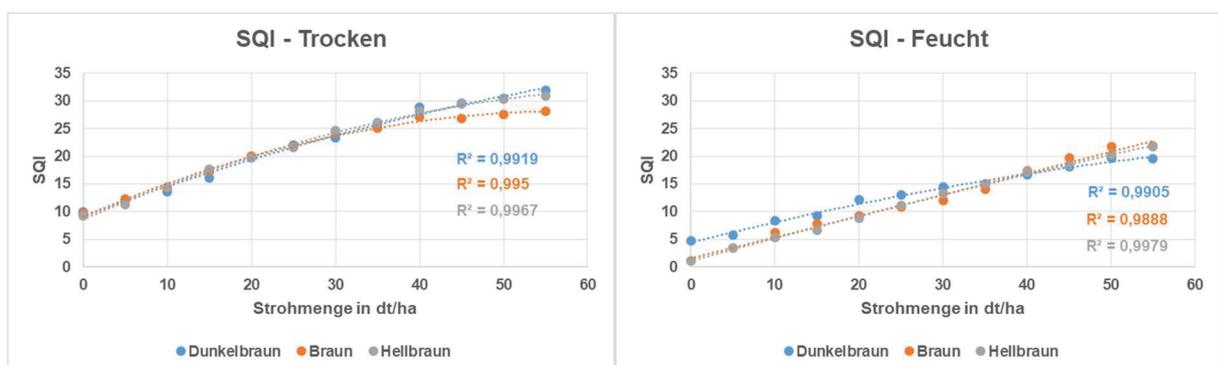


Abbildung 26: SQI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha der drei Böden in den Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Quelle: Eigene Darstellung

### 5.1.5 Berechnung

Um die Entwicklung der Indizes der trockenen Strohmenngen auf trockenem und feuchtem Boden mit der des nassen Strohs vergleichen zu können, wurden die Werte für Tau und Regen auf dem einem weiteren dunkelbraunen Boden (*Dunkelbraun 2*) erhoben. In der Tabelle sind die Werte des CAI<sub>S</sub> und des CAI<sub>J</sub> exemplarisch für den CAI dargestellt.

Tabelle 12: CAI<sub>S</sub> und CAI<sub>J</sub> für die Strohmenngen 0 dt/ha, 5 dt/ha und 20 dt/ha der drei Feuchtigkeitsstufen Trocken, Tau und Regen

CAI									
Feuchtigkeit	Trocken			Tau			Regen		
Strohmenge je ha	0 dt	5 dt	20 dt	0 dt	5 dt	20 dt	0 dt	5 dt	20 dt
CAI <sub>S</sub>	-1,23	1,47	6,39	-1,22	0,35	2,90	-0,94	-0,38	0,32
CAI <sub>J</sub>	-0,58	2,41	7,97	-1,10	0,56	2,91	-0,89	-0,39	0,28

Quelle: Eigene Darstellung

Grundsätzlich liegt der CAI bei 0 dt/ha (reinem Boden) immer im negativen Bereich, egal bei welcher Feuchtigkeitsstufe. In der trockenen Variante steigt er mit höheren Strohmenngen exponentiell an. Betrachtet man den Tau, erreichen die Werte nicht einmal die Hälfte der trockenen Variante. Im Vergleich liegen die Werte bei 20 dt/ha mit 2,90 und 2,91 der Feuchtigkeitsstufe Tau deutlich unter den trockenen Werten mit 6,39 und 7,79. In der Regen-Variante erreicht der CAI bei 5 dt/ha sogar negative Werte. Bei 20 dt/ha liegen die Werte knapp über 0.

Die beiden Grafiken verdeutlichen noch einmal den Verlauf und bilden den CAI<sub>S</sub> und CAI<sub>J</sub> in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha ab. Die gepunkteten Linien bilden den Verlauf des Bodens *Dunkelbraun 1* aus den bisherigen Versuchen ab. Die Quadrate gehören zu einem zweiten dunklen Boden (*Dunkelbraun 2*). Wie in Kapitel 5.1.2 bereits ausführlich beschrieben, unterscheiden sich die Kurvenverläufe der CAIs im trockenen und feuchten Zustand kaum voneinander. Die Werte von *Dunkelbraun 2* im trockenen Zustand passen zu den CAIs der bisher erhobenen Daten. Die blauen Quadrate hingegen, die den Tau und den Regen in Kombination mit dem Boden *Dunkelbraun 2* symbolisieren, weichen deutlich vom restlichen Kurvenverlauf ab. Die CAI-Tau-Werte liegen in etwa auf der Hälfte des trockenen CAIs und die CAI-Regen-Werte knapp über 0.

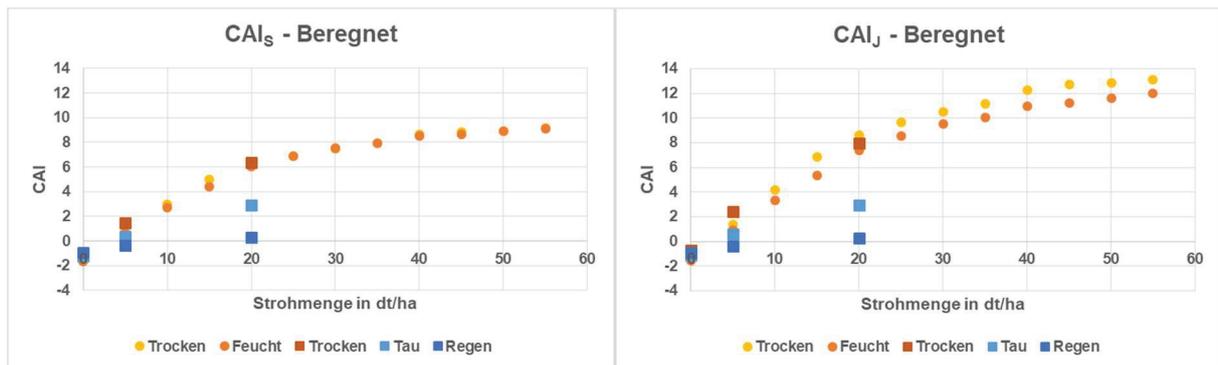


Abbildung 27: CAI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha im Beregnungsversuch auf zwei verschiedenen Böden (Punkte: Dunkelbraun 1; Quadrate: Dunkelbraun 2)

Quelle: Eigene Darstellung

Die anschließende Grafik zeigt den DFI in Abhängigkeit der Strohmenge in dt/ha. Die Punkte bilden den Verlauf des Bodens *Dunkelbraun 1* im trockenen und im feuchten Zustand ab. Die Quadrate verbildlichen die Werte des Bodens *Dunkelbraun 2* bei 0 dt/ha, 5 dt/ha und 20 dt/ha unter den Bedingungen Trocken, Tau und Regen.

Die Werte von *Dunkelbraun 2* im trockenen Zustand gleichen den Werten von Dunkelbraun 1. Größere Unterschiede treten erst unter den Bedingungen Tau und Regen auf. Im Verlauf ähneln die Tau-Werte denen von *Dunkelbraun 1*. Allerdings übersteigen sie die eigentlichen Werte von *Dunkelbraun 2* unter trockenen Bedingungen. Sobald Regen hinzukommt, steigt der DFI noch mehr an. Der Kurvenverlauf bleibt jedoch erhalten.

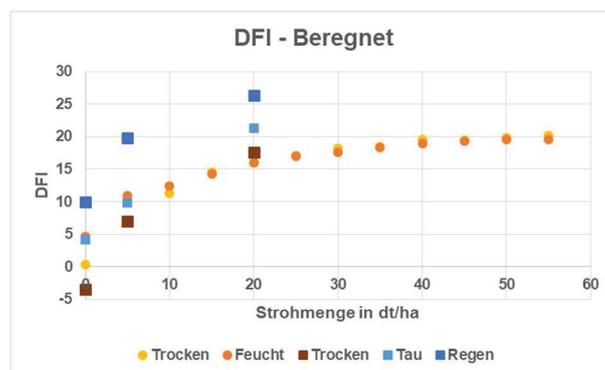


Abbildung 28: DFI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha im Beregnungsversuch auf zwei verschiedenen Böden (Punkte: Dunkelbraun 1; Quadrate: Dunkelbraun 2)

Quelle: Eigene Darstellung

Die letzte Abbildung zeigt den SQI in Abhängigkeit der Strohmenge in dt/ha. Die Punkte bilden, wie auch in den vorangegangenen Grafiken, den Verlauf des Bodens *Dunkelbraun 1* im trockenen und im feuchten Zustand ab. Die Quadrate verbildlichen die Werte des Bodens *Dunkelbraun 2* bei 0 dt/ha, 5 dt/ha und 20 dt/ha unter den Bedingungen Trocken, Tau und Regen. Die feuchte und die trockene Variante von *Dunkelbraun 1* weisen einen ähnlichen

Verlauf, aber nicht die gleichen Werte auf. *Dunkelbraun 2* lässt sich unter trockenen Bedingungen dazwischen einordnen. Bei 0 dt/ha erreicht *Dunkelbraun 2* den gleichen Wert wie *Dunkelbraun 1, Feucht* und bei 20 dt/ha den gleichen Wert wie *Dunkelbraun 1, Trocken*. Bei 5 dt/ha liegt *Dunkelbraun 2* dazwischen. Ist das Stroh mit Tau besprüht, sinken die Werte leicht unter den Verlauf der Variante *Dunkelbraun 1, Feucht*. Kommt Regen hinzu, sinken die Werte stark ab und liegen ab 5 dt/ha im negativen Bereich.

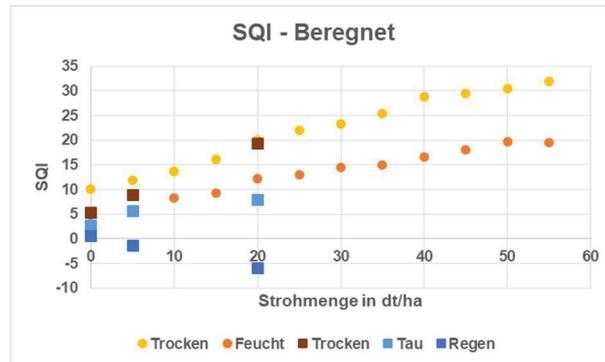


Abbildung 29: SQI in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha im Beregnungsversuch auf zwei verschiedenen Böden (Punkte: *Dunkelbraun 1*; Quadrate: *Dunkelbraun 2*)

Quelle: Eigene Darstellung

## 5.2 Bildanalyse

### 5.2.1 Skewness

Die Diagramme bilden die Skewness (Schiefe) der ausgewerteten RGB-Bilder sowie der einzeln aufgespaltenen Kanäle Rot, Grün und Blau der drei Böden im trockenen und feuchten Zustand in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha ab.

Auffällig bei der Betrachtung aller Diagramme ist, dass die Werte anfangs stark fallen oder steigen und sich ab 15 dt/ha kaum noch verändern. Im Bereich von 0-15 dt/ha unterscheiden sich die Varianten jedoch stark und müssen daher einzeln betrachtet werden. Eine weitere Gemeinsamkeit ist, dass die Werte bei 0 dt/ha, bis auf die Werte des Blaukanals in der feuchten Variante, immer im negativen Bereich liegen und teilweise deutlich unter den restlichen Kurvenverläufen.

Die Kurvenverläufe der RGB-Bilder und des Grünkanals weisen einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Bei 0 dt/ha liegen die Werte der trockenen Varianten im negativen Bereich und erreichen im gesamten Verlauf die geringsten Werte. Sobald Stroh hinzukommt, steigen die Messwerte an. Die Verläufe des dunkelbraunen und des braunen Bodens ähneln sich, wohingegen sich die hellbraune Variante davon abgrenzt. *Braun* und *Dunkelbraun* erreichen anfangs hohe Werte, bevor der Kurvenverlauf abfällt und sich ab 20 dt/ha kaum noch verändert. Die Werte der hellbraunen Variante steigen dagegen bis 15 dt/ha, bevor sie kaum weiter anwachsen und sich den Werten der braunen und dunkelbraunen Böden angleichen. Die Verläufe sind, wie

bereits erwähnt, ähnlich, allerdings liegen die RGB-Werte bei 5 und 10 dt/ha teilweise im positiven Bereich, die des Grünkanals knapp unter 0. Das reine Weizen-Stroh befindet sich mit einer Skewness von -0,1 (RGB) und -0,3 (Grün) in etwa auf einer Linie mit den Werten ab 15 dt/ha.

Die Werte in den feuchten Varianten weichen anfangs davon ab. Erneut ähneln sich die Werte der RGB-Bilder und des Grünkanals. Bei 0 dt/ha sind die Werte am geringsten, ehe sie ab 5 dt/ha ansteigen. Bei 5 dt/ha erreichen die Werte bereits ihren Höhepunkt. Danach fallen alle Kurven. Der dunkelbraune Boden sinkt beispielhaft von fast 0,4 bei 5 dt/ha auf -0,2 bei 25 dt/ha (RBG) bzw. von 0,2 bei 5 dt/ha auf -0,4 bei 20 dt/ha (Grün). Danach beginnen alle drei Böden wieder geringfügig anzusteigen. Die Kurvenverläufe der feuchten Variante verlaufen steiler als die der trockenen Variante, sowohl für die RGB-Bilder, als auch für den Grünkanal.

Die Kurvenverläufe des Rotkanals ähneln den vorangegangenen Kurvenverläufen sehr stark. Allerdings ist die Spannweite der Werte im Bereich bis 20 dt/ha größer. Während die Werte bei RGB und Grün im Bereich von 5 dt/ha bis 20 dt/ha der Variante *Dunkelbraun, Trocken* um ca. 0,2 schwanken, verändern sich die Werte des Rotkanals um ca. 0,4. Die Werte zwischen den Strohmenngen liegen demzufolge weiter auseinander. *Dunkelbraun* und *Braun* fallen bis 20 dt/ha in der trockenen Variante. *Hellbraun* wächst anfangs und gleicht sich ab 25 dt/ha den anderen Verläufen an. In der feuchten Variante fallen alle drei Böden steil bis sie sich ab 20 dt/ha in etwa zwischen -0,9 und -1,1 bewegen.

Der Blaukanal unterscheidet sich sehr von den bisher betrachteten Varianten. Die Werte bei 0 dt/ha liegen sowohl in der trockenen als auch in der feuchten Betrachtung nahe 0 und unterscheiden sich damit grundlegend vom restlichen Verlauf. Die übrigen Werte sind größer, aber bilden keine klare Tendenz ab. Vor allem die Kurven von *Dunkelbraun, Trocken* und *Braun, Trocken* schwanken immer wieder zwischen 0,9 und 1,2. In der feuchten Variante zeigt lediglich *Braun* eine markante Entwicklung. Die Werte fallen bis 20 dt/ha, steigen bis 40 dt/ha und stagnieren daraufhin.

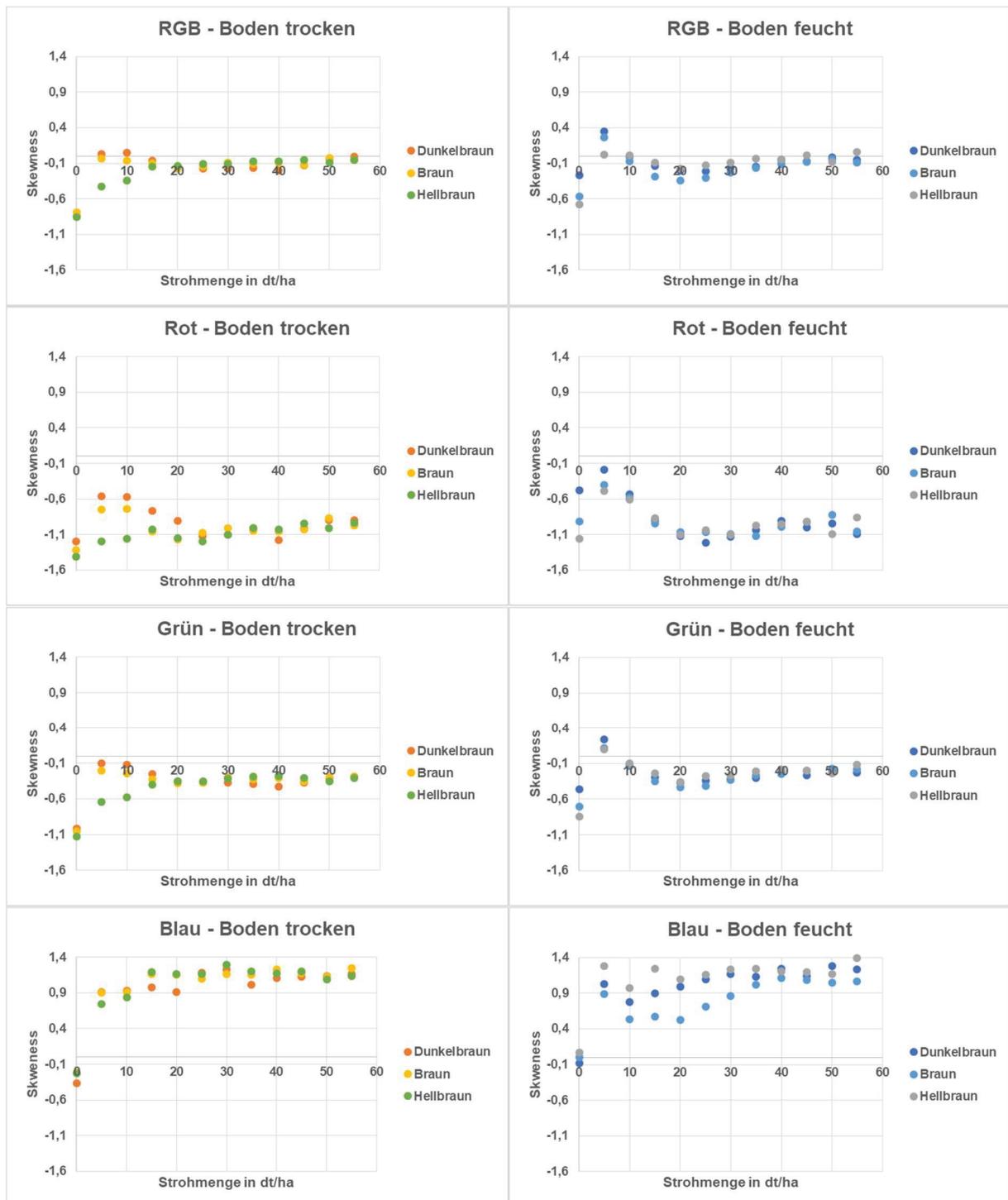


Abbildung 30: Skewness (Schiefe) der Verteilung der pixelbasierten Auswertung der RGB-Bilder sowie des Rot-, Grün- und Blaukanals in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha

Quelle: Eigene Darstellung

### 5.2.2 Exzess

Neben der Skewness wurde auch der Exzess (Wölbung) der ausgewerteten RGB-Bilder betrachtet. Die Grafiken bilden den Verlauf des Exzesses der drei Böden im trockenen und feuchten Zustand in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha ab. Als erstes wurden die RGB-Bilder ausgewertet und im Anschluss die drei einzelnen Kanäle Rot, Grün und Blau.

Wie schon bei der Betrachtung der Skewness unterscheiden sich die RGB-Bilder und der Grünkanal kaum voneinander und werden daher zusammengefasst bei der Auswertung. In der trockenen Variante liegen die Werte bei 0 dt/ha in allen Fällen deutlich über dem restlichen Kurvenverlauf im positiven Bereich. Auch bei 5 dt/ha erreichen die Böden teilweise positive Werte, jedoch sinken diese im weiteren Verlauf bis ca. 10 dt/ha. Der hellbraune Boden erreicht dabei die höchsten Werte und den steilsten Kurvenverlauf. Ab 10 dt/ha verändern sich die Werte kaum merklich und ab 25 dt/ha laufen die Graphen aller drei Böden zusammen. Der Exzess liegt bei den hohen Strohmenge ab 25 dt/ha zwischen -0,3 und -0,5.

In der feuchten Variante ist der Exzess bei 0 dt/ha ebenfalls am größten und liegt in allen Fällen im positiven Bereich. Die Werte fallen bis 10 dt/ha, bevor sie erneut leicht ansteigen. Von 5-55 dt/ha liegt der Exzess vollständig im negativen Bereich. Der Verlauf aller drei Böden ist insgesamt ähnlich.

Der Rotkanal unterscheidet sich von den RGB-Bildern und dem Grünkanal. Die Exzess-Werte sind bei 0 dt/ha im Vergleich höher, aber liegen ebenfalls im positiven Bereich. Von 0-10 dt/ha bricht der Kurvenverlauf leicht ein und erreicht in der Variante *Braun, Trocken* Werte nahe 0 und in der Variante *Dunkelbraun, Trocken* Werte unter 0. Danach steigt der Exzess wieder, bis er sich ab 30 dt/ha zwischen 0,4 und 0,8 einpendelt. *Hellbraun, Trocken* hat einen ähnlichen Verlauf, aber höhere Werte. In der trockenen Variante liegen alle Werte im positiven Bereich, bis auf 5 dt/ha, 10 dt/ha und 15 dt/ha der Variante *Braun, Trocken*.

Die feuchte Variante weist steilere Kurvenverläufe auf. Der Exzess liegt bei 0 dt/ha zwischen 0,3 und 1, fällt bei 5 dt/ha, 10 dt/ha und 15 dt/ha unter 0 und steigt daraufhin erneut an. Ab 20 dt/ha liegen die Werte vorrangig zwischen 0,3 und 0,6 und ähneln damit dem reinen Weizen-Stroh (0,4).

Der Blaukanal hebt sich erneut klar von der bisherigen Auswertung ab. Vor allem in der trockenen Variante wirkt der Kurvenverlauf zusammenhangslos. Die Werte fallen und sinken abwechselnd. Ein Exzess-Wert lässt sich nicht deutlich einer Strohmenge zuordnen. Der Verlauf in der feuchten Variante ist geringfügig klarer. Im Groben fallen die Werte vorerst und steigen dann wieder an. Allerdings lassen sich zwischen den drei Böden keine Zusammenhänge finden, da die Werte zu stark variieren.

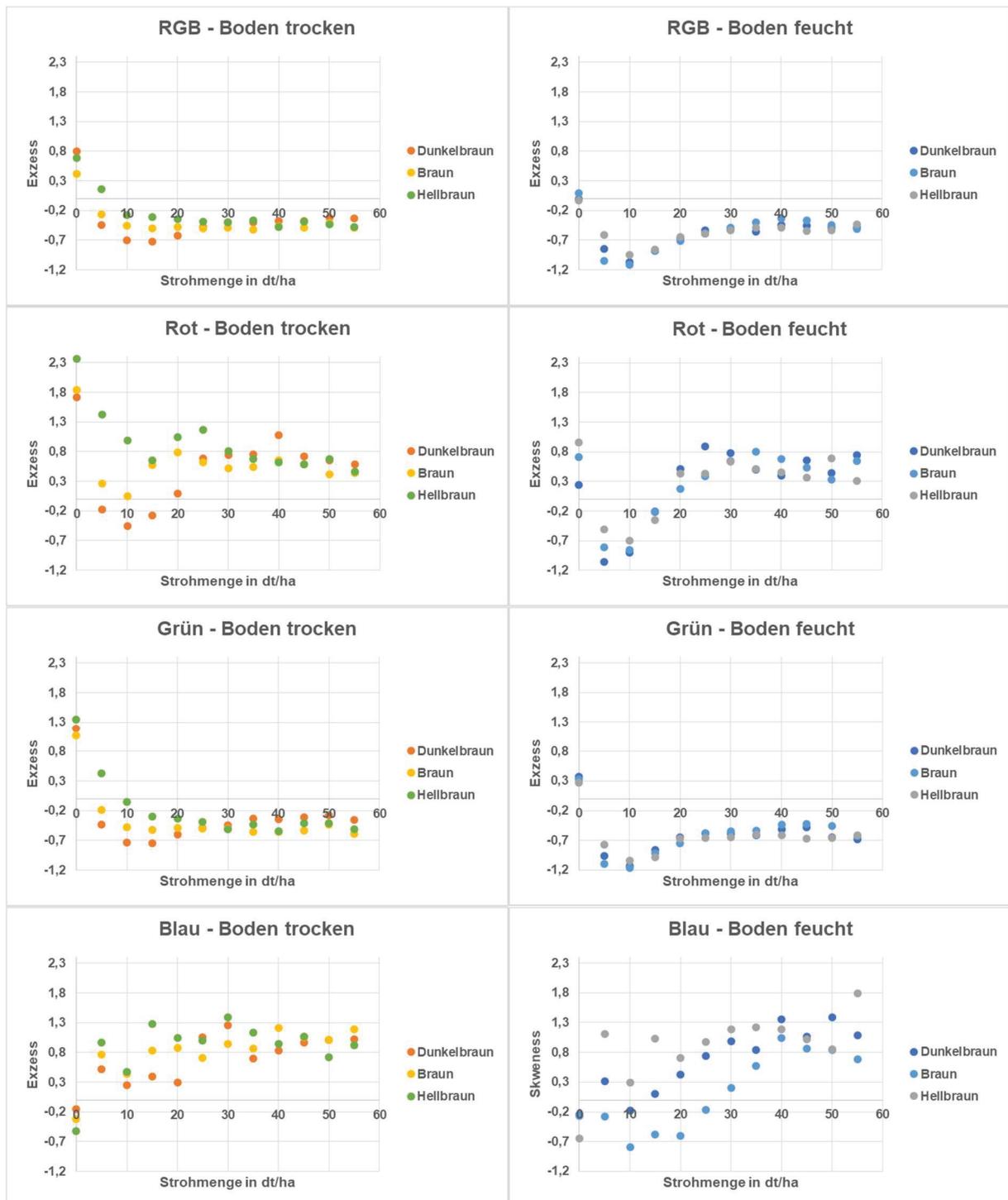


Abbildung 31: Exzess (Wölbung) der Verteilung der pixelbasierten Auswertung der RGB-Bilder sowie des Rot-, Grün- und Blaukanals in Abhängigkeit von der Strohmenge in dt/ha

Quelle: Eigene Darstellung

### 5.3 Zusammenhang zwischen Strohmenge und Bodenbedeckungsgrad

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen der Strohmenge in dt/ha und dem Bodenbedeckungsgrad durch Stroh in % der Variante *Dunkelbraun, Trocken*. Das Diagramm zeigt eine steil ansteigende Kurve, die ab 20 dt/ha deutlich abflacht. Bei 5 dt/ha liegt der Bodenbedeckungsgrad bei 23 %. Bei 10 dt/ha liegt der Wert bereits bei 53%. Bei 15 dt/ha erreicht der Bodenbedeckungsgrad einen Wert von 71 %, bevor der Kurvenverlauf deutlich langsamer wächst. Ab 25 dt/ha liegt der Bodenbedeckungsgrad dauerhaft über 90%.

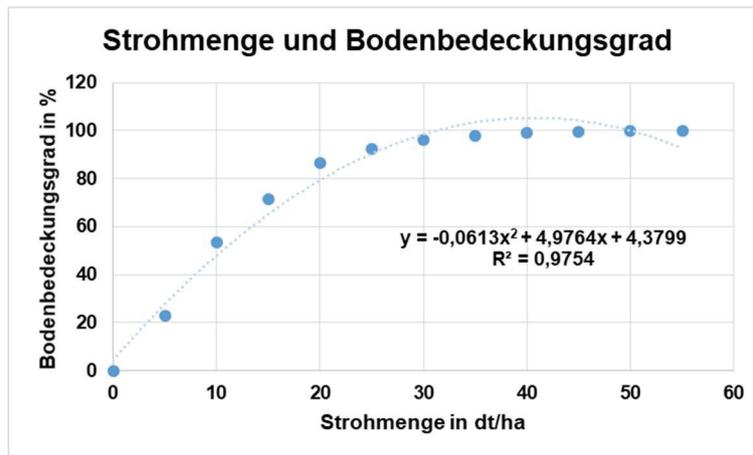


Abbildung 32: Bodenbedeckungsgrad in % der anhand der RGB-Fotos der Variante *Dunkelbraun, Trocken* von 0-55 dt/ha ermittelt wurde

Quelle: Eigene Darstellung

Die folgenden Diagramme zeigen den CAI<sub>J</sub> zu den ermittelten Bodenbedeckungsgraden. Zusätzlich sind die Strohmenen in dt/ha abgebildet. Bei einem Bodenbedeckungsgrad von 0 % liegt der CAI im negativen Bereich. Die Werte steigen daraufhin in etwa linear an und erreichen in der trockenen Variante Bestimmtheitsmaße von ca. 0,99 und der in der feuchten Variante zwischen 0,95 und 0,99. Der Bodenbedeckungsgrad steigt erst schneller an als die Strohmenge, was sich jedoch im weiteren Verlauf ändert. Bei höheren Strohmenen schon ab ca. 20 dt/ha ist die Zunahme des Bodenbedeckungsgrades deutlich geringer.

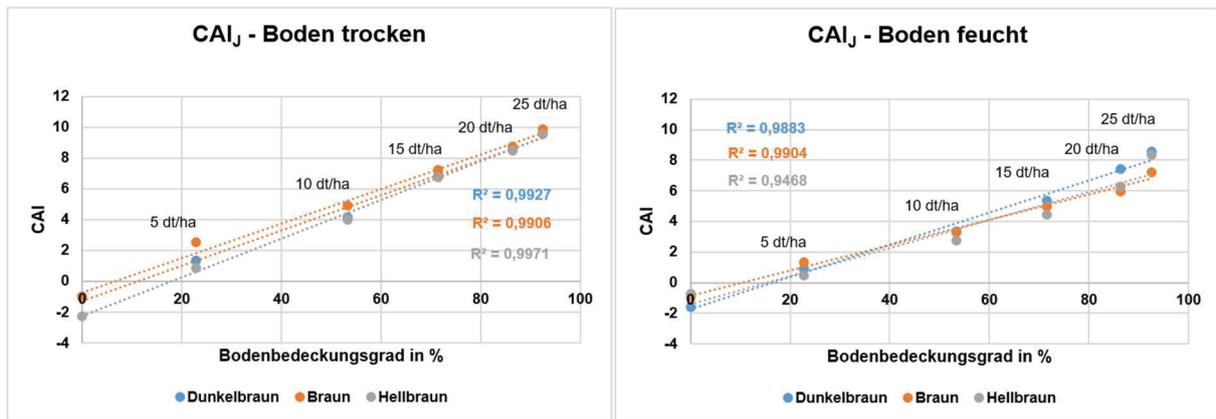


Abbildung 33:  $CAI_J$  in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad in % der drei Böden in den zwei Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Quelle: Eigene Darstellung

Anschließend sind die Diagramme des DFI in Abhängigkeit von den Bodenbedeckungsgraden in % und der dazugehörigen Strohmenge in dt/ha dargestellt. Die trockene Variante erreicht annähernd lineare Steigungen mit allen Werten im positiven Bereich mit Bestimmtheitsmaßen von 0,93 und 0,97. Der Bodenbedeckungsgrad steigt anfangs schneller als die Strohmenge. Dies kehrt sich jedoch im Verlauf um, woraufhin die Strohmenge weiter wächst, aber der Bodenbedeckungsgrad nur noch leicht ansteigt. Die Variante *Dunkelbraun, Feucht* verläuft ähnlich und weist ein Bestimmtheitsmaß von 0,93 auf. *Braun, Feucht* und *Hellbraun, Feucht* verlaufen nahezu parallel zur x-Achse, wobei  $R^2$  mit Werten von 0,12 und 0,08 sehr gering ist.

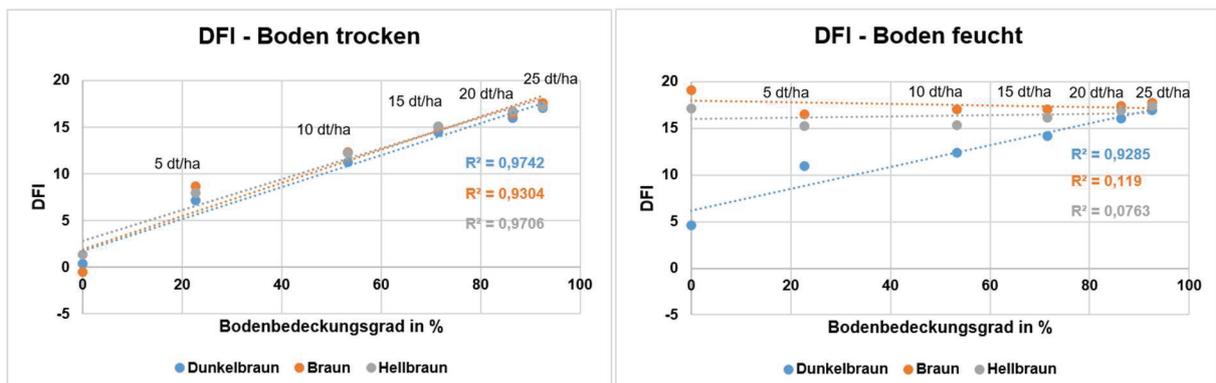


Abbildung 34: DFI in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad in % der drei Böden in den zwei Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Quelle: Eigene Darstellung

Die letzten beiden Diagramme bilden den SQI in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad in % mit der dazugehörigen Strohmenge in dt/ha ab. Der SQI steigt im Verlauf annähernd linear an und verläuft zwar in den Varianten auf unterschiedlichen Niveaus, erreicht jedoch

überall ähnliche Steigungen. Der Bodenbedeckungsgrad wächst anfangs schneller als die Strohmenge, was sich allerdings im weiteren Verlauf umkehrt. Bei hohen Strohmenge vergrößert sich der Bodenbedeckungsgrad nur noch geringfügig.

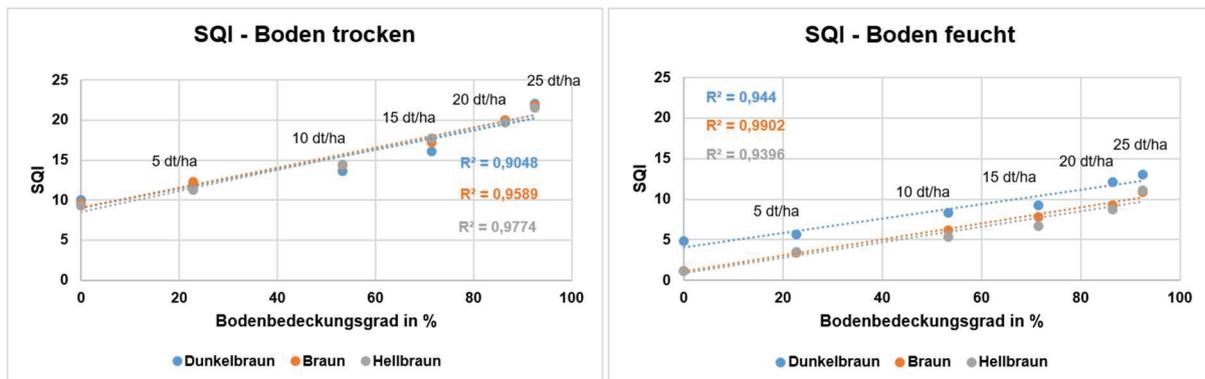


Abbildung 35: SQI in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad in % der drei Böden in den zwei Varianten Trocken und Feucht mit dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß  $R^2$

Quelle: Eigene Darstellung

Die folgenden vier Grafiken bilden die Skewness bzw. den Exzess in Abhängigkeit vom Strohbedeckungsgrad in % mit den dazugehörigen Strohmenge ab. Untersucht wurde das Weizen-Stroh auf den drei Böden im trockenen und feuchten Zustand.

Die Werte der Skewness von *Dunkelbraun, Trocken* und *Braun, Trocken* verändern sich kaum von 5 dt/ha zu 10 dt/ha, also bis ca. 50 % und sinken daraufhin leicht bis 25 dt/ha (ca. 90 %). In der hellbraunen Variante steigen die Werte von 20-90 % im Gegensatz dazu geringfügig an. Bei reinem Boden liegt die Skewness in jedem Fall unter dem restlichen Kurvenverlauf. Größere Unterschiede sind in der feuchten Variante erkennbar. Alle drei Graphen fallen in verhältnismäßig großen Schritten bis 20 dt/ha (86 %). Die Werte bei 20 dt/ha und 25 dt/ha, d.h. bei Bedeckungsgraden über 80 % ähneln sich stark.

Bei der Betrachtung des Exzesses liegen die Werte bei reinem Boden über den restlichen Werten. Die Graphen von allen drei trockenen Böden sinken daraufhin bis ca. 55 %. Die Verläufe der feuchten Varianten sind vergleichbar. In der trockenen Variante verändern sich die Werte ab 55 % kaum und in der feuchten Varianten steigen sie erneut leicht an.

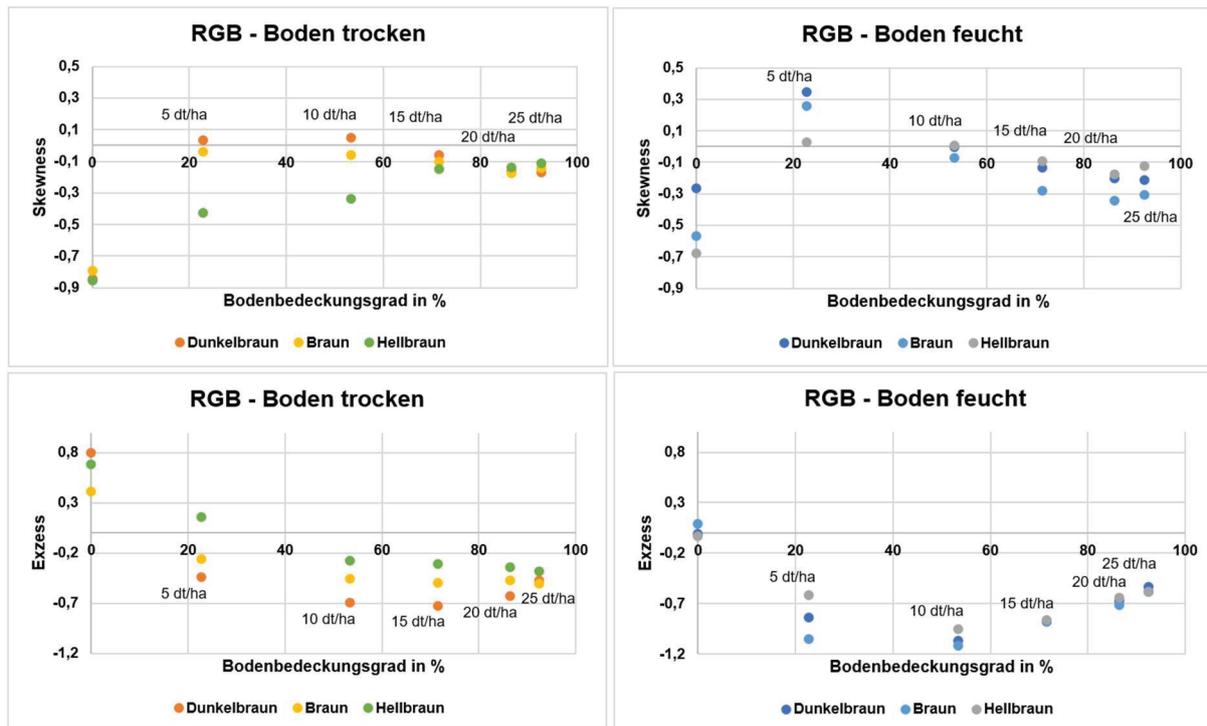


Abbildung 36: Skewness und Exzess der RGB-Bilder in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad

Quelle: Eigene Darstellung

Die Abbildungen zeigen die Skewness und den Exzess in Abhängigkeit vom Bodenbedeckungsgrad in % der bisherigen Untersuchungen im Vergleich zum Strohfächer von BRUNOTTE und ORTMEIER (2007). Die blauen Punkte bilden den Verlauf, der aus dem Strohfächer ermittelten Werte ab. Die orangenen Punkte gehören zu den Bodenbedeckungsgraden geschätzt aus der Digitalisierungsmethode.

Die Skewness der blauen Punkte sinkt anfangs leicht bis ca. 40 % und daraufhin stark bis 60 %. Danach steigt der Kurvenverlauf erneut an. Der Kurvenverlauf der Skewness aus der Strohmenge in deutlich flacher. Der Wert von 23 % auf 53 % verändert sich kaum. Bei 72 % und 86 % sinkt der Wert in beiden Fällen leicht. Einzig der Wert bei 0 % Bedeckung weicht mit -0,8 stark von den anderen Werten ab.

Der Verlauf des Exzesses fällt dagegen stärker. Hinzu kommt, dass der Wertebereich für den Exzess größer ist. Die Werte aus dem Strohfächer sinken stark von 10-60 %. Bis 90 % steigen sie wieder leicht an. Die Werte, die anhand der Strohmenge ermittelt wurden, unterscheiden

sich untereinander ausgenommen von dem Wert bei 0 % kaum voneinander. Von 0,8 (0 %) fällt der Exzess auf -0,4 (23 %) und bleibt dann mit ca. -0,7 (53 %, 72 %, 86 %) konstant.

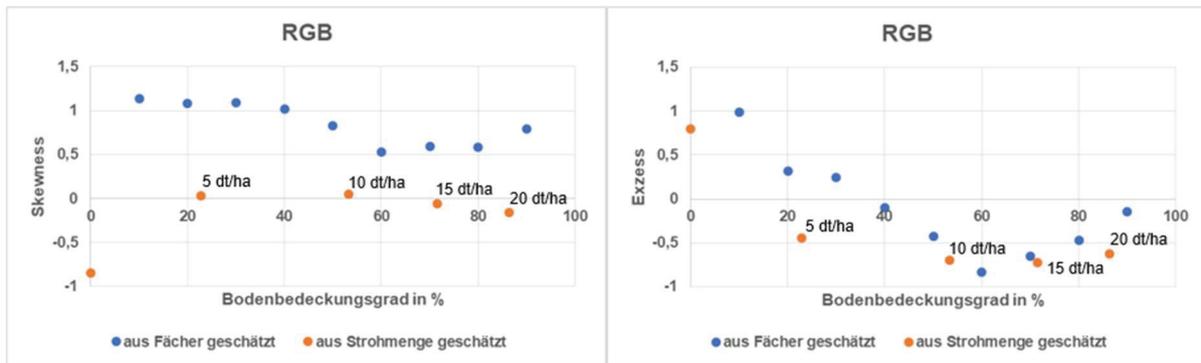


Abbildung 37: Skewness und Exzess der RGB-Bilder geschätzt aus dem Strohfächer und der Strohmenge der Variante Dunkelbraun, Trocken

Quelle: Eigene Darstellung

## 6. Diskussion

### 6.1 Spektraldaten

Um geeignete Indizes zur Ermittlung der Strohmenge vergleichen zu können, wurden als erstes die spektralen Reflexionskurven der drei Böden (*Dunkelbraun*, *Braun* und *Hellbraun*) im trockenen und feuchten Zustand, sowie von Weizen-Stroh und Cellulose im reinen Zustand untersucht. Das Weizen-Stroh und die Böden wurden für 48 h bei 105°C getrocknet. Für die feuchten Varianten wurden die drei Böden angefeuchtet und hatten zu Versuchsbeginn eine Feuchtigkeit von 15 Vol.-% (*Dunkelbraun* und *Hellbraun*) bzw. 19 % (*Braun*). Bei 1400 nm und 1900 nm liegen die Wasserbanden, die bei der Betrachtung außenvorgelassen wurden. Die Reflexionsgrade der Böden unterscheiden sich deutlich von denen der Cellulose und des Weizen-Strohs. Die Böden erreichen kaum ein Niveau über 40 %. Das Weizen-Stroh und die Cellulose reflektieren auf allen Wellenlängen deutlich mehr als die Böden. Bis auf die Einbrüche der Reflexion bei 1400 nm und 1900 nm ist der Reflexionsverlauf der Böden verhältnismäßig konstant. Die Verläufe des Weizen-Strohs und der Cellulose sind sichtlich kurvenreicher. Merkliche Einbrüche der Reflexion kommen bei den Wellenlängen 1.100 nm, 1.300 nm, 2.100 nm und 2.300 nm vor. Die Veränderungen ab 2.000 nm lassen sich auf das Vorhandensein von Cellulose zurückführen (SERBIN et al., 2013). Die cellulosehaltigen Materialien erreichen bei 2.200 nm einen Hochwert, wohingegen der Wert der Böden leicht absinkt. Dieser Einbruch beruht auf dem Vorhandensein von Aluminium-Hydroxid im Gestein (SERBIN et al., 2013). Anhand der besonders hervorstechenden Eigenschaften ab 2.000 nm entwickelten DAUGHTRY et al. (1996) den Cellulose Absorption Index. Zudem wurden in dieser Arbeit der Normalized Difference Index (NDI; MCNAIRN und PROTZ, 1993), der Dead Fuel Index (DFI; CAO et al., 2010) und der Straw Quantity Index (SQI) betrachtet.

Da der wahre Bodenbedeckungsgrad zu Versuchsbeginn nicht bekannt war, erfolgte die Auswertung anhand definierter Strohmenngen in dt/ha. Da ein steigender Bodenbedeckungsgrad mit steigenden Strohmenngen korreliert, gilt die Strohmenge in dt/ha als Anhaltspunkt. Vorerst erfolgte demzufolge lediglich eine Analyse der Präzision der Indizes und nicht der Genauigkeit der Methode zur Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades.

#### CAI

Der CAI gilt bisher als vielversprechendster Index (DAUGHTRY et al., 1996; NAGLER et al. 2000; PRAJAPATI et al., 2019) zur Unterscheidung zwischen NPV und Boden. In verschiedenen Forschungen wurden jedoch unterschiedlich breite Bänder zur Verrechnung genutzt. Als erstes sollte geklärt werden, inwieweit die Bandbreite einen Einfluss auf den CAI hat. Dafür wurden die vier Indizes  $CAI_D$  (50 nm breite Bänder),  $CAI_N$  (40 nm breite Bänder),  $CAI_S$  (11 nm breite Bänder) und  $CAI_J$  (jeweils eine Wellenlänge) berechnet und miteinander verglichen. Zusätzlich wurde das Bestimmtheitsmaß mithilfe einer polynomischen Funktion

zweiten Grades bestimmt, da mit steigender Strohmenge bzw. hohen Bedeckungsgraden nahe 100 % von einer abflachenden Kurve ausgegangen werden kann, wie es zum Beispiel auch beim Blattflächenindex (LAI) der Fall ist (LILIENTHAL, 2014). Alle vier Indizes weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Die Werte der feuchten Varianten liegen in allen Fällen leicht unter denen der trockenen Varianten. Im Allgemeinen liegen die reinen Bodenwerte im negativen Bereich. Daraufhin steigt die Kurve verhältnismäßig steil an, bis sie ab einer Strohmenge ca. 30 dt/ha nur noch flach ansteigt. Da der CAI bei reinem Boden negativ ist, er mit steigender Strohmenge stetig ansteigt und die Bestimmtheitsmaße in allen Varianten zwischen 0,98 und 0,99 liegen, ist grundsätzlich jeder der vier Indizes geeignet, um NPV von Boden zu unterscheiden, sowohl im trockenen als auch im feuchten Zustand. Jedoch unterscheiden sich die Indizes bei genauerer Betrachtung. Der CAI<sub>D</sub> und der CAI<sub>N</sub> weisen in der Variante *Hellbraun, Trocken* negative Werte bei 5 dt/ha auf. Wie bei allen vier Indizes zu sehen ist und wie SERBIN et al. (2013) feststellten, liegt der CAI i.d.R. nur bei reinem Boden immer unter 0 und befindet sich, sobald Stroh hinzukommt, im positiven Bereich. Die Spannweiten von CAI<sub>D</sub>, CAI<sub>N</sub> und CAI<sub>S</sub> sind ähnlich und enden bei 100%-iger Bedeckung zwischen 9 und 10. Der CAI<sub>J</sub> dagegen hat eine größere Spannweite und reagiert vor allem zwischen 30 und 45 dt/ha sensitiver als die anderen Indizes. In den höheren Bereichen kommen jedoch alle Indizes an ihre Grenzen. Ab 45 dt/ha beginnen sich die Konfidenzintervalle im Großteil der verschiedenen Varianten zu überschneiden.

Für pflanzenbauliche Entscheidungen sollte die Wahl des Indexes und dessen Genauigkeit hinterfragt werden. Ist es entscheidend, möglichst geringe Bodenbedeckungsgrade voneinander abgrenzen zu können (zwischen 0 und 5 dt/ha) oder ist eine grobe Einschätzung der Verteilung von viel oder wenig Stroh ausreichend. Dementsprechend kann die Auswahl zur Breite der Bänder getroffen werden. Schlussendlich bietet der CAI<sub>J</sub> die größte Spannweite und der CAI<sub>S</sub> eignet sich besser als der CAI<sub>N</sub> und CAI<sub>D</sub>, da diese bei 5 dt/ha negative Werte aufweisen. Mit geringeren Bandbreiten lassen sich demzufolge genauere Ergebnisse erzielen. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass der CAI aus den Maximalwerten bei 2.000 und 2.200 nm und dem Minimalwert bei 2.100 nm ermittelt wird. Aus den Bändern werden Mittelwerte gebildet und je größer die Bandbreite, desto eher weichen die Werte von den Minimal- und Maximalwerten ab. Der Einfluss der Bodenfeuchte von 15 Vol.-% (*Dunkelbraun* und *Hellbraun*) bzw. 19 Vol.-% (*Braun*) ist sehr gering und kann vernachlässigt werden. Wie sehr hohe Bodenfeuchten oder gänzlich nasse Bedingungen den CAI beeinflussen gilt zu erforschen (vergleiche Berechnungsversuch, Kapitel 6.1).

Am Ende gleichen sich die Ergebnisse mit denen von DAUGHTRY (2001), NAGLER et al. (2000) und PRAJAPATI et al. (2019). Die Zunahme der Rückstandsbedeckung führt zur Zunahme der CAI-Werte und weist hohe Korrelationskoeffizienten aufweist. Da in den Versuchen die Strohmenge untersucht wurde, wurde von einer polynomischen Funktion

zweiten Grades ausgegangen, da ab einer bestimmten Strohmenge ein Bodenbedeckungsgrad von 100 % nicht mehr überschritten werden kann. Die Korrelationen ähneln sich. Zudem ergibt der CAI negative Werte für reine Bodensignale und positive Werte für Misch-Szenen.

## **NDI**

Im Anschluss wurden der  $NDI_5$  und  $NDI_7$  (MCNAIRN und PROTZ, 1993) errechnet. Der  $NDI_5$  steigt in den feuchten und den trockenen Varianten von 0 bis 10 dt/ha an und vergrößert sich daraufhin in äußerst kleinen Schritten von -0,08 bis -0,03. In den einzelnen Varianten lassen sich Unterschiede zwischen 0 und 10 dt/ha ausmachen, jedoch haben verschiedene Varianten bei unterschiedlichen Strohmenngen gleiche Werte. D.h. dass beispielsweise ein dunkelbrauner Boden bei einer Strohmenge von 5 dt/ha und ein hellerer Boden bei 0 dt/ha den gleichen Wert erreichen könnten. Das könnte dazu führen, dass unterschiedliche Strohmenngen auf einer Fläche bei unterschiedlichen Bodenarten zu gleichen Werten führen. Das ist beim CAI in diesen Versuchen mit drei unterschiedlichen Böden nicht der Fall. Unterschiedliche Bodenarten sind jedoch auf einer Fläche nicht auszuschließen. Der  $NDI_5$  scheint daher ungeeignet zur Ermittlung der Strohmenge in dt/ha.

Die Auswertung des  $NDI_7$  ergibt ähnliche Ergebnisse. Die höheren Bestimmtheitsmaße (0,81-0,98) erwecken vorerst den Eindruck, dass eine Unterscheidung der Strohmenngen mithilfe des  $NDI_7$  möglich sei. Allerdings lassen sich die Werte kaum voneinander trennen, sobald der Boden feucht ist. Genauso ist eine Trennung der Strohmenngen ab ca. 15 dt/ha kaum möglich. Auch HUETE (1984, 1988) (zitiert nach MCNAIRN und PROTZ; 1993) kam zu dem Schluss, dass die Indizes empfindlich auf Unterschiede in der Bodenfeuchtigkeit, dem Gehalt an organischer Substanz und der Bodenart reagieren. SERBIN et al. (2009) fest, dass sich die NDI-Werte von Böden und Ernterückständen häufig überlappen, trotzdem können in einigen Gebieten ausreichende Kontraste für eine erfolgreiche Klassifizierung des Bodenbedeckungsgrades erzielt werden. WANG et al. (2018) betonen, dass diese beiden Indizes nur für das Nebeneinander der beiden Komponenten NPV und reinem Boden anwendbar sind und sich nicht für das Nebeneinander aller drei Komponenten eignen. Letztendlich weisen jedoch die meisten Studien darauf hin, dass der NDI für die Schätzung des Bodenbedeckungsgrades womöglich ungeeignet sei (BIARD und BARET, 1997; ARSENAULT und BONN, 2005; CAO et al., 2010; REN und ZHOU, 2012). Der NDI ist ein Verhältnis zwischen den NIR- und SWIR-Bändern und berücksichtigt nicht den Einfluss des darunter liegenden Bodens auf das Signal. Dies führt zu fehlerhaften Schätzungen, insbesondere bei geringen Deckungsanteilen, bei denen ein großer Teil der Bodenfläche freigelegt ist. (ARSENAULT und BONN; 2005).

Zusammenfassend lässt sich für den  $NDI_5$  und  $NDI_7$  feststellen, dass  $R^2$  in allen Fällen relativ hoch ist und Werte zwischen 0,70 und 0,89 erreicht. Dies sollte darauf zurückzuführen zu sein, dass wie beim LAI (LILIENTHAL, 2014) und CAI ab einer bestimmten Blattfläche bzw. Strohmenge ein Bodenbedeckungsgrad von 100 % erreicht ist und somit mit einer abfallenden Kurve zu rechnen ist. Trotzdem scheint der NDI ungeeignet zu sein, vor allem durch den engen Wertebereich, die geringen Steigungen ab 10 dt/ha und die Überschneidungen zwischen den Varianten trotz unterschiedlicher Strohmenen.

## DFI

Da viele Forschungen auf das Potential des Dead Fuel Indexes (DFI) zur Unterscheidung von Boden und NPV hinweisen (CAO et al., 2010; REN und ZHOU, 2012; WANG et al., 2016; YUE et al., 2019; CHAI et al., 2019; CHAI et al., 2020; YUE und TIAN, 2020; BAI et al., 2021; LUMEN et al., 2023), wurde der Index mit in den Versuch aufgenommen. Der DFI wurde ebenfalls in verschiedenen Strohmenen in dt/ha auf den drei Böden im trockenen und feuchten Zustand untersucht. Im ersten Moment scheint der DFI geeignet, da er vor allem in den trockenen Varianten einen steil ansteigenden Kurvenverlauf und dementsprechend einen ausreichend großen Wertebereich mit hohen Bestimmtheitsmaßen (0,93-0,96) vorweisen kann. Der Verlauf der dunkelbraunen, feuchten Variante ist ähnlich und erreicht ein  $R^2$  von 0,96. Allerdings grenzen sich *Braun* und *Hellbraun* in der feuchten Variante stark davon ab. Unabhängig von der Strohmenge liegen die Werte immer zwischen 15 und 20, was eine Unterscheidung anhand des DFIs unmöglich macht. Für trockene Bedingungen liefert der DFI sinnvolle Informationen. Kommt jedoch Feuchtigkeit hinzu, scheint der Index zur Bestimmung der Strohmenge bzw. folglich auch des Bodenbedeckungsgrades unbrauchbar zu sein.

## SQI

Als letztes wurde der Strohmenen-Index/Straw Quantity Index (SQI) untersucht. Dieser wurde nach der Untersuchung der Reflexion von Boden, Stroh und Cellulose auf Grundlage eines Einbruches im Kurvenverlauf bei 1.200 nm von cellulosehaltigen Materialien entwickelt. Bei der Betrachtung von SQI und Strohmenge ähneln sich die Kurvenverläufe der Böden der trockenen Variante stark. Vor allem *Dunkelbraun* und *Hellbraun* weisen einen fast identischen Verlauf auf. Im Gegensatz zu den anderen Indizes bleibt die Kurve verhältnismäßig steil und flacht nicht ab 20-30 dt/ha stark ab. Der Verlauf ist beinahe linear, was die Frage in den Raum wirft, ob der SQI im Vergleich zu anderen Indizes höhere Strohmenen erklären könnte. Der Verlauf der Kurven in der feuchten Variante ist ähnlich. Allerdings sind die Werte niedriger.  $R^2$  liegt sowohl in der trockenen als auch in der feuchten Variante bei 0,99. Der SQI bietet damit auch bei feuchten Bodenbedingungen eine Möglichkeit Strohmenen voneinander zu unterscheiden.

Schlussendlich ergeben sich für die Indizes unterschiedliche Korrelationen: CAI und SQI ( $R^2 = 0,99$ ) >  $NDI_7$  ( $R^2 = 0,92$ ) > DFI ( $R^2 = 0,86$ ) >  $NDI_5$  ( $R^2 = 0,82$ ). Die Bestimmtheitsmaße sind in allen Fällen sehr hoch. Trotzdem sollten  $NDI_5$  und  $NDI_7$  durch den engen Wertebereich nicht zur Bestimmung der Strohmenge genutzt werden. Der DFI eignet sich vorrangig, um Strohmenge auf trockenem Boden unterscheiden zu können. CAI und SQI bieten in jedem Fall die beste Möglichkeit, um Strohmenge voneinander trennen zu können. Der CAI bietet dabei den Vorteil, dass 1. die notwendigen Bänder bereits in den heutigen Satelliten verbaut sind, 2. reiner Boden (negative Werte) gewissenhaft von Stroh (positive Werte) getrennt werden kann (SERBIN et al., 2013) und 3. eine Unterscheidung der Strohmenge bis ca. 30 dt/ha problemlos möglich ist. Der SQI bietet keinen einheitlichen Wertebereich zur Unterscheidung der Materialien, kann aber womöglich Strohmenge darüber hinaus voneinander trennen. Im Rahmen des Versuches schnitten die beiden Indizes sehr gut ab. In der Praxis können verschiedene Boden- und Strohfeuchten, Bodenarten und Zersetzungsgrade auftreten. Bei der Untersuchung des CAIs wurde bereits beobachtet, dass dieser erheblich durch den zeitlichen Verfall von NPV beeinflusst wird (NAGLER et al., 2000; DAUGHTRY, 2001). Im weiteren Sinne kommen auch Probleme wie gerade oder schief stehende Stoppeln, Fahrspuren und unterschiedliche Lichtverhältnisse hinzu. Weitere Versuche sollten Aufschluss über die Einflüsse auf den CAI und den SQI untersuchen.

### **Berechnung**

Der Berechnungsversuch fand in einem sehr kleinen Umfang statt, zeigt aber deutliche Tendenzen. Es wurden reiner Boden, 5 dt/ha und 20 dt/ha Stroh in den drei Feuchtigkeitsstufen *Trocken*, *Tau* und *Regen* untersucht. Dafür wurden ortsübliche Werte für Mecklenburg-Vorpommern angenommen: Tau 0,07 l/m<sup>2</sup> und Regen 5 l/m<sup>2</sup> (Kapitel 4.4). Es wurde für den Berechnungsversuch ein vierter Boden (*Dunkelbraun 2*) verwendet. Es wurde direkt nach der Berechnung gemessen. Die Messung des CAIs ergab, dass sich der trockene Boden *Dunkelbraun 2* kaum von den drei Böden *Dunkelbraun 1*, *Braun* und *Hellbraun* unterscheidet. Sobald das Stroh mit Tau besprüht wird, halbieren sich die Werte des CAIs. Bei 5 l/m<sup>2</sup> Niederschlag erreicht der CAI lediglich Werte knapp über 0. Exemplarisch wurden der CAI<sub>s</sub> und der CAI<sub>J</sub> berechnet, allerdings gab es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den beiden CAIs. Wie NAGLER et al. (2000) feststellten, dominiert die Wasserabsorption die spektralen Eigenschaften und reduziert den CAI erheblich. Trotzdem kamen sie zu dem Schluss, dass der CAI der nassen Rückstände deutlich höher ist, als der des nassen Bodens, was eine Unterscheidung weiterhin möglich macht. Dies lässt sich auf die Auswertung der Tau-Variante übertragen. Die Werte steigen an, jedoch in geringerem Maße. Bei hohen Wassermengen (5 l/m<sup>2</sup>) lässt sich die Aussage allerdings nicht bestätigen. Mit Werten knapp

über 0, ist der CAI in solchen Fällen zur Ermittlung der Strohmenge unbrauchbar. Darüber hinaus ist es ein äußerst positives Ergebnis, dass sich der CAI der drei Böden aus Mecklenburg-Vorpommern (*Dunkelbraun 1*, *Braun*, *Hellbraun*) nicht von dem Boden aus Sachsen-Anhalt (*Dunkelbraun 2*) unterscheidet. Er scheint universell auf eine Vielzahl von Böden anwendbar zu sein.

Im Gegensatz dazu, steigen die Werte des DFIs unter Wassereinflüssen an. Die Werte des Bodens *Dunkelbraun 2* liegen leicht unter denen des Bodens *Dunkelbraun 1*, gleichen sich jedoch im Verlauf. Die Tau-Werte übersteigen die eigentlichen Werte geringfügig, liegen aber trotzdem nahe der trockenen Varianten von *Dunkelbraun 1* und *Dunkelbraun 2*. Die Regen-Variante erreicht deutlich höhere Werte, die dennoch einem steigenden Kurvenverlauf ähneln könnten. Die Werte unter trockenen und nassen Bedingungen sind demzufolge nicht identisch. Trotzdem lassen sich die Strohmenen dank des ansteigenden Kurvenverlaufes vermutlich voneinander unterscheiden. Der DFI scheint unter nassen Bedingungen plausible Ergebnisse zu liefern, allerdings widerspricht diese Aussage der Auswertung des ersten Versuches. In den feuchten Varianten des hellbraunen und braunen Bodens konnten keine brauchbaren Ergebnisse erzielt werden. Den dunklen Böden könnten jedoch unter feuchten bzw. nassen Bedingungen passende Strohmenen zugeordnet werden.

Als letztes wurden die Wellenlängen im Beregnungsversuch mit dem SQI verrechnet. *Dunkelbraun 1* weist in der trockenen und in der feuchten Variante einen ähnlichen Verlauf auf. *Dunkelbraun 2* lässt sich im trockenen Zustand dazwischen einordnen. Das mit Tau präparierte Stroh zeigt einen flacheren Kurvenverlauf als im trockenen Zustand. Eine positive Steigung ist trotzdem zu erkennen. Demzufolge zeigt der SQI bei geringen Feuchtigkeitsstufen (feuchter Boden, Tau) eine brauchbare Tendenz. Sobald das Stroh nass ist ( $5 \text{ l/m}^2$ ), sinkt der SQI mit steigenden Strohmenen stark ab und erreicht Werte im negativen Bereich. Bei Nässe liegt der SQI im negativen Bereich und eventuell gilt, entgegen den anderen Varianten, dass der SQI kleiner wird, je höher die Strohmenge. Die Feuchte scheint hierbei ein ausschlaggebendes Kriterium zu sein. Anhand des kleinen Versuchsumfanges lässt sich jedoch keine Tatsache beweisen, sondern nur erahnen. Es wäre auch für den SQI sinnvoll, weitere Versuche zu erforschen.

Der Beregnungsversuch ist nicht umfangreich und gibt somit lediglich einen Eindruck über die Reaktion der Indizes auf Feuchtigkeit. Unter Tau-Bedingungen ( $0,07 \text{ l/m}^2$ ) verändern sich die Werte des CAIs, DFIs und SQIs, zeigen jedoch trotzdem klare Tendenzen. Nach einem Regenschauer ( $5 \text{ l/m}^2$ ) scheint eine Messung der Indizes nicht sinnvoll. Es sollten mehr Strohmenen und Wassermengen untersucht werden. Zudem wurde direkt nach der

Berechnung gemessen. Unter Praxisbedingungen ist es unüblich unter sehr feuchten Bedingungen bzw. direkt nach einem Regenschauer zu messen und die Flächen zu befahren. Es sollte untersucht werden, inwieweit eingezogene Feuchtigkeit, d.h. klammes Stroh Schwankungen unterliegt.

## 6.2 Bildanalyse

Da die Bildanalyse durch das Setzen geeigneter Thresholds einem hohen Gesamtaufwand unterliegt (MEYER et al., 1988) und bei der OBIA-Methode weiterhin ein Beobachter die Bildklassifizierung vornehmen muss (KAMPTNER, 2014), wurde für die Auswertung der Bilder eine andere Variante genutzt. Um die Bildanalyse zur Ermittlung des Bodenbedeckungsgrades möglicherweise zu vereinfachen, wurden für alle Fotos die Skewness und der Exzess ermittelt. Skewness und Exzess geben Auskunft über die Schiefe (Skewness) und die Wölbung (Exzess) einer Verteilung. Es stellt sich die Frage, ob sich die Strohmenge möglicherweise an den ermittelten Zahlenwerten erkennen lässt. Da die Skewness angibt, ob eine Verteilung links- oder rechtsschief ist und eine Idee über das Verhältnis von hellen zu dunklen Pixeln gibt, stand die Annahme im Raum, dass die Skewness sich durch eine höhere Strohmenge und somit mehr helleren Pixel verändert. Dafür wurden zuerst die RGB-Bilder und im Anschluss die einzelnen Kanäle Rot, Grün und Blau untersucht. Es wurden nicht nur einzelne Ausschnitte, sondern der gesamte Inhalt der Schalen betrachtet.

Die Auswertung der Skewness zeigt deutlich Tendenzen. Die Ergebnisse der RGB-Bilder und des Grünkanals ähneln sich stark und können somit zusammengefasst werden. Sowohl in der trockenen als auch der feuchten Variante verlaufen die Kurven der drei Böden parallel bis auf *Hellbraun, Trocken*. Im Verlauf sinken die Werte aller Kurven bis ca. 20 dt/ha, woraufhin sie sich kaum noch verändern. *Hellbraun, Trocken* bildet die Ausnahme, steigt bis 20 dt/ha und gleicht sich dann den restlichen Verläufen an. Die Auswertung des Rotkanals zeigt ähnliche Ergebnisse, allerdings sind die Kurven stärker ausgeprägt. Die Werte fallen und sinken bis zu den gleichen Strohmenge, doch die Spannweite der Werte ist größer. Die Werte liegen weiter auseinander und können demzufolge unterschiedliche Strohmenge klarer definieren. Die Werte in allen drei Untersuchungen liegen im negativen Bereich. Eine Ausnahme bilden einige Werte bei 5 dt/ha und 10 dt/ha. Negative Werte deuten darauf hin, dass die Verteilung linksschief ist. Demzufolge ist der Median größer als das arithmetische Mittel und es gibt mehr helle Pixel als dunkle. Da die Werte der Skewness bis 20 dt/ha in jedem Fall, außer bei *Hellbraun, Trocken*, kleiner werden, nimmt die Anzahl der hellen Pixel, also der Strohpixel zu. Die teilweise positiven Werte bei 5 dt/ha und 10 dt/ha untermauern, dass es mehr dunkle Bodenpixel als helle Strohpixel gibt. Der hellbraune, trockene Boden scheint heller zu sein als das Stroh selbst. Der reine Boden liegt i.d.R. bei jeder Variante unter dem restlichen Kurvenverlauf und lässt sich somit durch stark negative Werte ausmachen. Ab 20 dt/ha ist eine

Unterscheidung der Strohmenngen weder bei den RGB-Bildern noch im Grün- oder Rotkanal möglich. Dies lässt sich möglicherweise darauf zurückführen, dass ab ca. 20 dt/ha ein Bodenbedeckungsgrad von 100 % erreicht ist. Bildanalytisch wird nur die Oberfläche ausgewertet. Höhere Strohmenngen führen demzufolge zu keiner Veränderung in der Skewnessermittlung. Der Blaukanal ist zur Auswertung der Strohmenge anhand der Skewness unbrauchbar, da die Werte nah beisammen liegen und der Kurvenverlauf nicht eindeutig ist. Schlussendlich ist eine Unterscheidung der Strohmenngen im Rotkanal bis 20 dt/ha am besten möglich, da die Spannweite der Werte am größten ist. Bei der Betrachtung des dunkelbraunen und des braunen Bodens sinken die Werte der Skewness ab 5 dt/ha, die Anzahl der hellen Pixel zunimmt. Bei dem hellbraunen Boden steigen die Werte dagegen, was darauf hindeutet, dass die Bodenfarbe einen großen Einfluss auf die Skewness hat. Die feuchten Böden lassen sich aufgrund ihrer dunkleren Farbe besser vom Stroh trennen, als die trockenen Böden.

Der Exzess bildet die Wölbung einer Verteilung ab und gibt an, ob diese spitz- oder flachgipflig ist. Da die Wölbung die Breite der Werte widerspiegelt, steht die Annahme im Raum, dass reine Boden- und Strohpixel steilgipflig und verschiedene Strohmenngen durch eine andere Verteilung der Werte flachgipfliger sind. Wie schon bei der Auswertung der Skewness ähneln sich die Verläufe der RGB-Bilder und des Grünkanals. Die Graphen erreichen bei 0 dt/ha ihren Höhepunkt und liegen im positiven Bereich, was auf eine spitzgipflige Verteilung hindeutet. Da es nur dunkle Bodenpixel gibt, konzentrieren sich die Werte auf einen Bereich. Im Verlauf fallen die Graphen, was darauf verweist, dass die Spitzgipfligkeit abnimmt. Es kommt Stroh hinzu, weshalb sich die Wölbung durch mehr helle Werte verbreitert. Ab ca. 25 dt/ha verändert sich der Exzess nicht mehr und liegt dauerhaft zwischen ca. -0,3 und -0,6 in allen Varianten. Das führt zu der Annahme, dass ab ca. 25 dt/ha ein Bodenbedeckungsgrad von 100 % erreicht ist, wodurch sich der Exzess nicht mehr verändert. Der Exzess kann in den Bildern nur anhand der verschiedenen oberflächlichen Reflexionen ermittelt werden. Die Reflexion kann bekanntlich nicht durch die Materialien hindurchmessen und eine definierte Strohmenge bestimmen. In den feuchten Varianten fallen die Kurven stärker, was darauf hindeuten könnte, dass die Wölbung durch verhältnismäßig dunklere Bodenpixel und helle Strohpixel flacher und die Kurve somit breiter ist. In allen Varianten fallen die Graphen erst stark bis 10 dt/ha und steigen daraufhin wieder leicht an, bis sie ab 25 dt/ha stagnieren. Die Zunahme des Strohs bewirkt anfangs, dass sich die Wölbung verbreitert. Da das Stroh jedoch so stark zunimmt, dass nur noch Stroh und kein Boden mehr zu sehen ist, wird die Kurve wieder steilgipfliger, da das helle Stroh dominiert. Die Exzess-Werte wachsen jedoch nicht wieder bis auf die Anfangswerte bei 0 dt/ha an. Dies liegt vermutlich daran, dass der Boden keinen Schatten wirft, sondern einheitlich dunkel ist und somit einen hohen Exzess hat. Da das Stroh viele helle Pixel hervorbringt, die ebenfalls für eine steilgipflige Kurve sorgen, ist der Exzess zwar

ebenfalls hoch, wird aber durch die dunklen Schattenpixel des Strohs gedämpft. Daher befindet sich der Wert einer 100%-igen Strohbedeckung in der Mitte aller ermittelten Werte. Dies kann bei geringen Strohmenge, die die gleichen Werte erreichen zu unklaren Aussagen führen. Ein mittlerer Exzess kann sowohl zu einer geringen Strohmenge als auch zu einer sehr hohen Strohmenge führen. Die Variante *Hellbraun, Trocken* bildet dabei eine Ausnahme. Die Werte sinken bis 15 dt/ha und bleiben daraufhin konstant. Letztendlich ist eine Untersuchung der Strohmenge anhand des Exzesses bei niedrigen Strohmenge möglich. Doch sobald hohe Strohmenge und somit vermutlich hohe Bodenbedeckungsgrade eintreten, ist eine klare Trennung anhand des Exzesses nicht möglich.

Im Rotkanal zeigt die feuchte Variante einen ähnlichen Verlauf, weshalb sich die oben beschriebenen Erkenntnisse darauf übertragen lassen. In der trockenen Variante verlaufen die einzelnen Graphen für geringe Strohmenge sehr unterschiedlich. Eine einzelne Unterscheidung bis ca. 10 dt/ha ist möglich, aber die Werte variieren im Vergleich der drei Böden stark. Daher scheinen die RGB-Bilder und der Grünkanal besser geeignet zu sein, um Strohmenge von 0-10 dt/ha unterscheiden zu können.

Im Blaukanal variieren die Werte zu schwach und bilden keine eindeutigen Kurvenverläufe. Durch die vielen hellen Pixel verändert sich die Wölbung kaum und ist dadurch nicht aussagekräftig.

Um Skewness und Exzess gemeinsam betrachten zu können, verdeutlichen die nachfolgenden Histogramme zu den RGB-Bildern der Variante *Dunkelbraun, Trocken* von 0- 25 dt/ha noch einmal die oben beschriebenen Veränderungen. Bei 0 dt/ha ist die Skewness stark negativ, der Exzess leicht positiv und der Verlauf des Histogramms somit äußerst linksschief und spitzgipflig. Die reinen Bodenpixel machen den Großteil der Werte aus, konzentrieren sich hauptsächlich auf eine Intensität und der Schattenwurf durch Bodenkrümel lässt die Kurve linksschief auslaufen. Bei 5 dt/ha und 10 dt/ha ist die Skewness positiv, da diese durch die hellen Strohpixel beeinflusst wird. Die Rechtsschiefe nimmt von 5 dt/ha bis 10 dt/ha leicht zu, da die Mehrzahl der Pixel Bodenpixel sind, aber die hellen Pixel durch die Strohmenge deutlich zunehmen. Der Gipfel bildet dabei die Bodenpixel ab und der zunehmende Verlauf rechterhand davon die Strohpixel. Die Wölbung ist in beiden Fällen negativ, was sich im Vergleich zum ersten Histogramm verändert hat, da die Breite der Intensitätswerte zugenommen hat. Das Histogramm bei 10 dt/ha ist durch mehr Strohpixel flachgipfliger als bei 5 dt/ha. Ab 15 dt/ha ist die Skewness erneut negativ und demzufolge linksschief. Der rechte Gipfel verbildlicht das Stroh und die Werte, die links davon auslaufen, die Bodenpixel und den Schattenwurf. Durch die breite Menge an Intensitätspixeln bleibt die Wölbung dauerhaft flachgipflig. Der Exzess nimmt im Verlauf wieder leicht zu, da immer mehr Bodenpixel verschwinden, aber mit zunehmender Strohmenge auch gleichzeitig mehr

Schattenwurf eintritt. Die Intensität konzentriert sich auf den mittleren Bereich, bleibt jedoch flachgipflig. Ab 15 dt/ha verändern sich Skewness und Exzess nur noch kaum merklich. Die beiden Histogramme der Strohmenngen 20 dt/ha und 25 dt/ha deuten dies bereits an. Eine klare Trennung der Strohmenngen ist daher bis ca. 10 dt/ha möglich.

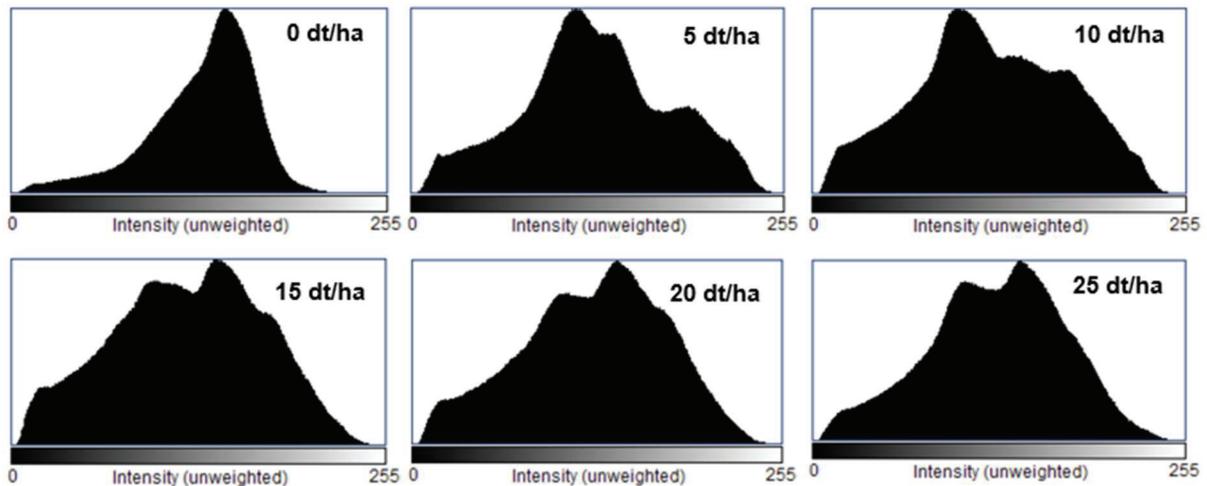


Abbildung 38: Histogramme der RGB-Bilder der Variante Dunkelbraun, Trocken von 0-25 dt/ha

Quelle: Eigene Darstellung anhand von Fiji (ImageJ 1.54f)

MEYER et al. (1988) sowie MORRISON und CHICHESTER (1991) nutzen pixelbasierte Methoden zur Schätzung des Bodenbedeckungsgrades und kamen, obwohl der reale Bedeckungsgrad i.d.R. über- oder unterschätzt wurde, zu positiven Ergebnissen. Die Ermittlung der Skewness und des Exzesses orientieren sich an den pixelbasierten Verfahren und betrachten das Verhältnis von hellen und dunklen Pixeln. Überzeugen konnte dabei vor allem die Skewness, vorrangig im Rotkanal, aber auch im Grünkanal und den RGB-Bildern. Eine Unterscheidung ist allerdings nur bis 10 dt/ha möglich, was wahrscheinlich auf einen sehr hohen Bodenbedeckungsgrad zurückzuführen ist, der im weiteren Verlauf 100 % erreicht. Zur Erfassung von Stroh in hohen Mengen ist die Methode eindeutig ungeeignet, was allerdings auch bei den anderen pixel- und objektbasierten Methoden der Fall ist. Es sollte näher untersucht werden, welche Strohmenge welchem Bodenbedeckungsgrad entspricht und wie feine Unterscheide sich mit der Skewness ermitteln lassen. Schlussendlich eignet sich das Verfahren vermutlich zur Bestimmung des Bedeckungsgrades und nicht zur Bestimmung der Strohmenge. Wichtig ist auch in jedem Fall, dass die Bodenfarbe bedacht wird. Der Boden kann heller sein als das Stroh und zu Fehlinterpretationen führen. Auch eine ungleichmäßige Ausleuchtung kann die Ergebnisse verfälschen.

### 6.3 Zusammenhang zwischen Strohmenge und Bodenbedeckungsgrad

Da die Strohmenge ein entscheidender Faktor im Strohmanagement und der damit zusammenhängenden Bodenbearbeitung ist, wurden für den Versuch Strohmenngen von 0- 55 dt/ha auf reinem Boden verteilt, gemessen und analysiert. Besser zugänglich zur Auswertung und auch als Maß für die Strohmenge geeignet, ist jedoch der Bodenbedeckungsgrad. Dieser wird i.d.R. in Forschungen verwendet und gibt Auskunft über den Anteil des Bodens, der mit Stroh bedeckt ist. Um die Beziehung zwischen Strohmenge in dt/ha und Bodenbedeckungsgrad in % untersuchen zu können, wurden zwei Methoden angewandt. Zuerst wurde die Variante *Dunkelbraun, Trocken* händisch vollständig digitalisiert und das Verhältnis aus Boden- und Strohpixeln bestimmt, woraus sich der Bodenbedeckungsgrad in % ergibt. Im zweiten Schritt wurde der „Fächer zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades durch organische Rückstände“ (BRUNOTTE und ORTMEIER, 2007) mithilfe der pixelbasierten Bildanalyse ausgewertet, indem Skewness und Exzess für den gesamten Fächer der Stroh-Bilder ermittelt wurden.

Die Digitalisierung der RGB-Bilder führte zu durchaus positiven Ergebnissen. Wie bereits bei der Auswertung der Indizes und der Bildanalyse vermutet, nimmt der Bodenbedeckungsgrad anfangs mit steigenden Strohmenngen zu, erreicht daraufhin aber schnell Werte nahe 100 %. In der Variante *Dunkelbraun, Trocken* liegt der Bodenbedeckungsgrad bei 20 dt/ha bereits über 80 % und bei 25 dt/ha sogar über 90 %. In diesem Versuch soll die Digitalisierungsmethode eine Idee geben, ab welchem Umfang Strohmenngen für einen niedrigen bzw. hohen Bodenbedeckungsgrad oder vollständige Bedeckung sorgen. Zwischen den einzelnen Varianten sollten die Unterschiede gering sein, da auf jedem Boden das gleiche Stroh mit gleichen Häcksellängen im trockenen Zustand verteilt wurde. Geringe Unterschiede können allerdings entstehen, wenn das Stroh nicht gleichmäßig flach, sondern häufchenartig verteilt wird und mehr Boden als in anderen Varianten sichtbar ist.

Bei der händischen Verteilung lassen sich in der Variante *Dunkelbraun, Trocken* bei Strohmenngen von 0-25 dt/ha Unterschiede im Bodenbedeckungsgrad ausmachen. Da sich der Bodenbedeckungsgrad in gleichmäßigen Abständen erhöht und sich somit gleichwohl einerseits die hellen und dunklen Pixel bei der Bildanalyse und andererseits die Oberflächenmaterialien bei den Spektralmessungen erhöhen, stellt sich die Frage, ob sich lineare Zusammenhänge zwischen dem Bodenbedeckungsgrad und den Indizes, der Skewness und dem Exzess abzeichnen. Im Unterschied zu den hohen Strohmenngen, bei denen sich ein Maximalwert einstellt, verändert sich der Bodenbedeckungsgrad bis 100 % konstant.

Da der CAI, der DFI und der SQI hohe Korrelationen im Zusammenhang mit der Strohmenge aufweisen, wurden die Indizes auf den Bodenbedeckungsgrad übertragen. Der CAI zeigt mit Bestimmtheitsmaßen von durchschnittlich 0,98 die besten Ergebnisse. Die Zusammenhänge

sind linear und deuten darauf hin, dass mithilfe des CAIs der Bodenbedeckungsgrad und die Strohmenge bis ca. 25 dt/ha geschätzt werden können. Wie bereits in Kapitel 6.1 näher beschrieben, zeigt der DFI ähnliche Tendenzen, jedoch nur für die trockene Variante. Auch hier sind die Zusammenhänge linear und anhand des DFIs können der Bodenbedeckungsgrad und die Strohmenge bis 25 dt/ha geschätzt werden.  $R^2$  ist mit 0,96 sehr hoch. Kommt jedoch Feuchtigkeit hinzu, ist keine Schätzung mehr möglich. Das Bestimmtheitsmaß sinkt durch die Varianten *Braun*, *Feucht* und *Hellbraun*, *Feucht* im Durchschnitt auf 0,66. Der SQI weist in allen Fällen nahezu lineare Zusammenhänge auf und erreicht ein Bestimmtheitsmaß von 0,95. Wie auch beim CAI ist eine Schätzung des Bodenbedeckungsgrades und der Strohmenge bis 25 dt/ha möglich. Der Nachteil ist, dass es keine Grenze zur Unterscheidung von Boden und cellulosehaltigen Materialien wie beim CAI gibt. Trotzdem zeigen die Auswertungen einen klaren Trend, weshalb der Index näher untersucht werden sollte.

Skewness und Exzess zeigten in der vorangegangenen Auswertung vorrangig Unterschiede bis 20 dt/ha. Da sich ähnliche Ergebnisse für die RGB-Bilder, den Rot- und den Grünkanal abzeichneten und der Blaukanal für eine Analyse ungeeignet war, wurden im letztem Schritt Skewness und Exzess stellvertretend anhand der RGB-Bilder ermittelt. Bei der Betrachtung der Skewness im Zusammenhang mit dem Bodenbedeckungsgrad ergeben sich in der trockenen Variante keine eindeutigen Beziehungen. Die Werte von *Dunkelbraun* und *Braun* verändern sich kaum von 5 dt/ha zu 10 dt/ha und sinken daraufhin leicht bis 25 dt/ha. In der hellbraunen Variante steigen die Werte geringfügig an. Größere Unterschiede sind in der feuchten Variante erkennbar. Alle drei Graphen fallen in verhältnismäßig großen Schritten bis 20 dt/ha. Die Werte bei 20 dt/ha und 25 dt/ha, d.h. bei Bedeckungsgraden über 80 %, ähneln sich zu stark, um die Werte voneinander unterscheiden zu können. Der Verlauf der Exzess-Werte ist verhältnismäßig steiler, sinkt allerdings nur bis 10 dt/ha (ca. 53 %), woraufhin er stagniert oder erneut leicht ansteigt. Dadurch lassen sich die Werte bis ca. 50 % gut voneinander trennen. Da die Werte jedoch erneut ansteigen, haben hohe und niedrige Bedeckungsgrade teilweise gleiche Exzess-Werte. Schlussendlich kann keine Skewness und kein Exzess eindeutig einem Bodenbedeckungsgrad zugeordnet werden. Zusätzlich ist die Auswertung pixelbasiert und unterliegt fielen äußeren Einflüssen, wie z.B. Farben und Lichtverhältnissen. Die Belichtungsverhältnisse waren während des gesamten Versuches konstant. Die Strahlung blieb gleich und Störfaktoren wie in etwa Schatten können durch den abgeschirmten Versuchsaufbau vernachlässigt werden. Es wird vor allem deutlich, dass die Hintergrundfarbe eine entscheidende Rolle spielt. Dunkler und feuchter Boden lässt eine Unterscheidung der Strohbedeckungsgrade anhand der Skewness und des Exzesses zu. Bei Boden, der heller als Stroh ist, kehrt sich der Verlauf der Skewness um und sie steigt. Böden und Stroh, die in einem engen Farbspektrum liegen, lassen sich kaum voneinander trennen.

Da bei der Digitalisierungsmethode die Variante *Dunkelbraun, Trocken* verwendet wurde, wurde bei dem Abgleich von Skewness und Exzess zwischen Strohfächer und Strohmenge ebenfalls diese Variante verwendet. Die Skewness-Werte, die anhand des Strohfächers ermittelt wurden, sinken bis 40 % Bedeckung leicht und bis 60 % steil. Daraufhin steigt der Verlauf wieder an. Der Kurvenverlauf zeigt eine gewisse Tendenz, bei der die Werte bis 60 % sinken. Allerdings erreichen höhere Bedeckungsgrade erneut höhere Werte. Das gleiche Problem tritt bei der Auswertung des Exzesses auf. Der Wertebereich ist größer und der Kurvenverlauf ist steiler, aber ab 60 % beginnt der Verlauf erneut zu steigen. Der Bedeckungsgrad lässt sich somit weder mit der Skewness noch mit dem Exzess exakt schätzen. Die aus der Strohmenge ermittelten Skewness- und Exzess-Werte steigen und fallen viel flacher und liegen unter denen des Strohfächers. Eine Schätzung des Bodenbedeckungsgrades der Variante *Dunkelbraun, Trocken* ist, da sich die Werte kaum voneinander unterscheiden, nicht möglich. Die anderen Varianten, v. a. die feuchten Varianten, haben in der Versuchsauswertung zwar deutlichere Ergebnisse geliefert, jedoch bleiben die gleichen Probleme wie bei der Auswertung des Strohfächers bestehen. Der Kurvenverlauf sinkt erst zu flach, um die Bedeckungsgrade voneinander trennen zu können und steigt im Anschluss, sodass verschiedene Bedeckungsgrade gleiche Skewness- und Exzess-Werte aufweisen. Die ermittelten Werte reichen weder bei der Strohfächer- noch bei der Digitalisierungsmethode aus, um die Bodenbedeckung schätzen zu können.

Die Digitalisierungsmethode liefert für die Variante *Dunkelbraun, Trocken* sehr präzise Ergebnisse. Die Digitalisierung erfolgte händisch und es wurde zwischen Stroh- und Bodenpixeln unterschieden. Durch die manuelle Trennung von Stroh und Boden geht die Methode als sehr genau hervor und liefert zu den Strohmenge in dt/ha den passenden Strohbedeckungsgrad in %. Dank der Zuordnung durch das menschliche Auge können verschiedene Pixel eindeutig zugeteilt werden. Eine falsche oder fehlende Markierung würde in diesem Fall in Anbetracht der kleinen Partikelgröße den Strohbedeckungsgrad zwar nicht signifikant beeinflussen, allerdings deutet das Problem auf die Schwierigkeiten von Bildanalysen hin. Auch wenn geeignete Tresholds gesetzt werden, können Pixel falsch zugeordnet werden. Dies bezieht sich auf alle pixelbasierten Analysemethoden. Sobald Stroh und Boden eine ähnliche Farbe aufweisen, werden die Ergebnisse ungenau. In Abbildung 39 ist das Problem deutlich zu sehen. Eingekreist sind zwei Stellen, die bei einer Bildanalyse falsch zugeordnet werden könnten. In dem linken roten Kreis befindet sich durch Boden verschmutztes Stroh und im rechten roten Kreis ein heller Stein, der farblich dem Stroh zugeordnet werden würde. Mit der händischen Digitalisierung könnte diese Problematik zwar umgangen werden, allerdings ist die Methode äußerst zeitintensiv und gilt daher in diesem Versuch lediglich als Referenzmethode.

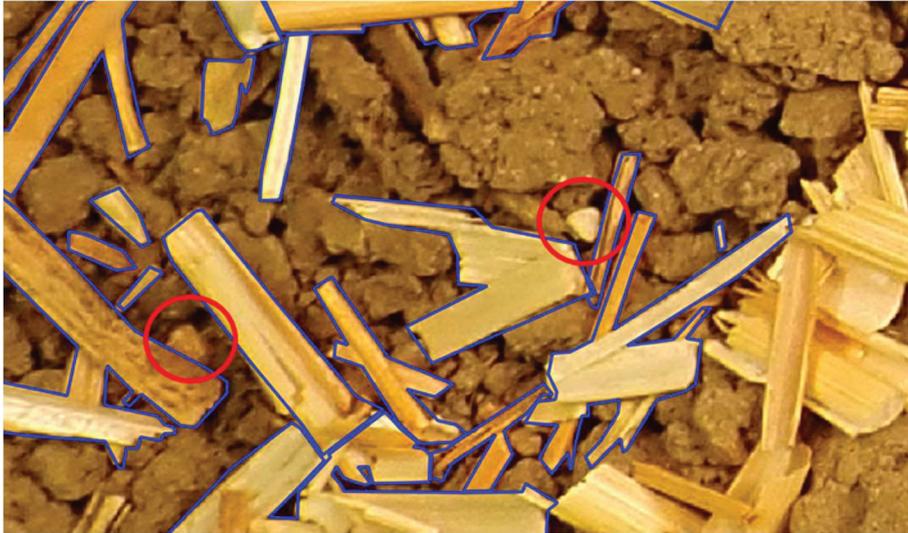


Abbildung 39: Probleme der pixelbasierten Bildanalyse durch gleiche Boden- und Strohfalten

Quelle: Eigene Darstellung

## 7. Zusammenfassung

Eine gute Strohverteilung als Grundbaustein des Strohmanagements bildet die Grundlage für einen gleichmäßigen Feldaufgang, einen optimalen Erosionsschutz und eine verbesserte Tragfähigkeit. Um ein gutes Strohmanagement auf dem Feld betreiben zu können, ist es notwendig die Strohmenge und deren Verteilung beurteilen zu können. Daher war es das Ziel der Arbeit, zu untersuchen, ob berührungsfreie, visuelle und hyperspektrale Daten zur Ermittlung der Strohbedeckung und der Strohmenge geeignet sind. In einem Laborversuch unter definierten Bedingungen wurden die Spektralreflexionen von Weizen-Stroh auf drei verschiedenen Böden mit jeweils zwei Feuchtigkeitsstufen und nach Beregnung gemessen. Ausgewertet wurden die Messungen mithilfe der Indizes CAI (DAUGHTY et al., 1996), NDI (MCNAIRN und PROTZ, 1993), DFI (CAO et al., 2010) und SQI. Zusätzlich sollte die Strohmenge anhand einer Bildanalysemethode ermittelt werden. Dafür wurden Skewness (Schiefe) und Exzess (Wölbung) der Verteilungen der RGB-Bilder und der einzelnen Kanäle (Rot, Grün, Blau) bestimmt werden.

Schlussendlich ergeben sich für die Indizes unterschiedliche Korrelationen: CAI und SQI ( $R^2 = 0,99$ ) >  $NDI_7$  ( $R^2 = 0,92$ ) > DFI ( $R^2 = 0,86$ ) >  $NDI_5$  ( $R^2 = 0,82$ ). Die Bestimmtheitsmaße sind in allen Fällen sehr hoch. Trotzdem eignen sich  $NDI_5$  und  $NDI_7$  durch den engen Wertebereich kaum zur Bestimmung der Strohmenge. Der DFI eignet sich vorrangig, um Strohmenge auf trockenem Boden unterscheiden zu können. CAI und SQI bieten in jedem Fall die beste Möglichkeit, um Strohmenge voneinander trennen zu können. Der CAI bietet dabei den Vorteil, dass 1. die notwendigen Bänder bereits in den heutigen Satelliten verbaut sind, 2. reiner Boden (negative Werte) gewissenhaft von Stroh (positive Werte) getrennt werden kann und (SERBIN et al, 2013) 3. eine Unterscheidung der Strohmenge bis ca. 30 dt/ha problemlos möglich ist. Der SQI bietet keinen einheitlichen Wertebereich zur Unterscheidung der Materialien, kann aber womöglich Strohmenge darüber hinaus voneinander trennen. Im Rahmen des Versuches schnitten die beiden Indizes sehr gut ab. Außerdem zeigen die Versuche, dass die Verwendung geringerer Bandbreiten zu genaueren Ergebnissen führt, da die Verrechnung der Mittelwerte der Bänder zu einer geringeren Abweichung von den Maximal- bzw. Minimalwerten führt.

Der Beregnungsversuch gibt aufgrund des geringen Umfanges lediglich einen kleinen Eindruck über die Reaktion der Indizes auf Feuchtigkeit. Unter Tau-Bedingungen ( $0,07 \text{ l/m}^2$ ) verändern sich die Werte des CAIs, DFIs und SQIs, zeigen jedoch trotzdem klare Tendenzen. Nach einem Regenschauer ( $5 \text{ l/m}^2$ ) scheint eine Messung der Indizes nicht sinnvoll.

Die Auswertung der RGB-Bilder ergibt, dass eine Unterscheidung der Strohmenge im Rotkanal anhand der Skewness bis 20 dt/ha am besten möglich, da die Spannweite der Werte am größten ist. Die feuchten Böden lassen sich aufgrund ihrer dunkleren Farbe besser vom Stroh trennen, als die trockenen Böden. Die Skewness wird sehr stark von der Bodenfarbe

beeinflusst. Bei der Betrachtung des Exzesses kommt es zu ähnlichen Problemen. Die besten Ergebnisse liefern die RGB-Bilder und der Grün-Kanal. Allerdings ist eine Unterscheidung anhand des Exzesses lediglich bis 10 dt/ha, maximal 15 dt/ha möglich.

Im letzten Schritt wurden die Bilder der verschiedenen Strohmenngen händisch digitalisiert und das Verhältnis aus hellen und dunklen Pixeln bestimmt, um den Bodenbedeckungsgrad errechnen zu können. Durch die manuelle Trennung von Stroh und Boden geht die Methode als sehr genau hervor und liefert zu den Strohmenngen in dt/ha den passenden Strohbedeckungsgrad in %. Bei 20 dt/ha Stroh werden bereits über 80 % Bodenbedeckung erreicht, was erklärt, weshalb die verschiedenen Methoden bereits bei 20 dt/ha an ihre Grenzen kommen. Zusammenfassend lassen sich Strohmenngen von 0-20 dt/ha bzw. Bodenbedeckungsgrade von 0-80 % am besten mithilfe des CAIs und des SQIs ermitteln. Geringe Feuchten können dabei vernachlässigt werden. Die Bildanalysemethode liefert im Vergleich schlechtere Ergebnisse als die Indexmethode, wobei CAI und SQI die besten Ergebnisse erzeugen.

## 8. Ausblick

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich die Strohmenge von 0-20 dt/ha bzw. Bedeckungsgrade von 0-80 % unter Laborbedingungen deutlich voneinander trennen lassen. CAI und SQI bieten dafür gute Werkzeuge. Strohmenge und Bodenbedeckungsgrad hängen untrennbar miteinander zusammen und könnten eine Schätzung unter realen Bedingungen auf dem Feld durch eine Verknüpfung vereinfachen. Neben weiteren intensiven Versuchen, die im Labor beispielsweise zur Feuchtigkeit notwendig sind, bringen auch Feldbedingungen Schwierigkeiten wie unterschiedlich lange, schräg stehende Stoppeln und unterschiedliche Einstrahlung durch Wolken und Tageszeit mit sich. Nichtsdestotrotz liefern die Ergebnisse eine Grundidee zur Bestimmung der Strohmenge und des Strohbedeckungsgrades. Ist ein Strohbedeckungsgrad von 100 % erreicht, kann die Strohmenge bei einer schlechten Strohverteilung über diesen Bedeckungsgrad von 100 % hinausgehen. Denkbar wäre, dass sich die Strohmenge, verteilt über die gesamte Schneidwerksbreite, mithilfe des Strohbedeckungsgrades und der Ertragserwartung schätzen lässt. Aus der Berechnung der Ertragserwartung lässt sich die Strohmenge errechnen, die sich über die gesamte Schneidwerksbreite verteilt. Da bestimmte Strohbedeckungsgrade an bestimmte Strohmenge gekoppelt sind, lässt sich der Überschuss des errechneten Strohs den Strohbedeckungsgraden von 100 % zuordnen. Sobald der CAI oder auch der SQI einen bestimmten Wert erreicht und diesen kaum noch überschreitet bis er wieder absinkt im Verlauf der Querverteilung, kann davon ausgegangen werden, dass die restliche, hochgerechnete Strohmenge in der Mitte Querverteilung befindet und somit den Feldaufgang, den Ertrag etc. maßgeblich beeinflusst. Ebenso benachteiligt sind die Randbereiche, in denen es bei einer schlechten Strohverteilung zu Evaporation, Infiltration und Verschlammung kommt.

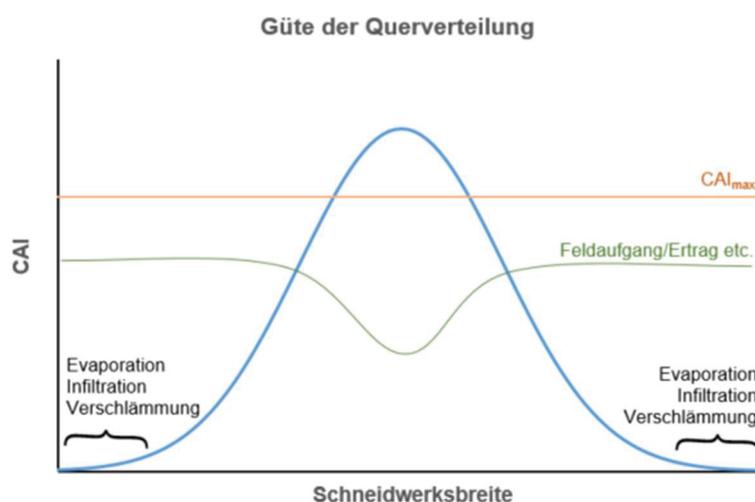


Abbildung 40: Güte der Querverteilung im Verlauf der Schneidwerksbreite am Beispiel einer schlechten Strohverteilung

Quelle: Eigene Darstellung

Grundsätzlich besteht weiterer Forschungsbedarf im Labor, jedoch liefert die Darstellung eine erste Vorstellung davon, wie die Ergebnisse in die Praxis zu übertragen werden können.

## Literaturverzeichnis

Aase, J.K.; Siddoway; F.H., (1980).

Stubble height effects on seasonal microclimate, water balance, and plant development of no-till winter wheat. *Agric. Meteorol.* 21: 1-20.

Aase, J.K., Tanaka, D.L., (1991).

Reflectances from four wheat residue cover densities as influenced by three soil backgrounds. *Agron. J.* 83: 753-757.

Adams, J.B., Smith, M.O., Gillespie, A.R., (1989).

Simple models for complex natural surfaces: a strategy for the hyperspectral era of remote sensing. *IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium '89.* IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, New York, 16-21.

Al-Kaisi, M.; Hanna, M; Tidman, M., (2002)

Methods for measuring crop residue; Iowa State University of Science and Technology; IC-488 (8): 69-71.

Arsenault, E., Bonn, F., (2005).

Evaluation of soil erosion protective cover by crop residues using vegetation indices and spectral mixture analysis of multispectral and hyperspectral data. *Catena* 62: 157-172.

Asner, G. P., (1998).

Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 64: 234-253.

Bauer, T., & Strauss, P., (2013).

A rule-based image analysis approach for calculating residues and vegetation cover under field conditions. *Catena*, 363-369.

Biard, F., Baret, F., (1997).

Crop residue estimation using multiband reflectance. *Remote Sensing of Environment* 59: 530-536.

Biard, F., Bannari, A., Bonn, F., (1995).

Soil adjusted corn residue index (SACRI): an index using near and mid-infrared for the detection of residues of maize. In: 17th Canadian Symposium on Remote Sensing, 13–15 June 1995, Saskatoon, Canada. Canadian Remote Sensing Society, Ottawa, 417-423.

Bannari, A., Haboudane, D., Bonn, F., (2000).

Mid infrared interest for culture residues cartography. *Can. J. Remote Sens.* 26: 384-393.

Bonham, C. D., (1989).

Measurements for Terrestrial Vegetation. New York: John Wiley & Sons, 338 pp.

Booth, D.T., Cox, S.E., Fifield, C., Phillips, M., Williamson, N., (2005).

Image analysis compared with other methods for measuring ground cover. *Arid. Land Res. Manage.* 19: 91-100.

Bowers, S.A.; Hanks, R.J., (1965).

Reflection of radiant energy from soils. *Soil Sci.* 100: 130-138

Brunotte, J.; Ortmeier, B. (2007)

Fächer zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades durch organische Rückstände; Braunschweig, Deutschland: FAL Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Institut für Betriebstechnik und Bauforschung.

Cao, X., Chen, J., Matsushita, B., Imura, H., (2010).

Developing a MODIS-based index to discriminate dead fuel from photosynthetic vegetation and soil background in the Asian steppe area. *Int. J. Remote Sens.* 31 (6): 1589-1604.

Cao, X., Cui, X., Yue, M., Chen, J., Tanikawa, H., Ye, Y.u., (2013).

Evaluation of wildfire propagation susceptibility in grasslands using burned areas and multivariate logistic regression. *Int. J. Remote Sens.* 34 (19): 6679-6700.

- Chai, G., Wang, J., Wang, G., Kang, L., Wu, M., Wang, Z., (2019).  
Estimating fractional cover of non-photosynthetic vegetation in a typical grassland area of northern China based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) image data. *Int. J. Remote Sens.* 1-18.
- Chai, G., Wang, J., Wu, M., Li, G., Zhang, L., Wang, Z., (2020).  
Mapping the fractional cover of non-photosynthetic vegetation and its spatiotemporal variations in the Xilingol grassland using MODIS imagery (2000–2019). *Geocarto Int.* 1-17.
- Clark, R.N.; (1999).  
Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In *Manual of Remote Sensing*, A.N. Rencz (Ed.), *Remote Sensing for the Earth Sciences*, 3: 3-58 (New York: John Wiley and Sons).
- Corak, S.J., Kaspar, T.C., Meek, D.W., (1993).  
Evaluating methods for measuring residue cover. *J. Soil Water Conserv.* 48: 70–74.
- Cyr, L., Bonn, F., Pesant, A., (1995).  
Vegetation Indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. *Ecological Modelling* 79: 277–285.
- Daughtry, C. S. T., (2001).  
Discriminating crop residues from soil by shortwave infrared reflectance. *Agronomy Journal*, 93: 125–131.
- Daughtry, C. S. T.; Hunt, E.R. (2008).  
Mitigating the effects of soil and residue water contents on remotely sensed estimates of crop residue cover. *Remote Sensing of Environment* 112: 1647-1657.
- Daughtry, C. S. T., McMurtrey III, J. E., Chappelle, E. W., Dulaney, W. P., Irons, J. R., & Satterwhite, M. B., (1995).  
Potential for discriminating crop residues from soil by reflectance and fluorescence. *Agronomy Journal*, 87: 16-171.

Daughtry, C. S. T., McMurtrey III, J. E., Chappelle, E. W., Hunter, W. J., & Steiner, J. L., (1996).  
Measuring crop residue cover using remote sensing techniques. *Theoretical and Applied Climatology*, 54: 17-26.

Daughtry, C. S. T., McMurtrey III, J. E., Kim, M. S., & Chappelle, E. W., (1997).  
Estimating crop residue cover by blue fluorescence imaging. *Remote Sensing of Environment*, 60: 14-21.

Daughtry, C. T.; Doraiswamy, P. C.; Hunt Jr., E. R.; Stern, A. J.; McMurtrey, J. E.; Prueger, J. H.; (2006).

"Remote Sensing of Crop Residue Cover and Soil Tillage Intensity", *Soil and Tillage Research*, Vol. 91, No. 1-2: 101-108.

Daughtry, C.S.T., Hunt, E.R., Doraiswamy, P.C., McMurtrey, J.E., (2005).

Remote sensing the spatial distribution of crop residues. *Agron. J.* 97, 864–871.

De Paul, O. V., (2012).

Review article: remote sensing, surface residue cover and tillage practice. *J. Environ.* 3: 211–217.

Elvidge, C. D., (1990).

Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *International Journal of Remote Sensing*, 11: 1775-1795.

Estimating Crop Residue Cover for Soil Erosion Control, (2000), *Soil Factsheet*; Ministry of Agriculture; British Columbia, Kanada

Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C., Weidner, V. R., (1965).

Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4: 11-20.

Gausman, H.W.; Gerbermann, A.H.; Wiegand, C.L.; Leamer, R.W.; Rodriguez, R.R.; Noriega; J.R., (1975).

Reflectance differences between crop residues and bare soils. *Soil Science Society of America Journal* 39: 752-755.

- Gausman, H.W.; Rodriguez, R.R.; Wiegand; C.L., (1976).  
Spectrophotometric reflectance differences between dead leaves and bare soils. Rio Grande Valley Hortic. Soc. J. 30: 103-107.
- Gausman, H.W.; Leamer, R.W.; Noriega; J.R.; Rodriguez, R.R.; Wiegand; C.L., (1977).  
Field-measured spectroradiometric reflectances of disked and nondisked soil with and without wheat straw. Soil Science Society of America Journal 41: 793-796.
- Guerschman, J.P., Hill, M.J., Renzullo, L.J., Barrett, D.J., Marks, A.S., Botha, E.J., (2009).  
Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors. Remote Sens. Environ. 113: 928–945.
- Hartwig R.O., Laflen J.M., (1978).  
A meterstick method for measuring crop residue cover, Journal of Soil and Water Conservation, march-april.
- Hensel O. (2003)  
Online-Messverfahren zur Bestimmung der Strohverteilung und der Einarbeitungsqualität von Bodenbearbeitungsgeräten, 61. VDI-Tagung Landtechnik, Hannover.
- Hively, W. D.; Lamb, B. T.; Daughtry, C. S. T.; Shermeyer, J.; McCarty, G. W.; Quemada, M.; (2018).  
Mapping Crop Residue and Tillage Intensity Using WorldView-3 Satellite Shortwave Infrared Residue Indices. Remote Sens. 10(10): 1657
- Hofmann, G. (1955).  
Die Thermodynamik der Taubildung. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Berichte des Deutschen Wetterdienstes. 18
- Illinois Cooperative Extension Service, (1988):  
Managing Residue To Reduce Erosion; Taped slide program 726-6.
- Jackson, R.D., (1983).  
Spectral Indices in n-space. Remote Sens. Environ. 13: 409-421

Ju, J.; Kolaczyk, E.; Gopal, S. (2003).

"Gaussian Mixture Discriminant Analysis and Sub-Pixel Land Cover Characterization in Remote Sensing," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, 4: 550-560.

Kamptner, J., (2014).

Evaluierung der Auswirkung unterschiedlicher Bearbeitungsverfahren und Winterbegrünungen auf den Bedeckungsgrad von Böden. Masterarbeit. Wien

Kreitmayr, J., (2004).

Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 5. Juli 2013 von [http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/zwischenfruchtanbau\\_mulchsaat.pdf](http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/zwischenfruchtanbau_mulchsaat.pdf)

Laflen, J. M.; Amemiya, M.; Hintz, E. A., (1981)

Measuring Crop Residue Cover; *Journal of Soil and Water Conservation*; 32: 231-236.

Laliberte, A.S., Rango, A., Fredrickson, E.L., (2006).

Separating green and senescent vegetation in very high resolution photography using an intensity–hue–saturation transformation and object based classification. ASPRS 2006 Annual Conference, Reno, Nevada.

Laliberte, A.S., Rango, A., Herrick, J.E., Fredrickson, E.L., Bukett, L., (2007).

An object image analysis approach for determining fractional cover of senescent and green vegetation with digital plot photography. *J. Arid. Environ.* 69: 1-14.

Li, Z.; Guo, X., (2015).

Remote sensing of terrestrial non-photosynthetic vegetation using hyperspectral, multispectral, SAR, and LiDAR data. *Progress in Physical Geography*. University of Saskatchewan, Canada.

Lilienthal, H., (2014).

Optische Sensoren in der Landwirtschaft: Grundlagen und Konzepte. *Journal für Kulturpflanzen*. Stuttgart. 66 (2): 34-41.

Luscier, J.D., Thompson, W.L., Wilson, J.M., Gorham, B.E., Dragut, L.D., (2006).

Using digital photographs and object-based image analysis to estimate percent ground cover in vegetation plots. *Front. Ecol. Environ.* 4: 408-413.

- McMurtrey, J. E., III, Chappelle, E. W., Daughtry, C. S. T., Kirn, M. S. (1993).  
Fluorescence and reflectance of crop residue and soil. *J. Soil Water Conserv.* 48: 207-213.
- McNairn, H., Protz, R., (1993).  
Mapping corn residue cover on agricultural fields in Oxford county, Ontario, using Thematic Mapper. *Canadian Journal of Remote Sensing*; 19: 152-159.
- Meyer, G. E.; Stepanek, A.; Shelton, D. P.; Dickey, E. C., (1988).  
Electronic Image Analysis of Crop Residue Cover on Soil, *Biological Systems Engineering: Papers and Publications.* 250.
- Morrison J.E., Chichester F.W., Escobar D.E., (1989).  
Measurement of residue cover with dot screens, *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(5).
- Morrison J.E., Chichester F.W., (1991).  
Still Video Image Analysis of Crop Residue Soil Covers, *Transactions of the ASAE*, 34(6).
- Morrison Jr., J.E., Huang, C., Lightle, D.T., Daughtry, C.S.T., (1993).  
Residue cover measurement techniques. *J. Soil Water Conserv.* 48: 479-483.
- Morrison, J. E., Jr., Lemunyon, J., & Bogusch, H. C., Jr., (1995).  
Sources of variation and performance of nine devices when measuring percent residue cover. *Transactions of the ASAE*, 38(2): 521-529.
- Morrison, J. E., Jr., Potter, K. N., Torbert, H. A., & Pantone, D. J., (1996).  
Comparison of three methods of residue cover measurements on rainfall simulator sites. *Transactions of the ASAE*, 39(4): 1415-1417.
- Nagler, P. L.; Inoue, Y.; Glenn, E. P.; Russ, A. L.; Daughtry, C. S. T., (2003).  
Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil-plant litter scenes, *87(2-3):* 310-325.

- Numata I., Roberts D. A., Chadwick O. A., et al. (2008).  
Evaluation of hyperspectral data for pasture estimate in the Brazilian Amazon using field and imaging spectrometers. *Remote Sensing of Environment* 112: 1569–1583.
- Nagler, P. L., Daughtry, C. S. T., & Goward, S. N. (2000).  
Plant litter and soil reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 71(2): 207–215.
- Pforte, F., (2010).  
Entwicklung eines Online-Messverfahrens zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades bei der Stoppelbearbeitung zu Mulchsaatverfahren; Dissertation; Witzenhausen.
- Pforte, F., Wilhelm, B., Hensel, O., (2012).  
Evaluation of an online approach for determination of percentage residue cover. *Biosyst. Eng.* 112: 121-129.
- Prajapati, R.; Chakraborty, D.; Saa, S.; Gupta, V. K.; Sahoo, R. N.; (2019).  
Remote sensing for estimation of intensity and extent of plant residue cover. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. New Delhi. Volume XLII-3/W6
- Qi, J., Marsett, R., Heilman, P., Bieden-bender, S., Moran, S., Goodrich, D., Weltz, M., (2002).  
RANGES improves satellite-based information and land cover assessments in southwest United States. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 83 (51): 601–606.
- Quemada, M.; Daughtry, C.S.T. (2016).  
Spectral Indices to improve crop residue cover estimation under varying moisture conditions. *Remote Sens.*, 8: 660.
- Ren, H., Zhang, B., Guo, X., (2018).  
Estimation of litter mass in nongrowing seasons in arid grasslands using MODIS satellite data. *Eur. J. Remote Sens.* 51 (1): 222–230.
- Ren, H., Zhou, G., (2012).  
Estimating senesced biomass of desert steppe in Inner Mongolia using field spectrometric data. *Agric. For. Meteorol.* 161 (4): 0–71.

Ribeiro, A., Ranz, J., Burgos-Artizzu, X. P., Pajares, G., Sanchez del Arco, M. J., & Navarrete, L., (2011).

An image segmentation based on a genetic algorithm for determining soil coverage by crop residues. *Sensors*, 11(6): 6480-6492.

Richardson, A.J., Wiegand, C.L., (1977).

Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 43: 1541 – 1552.

Roberts, D. A.; Smith, M. O.; Adams, J. B., (1993).

Green Vegetation, Nonphotosynthetic Vegetation, and Soils in AVIRIS Data. Department of Geological Sciences, University of Washington, Seattle. *Remote sens. environ.* 44: 255-269.

Serbin, G.; Daughtry, C.S.T.; Hunt, E.R. Jr.; Brown, D.J.; McCarty, G.W.; (2009a).

Effect of soil spectral properties on remote sensing of crop residue cover. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 1545–1558.

Serbin, G.; Daughtry, C.S.T.; Hunt, E.R. Jr.; Reeves, J.B. III; Bown, D.J.; (2009b).

Effects of soil composition and mineralogy on remote sensing of crop residue cover. *Remote Sensing of Environment*, 113: 224-238.

Serbin G., Hunt E. R., Daughtry C. S. T., et al. (2013).

Assessment of spectral indices for cover estimation of senescent vegetation. *Remote Sensing Letters* 4: 552–560.

Sloneker L.L., Moldenhauer W.C., (1977).

Measuring the amounts of crop residue remaining after tillage, *Journal of Soil and Water Conservation*, september-october.

Smith, A.M., Bullock, M.S., Ivie, C.V., (2000).

Estimating wheat residue cover using broad and narrow band visible-infrared reflectance. *Can. J. Remote Sens.* 26: 241–252.

Stemann, Dipl. Ing. agr. G., (2009).

Pfluglose Bodenbearbeitung – Ziele, Voraussetzungen, pflanzenbauliche Lösungsansätze, Wirtschaftlichkeit“; Fachtagung DMK, GKB, Landwirtschaftskammer NRW, FH Soest; Senden.

Stoner, E. R.; Baumgardner, M. F., (1981).

Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Science Society of America Journal, 45(6): 1161–1165.

Stoner, E. R.; Baumgardner, M. F.; Weismiller, R. A.; Biehl, L. L.; Robinson, B. F., (1980).

Extension of laboratory-measured soil spectra to field conditions. Soil Science Society of America Journal, 44: 572– 574.

Streck, N.A., Rundquist, D., Connot, J., (2002).

Estimating residue wheat dry matter from remote sensing measurements. Photogramm. Eng. Remote Sens. 68: 1193–1201.

Sonmez, N.K.; Slater, B. (2016).

Measuring intensity of tillage and plant residue cover using remote sensing. Eur. J. Remote Sens., 49: 121–135.

Tucker, C.V., (1977).

Use of near infrared/red radiance ratios for estimating vegetation biomass and physical status. 11th Int. Symp. on Remote Sensing of Environ., Ann Arbor, MI, Vol. 1. ERIM: 493-494.

Van Deventer, A., Ward, A.D., Gowda, P.H., Lyon, J.G., (1997).

Using thematic mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices. Photogramm. Eng. Remote Sens. (USA) 63 (1): 87–93.

Voßhenrich, H.; Brunotte, J., (2022).

Strohmanagement; erschienen in „Gute fachliche Praxis – Bodenfruchtbarkeit“; Hrsg.: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE); Bonn.

Voßhenrich H.-H., Brunotte J., Ortmeier B., (2003)

Methoden zur Bewertung der Strohverteilung und Einarbeitung, Landtechnik 2/2003

Voßhenrich H.-H., Brunotte J., Ortmeier B., (2005)

Giterrastermethode mit Strohindex zur Bewertung der Stroheinarbeitung, Landtechnik 6/2005

Wang, G., Wang, J., Zou, X., Chai, G., Wu, M., Wang, Z., (2019).

Estimating the fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil from MODIS data: Assessing the applicability of the NDVI-DFI model in the typical Xilingol grasslands. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 76: 154–166.

Westman, W. E., und Price, C V., (1988).

Spectral changes in conifers subjected to air pollution and water stress: Experimental studies. *I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26: 11-21.

Winnige, B., Corzelius, U., & Frielinghaus, M., (1998).

Indikation der aktuellen Erosions-gefährdung mit Hilfe der Bodenbedeckung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 88: 569-572.

Workman, J. Jr.; Weyer, L.; (2008)

Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy (Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group).

Yue, J. B.; Tian, Q. J., (2020).

Estimating fractional cover of crop, crop residue, and soil in cropland using broadband remote sensing data and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89: 1–15.

Yue, J.; Tian, Q.; Dong, X.; Xu, N., (2020).

Using broadband crop residue angle index to estimate the fractional cover of vegetation, crop residue, and bare soil in cropland systems. *Remote Sens. Environ.* 23

Zhongming, W., Lees, B.G., Feng, J., Wanning, L., Haijing, S., (2010).

Stratified vegetation cover index: a new way to assess vegetation impact on soil erosion. *Catena* 83: 87–93.

<https://ccsols.ch/de/bodeninformationen-erheben/bestimmungsmethoden-fuer-bodeneigenschaften/>;  
abgerufen am 20.02.2023

<https://seos-project.eu/classification/classification-c01-p05.de.html>;  
abgerufen am 20.02.2023

DLR: <https://www.dlr.de/content/de/missionen/enmap.html>;  
abgerufen am 21.02.2023

„Fernerkundung in weiter Ferne?“; Lilienthal, H.; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft  
[https://boden-fruchtbarkeit.de/wp-content/uploads/N%C3%A4hrstoffanalytik09\\_Fernerkundung-in-weiter-Ferne\\_Holger-Lilienthal.pdf](https://boden-fruchtbarkeit.de/wp-content/uploads/N%C3%A4hrstoffanalytik09_Fernerkundung-in-weiter-Ferne_Holger-Lilienthal.pdf);  
abgerufen am 21.02.2023

<https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/haetten-sies-gewusst/pflanzenbau/warum-werden-landmaschinen-immer-groesser>;  
abgerufen am 21.02.2023

CLAAS: <https://www.claas.de/unternehmen/historie/products/combines/mdb-matador>;  
abgerufen am 21.02.2023

DWD: <https://cdc.dwd.de/portal/202209231028/mapview>;  
abgerufen am 13.10.2023

Kopplin, J., (2004).

Use Direct 3D 8 To Fly Through the Munsell Color Solid  
<https://www.codeproject.com/articles/7751/use-direct3d-8-to-fly-through-the-munsell-color-so>;  
abgerufen am 22.11.2023

# Anhang

## Anhang 1: Visuelle Methoden

Die visuellen Methoden wurden naturgemäß zuerst entwickelt. Die Nutzung und Weiterentwicklung hält bis heute an, obwohl auch die Verwendung von Bildverarbeitungsverfahren durch eine immer bessere und kostengünstigere Kamera- und Computertechnik wächst. Nach wie vor werden die visuellen Methoden als Standardmethode genutzt. Im Anschluss folgen die Kurzbeschreibungen der visuellen Methoden.

Das **Schätzverfahren** stellt dabei die einfachste Methode zur Schätzung des Bodenbedeckungsgrades dar. Ein geschulter Beobachter übernimmt die Schätzung aller zu vergleichenden Bodenbedeckungsgrade. Das Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der FAL entwickelte dafür den „Fächer zur Bestimmung des Bodenbedeckungsgrades durch organische Rückstände“ (2. Auflage, 2007). In dem Fächer werden Fotos von mit Getreide- und Senfstroh bedecktem Boden mit Bedeckungsgraden von 10 bis 90% dargestellt.

Die Autoren SLONEKER und MOLDENHAUER beschrieben 1977 erstmals die **Perlenschnurmethode**, auch als **Zählmethode**, **Linien-Transekt-** oder **Linien-Punkt-Methode** bekannt, zur Untersuchung der Bodenbedeckung. Die Methode basiert auf der systematisierten Stichprobenausählung von Strohteilchen. Auf ca. 9x15 m großen Parzellen wurde eine Schnur diagonal zur Bearbeitungsrichtung über die Parzelle gespannt. Auf der Schnur befand sich nach jeweils 15 cm eine aufgereihete Perle, wodurch diese in 100 gleich große Abschnitte unterteilt wird. Wieder übernimmt ein geschulter Beobachter die Schätzung des Bedeckungsgrades, indem er die Anzahl der Perlen ermittelt, die ein „signifikantes“ Strohteilchen (mindestens 3 mm lang) berühren. Die Anzahl der ermittelten Perlen wird durch die Gesamtanzahl geteilt. Daraus ergibt sich „ein Schätzmaß für den von Ernterückständen bedeckten Anteil der Bodenoberfläche auf der beprobten Parzelle“ (PFORTE, 2010). MORRISON, LEMUNYON und BOGUSCH (1995) beschreiben verschiedene Varianten zum Versuchsaufbau, die auch PFORTE (2010) aufgreift:

- „äquidistante Anordnung der Perlen,
- äquidistante Anordnung von nicht punktförmigen (länglichen) Markierungen,
- statistische (randomisierte) Zufallsanordnung der Perlen,
- randomisierte Anordnung von Perlenpaaren (je 3 mm Abstand), zwischen denen die Messung erfolgen muss.“

WINNIGE, CORZELIUS und FRIELINGHAUS (1998) betonen ebenfalls, dass die bewerteten Objekte mindestens 3 mm groß sein sollen und die Perlen vollständig schneiden müssen. Je nach Versuchsfläche variiert die Anzahl der Wiederholungen. „Bei einer Größe bis zu 10 ha

werden 15 Wiederholungen empfohlen, bei einer Größe > 10 ha 25 Wiederholungen“ (WINNIGE et al., 1998).

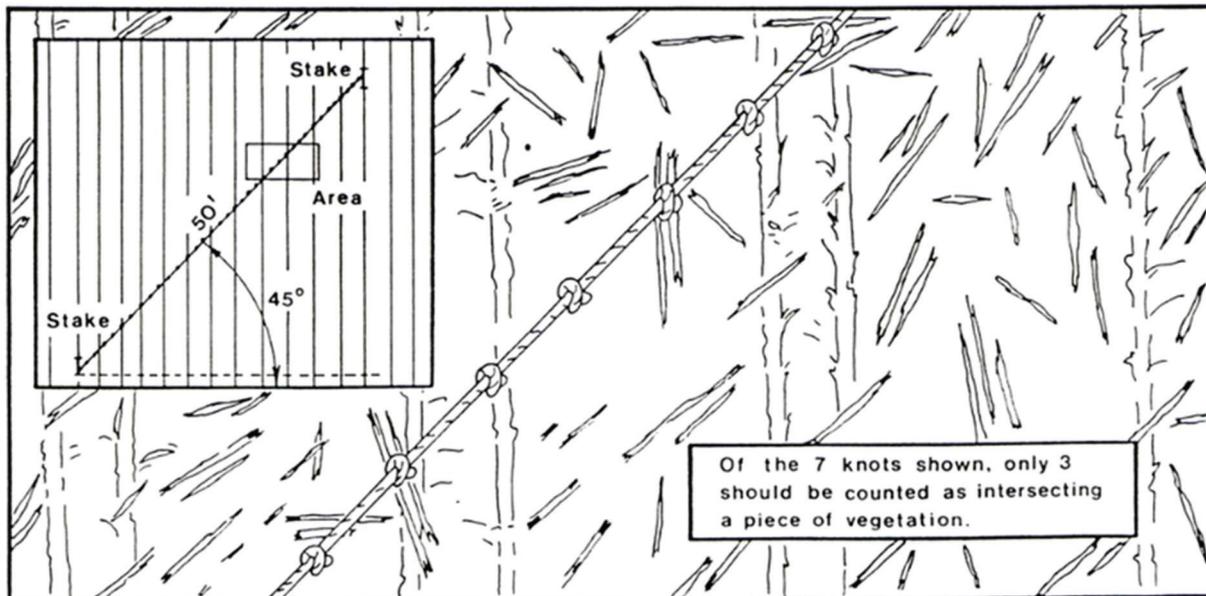


Abbildung 41: Übersicht und Nahaufnahme der Perlenschnurmethode

Quelle: Illinois Cooperative Extension Service

Das gleiche Prinzip kommt bei der **Drop-Pin-Methode** von MORRISON, POTTER, TORBERT und PANTONE (1996) zum Tragen. Eine Stange mit 50 in zufälligen Abständen angeordneten Löchern wird diagonal zur Bearbeitungsrichtung erhöht über die Fläche gelegt. Ein Stab mit einem Durchmesser von 2 mm wird nun durch die Löcher auf die Fläche fallen gelassen. Dasselbe wird in die andere diagonale Richtung ausgeführt. Nach 100 Durchführungen steht die Anzahl der „Treffer“ für den Bedeckungsgrad.

Die **Meterstick-Methode**, die 1978 von HARTWIG und LAFLEN entwickelt wurde, berücksichtigt die Größe, Form und Orientierung der Strohpartikel. Ein Meterstick, also ein Maßband bzw. Meterstab, wird rechtwinklig zur Druschrichtung platziert. Auf einer Seite des Meterstabes werden die Längen der Flächen der Strohpartikel, die am Meterstab anliegen, gemessen und aufsummiert. Die Summe geteilt durch die Gesamtlänge ergibt den Bodenbedeckungsgrad. Es sind mehrere Messungen erforderlich. Bei der Messung ist es notwendig, gerade von oben auf der Meterstab herabzuschauen.

Auch bei dieser Methode werden unterschiedliche Varianten beschrieben. Die Autoren des Artikels „Estimating Crop Residue Cover for Soil Erosion Control“ (2000) des Ministry of Agriculture nutzen eine andere Auswertungsmethode sich eher an die Perlenschnurmethode. Es werden nicht die Gesamtzentimeter am Meterstab bestimmt. Stattdessen wird der Meterstab in 25 gleiche Segmente unterteilt. Daraufhin werden die Schnittpunkte gezählt und

mit dem Faktor 4 multipliziert. In dem Artikel „Methods for measuring crop residue“ (2002) der Iowa State University of Science and Technology sollte der Stab zufällig in das Feld geworfen werden.

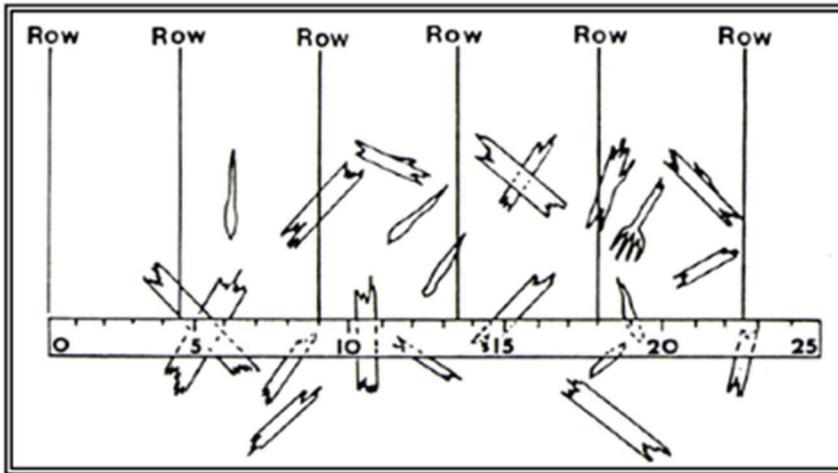


Abbildung 42: Meterstick-Methode

Quelle: Ministry of Agriculture, British Columbia

MORRISON, LEMUNYON und BOGUSCH (1995) beschreiben einige vom Prinzip her ähnliche Messgeräte wie bei der Perlenschnurmethode. Die radförmigen Geräte sind unter dem Begriff „**Residue Wheels**“ bekannt. Das erste Laufrad mit einem Umfang von 305 cm ist mit 10 weißen Kabelbindern in gleichen Abständen auf der Felge ausgestattet. Die drei anderen Räder haben einen Umfang von 203 cm und 8 gleichmäßig oder ungleichmäßig verteilte Zacken (Spikes) auf der Oberfläche. Die integrierten Zähler ermitteln die Anzahl der Bodenberührungen. Die „Treffer“-Zählungen (Strohpartikel mindestens 3 mm groß) müssen parallel per Hand aufgezeichnet werden. Das Rad wird über eine vorher festgelegte Linie über das Feld gerollt. Am Ende wird die Trefferzahl durch die Gesamtzahl geteilt.

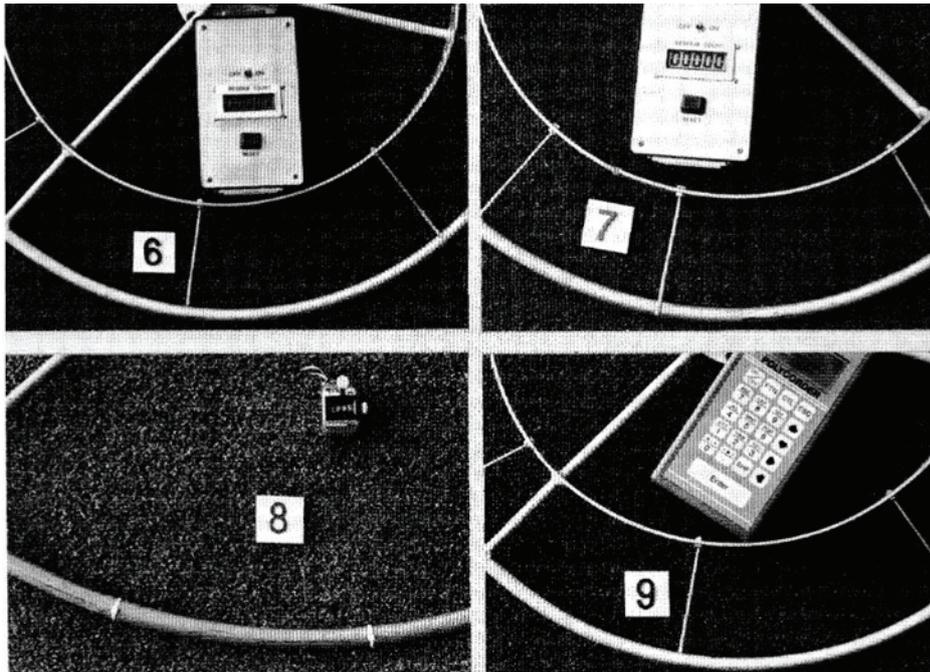


Abbildung 43: Vier verschiedene Varianten der "Residue Wheels" mit Spikes und Zählbox

Quelle: Morrison et al. (1995)

Des Weiteren gibt es verschiedene **Gitterraster-Methoden**. Dabei wird ein Rahmen verwendet, auf den ein Gitter z. B. aus sich schachbrettartig kreuzenden Schnüren aufgespannt wird. Häufig sind die Schnittpunkte 5 cm voneinander entfernt, woraus sich ein Raster aus 5x5 cm ergibt (PFORTE, 2010). Die Rahmengröße variiert. Der Bedeckungsgrad wird ähnlich wie bei den anderen Methoden ermittelt. Die Gitterpunkte, die über den Strohpartikeln liegen werden gezählt und durch die Gesamtanzahl geteilt. HARTWIG und LAFLEN (1978) vereinfachen die Methode, indem sie den 75x75 cm großen Rahmen mit dem 5x5 cm Raster fotografieren und an eine Leinwand projizieren. Durch das Auszählen an der Wand kann der Bedeckungsgrad bequem ermittelt werden („photografic grid method“). Auch MEYER et al. (1988) machen sich die Methode zu Nutze („manual photographic grid“). Sie projizieren ihre Dias auf ein Gittermuster an der Wand und zählen an insgesamt 130 Schnittpunkten aus, ob ein Strohrest den jeweiligen Schnittpunkt verdeckt.

MORRISON, POTTER, TORBERT und PANTONE (1996) verfeinerten diese Methode und entwickelten die **Punktrastermethode/“Dotscreens“**. Dabei wird eine 35-mm-Farbdiaaufnahme aus einer Überkopfposition auf drei verschiedene Leinwände projiziert. Nach MORRISON et al. (1996) wurden 300 Punkte mit einem Durchmesser von 3 mm auf zufällige Positionen projiziert. Der Mittelwert aus allen 900 Punkten galt als charakteristischer Bodenbedeckungsgrad.

VOßHENRICH, BRUNOTTE und ORTMEIER (2003, 2005) gehen noch einen Schritt weiter und entwickelten die **Giterraster-Methode mit Strohindex**. Die Methode soll dazu dienen, die Stroheinarbeitungsqualität von verschiedenen Bodenbearbeitungsgeräten bewerten zu können. Im ersten Schritt wird mithilfe von scharfen Werkzeugen ein Schlitz in den Boden geschlagen und eine Rinne bis zu 2 m Länge und der maximalen Tiefe der Bodenbearbeitung freigelegt. Mithilfe eines 180x22,5 cm großem Gitter mit einer Rasterung von 4,5x4,5 cm wird zunächst die Strohbedeckung an der Oberfläche entlang der Kante abgeschätzt, indem die fünf in Arbeitsrichtung hintereinander liegenden Raster zu einem 4,5x22,5 cm messenden rechteckigen Raster zusammengefasst und jedem Rasterrechteck ein Bedeckungsgrad von 0, 10, 25, 50, 75 oder 100 % zugeordnet wird. Die Summe aller Werte wird als Strohindex bezeichnet. Im nächsten Schritt wird die Einarbeitungsqualität entlang des Profils beurteilt. Das Gitter wird parallel zur Profilwand angebracht, sodass „eine Zeilenebene des Giterrasters mit der Oberkante der Bodenoberfläche ab[schließt]“ (VOßHENRICH et al., 2003). Nun wird für jedes Raster die Strohbedeckung der Wand erfasst. Die gesammelten Boniturwerte sollen einen Eindruck über die Verteilung der Strohmasse nach der Ernte und die Qualität der Einarbeitung bieten.

Insgesamt basieren die visuellen Methoden zur Bewertung der Bodenbedeckungsgrade auf der Einschätzung durch geschulte Beobachter oder einer stichprobenartigen Auszählung. Das große Problem der Schätzmethode liegt in der Subjektivität. Laut HENSEL (2003) kann der geschätzte Bodenbedeckungsgrad einer und derselben Person u.U. schon deutlich abweichen, wenn das Bild um 180° gedreht wurde. Außerdem zeigten Untersuchungen, dass die Bedeckung bei einer stichprobenartigen Auszählung systematisch überschätzt wird. PFORTE (2010) kam bei dem Vergleich der Gitternetzmethode, Meterstick-Methode und einer Bildanalyse zu der Erkenntnis, dass „die leichte Überbewertung der Bedeckung [...] dadurch verursacht zu sein [scheint], dass die Größe der stichprobenartig erfassten Objekte beim Auszählen der Gitterpunkte nicht berücksichtigt wird, so dass sie bei der gewählten Maschenweite des Rasters systematisch als zu groß eingeschätzt werden“. Abbildung 4 zeigt zwei solcher „Treffer“ einer stichprobenartigen Auszählung. Die Bedeckungsgrade sind offensichtlich verschieden. Jedoch wird der Bedeckungsgrad bei dem dargestellten Raster für beide Bereiche gleich bewertet.

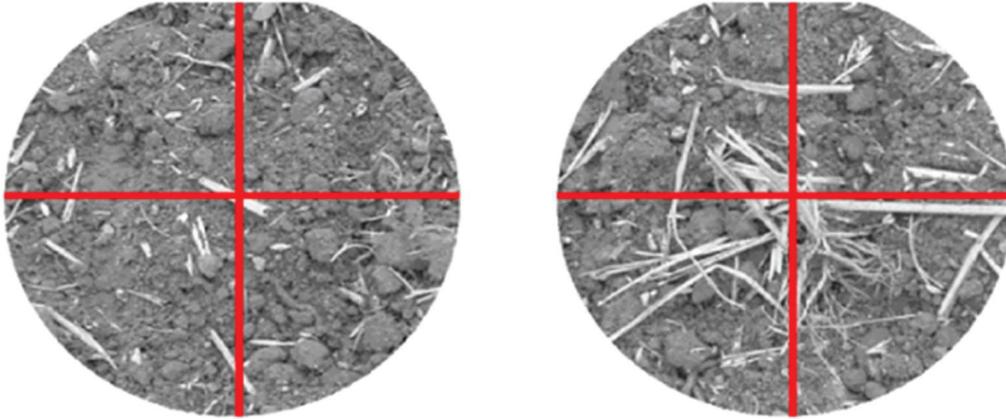


Abbildung 44: "Treffer" einer stichprobenartigen Zählung der Bestimmung des Bedeckungsgrades

Quelle: Pforte, 2010

Weiterhin schreibt der Autor, dass eine geringere Rasterung zu genaueren Analyseergebnissen, aber genauso zu einem enorm hohen Zählaufwand führen würde. „Damit wäre dann auch der Hauptvorteil gegenüber der präziseren Meterstick-Methode aufgehoben, welche im Laborversuch nicht mit einem systematischen Fehler behaftet zu sein scheint, aber mit Abstand den größten Anspruch hinsichtlich Zeitaufwand und Konzentration an den Beobachter stellt“ (PFORTE, 2010). Die Meterstick-Methode lieferte in seiner Forschung die besten Ergebnisse. Da allerdings viele kleine Objekte präzise gemessen und aufaddiert werden müssen, gilt dieses Verfahren als enorm aufwändig.

Diese Beobachtungen sind deckungsgleich mit den Versuchen von MORRISON et al. (1996) und WINNIGE et al. (1998), die ähnliche visuelle Auszähl-Methoden mit der Meterstick-Methode oder einer Bildanalyse verglichen. Außerdem schlagen MORRISON et al. (1996) vor, nicht nur 100 oder wenige hundert Punkte bei der Punktrastermethode/„Dotscreens“ zu verwenden, da es sonst ebenfalls zu einer Überschätzung der Bodenbedeckung kommt.

## **Eidesstaatliche Erklärung**

Ich, Julia Johannes, erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Thema „Quantifizierung der Strohbedeckung und Strohmenge von Ackerböden mit Hilfe von hyperspektralen Messungen und Bildauswertung“ selbstständig und ohne Benutzung anderer als angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben sind.

Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer andern Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Dessau-Roßlau, den 09.06.2024