

**Entwicklung eines Verfahrens zur dualen
Anwendung von TrueColor-Sensoren bei der
Pflanzendiskriminierung sowie Stickstoff-Düngung**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

Andreas Christ

aus

Straßfeld

Bonn 2022

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers

Korreferent: Prof. Dr. Mathias Becker

Tag der mündlichen Prüfung: 08.11.2022

Angefertigt mit Genehmigung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2022

Im Selbstverlag: Andreas Christ

Bezugsquelle: Institut für Landtechnik

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Nußallee 5

53115 Bonn

Meinen Eltern

Kurzfassung

Nicht erst seit dem Beschluss der Europäischen Union zur Umsetzung der Green Deal-Strategie ist die Reduktion von Pflanzenschutzmitteln und Mineraldüngern bei gleichzeitiger Versorgungssicherheit mit Lebensmitteln eine zentrale Herausforderung der Agrarbranche. In diesem Zusammenhang wird sowohl eine Steigerung der Biodiversität, als auch die Reduktion von Treibhausgasemissionen angestrebt. Neben diesen ökologischen Gesichtspunkten, stellt die Sicherstellung der Nahrungsmittelverfügbarkeit unter den aktuell vorherrschenden Marktbedingungen eine wesentliche Aufgabe der Landwirtschaft für die Gesellschaft dar. Zur Vereinbarung dieser beiden Forderungen können sensorbasierte Entscheidungshilfen, neben vielfältigen pflanzenbaulichen Maßnahmen, einen Beitrag zur bedarfsgerechten Pflanzenversorgung leisten.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Verfahrens zur dualen Anwendung von TrueColor-Sensoren bei der Pflanzendiskriminierung sowie Stickstoff-Düngung. Die Kombination dieser beiden Anwendungsgebiete stellt gegenüber aktuell verfügbaren Systemen eine technische Neuerung dar. Eine duale Anwendung wurde mit bestehenden Sensoren bisher nicht erreicht und kann einen weiteren Anreiz zur Marktetablierung sensorbasierter Pflanzenschutztechnik schaffen. Neben einer zunehmenden Auslastung und damit verbundener Rentabilitätssteigerung, spart dieser kombinierte Ansatz gegenüber Einzelsensoren ebenfalls Ressourcen durch den Wegfall weiterer benötigter Komponenten.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Pflanzendiskriminierung ist die Detektion (Pflanze auf Boden) unter Verwendung der modifizierten euklidischen Farbdifferenz (ΔE_{IR}) für alle untersuchten Pflanzenarten und Entwicklungsstadien möglich. Bei der Pflanzendifferenzierung erfolgt die Beurteilung über die Differenzierungsrate in Abhängigkeit der untersuchten Kulturpflanze. Zuckerrüben bis BBCH 12 sind durch eine weitere Modifikation der euklidischen Farbdifferenz (ΔE_{Diff}) von 93,5 % der untersuchten Unkräuter differenzierbar. Ab BBCH 14 ist eine vollständige Differenzierbarkeit der Zuckerrübe von den untersuchten Unkräutern möglich. Aufgrund phänotypischer Merkmale ist eine vollständige Differenzierbarkeit für Soja bereits ab BBCH 12 und Mais ab BBCH 13 möglich.

Die Untersuchungen hinsichtlich der Eignung des Sensorarrays zur teilschlagspezifischen N-Düngung zeigen starke Zusammenhänge zwischen den Kanälen des CIELab-Farbraums und der N-Stufe. Über die untersuchten Pflanzenarten und Entwicklungsstadien hinweg, weist der L-Kanal bezüglich der N-Stufe ein durchschnittliches Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,764$ auf. Der a-Kanal kann aufgrund eines durchschnittlichen Bestimmtheitsmaßes von $R^2 = 0,835$ gegenüber dem L-Kanal als besser geeignet bezeichnet werden. Mit durchschnittlich $R^2 = 0,871$ ist der Zusammenhang zwischen der b-Reflexion und den N-Stufen am höchsten. Dieses Ergebnis wird auch durch Untersuchungen innerhalb der BBCH-Stadien bestätigt, wie die hohen Korrelationskoeffizienten des b-Kanals bezüglich der Referenzparameter Pflanzenbedeckung ($r = -0,965$), Frischmasse ($r = -0,99$) und Pflanzenhöhe ($r = -0,99$) zeigen. Zusätzlich weisen die b-Reflexionswerte die geringsten Abhängigkeiten bezüglich des Entwicklungsstadiums auf, wodurch dieser Kanal aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zur Bestimmung der N-Stufe am besten geeignet ist.

Abstract

Not only since the European Union's decision to implement the Green Deal strategy, the reduction of pesticides and mineral fertilizers has been a central challenge for the agricultural sector, while at the same time ensuring a secure food supply. In this context, both an increase in biodiversity and the reduction of greenhouse gas emissions are targeted. In addition to these ecological aspects, ensuring food availability under the currently prevailing market conditions is an essential task of agriculture for society. To reconcile these two demands, sensor-based decision making aids, in addition to a wide range of plant cultivation measures, can contribute to demand-controlled plant supply.

The aim of this work was the development of a method for the dual application of TrueColor sensors in plant discrimination as well as nitrogen fertilization. The combination of these two application areas represents a technical innovation compared to currently available systems. A dual application has not yet been achieved with existing sensors and can create a further incentive for the market establishment of sensor-based crop protection technology. In addition to increasing capacity utilization and the associated increase in profitability, this combined approach also saves resources compared to single sensors by eliminating the need for additional components.

In the context of plant discrimination studies, plant detection (plant on soil) using modified Euclidean color difference (ΔE_{IR}) is possible for all investigated plant species and growth stages. For plant differentiation, the assessment is made using the differentiation rate as a function of the investigated crops. Sugar beet up to BBCH 12 can be differentiated to 93.5 % of the examined weeds by a further modification of the Euclidean color difference (ΔE_{Diff}). From BBCH 14 onwards, complete differentiability of sugar beet from the investigated weeds is possible. Based on phenotypic characteristics, a complete differentiation is possible for soybean from BBCH 12 and maize from BBCH 13.

The investigations regarding the suitability of the sensor array for site-specific nitrogen fertilization show strong correlations between the channels of the CIE Lab color space and the nitrogen level. Across the investigated plant species and growth stages, the L channel shows an average coefficient of determination of $R^2 = 0.764$ concerning the nitrogen level. The a channel can be considered more suitable than the L channel due to an average coefficient of determination of $R^2 = 0.835$. With an average $R^2 = 0.871$, the dependence between the b reflection and the nitrogen level is the highest. This result is also confirmed by investigations within the BBCH stages, as shown by the high correlation coefficients of the b channel concerning the reference parameters plant cover ($r = -0.965$), fresh mass ($r = -0.99$), and plant height ($r = -0.99$). In addition, the b reflection shows the lowest dependencies concerning the growth stage, making this channel the most suitable for determining nitrogen level due to the high reproducibility of the measurement results.

Vorveröffentlichungen der Dissertation

Teilergebnisse aus dieser Arbeit wurden mit Genehmigung der Fakultät, vertreten durch den Mentor der Arbeit, Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers, in folgenden Beiträgen vorab veröffentlicht:

Christ, A.; Schmittmann, O.; Schulze Lammers, P. (2021): Plant Differentiation with TrueColor Arrays for Online Precision Plant Protection. 48. International Symposium of Actual Tasks on Agricultural Engineering, 02. – 04. März 2021, Opatija, Kroatien, 347 – 359.

Christ, A.; Schmittmann, O.; Schulze Lammers, P. (2021): Study on Deployment of a TrueColor Sensor Array for Dual Use – Weed Detection and N-Fertilizer Application. EurAgEng 2021 conference, 04. – 08. Juli 2021, Évora, Portugal, 484 – 494.

Christ, A.; Schmittmann, O.; Schulze Lammers, P. (2022): Dual use sensor array for crop management in arable farming by CIELab color space – detection of N supply and plant discrimination. 79. International Conference on Agricultural Engineering LAND.TECHNIK 2022, 25. – 26. Februar 2022, Hannover, Deutschland, VDI-Berichte Nr. 2395, S. 97 – 104.

Christ, A.; Schmittmann, O.; Schulze Lammers, P. (2022): Capability of the TrueColor Sensor Array for Determining the Nitrogen Supply in Winter Barley (*Hordeum vulgare* L.). Sensors, 22, 6032. <https://doi.org/10.3390/s22166032>

I	Inhaltsverzeichnis	
I	Inhaltsverzeichnis	I
II	Abbildungsverzeichnis	IV
III	Tabellenverzeichnis	VIII
IV	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	XI
1	Einleitung	1
2	Stand des Wissens und der Technik	3
2.1	Gebräuchliche Farbräume und deren Unterscheidung	3
2.2	Teil A: Unkrauterkenung und –diskriminierung	8
2.2.1	Definition des Begriffs Unkraut.....	8
2.2.2	Leitunkräuter in Reihen- und Flächenkulturen.....	9
2.2.3	Einteilung von Pflanzenerkennungssystemen.....	11
2.2.3.1	Abstandssensoren.....	11
2.2.3.2	Georeferenzierung.....	12
2.2.3.3	Lichtschranken	12
2.2.3.4	Tastsensoren.....	13
2.2.3.5	Reflexionswertbasierte Auswertelgorithmen zur Pflanzendifferenzierung.....	13
2.2.4	Systematisierung pflanzenspezifischer Applikationstechniken und deren Anwendung in der Praxis	17
2.3	Teil B: Sensorgestützte Stickstoffdüngung	22
2.3.1	Hintergrund und Effekte der Stickstoffdüngung im Getreidebau.....	22
2.3.2	Auswertelgorithmen zur Stickstoffdüngung	23
2.3.3	Systeme zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung in der landwirtschaftlichen Praxis.....	25
2.4	Zielsetzung und Anforderungsliste	27
3	Material und Methoden	30
3.1	TrueColor-Sensorarray.....	30
3.2	Teil A: Versuche zur Pflanzendifferenzierung von Unkräutern und Nutzpflanzen am Beispiel von Zuckerrüben, Mais und Soja.....	33
3.2.1	Versuchsaufbau des statischen Prüfstands	33

3.2.2	Beschreibung verwendeter Versuchsparameter zur Pflanzendiskriminierung	34
3.3	Teil B: Einsatz des TrueColor-Sensorarrays zur Messung der Stickstoffversorgung bei Winterweizen und Wintergerste	36
3.3.1	Feldversuchsaufbau zur Kalibrierung der TrueColor-Sensorarrays	36
3.3.2	Versuchsparameter	40
3.3.3	Feldversuchsbeschreibung zur Anwendung der TrueColor-Sensorarrays unter Praxisbedingungen	42
3.4	Statistische Auswertung	44
4	Ergebnisse und Diskussion	45
4.1	Teil A: Einsatz des TrueColor-Sensorarrays zur Pflanzendiskriminierung	45
4.1.1	Wertebereiche charakteristischer Reflexionskanäle zur Pflanzendiskriminierung und deren statistische Beschreibung	45
4.1.2	Pflanzendetektion mittels IR-Kanal sowie CIELab-Farbraum	48
4.1.2.1	Detektionslücken durch Analyse von Einzelkanälen	48
4.1.2.2	Pflanzendetektion mittels euklidischem Abstand ΔE	54
4.1.2.3	Vergleich des Detektionsvermögens von Einzelkanälen und euklidischem Abstand	56
4.1.3	Blattflächenentwicklung untersuchter Pflanzenarten	58
4.1.4	Pflanzendifferenzierung mittels IR-Kanal sowie CIELab-Farbraum	59
4.1.4.1	Pflanzendifferenzierung durch Analyse von Einzelkanälen	60
4.1.4.2	Pflanzendifferenzierung mittels euklidischem Abstand ΔE_{Diff}	72
4.1.4.3	Bewertung des Differenzierungsvermögens anhand des Vergleichs von Spannweite und Signifikanz	75
4.2	Teil B: Einsatz des TrueColor-Sensorarrays zur teilschlagspezifischen Stickstoff-Düngung	83
4.2.1	Wertebereiche charakteristischer Reflexionskanäle zur Anwendung bei der Stickstoff-Düngung	83
4.2.2	Einfluss der Messfläche auf die Aussagefähigkeit der Reflexionsmesswerte	88
4.2.3	Einfluss der Pflanzenbedeckung auf die Reflexionseigenschaften	91
4.2.4	Einfluss der Frischmasse auf die Reflexionseigenschaften	101
4.2.5	Einfluss der Pflanzenhöhe auf die Reflexionseigenschaften	105
4.2.6	Einfluss der N-Stufe auf die Reflexionseigenschaften	109

4.2.7	Vergleich zwischen den Reflexionskanälen und den SPAD-Werten	117
4.3	Teil C: Vergleich zwischen den Reflexionskanälen und den Kornerträgen ..	120
4.4	Diskussion der Entwicklungsstände	125
5	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	131
6	Literaturverzeichnis	133
7	Anhang	143
7.1	Modellversuch zum Ansprechverhalten der Reflexionskanäle in Abhängigkeit des Pflanzenbedeckungsgrades	143
7.2	Witterungsbedingungen während der Vegetationszeit der Freilandversuche	144
7.3	Homogene Untergruppen der Reflexionswerte zur Pflanzendiskriminierung	146
7.4	Aufschlüsselung der Einzelkanäle zur Pflanzendifferenzierung	150
7.5	Reflexionsdatenbank zur Pflanzendiskriminierung sowie N-Düngung	151
7.6	Absolute N-Zufuhr der Stickstoffsteigerungsversuche	154
7.7	Untersuchung des Einflusses der Messfläche bei der Stickstoff-Düngung...	155
7.8	Regressionsmodelle zwischen den Reflexionswerten des a-Kanals und der Pflanzenbedeckung	159
7.9	Regressionsmodelle der Reflexionskanäle bezüglich des Frischmasse-Ertrags sowie der Pflanzenhöhe	159
7.10	Ergebnisse der nasschemischen Analyse von Wintergerste 2020.....	160
8	Danksagung	162

II Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Spektralband im Untersuchungsbereich (Sensor Instruments, 2019)	3
Abb. 2-2: Tristimuluswerte X, Y, Z in Abhängigkeit der Wellenlänge (Sensor Instruments, 2019, verändert).....	4
Abb. 2-3: Schematische Darstellung des CIELab-Farbraums (Weatherall & Coombs, 1992).....	5
Abb. 2-4: Schematische Darstellung des HSV-Farbraums (Marggraf, 2019, verändert) 6	
Abb. 2-5: Schematische Darstellung des RGB-Farbraums (Beyerer et al., 2012)	7
Abb. 2-6: Einteilung der Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Farbräume (Beyerer et al., 2012, verändert)	8
Abb. 2-7: Pflanzenerkennung mittels Lichtgitter-Sensor (Fender et al., 2005)	12
Abb. 2-8: Verteilung der Bildpunkte im RGB-Farbraum inklusive Grau-Achse (OL) bei natürlicher Beleuchtung von Pflanzen (schwarz) und Boden (grau) (Tian & Slaughter, 1998).....	14
Abb. 2-9: Ablaufschema zur Erzeugung eines bispektralen Differenzbildes am Beispiel zweier Zuckerrübenpflanzen und daraus resultierender Steigerung der Differenzierbarkeit (Gerhards & Christensen, 2003)	16
Abb. 2-10: Klassifizierung des Herstellerangebotes pflanzenspezifischer Applikationstechnik und deren Anwendungsbeispiele	18
Abb. 2-11: Hackgerät der Fachhochschule Osnabrück zur georeferenzierten Unkrautbekämpfung (Müter, 2017).....	19
Abb. 2-12: Rotationshacke des Instituts für Landtechnik, Universität Bonn (Müter, 2017).....	20
Abb. 2-13: Verlauf der Stickstoff-Aufnahme und deren Auswirkungen über die Entwicklungsstadien von Wintergetreide (Yara, 2021).....	23
Abb. 3-1: Oben: Anordnung der Einzelsensoren/ Lichtquellen des verwendeten TrueColor-Sensorarrays, unten: Sensitivität S der Filterfunktionen nach Standard der CIE 1931 ohne IR-Kanal (Mazet, 2016).....	30
Abb. 3-2: Statischer Versuchsaufbau zur reproduzierbaren Aufnahme des Reflexionsverhaltens verschiedener Pflanzenarten inklusive Boden als Hintergrund...33	
Abb. 3-3: Anordnung der Versuchspartellen zur Stickstoff-Kalibrierung des TrueColor-Sensors (oben) sowie Versuchsaufbau mit Auslegearm für TrueColor-Sensorarrays zur Messung der Stickstoffsteigerungspartellen (unten)	39
Abb. 3-4: Übersicht der Versuchsanlage zum Praxiseinsatz der TrueColor-Sensorarrays zur Messung der Stickstoffversorgung bei Winterweizen (Schmittmann, 2018).....	42
Abb. 4-1: IR-Reflexionswerte der untersuchten Pflanzenarten sowie Störeinfluss des Bodens.....	48
Abb. 4-2: L-Reflexionswerte der untersuchten Pflanzenarten sowie Störeinfluss des Bodens.....	50
Abb. 4-3: a-Reflexionswerte der untersuchten Pflanzenarten sowie Störeinfluss des Bodens.....	51

Abb. 4-4: b-Reflexionswerte der untersuchten Pflanzenarten sowie Störeinfluss des Bodens.....	52
Abb. 4-5: Einfluss des IR-Kanals auf die Wahrnehmbarkeit des Farbunterschieds auf trockenem Boden nach DIN EN ISO/CIE 11664-4 (Deutsches Institut für Normung, 2019).....	55
Abb. 4-6: Mittelwerte der Blattflächen in den ausgewählten Entwicklungsstadien der untersuchten Pflanzenarten inklusive Fehlerresiduen.....	58
Abb. 4-7: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Blattfläche und IR-Kanal.....	60
Abb. 4-8: Median, Minima und Maxima der Reflexionswerte zur Differenzierbarkeit der Pflanzenarten anhand des IR-Kanals.....	62
Abb. 4-9: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Blattfläche und L-Kanal.....	63
Abb. 4-10: Median, Minima und Maxima der Reflexionswerte zur Differenzierbarkeit der Pflanzenarten anhand des L-Kanals.....	64
Abb. 4-11: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Blattfläche und a-Kanal.....	66
Abb. 4-12: Median, Minima und Maxima der Reflexionswerte zur Differenzierbarkeit der Pflanzenarten anhand des a-Kanals.....	67
Abb. 4-13: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Blattfläche und b-Kanal.....	69
Abb. 4-14: Median, Minima und Maxima der Reflexionswerte zur Differenzierbarkeit der Pflanzenarten anhand des b-Kanals.....	70
Abb. 4-15: Wahrheitsmatrix zur Differenzierungsentscheidung des TrueColor-Sensorarrays.....	75
Abb. 4-16: Mittelwert und Standardabweichung der Reflexionsmesswerte (IR-, L-, a- und b-Kanal) in Abhängigkeit der verwendeten Datengrundlage am Beispiel von Winterweizen in BBCH 32 aus 2021.....	89
Abb. 4-17: Pflanzenbedeckung von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 24 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N in den Versuchsjahren 2020 (oben) und 2021 (unten).....	92
Abb. 4-18: Pflanzenbedeckung von Winterweizen in den Entwicklungsstadien BBCH 13 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2021.....	94
Abb. 4-19: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Pflanzenbedeckung und IR-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021.....	96
Abb. 4-20: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Pflanzenbedeckung und L-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021.....	98
Abb. 4-21: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Pflanzenbedeckung und a-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021.....	99

Abb. 4-22: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Pflanzenbedeckung und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021	101
Abb. 4-23: Frischmasse-Ertrag von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N in den Versuchsjahren 2020 (oben) und 2021 (unten).....	102
Abb. 4-24: Frischmasse-Ertrag von Winterweizen in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2021	103
Abb. 4-25: Pflanzenhöhe von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N in den Versuchsjahren 2020 (oben) und 2021 (unten).....	106
Abb. 4-26: Pflanzenhöhe von Winterweizen in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2021	107
Abb. 4-27: C/N-Verhältnis von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2020.....	110
Abb. 4-28: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen N-Stufe und IR-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021	111
Abb. 4-29: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen N-Stufe und L-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021	113
Abb. 4-30: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen N-Stufe und a-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021	114
Abb. 4-31: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen N-Stufe und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021	116
Abb. 4-32: SPAD-Werte von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 24 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N in den Versuchsjahren 2020 (oben) und 2021 (unten).....	118
Abb. 4-33: SPAD-Werte von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 24 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2021	119
Abb. 4-34: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Kornertrag und Pflanzenbedeckung, Pflanzenhöhe sowie SPAD-Wert in Winterweizen	121
Abb. 4-35: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Kornertrag und IR-, L-, a- und b-Kanal von Winterweizen mittels Cluster-Bildung mit einer Breite von 0,5 t ha ⁻¹	123
Abb. 7-1: Reflexionswertverläufe in Abhängigkeit des Pflanzenbedeckungsgrades durch Vermessung von homogenen Laubblättern (Objekt) unter konstanten äußeren Einflüssen.....	143
Abb. 7-2: Monatliche Niederschlags- und Temperaturwerte über den Versuchszeitraum 2019/2020 im Vergleich zum langjährigen Niederschlags- und Temperaturmittel am Campus Klein-Altendorf (CKA, 2020b)	144
Abb. 7-3: Monatliche Niederschlags- und Temperaturwerte über den Versuchszeitraum 2020/2021 im Vergleich zum langjährigen Niederschlags- und Temperaturmittel am Campus Klein-Altendorf (CKA, 2020b)	145

Abb. 7-4: Lineares Regressionsmodell des Frischmasse-Ertrags aus 2020 mittels Reflexionswerten der Mischfläche für den b-Kanal in den Entwicklungsstadien BBCH 32 ($p = 2.259E-20$), BBCH 39 ($p = 8.455E-15$), und BBCH 59 ($p = 1.322E-14$)	159
Abb. 7-5: Lineares Regressionsmodell der Pflanzenhöhe mit den Reflexionswerten des IR- ($p = 2,075E-14$), L- ($p = 1,740E-14$) und b-Kanals ($p=8,409E-06$) über die Entwicklungsstadien BBCH 32, 39, 59 in Wintergerste 2020	160
Abb. 7-6: Nasschemisch bestimmter C-Gehalt von WG 2020.....	160
Abb. 7-7: Nasschemisch bestimmter N-Gehalt von WG 2020.....	161

III Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Einordnung der durch ΔE beschriebenen Farbunterschiede.....	5
Tab. 2-2: Übersicht der Leitunkräuter in Flächenkulturen und deren botanische Einordnung (Gerhards, 1998).....	9
Tab. 2-3: Übersicht der Leitunkräuter in Reihenkulturen und deren botanische Einordnung (Dicke, 2005; Eßer, 2020; Gerhards, 1998).....	10
Tab. 2-4: Technische Spezifikationen aktiv beleuchteter Reflexionssensoren zur Stickstoffdüngung (Drücker, 2016; Kendall et al., 2017; Whelan, 2015; Xu, 2008)	26
Tab. 2-5: Anforderungsliste zur Entwicklung eines Sensors zur dualen Anwendung in Anlehnung der Konstruktionsrichtlinien.....	28
Tab. 3-1: Technische Daten des TrueColor-Sensorarrays.....	32
Tab. 3-2: Übersicht verwendeter Pflanzenarten und deren botanische Einordnung.....	34
Tab. 3-3: Übersicht verwendeter Pflanzenarten und deren Entwicklungsstadien (BBCH) zur Erhebung der Pflanzenreflexionswerte	35
Tab. 3-4: Übersicht der Düngetermine in den Stickstoffsteigerungsversuchen 2020/2021	37
Tab. 3-5: Übersicht der Düngegaben sowie Grundversorgung aus mineralisiertem Stickstoff (N_{\min}) in den Stickstoffsteigerungsversuchen 2020/2021	38
Tab. 3-6: Mess- und Boniturtermine der Stickstoffsteigerungsversuche in den Versuchsjahren 2020/ 2021	40
Tab. 3-7: Entwicklungsstadien und Termine zur Stickstoffapplikation und Datenerhebung	43
Tab. 4-1: Korrelation zwischen der Pflanzenbedeckung und den Reflexionswerten bei homogen erscheinenden Laubblättern	45
Tab. 4-2: Mittelwerte ($\bar{\sigma}$) und Standardabweichungen (σ) der IR-, L-, a- und b-Reflexionswerte von Mischfläche (Pflanze + Boden) sowie Hintergrund (Boden)	47
Tab. 4-3: Extremstellen für Wertebereich und Detektionslücke der einzelnen Reflexionskanäle inklusive des Detektionskoeffizienten	53
Tab. 4-4: Detektierbare Pflanzenarten sowie deren Detektionsrate mit dazugehörigen Entwicklungsstadien mittels IR- und CIELab-Kanälen, sowie ΔE und ΔE_{IR} auf trockenem Boden.....	57
Tab. 4-5: Differenzierbare Pflanzenkombinationen sowie deren Differenzierungsrate mit dazugehörigen Entwicklungsstadien mittels IR- oder CIELab-Kanälen.....	71
Tab. 4-6: Differenzierbare Pflanzenkombinationen sowie deren Differenzierungsrate mit dazugehörigen Entwicklungsstadien mittels ΔE_{Diff}	73
Tab. 4-7: Differenzierbare Pflanzenkombinationen sowie deren Differenzierungsrate mit dazugehörigen Entwicklungsstadien mittels ΔE_{IR_Diff}	74
Tab. 4-8: Signifikanzmatrix des IR-Reflexionskanals, * signifikante Unterscheidung bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $\alpha < 0,05$	77
Tab. 4-9: Signifikanzmatrix des L-Reflexionskanals, * signifikante Unterscheidung bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $\alpha < 0,05$	78
Tab. 4-10: Signifikanzmatrix des a-Reflexionskanals, * signifikante Unterscheidung bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $\alpha < 0,05$	79

Tab. 4-11: Signifikanzmatrix des b-Reflexionskanals, * signifikante Unterscheidung bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $\alpha < 0,05$	80
Tab. 4-12: Vergleich differenzierbarer Pflanzenkombinationen mittels Spannweite (X) und signifikanter Unterschiede (*), grün: richtig positiv + negativ, gelb: falsch positiv, rot: falsch negativ	82
Tab. 4-13: Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (σ) der IR-, L-, a- und b-Reflexionswerte für die Düngestufen von Wintergerste in den untersuchten Pflanzenstadien BBCH 24, 32, 39 und 59 in den Versuchsjahren 2020 und 2021	84
Tab. 4-14: Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (σ) der IR-, L-, a- und b-Reflexionswerte für die Düngestufen von Winterweizen in den untersuchten Pflanzenstadien BBCH 13, 23, 32, 39 und 59 in den Versuchsjahren 2020 und 2021	87
Tab. 4-15: Homogene Untergruppen des Post-hoc-Tests nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von $\alpha < 0,05$ für Datengrundlagen von 0,1 % bis 100 % in Abhängigkeit der N-Stufe sowie des Reflexionskanals	90
Tab. 4-16: Korrelationskoeffizienten zwischen den Frischmasse-Erträgen sowie dem IR-, L-, a- und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021	104
Tab. 4-17: Korrelationskoeffizienten zwischen den Pflanzenhöhen sowie dem IR-, L-, a- und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021	108
Tab. 4-18: Korrelationskoeffizienten zwischen den SPAD-Werten sowie dem IR-, L-, a- und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021	120
Tab. 4-19: Bestimmtheitsmaß sowie Regressionsgeradengleichung des Zusammenhangs zwischen Kornertrag und IR-, L-, a- und b-Kanal von Winterweizen mittels Cluster-Bildung mit einer Breite von $0,5 \text{ t ha}^{-1}$	124
Tab. 7-1: Homogene Untergruppen des IR-Kanals.....	146
Tab. 7-2: Homogene Untergruppen des L-Kanals	147
Tab. 7-3: Homogene Untergruppen des a-Kanals	148
Tab. 7-4: Homogene Untergruppen des b-Kanals	149
Tab. 7-5: Übersicht differenzierbarer Pflanzen durch Analyse der Einzelkanäle	150
Tab. 7-6: Wertebereiche der IR-, L-, a- und b-Reflexion von Mischfläche (Pflanze + Boden) sowie Hintergrund (Boden) durch die Verrechnung der Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (σ)	151
Tab. 7-7: Wertebereiche der IR-, L-, a- und b-Reflexion durch die Verrechnung der Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (σ) in Abhängigkeit des BBCH-Stadiums sowie der N-Stufe.....	153
Tab. 7-8: Zugeführte absolute Stickstoffmenge je Entwicklungsstadium und Variante in Wintergerste.....	154
Tab. 7-9: Zugeführte Stickstoffmenge je Messtermin und Variante in Winterweizen..	154
Tab. 7-10: Homogene Untergruppen bei 0,1 % Datengrundlage	155
Tab. 7-11: Homogene Untergruppen bei 1 % Datengrundlage	156
Tab. 7-12: Homogene Untergruppen bei 10 % Datengrundlage	157
Tab. 7-13: Homogene Untergruppen bei 100 % Datengrundlage	158

Tab. 7-14: Geradengleichungen der Regressionsgeraden zwischen Pflanzenbedeckung und a-Kanal.....	159
---	-----

IV Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung/ Symbol	Einheit	Bedeutung
$\hat{\sigma}$		Standardfehler der Regression
ΔE		Euklidischer Farbabstand
ΔE_{Diff}		Euklidischer Farbabstand zur Pflanzendifferenzierung
a		Grün-Rot-Achse
AHL		Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung
b		Blau-Gelb-Achse
B		Blauer Pixel
BBCH		Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie
C		Kohlenstoff
CCD		Charge-coupled device
CMOS		Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DB		Differenzbild
DK		Detektionskoeffizient
EK		Echte Kamille
ExG		Normalized Excess Green Color Index
FFT		Fast Fourier Transformation
FK		Floh-Knöterich
G_1, G_2		Grüner Pixel
GB		Gänseblume
GPS		Global Positioning System
H		Farbton (hue)
I		Intensität (intensity)

IC		Integrated circuit
IR		Infraroter Wellenlängenbereich des Lichtes
K		Kalium
KL		Kletten-Labkraut
Ko		Kornblume
L		Helligkeit (lightness), Luminanz
LED		Licht emittierende Diode
Lö		Löwenzahn
MAX		Oberer Extremwert einer Datenreihe
MIN		Unterer Extremwert einer Datenreihe
N		Stickstoff
N _{min}	kg N ha ⁻¹	Mineralisierter Stickstoff
NR		Normierte Reflexion
OS		Oberer Reflexionsschwellenwert
P		Phosphor
r		Korrelationskoeffizient
R		Roter Pixel
R ² F		Bestimmtheitsmaß
RF		Rauhaariger Fuchsschwanz
RGNIR		Intensität aus RGB-/ NIR-Reflexionswerten
RTK		Real Time Kinematic
S		Sättigung (saturation)
Soja		Sojabohne
TKG	g	Tausendkorngewicht

US	Unterer Reflexionsschwellenwert
UV	Ultravioletter Wellenlängenbereich des Lichtes
V	Hellwert (value)
WG	Wintergerste
WGä	Weißer Gänsefuß
WS	Wiesenstorchschnabel
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrübe

1 Einleitung

Sensoren zur pflanzenspezifischen Intervention dienen dazu, die Ausbringungsmengen sowohl bei der Herbizidanwendung als auch Nährstoffversorgung zu reduzieren. Neben den ökologischen Aspekten, die Gegenstand politischer und gesellschaftlicher Diskussionen sind, spielen in der modernen Landwirtschaft vor allem auch monetäre Aspekte eine Rolle. Beide Aspekte werden durch die sensorbasierte Applikationstechnik berücksichtigt. Die Kombination von mehreren Arbeitsprozessen in einer Sensoreinheit stärkt diese Ansätze. Zum einen wird die Auslastung und damit die Rentabilität der Investition erhöht, zum anderen spart ein kombinierter Sensor im Gegensatz zu Einzelsensoren auch Ressourcen durch den Wegfall weiterer benötigter Komponenten.

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Multispektral-Sensor hinsichtlich seiner Eignung zur Pflanzenerkennung sowie Detektion physiologischer Eigenschaften von Nutzpflanzen untersucht. Bei dem verwendeten TrueColor-Sensor werden die Echtfarbwerte XYZ in den CIE Lab-Farbraum transformiert und bilden zusammen mit einem IR-Kanal die zu analysierenden Ausgangsgrößen. Möglichkeiten einer Differenzierung über verschiedenste Auswertelgorithmen lassen sich über die Verrechnung der zur Verfügung stehenden Kanäle frei konfigurieren.

Durch die Integration optischer Bauelemente und Farbdioden sowie elektrischer Signalverarbeitung und geeigneter Schnittstellen zur Datenübertragung stellen diese Systeme eine kostengünstige und kompakte Einheit dar. Diese lässt sich durch Kaskadierung zu Arrays auf beliebige Arbeitsbreiten erweitern. Durch die schnelle Signalverarbeitung wird das Sensorprinzip den hohen Anforderungen an Arbeitsgeschwindigkeit, Ortsauflösung und Preisgefüge praxisrelevanter Pflanzenerkennungssysteme gerecht.

Gegenstand aktueller Untersuchungen zur Pflanzenerkennung bilden derzeit vorwiegend kamerabasierte Systeme, deren Technologien meist mit deutlichen Einschränkungen bezüglich Arbeitsgeschwindigkeit und Preisgefüge verbunden sind. Im Gegensatz zu aktuell verfügbaren Einzelsensoren versprechen Sensorelemente durch Kaskadierung zu Sensor-Arrays einen wesentlichen Fortschritt hinsichtlich eines höheren Anteils der vermessenen Fläche an der Arbeitsbreite.

Grundlegende Untersuchungen zur Differenzierung diverser Unkräuter bei Reihenkulturen wurden in Gewächshausversuchen durchgeführt und bilden den ersten Teil der vorliegenden Arbeit.

Im Zuge weiterer Untersuchungen zur Einsatzfähigkeit dieses Sensorprinzips, wurden Messungen zur Stickstoffversorgung in Wintergetreide durchgeführt um die Eignung des CIE Lab-Farbraums zur bedarfsgerechten Pflanzenversorgung zu untersuchen. Stickstoff aus Pflanzendünger, der nicht von den Pflanzen aufgenommen wird, kann negative Auswirkungen auf die Umwelt haben, wie beispielsweise die Belastung des Grundwassers. Stickstoffmangel beeinträchtigt jedoch die Pflanzengesundheit und führt zu geringeren Erträgen. Eine unzureichende Düngung kann durch die Kombination neuer Technologien mit landwirtschaftlichen Praktiken zur Anpassung an spezifische Bedürfnisse reduziert werden (Cameron et al., 2013).

Seit mehr als zwei Jahrzehnten werden digitalisierte Lösungen für standortbezogene Feldarbeiten eingeführt, um Ressourcen zu sparen und die Umwelt zu schützen (Auernhammer, 1999). Sensordaten können für das Erntemanagement eingesetzt werden, um den Ertrag von landwirtschaftlichen Produkten zu verbessern, was wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Die Herausforderung für sensorbasierte Anwendungen besteht darin, valide Modelle für die Beziehungen zwischen Sensordaten und Ernteerträgen zu entwickeln.

Das Aussehen der Pflanzen hat einen wesentlichen Einfluss auf den Infrarotwert, die Lumiananz sowie die TrueColor-Werte. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Eignung zur Unkrauterkenntnis und Stickstoffdüngung mittels CIELab-Farbraum und einem IR-Kanal zu analysieren. Diese Untersuchungen dienen als Grundlage für praktische Feldanwendungen, bei denen eine kombinierte Lösung zur Herbizidapplikation und Stickstoffdüngung die Anforderung an die Technik zur pflanzenspezifischen Anwendung erhöhen kann.

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein TrueColor-Array als kostengünstigen Dualsensor auf seine Eignung zur Pflanzenerkennung (Teil A) und Bestimmung der Stickstoffversorgung (Teil B) zu untersuchen. Abschließend gilt es die Untersuchungsergebnisse auf die Abbildung des Kornertrags anhand der Reflexionsmesswerte zu übertragen. Die Leistung dieses Sensorarrays wird anhand der folgenden wissenschaftlichen Fragestellungen analysiert:

Teil A: Bewertung der Eignung von TrueColor-Sensorarrays zur Pflanzendiskriminierung

Teil B: Vergleich der Reflexionsqualität von Sensorkanälen nach den agronomischen Parametern N-Gehalt, Frischmasse, Pflanzenbedeckung und –höhe sowie den SPAD-Messungen

Teil C: Abbildung des Kornertrags mit Hilfe der Reflexionsmesswerte zur praxisrelevanten Anwendung des TrueColor-Sensorarrays

2 Stand des Wissens und der Technik

Im folgenden Kapitel werden grundlegende Zusammenhänge der elektromagnetischen Strahlung erläutert, welche die Basis für das Reflexionsverhalten von Licht und deren spektraler Analyse darstellen. Diverse Anforderungen an Sensoren zur Unkrauterkennung sowie sensorgestützter Stickstoffdüngung bilden einen weiteren Teil dieses Kapitels. Abschließend wird die Zielsetzung der Arbeit konkretisiert.

2.1 Gebräuchliche Farbräume und deren Unterscheidung

Voraussetzung zur Darstellung von Farbräumen ist das sichtbare Licht. Dessen elektromagnetische Schwingungen weisen Wellenlängen von ca. 380 nm bis 780 nm auf (siehe Abb. 2-1). Dieser Wellenlängenbereich ist zwischen Ultraviolett (UV) und Infrarot (IR) angesiedelt und weist im Vergleich zum restlichen elektromagnetischen Spektrum nur eine geringe Frequenzbreite auf (Smaniotta, 2006).



Abb. 2-1: Spektralband im Untersuchungsbereich (Sensor Instruments, 2019)

Farbe ist weder Eigenschaft noch Zustand eines Objektes, sondern eine subjektive Sinneswahrnehmung. Aus diesem Grund ist die Erfassung und auch Darstellung farbiger Objekte von Umgebungsbedingungen und Beleuchtung abhängig (Marggraf, 2019). Technische Messverfahren dienen einer Umwandlung des subjektiv wahrgenommenen Lichtes in physikalische Größen. Sowohl in der Photographie als auch Spektroskopie wird der Einfluss des Beleuchtungsspektrums mittels Weißabgleich eliminiert (Marggraf, 2019). Farbwerte in verschiedenen Darstellungsformen berücksichtigen Helligkeit und Sättigung auf unterschiedliche Weise, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

– XYZ-Tristimuluswerte

Die lichtempfindlichen Zäpfchen auf der Netzhaut des menschlichen Auges reagieren bei einfallendem Licht sensitiv auf die Grundfarben Rot, Grün und Blau, welche als Farbrohwerte bezeichnet werden (Gegenfurtner, 2012). In Abhängigkeit der Wellenlänge des imitierenden Lichtes ergibt sich nach Abb. 2-2 eine Mischfarbe aus den Tristimuluswerten X, Y, Z. Mit Ausnahme des Farbrohwertes $X(\lambda)$, weisen die Verläufe von $Y(\lambda)$ und $Z(\lambda)$ nur jeweils einen Hochpunkt auf. Der Farbrohwert Z weist eine maximale Intensität um 450 nm auf, wohingegen der charakteristische Wellenlängenbereich für die maximale Intensität des Y-Tristimulus bei 550 nm liegt (Lang, 1998).

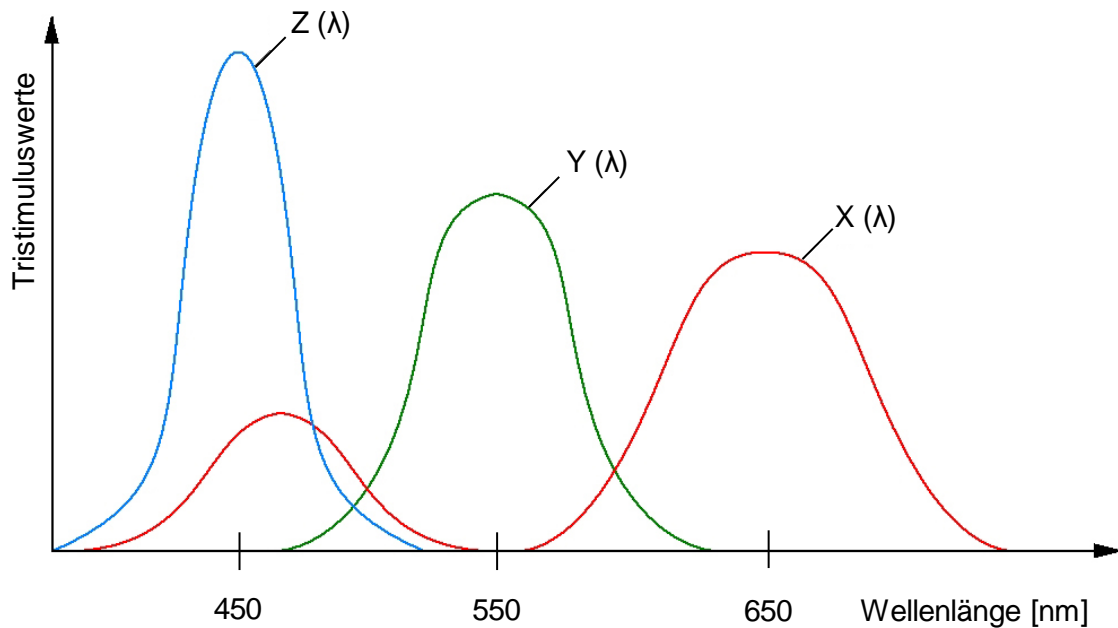


Abb. 2-2: Tristimuluswerte X, Y, Z in Abhängigkeit der Wellenlänge (Sensor Instruments, 2019, verändert)

– CIELab-Farbraum

Bei dem 1931 von der Internationalen Beleuchtungskommission CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) entwickelten Farbsystem wird der Farbraum durch ein dreidimensionales Koordinatensystem aufgespannt (siehe Abb. 2-3). Auf der Applikate wird dabei die Luminanz L (Helligkeit) dargestellt. Dort können Werte zwischen $L = 0$ (schwarz) und $L = 100$ (diffuses Weiß) angenommen werden. Die Abszisse weist einen Wertebereich von $a = -128$ (grün) bis $a = 127$ (rot) auf. Entsprechend werden auf der Ordinate die Gegenfarben von $b = -128$ (blau) bis $b = 127$ (gelb) abgetragen (Deutsches Institut für Normung, 2017).

Im Gegensatz zu den Tristimuluswerten X, Y und Z unterscheidet sich diese Art der Farbdarstellung in der Berücksichtigung der Helligkeit und ähnelt damit mehr der Farbwahrnehmung des menschlichen Auges (Ganesan et al., 2010). Aus der Vorgehensweise der CIE zur Messung der Farbvalenz einer Lichtquelle von 1931 lassen sich Aussagen über die Hellempfindlichkeit eines Beobachters machen. Das Verfahren sieht vor, einen Probanden gleichzeitig einer Überlagerung dreier Lichtquellen (rot, grün und blau) sowie einer Testlichtquelle auszusetzen. Die drei Lichtquellen werden in ihrer Intensität so eingestellt, dass sie mit der Testlichtquelle übereinstimmen. Daraus ergibt sich, dass die Hellempfindlichkeit des Auges ab einer Wellenlänge von 700 nm (Rot) stark nachlässt. Ergebnis der Untersuchungen war, dass die Intensität der roten Lichtquelle dem 72,0962-fachen der blauen Lichtquelle entspricht. Darüber hinaus ist die grüne Lichtquelle um den Faktor 1,3791 intensiver als die der Blauen (Marggraf, 2019).

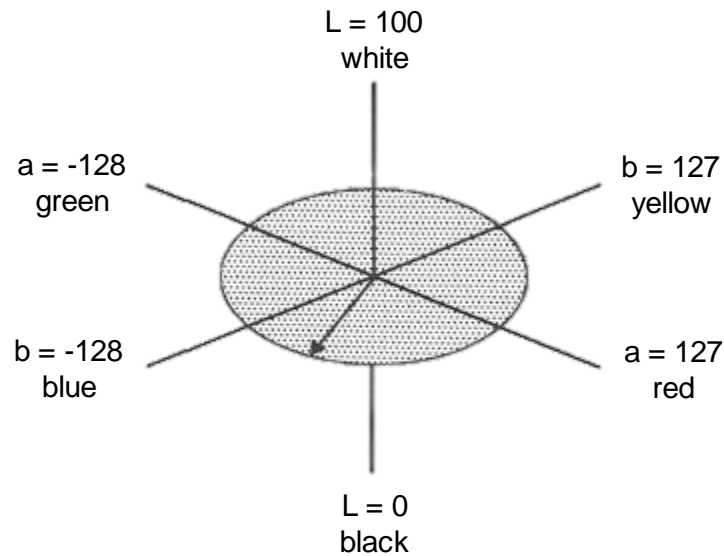


Abb. 2-3: Schematische Darstellung des CIELab-Farbraums (Weatherall & Coombs, 1992)

Eine Möglichkeit der Farbunterscheidung ist die Berechnung von Farbabständen nach (2.1).

$$\Delta E = \sqrt{(L_{Obj} - L_{Ref})^2 + (a_{Obj} - a_{Ref})^2 + (b_{Obj} - b_{Ref})^2} \quad (2.1)$$

ΔE stellt den euklidischen Abstand zwischen zwei Farbpunkten im dreidimensionalen Koordinatensystem dar. In Abhängigkeit der Größe des Farbabstandes, wird die Wahrnehmbarkeit des Farbunterschieds nach DIN EN ISO/CIE 11664-4 in Bewertungskriterien eingeteilt (Deutsches Institut für Normung, 2019). Diese Einteilung ist in Tab. 2-1 dargestellt und reicht in sechs Schritten von „nahezu unmerklich“ ($\Delta E < 0,5$) bis „Differenz wird als andere Farbe bewertet“ ($\Delta E > 5$). Diese Bewertungskriterien dienen in der industriellen Anwendung zur Qualitätsbeurteilung von Produkten, bei denen Wert auf Farbechtheit gelegt wird.

Tab. 2-1: Einordnung der durch ΔE beschriebenen Farbunterschiede

ΔE	Bewertungskriterium
0,0 – 0,5	Nahezu unmerklich
0,5 – 1,0	Für geübtes Auge bemerkbar
1,0 – 2,0	Geringer Farbunterschied
2,0 – 4,0	Wahrgenommener Farbunterschied
4,0 – 5,0	Wesentlicher Farbunterschied
> 5,0	Differenz wird als andere Farbe bewertet

– HSV-Farbraum

Der im Folgenden erläuterte HSV-Farbraum umfasst eine dreidimensionale Farbdarstellung und setzt sich aus Farbton (hue), Sättigung (saturation) und Hellwert (value) zusammen (Abb. 2-4), welches vergleichbar mit der menschlichen Farbwahrnehmung ist (Beyerer et al., 2012). Der Farbton (H) wird im HSV-Farbraum durch einen Einheitskreis ($r = 1$) dargestellt, mit dem Weißpunkt in der Mitte. Die Sättigung (S) ist die radiale Lage des Farbtons im Kreis und kann Werte von null (im Mittelpunkt) bis eins (100 % Sättigung) annehmen. Der Hellwert (V) als dritte Dimension des Farbraumes, spannt den Kreis zu einem Kegel auf und beschreibt dessen Höhe. Er nimmt ebenfalls Werte von null bis eins an. Die volle Helligkeit liegt im Kreismittelpunkt vor ($V = 1$) und reduziert sich zur Kegelspitze hin bis auf 0. Die XYZ-Farbwerte können durch Umrechnung in RGB-Farbwerte oder direkt in den HSV-Farbraum transformiert werden (Ebner, 2007). In Anlehnung an den HSV-Farbraum, wird bei den Farbräumen HSI und HSL statt des Hellwertes (V) die Intensität (I) bzw. relative Helligkeit bzw. Lightness (L) behandelt (Beyerer et al., 2012; Ebner, 2007).

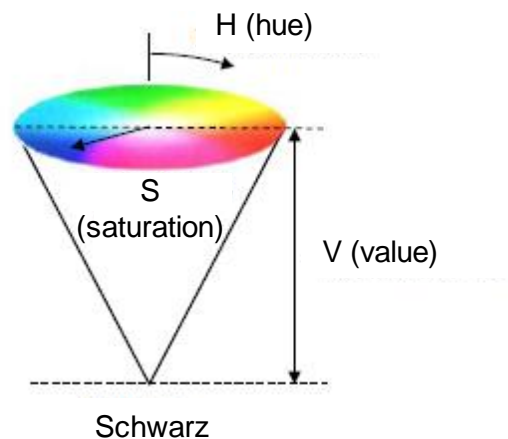


Abb. 2-4: Schematische Darstellung des HSV-Farbraums (Marggraf, 2019, verändert)

– RGB-Farbraum

Im Gegensatz zu den bisher behandelten Farbmodellen, wird der RGB-Farbraum durch einen Würfel aufgespannt (Abb. 2-5). Farbhelligkeit oder -sättigung werden darin nicht dargestellt. Die Grundfarben Rot, Grün und Blau spannen ein dreidimensionales Koordinatensystem auf und stellen sogenannte Lichtfarben dar, deren Mischung als additive Farbmischung bezeichnet wird (VHS-Seminar, 2019). Häufig wird dieses Farbmodell in technischen Anwendungen, beispielsweise Kamerasystemen, zur sensorischen Farberfassung genutzt (Marggraf, 2019).

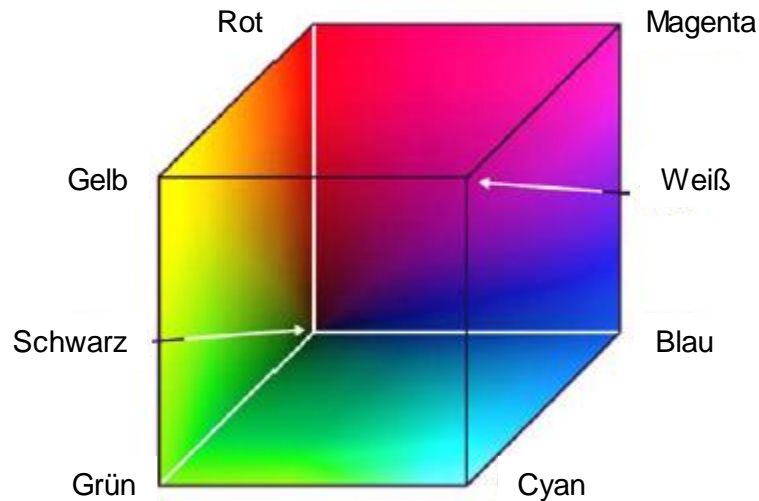


Abb. 2-5: Schematische Darstellung des RGB-Farbraums (Beyerer et al., 2012)

Die Grundfarben können jeweils Werte von 0 (schwarz) bis 255 (weiß) annehmen, während die Diagonale zwischen den Farbkoordinaten $[0;0;0]$ und $[255;255;255]$ die Grauwerte darstellt. Häufig liegen aufgenommene Farbpixel von Vegetation und Umgebung in der Nähe dieser Achse. Folglich ist der Farbunterschied in dieser Darstellungsform zu gering und darauf basierende Clusterbildungen ineffizient (Ruiz-Ruiz et al., 2009). Abhilfe schafft die Transformation des RGB-Farbraumes in die normalisierten Farbwerte rgb .

$$r = \frac{R}{R + G + B}, g = \frac{G}{R + G + B}, b = \frac{B}{R + G + B} \quad (2.2)$$

Die Farbpixel nehmen nach Gleichung (2.2) Werte auf einer Einheitsebene zwischen 0 und 1 an, welche senkrecht zu der beschriebenen Grauwert-Diagonale liegt und damit Einflüsse verschiedener Beleuchtungsintensitäten stark abschwächt (Tian & Slaughter, 1998). Daraus ergibt sich eine kompaktere Verteilung der Pixel von Vegetations- und Umgebungsobjekten, was nach Ruiz-Ruiz et al. (2009) zu einer effizienteren Clusterbildung führt und in Kap. 2.2.3.5 näher erläutert wird.

Die beschriebenen Eigenschaften der unterschiedlichen Farbräume machen eine Einordnung der Anwendungsmöglichkeiten notwendig. Nach Beyerer et al. (2012) erfolgt dies anhand einer in Abb. 2-6 dargestellten Einteilung. Es wird zwischen technischer und physiologischer Sichtweise kategorisiert und dies in spezielle bzw. allgemeine Anwendungen untergliedert.

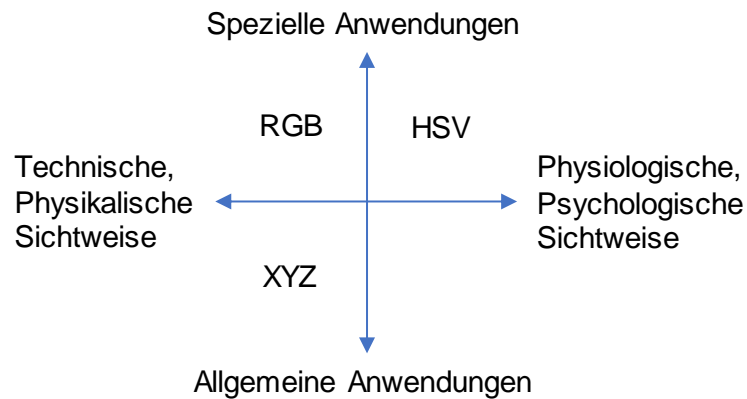


Abb. 2-6: Einteilung der Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Farbräume (Beyerer et al., 2012, verändert)

Danach ist der RGB-Farbraum eher für spezielle Anwendungen aus technischer Sichtweise geeignet, wohingegen sich der HSV-Farbraum für spezielle Anwendungen hinsichtlich physiologischer Sichtweise auszeichnet. Die Nutzung des XYZ-Farbraums hingegen ist nach Beyerer et al. (2012) für allgemeine Anwendungen mit technisch-physikalischer Sichtweise geeignet. Das in Kap. 3.1 vorgestellte Sensorprinzip basiert auf diesen Echtfarbwerten und ist von den vorgestellten Farbräumen somit für die Nutzung im agrartechnischen Anwendungsfall in besonderer Weise geeignet.

Die bisher erläuterten Grundlagen zur Nutzung des Reflexionsverhaltens werden im Hinblick auf Maßnahmen zur Pflanzenerkennung in Kap. 2.2.4 näher erläutert. Dazu werden Systeme zur pflanzenspezifischen Applikation systematisiert, hinsichtlich ihrer Funktionsprinzipien differenziert und daraus resultierende Anwendungsgebiete vorgestellt.

2.2 Teil A: Unkrauterkennung und –diskriminierung

In diesem Kapitel wird der Begriff Unkraut definiert, bevor eine Übersicht gängiger Unkräuter in Reihen- und Flächenkulturen gegeben wird. Im Anschluss erfolgt eine Einteilung von Pflanzenerkennungssystemen. Im weiteren Verlauf werden farbwertbasierte Auswertelgorithmen zur Pflanzendifferenzierung und angewandte pflanzenspezifische Applikationstechniken behandelt.

2.2.1 Definition des Begriffs Unkraut

Im Allgemeinen wird unter dem Begriff Unkraut eine Pflanze verstanden, die an ihrem auftretenden Ort nicht erwünscht ist. Bereits in den 1920er Jahren wurde diese Definition erweitert, um eine Abgrenzung zu parasitären Pflanzen zu schaffen (Campbell, 1923). Phytoparasiten stellen die Nährstoffversorgung über Wirtspflanzen sicher (Leake, 2004). Unter Ausschluss dieser Pflanzengruppe, werden Unkräuter als eigenständige Pflanzen definieren, deren Art dauerhaft auf Anbauflächen schädlich ist (Campbell, 1923). Darunter fallen ebenfalls Pflanzen, die einerseits kultiviert werden, auf anderen Anbauflächen aber eine Konkurrenz bezüglich

Licht, Nährstoffen und Wasser darstellen. Aus diesem Grund gilt es, die Benennung von Kultur- und Unkrautpflanze in Abhängigkeit des jeweiligen Anbausystems vorzunehmen. Im folgenden Kapitel werden häufig auftretende Unkräuter botanisch eingeordnet. Im Fokus stehen die kulturspezifischen Anforderungen bezüglich Maßnahmen zur Herbizidanwendung.

2.2.2 Leitunkräuter in Reihen- und Flächenkulturen

In Abhängigkeit der Kulturpflanze werden Maßnahmen zur Unkrautbekämpfung differenziert bewertet. Grund dafür sind zum einen unterschiedliche Saatzeitpunkte von Sommer- bzw. Winterkulturen und damit verbundenes Unkrautauftreten, sowie die Jugendentwicklung der Kulturpflanzen. Die Zuckerrübe als Beispiel einer Sommerkultur mit langsamer Jugendentwicklung mit einhergehender längerer Zeit unbedeckten Bodens erfordert eine geringere Schadschwelle zur Unkrautbekämpfung. Gerhards (1998) gibt dazu eine Bekämpfungsschwelle von 0,3 Pflanzen m⁻² an. Im Gegensatz dazu sind Wintergetreidekulturen aufgrund zügiger Bestockung nach der Saat bzw. zu Vegetationsbeginn im Frühjahr deutlich unempfindlicher. Es kann eine Unkrautschadensschwelle von 40-50 Unkräutern m⁻² angenommen werden (Wahmhoff & Heitefuss, 1985). Gegebenenfalls kann bei geringem Unkrautdruck in solchen Fällen auf eine Herbizidmaßnahme verzichtet werden (Gerhards, 1998). Eine Übersicht gängiger Unkrautarten und deren botanische Einordnung im Anbau von Flächenkulturen gibt Tab. 2-2.

Tab. 2-2: Übersicht der Leitunkräuter in Flächenkulturen und deren botanische Einordnung (Gerhards, 1998)

Familie	Art	Wissenschaftlicher Name
Lamiaceae (Lippenblütler)	Rote Taubnessel	Lamium purpureum L.
Plantaginaceae (Wegerichgewächse)	Efeublättriger Ehrenpreis	Veronica hederifolia L.
Poaceae (Süßgräser)	Ackerfuchsschwanz Diverse Ungräser	Alopecurus myosuroides HUDS. Divers
Rubiaceae (Rötegewächse)	Kletten-Labkraut	Galium aparine L.

Aufgrund der eingangs erwähnten höheren Relevanz der Unkrautunterdrückung bei Sommerungen in Reihenkultur, ist die Auswahl relevanter Unkräuter dort deutlich ausgeprägter (siehe Tab. 2-3). Die Einordnung in deren botanische Familie ist in der praktischen Anwendung von Relevanz, da entsprechend formulierte Wirkstoffgruppen unterschieden werden (Gerhards, 1998).

Tab. 2-3: Übersicht der Leitunkräuter in Reihenkulturen und deren botanische Einordnung (Dücke, 2005; Eßer, 2020; Gerhards, 1998)

Familie	Art	Wissenschaftlicher Name
Amaranthaceae (Fuchsschwanzgewächse)	Weißer Gänsefuß	<i>Chenopodium album</i> L.
	Spreizende Melde	<i>Atriplex patula</i> L.
	Rauhaariger Fuchsschwanz	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.
Apiaceae (Doldenblütler)	Hundspetersilie	<i>Aethusa cynapium</i> L.
Asteraceae (Korbblütler)	Echte Kamille	<i>Matricaria chamomilla</i> L.
	Acker-Hundskamille	<i>Anthemis arvensis</i> L.
	Acker-Kratzdistel	<i>Cirsium arvense</i> L.
Brassicaceae (Kreuzblütler)	Gewöhnliches Hirtentäschel	<i>Capsella bursa-pastoris</i> L.
	Acker-Hellerkraut	<i>Thlaspi arvense</i> L.
	Acker-Senf	<i>Sinapis arvensis</i> L.
	Ausfallraps	<i>Brassica napus</i> L.
Caryophyllaceae (Nelkengewächse)	Gewöhnliche Vogelmiere	<i>Stellaria media</i> L.
Equisetaceae (Schachtelhalmgewächse)	Acker-Schachtelhalm	<i>Equisetum arvense</i> L.
Euphorbiaceae (Wolfsmilchgewächse)	Einjähriges Bingelkraut	<i>Mercurialis annua</i> L.
Lamiaceae (Lippenblütler)	Purpurrote Taubnessel	<i>Lamium purpureum</i> L.
Papaveraceae (Mohngewächse)	Gewöhnlicher Erdrauch	<i>Fumaria officinalis</i> L.
	Kalifornischer Mohn	<i>Eschscholzia californica</i> CHAM.
Plantaginaceae (Wegerichgewächse)	Acker-Ehrenpreis	<i>Veronica agrestis</i> L.
Poaceae (Süßgräser)	Flughafer	<i>Avena fatua</i> L.
	Diverse Ungräser	Divers
Polygonaceae (Knöterichgewächse)	Windenknöterich	<i>Polygonum convolvulus</i> L.
	Ampfer-Knöterich	<i>Polygonum lapathifolium</i> L.
	Vogelknöterich	<i>Polygonum aviculare</i> agg. L.
	Floh-Knöterich	<i>Persicaria maculosa</i> GRAY
Rubiaceae (Rötegewächse)	Kletten-Labkraut	<i>Galium aparine</i> L.
Solanaceae (Nachtschattengewächse)	Schwarzer Nachtschatten	<i>Solanum nigrum</i> L.
Urticaceae (Brennnesselgewächse)	Kleine Brennnessel	<i>Urtica urens</i> L.
Violaceae (Veilchengewächse)	Acker-Stiefmütterchen	<i>Viola arvensis</i> MURRAY

Untersuchungen zu Sommerungen in Flächenkulturen zeigen bezüglich Art und Anzahl der Unkräuter eine ähnliche Verteilung (Dicke, 2005). Anhand dieser Studien sowie unter Berücksichtigung von Verfügbarkeit und Anzuchtverhalten, wurden im Rahmen dieser Untersuchungen stellvertretend Vertreter aus der Familie der Fuchsschwanzgewächse, Korbblütler, Süßgräser, Knöterichgewächse sowie Rötengewächse ausgewählt (siehe Kap. 3.2.1).

2.2.3 Einteilung von Pflanzenerkennungssystemen

Im Folgenden werden unterschiedliche Möglichkeiten der Pflanzenerkennung, sowie deren Vor- und Nachteile vorgestellt.

2.2.3.1 Abstandssensoren

Zu den Abstandssensoren zählen in diesem Zusammenhang Ultraschall- und Laser-Distanzsensoren. Mit einem weiten Frequenzbereich von 13 bis 45 kHz, ist dieses Sensorprinzip für ein breites Aufgabenfeld geeignet. Längere Messstrecken erfordern durch die Schallabsorption der Luft geringere Frequenzen. Gleichzeitig reduziert sich mit niedrigeren Frequenzen das Auflösungsvermögen (Lau, 1991). Ultraschallwellen werden ausgesendet, am Zielobjekt reflektiert und wieder empfangen. Der Abstand wird durch die Laufzeit des ausgesendeten Ultraschallsignals zwischen Sender und Empfänger errechnet. Uhlig (1978) nutzte dieses Signal zur Untersuchung von Halmreihen und geköpften Rüben, während Schmittmann (2002) dieses Messprinzip zur Online-Ertragsmessung von Zuckerrüben verwendet hat. Für beide Anwendungsfälle sind Ultraschallsensoren geeignet. Die Anforderungen an das Auflösungsvermögen von Sensoren zur Unkrautkontrolle sind um ein vielfaches höher, wodurch das Ultraschallverfahren keine geeignete Lösung darstellt.

Abstandsmessungen mittels Lasersensoren basieren auf drei Messprinzipien: Strahlungsintensität, Licht-Laufzeit und Triangulation. Die reflektierte Strahlungsintensität ist von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig, welches die Messgenauigkeit negativ beeinflusst. Aus diesem Grund sind lediglich Abstandsmessungen durch Licht-Laufzeit und Triangulation zur Messung unter Feldbedingungen geeignet (Ehlert et al., 2008). In Abhängigkeit der zurückgelegten Distanz des Laserstrahls verändert sich dessen Strahlengang. Die Strahlung wird in einem anderen Bereich des verwendeten CMOS-Sensors (CMOS = Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) registriert und somit auf die zurückgelegte Distanz geschlossen. Analog zu den Ultraschallwellen, wird bei der Laser-Laufzeitmessung die Zeit zwischen Sender und Empfänger als Kenngröße der zurückgelegten Distanz herangezogen.

Auch eine Kombination aus Ultraschall- und Lasersensor zur automatischen Lenkung von Erntemaschinen ist möglich. Der Ultraschallsensor tastet die Bestandeskante in unmittelbarer Nähe vor der Maschine ab, während der Lasersensor den weiteren Bereich vor dem Schneidwerk abtastet. Die Verbindung dieser beiden Messpunkte gibt die Lenktrajektorie für die Maschine vor (Diekhans, 1998). Mit diesen Sensorprinzipien ist eine reine Objekterkennung möglich. Es kann jedoch nicht zwischen Unkraut, Nutzpflanze oder nichtpflanzlichem Fremdkörper unterschieden werden. Dies macht die Kombination mit einem anderen Sensor notwendig, um eine selektive Unkrautbekämpfung durchführen zu können (Gobor, 2007).

2.2.3.2 Georeferenzierung

Durch koordinatengestützte Aussaatverfahren kann die Position der Kulturpflanze bei der Unkrautbekämpfung genutzt werden. Neben der Kenntnis über den Ablageort des Saatgutes, können auch alternative Verfahrensschritte eingeleitet werden. Beispiel dafür ist die Möglichkeit einer mechanischen Unkrautbekämpfung quer zur Saattrichtung (Schmittmann et al., 2010; Schulze Lammers et al., 2017). Die Durchführbarkeit hängt von der Standgenauigkeit der Kulturpflanze ab. Beeinflusst wird diese durch die Qualität der Zielort-Positionsbestimmung, die Ablagegenauigkeit, die Variation der Abwurfkurven, Verrolleffekte und den nicht erektophilen Wuchs des Keimlings (Schmittmann et al., 2010). Die Möglichkeit einer Überlagerung mit weiteren Sensoren zur Pflanzenerkennung wird im Hackgerät der Fachhochschule Osnabrück genutzt und in Kap. 2.2.4 weiter erläutert (Griepentrog et al., 2006).

2.2.3.3 Lichtschranken

Die Pflanzenerkennung durch Lichtschranken erfolgt mit Hilfe eines Lichtgitters aus parallel angeordneten Laserstrahlen. Sende- und Empfangskomponenten sind beidseitig im Lichtgitter verbaut. Das Messobjekt wird zwischen Sender und Empfänger platziert (siehe Abb. 2-7).

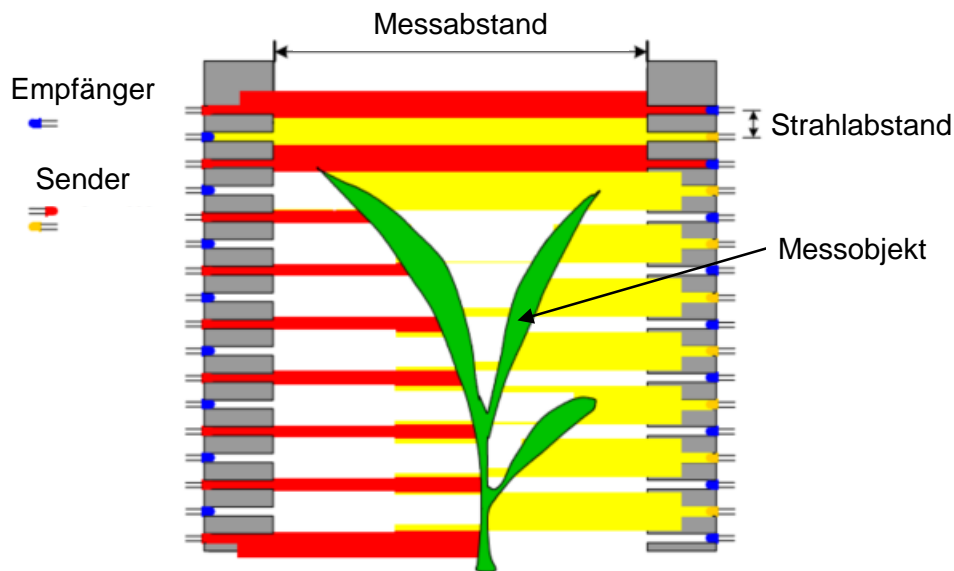


Abb. 2-7: Pflanzenerkennung mittels Lichtgitter-Sensor (Fender et al., 2005)

Durch die Überlagerung von Lichtstrahl-Abschattung und Weg bzw. Geschwindigkeit, wird ein zweidimensionales Profil des Objektes generiert. Durch die Lichtstrahlunterbrechungen werden die absoluten geometrischen Abmaße direkt ermittelt, ein Analog-Digital-Wandler ist daher nicht erforderlich. Dies ermöglicht eine schnelle und kostengünstige Bilderfassung und –auswertung zur Online-Anwendung (Fender et al., 2005). Bei weiter entwickelten Pflanzen anwendbar, erweisen sich Lichtgitter-Sensoren bei der Erkennung von bekämpfungswürdigen Unkräutern als nachteilig. Die Notwendigkeit einer exakten Höhenführung kurz über der Bodenoberfläche sowie fehlerhafte Detektionen durch Steine oder Ernterückstände, schränken eine Anwendung zur Unkrautbekämpfung ein (Müter, 2017).

2.2.3.4 Tastsensoren

Eine Erkennung von Kulturpflanzen durch mechanische Tastsensoren ist seit den 1970er Jahren bekannt (Coenenberg et al., 1977; Graeber, 1970). Im Gegensatz zu aktuellen Fragestellungen, dienen diese Systeme der Lenkhilfe bei Erntemaschinen und werden daher in weiter entwickelten Pflanzenbeständen eingesetzt. Die Verwendung von Sensoren bei Pflanzenschutzmaßnahmen finden in früheren Entwicklungsstadien statt (siehe Kap. 3.2.2). Wesentliche Gründe dafür sind die Reduktion von Licht-, Nährstoff- und Wasserkonkurrenz zum Wachstumsbeginn, um eine gute Jugendentwicklung der Pflanzen zu gewährleisten. Die Verwendung von Tastsensoren wird hier der Vollständigkeit halber erwähnt, stellt aber keine geeignete Anwendung zur Unkrauterkenntung dar.

2.2.3.5 Reflexionswertbasierte Auswertealgorithmen zur Pflanzendifferenzierung

Das Einsparpotential von Herbiziden durch teilflächenspezifische Applikation ist bereits seit über 30 Jahren Gegenstand der Forschung und kann mit bis zu 90 % quantifiziert werden (Marshall, 1988). Grundlage hierfür ist eine technische Umsetzung der Pflanzendifferenzierung aufgrund ihrer Reflexionseigenschaften. Als besondere Herausforderungen stellten sich dabei eine ausreichende Bildqualität sowie Verarbeitung der auftretenden Datenmengen heraus. Diesem Sachverhalt wurde durch binäre Bilder in Form von Schwarz-Weiß-Infrarot-Aufnahmen entgegengewirkt, um den Kontrast zwischen Boden und Pflanze zu erhöhen sowie eine schnellere Auswertung zu generieren (Guyer et al., 1986). Aufgrund steigender Prozessorleistungen ist die Rechengeschwindigkeit um ein Vielfaches gestiegen und stellt nicht mehr den limitierenden Faktor in der Bildauswertung dar. Dies eröffnet Möglichkeiten zur farbwertbasierten Pflanzendifferenzierung.

Mit Hilfe optoelektronischer Sensoren lässt sich die Lichtreflexion zu untersuchender Oberflächen registrieren, wie beispielweise Pflanze und Boden. Dabei können Intensitätsunterschiede charakteristischer Spektralanteile von intakten Pflanzenoberflächen oder abgestorbenen Pflanzenresten vom Boden genutzt werden (Wartenberg et al., 2005). Die pflanzentypische Spektralverteilung ist durch ein ausgeprägtes Minimum des Reflexionsgrades im Wellenlängenbereich von ca. 650 nm, gepaart mit einer Rampe auf ca. 750 nm. Aus der Verrechnung beider Strahlungsanteile resultiert die Möglichkeit zur Trennung von Bodenoberfläche und grüner Pflanze (Wartenberg & Dammer, 2002).

Die Pflanzenerkennung unter Freilandbedingungen mit Hilfe optoelektronischer Sensoren stellt hohe Anforderungen an konstante Beleuchtungsintensitäten. Veränderte Licht- und Klimabedingungen führen zu Farbveränderungen von Vegetation und Umgebung. Diese Tatsache und das Vorhandensein von Schatten erschweren die Identifizierung von Pflanzen. Eine weitere Schwierigkeit bei der Erkennung von Pflanzen im Freien sind Veränderungen in der Bodenfärbung, welche sich von sandig bis dunkelbraun erstrecken können und durch das Vorhandensein von Steinen und Kieselsteinen zusätzlich erschwert werden. Die Bildsegmentierung durch Festlegung eines statischen Schwellenwerts von Intensität oder Leuchtdichte liefert daher keine zuverlässigen Ergebnisse für Freilandbilder (Ruiz-Ruiz et al., 2009). Aus diesem

Grund wurde von Tian und Slaughter (1998) der sogenannte „environmentally adaptive segmentation algorithm“ (EASA) zur Pflanzenerkennung vorgestellt, der einen Prozess des überwachten Lernens und der Echtzeitanwendung auf neue Bilder verwendet. Darin werden Farbveränderungen durch Beleuchtungs- und Umwelteinflüsse durch Normierung der Einzelfarbwerte auf die Summe aller Farbwerte berücksichtigt (siehe Gleichung (2.2) in Kap. 2.1). Anstelle monochromer Bilder werden bei der Verwendung des adaptiven Segmentierungsalgorithmus Farbinformationen verwendet, da der RGB-Farbraum im Gegensatz zu Schwarz/Weiß-Bildern Daten aus einem breiteren Spektrum bietet. Aufgrund der Variabilität dieser Reflexionsdaten wird im Gegensatz zu statischen Schwellenwerten ein adaptiver Algorithmus zur Segmentierung der Aufnahmen von Bestandesflächen etabliert (Tian & Slaughter, 1998). Basierend auf einem zweistufigen Prozess, beinhaltet die erste Stufe die Erstellung von Trainingsdaten zur Bildsegmentierung. Die zweite Stufe besteht aus der Berechnung einer Klassifizierung und die Erstellung einer Lookup-Tabelle (LUT). Dies dient als Datenbank zur Pflanzendiskriminierung in Echtzeit ohne aufwändige Rechenoperationen. In der Trainingsphase werden dem EASA diverse Pflanzenarten, Beleuchtungsmerkmale und Bodentypen eingelernt. Wichtig ist dabei ein Clustering-Prozess für Farbdaten, bei dem Pixel nach ihrer Ähnlichkeit gruppiert werden. Bei Verwendung des RGB-Farbraums sind die Farbunterschiede zwischen Pflanze und Boden in der Regel zu gering (Ruiz-Ruiz et al., 2009). Sowohl Vegetations- als auch Bodenpixel liegen entlang der Grauachse dicht nebeneinander, wodurch sich die Eigenschaften im RGB-Farbraum ähneln (siehe Abb. 2-8).

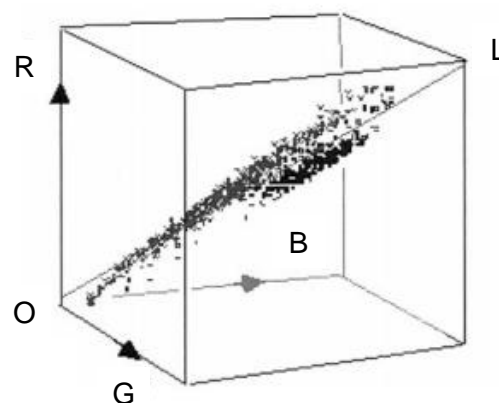


Abb. 2-8: Verteilung der Bildpunkte im RGB-Farbraum inklusive Grau-Achse (OL) bei natürlicher Beleuchtung von Pflanzen (schwarz) und Boden (grau) (Tian & Slaughter, 1998)

Objekte der gleichen Klasse (Vegetation oder Boden) können mit unterschiedlicher Beleuchtung auf der Grauachse weiter auseinanderliegen als Pixel verschiedener Klassen. Um eine beleuchtungsunabhängige Pflanzendiskriminierung mittels RGB-Farbraum zu erzielen, erfolgt die Farbraumtransformation der Komponenten RGB in normalisierte Komponenten rgb nach Gleichung (2.2) in Kap. 2.1.

Eine ähnliche Herangehensweise wird nach Elstone et al. (2020) durch die Erweiterung des Auswertalgorithmus auf Basis des RGB-Farbraums um einen NIR-Kanal ($\lambda = 850 \text{ nm}$) erzielt.

Gleichzeitig wird die Annahme größerer Blattflächen der Nutzpflanzen im Gegensatz zu den Unkrautpflanzen vorausgesetzt. Die Erzeugung von Graustufen-Bildern zur Segmentierung erfolgt durch Kombination der Reflexionswerte zur RGNIR-Intensität:

$$RGNIR = \frac{\beta(G_c - g_c)}{\alpha(R_c - r_c) + \beta(G_c - g_c) + \gamma(B_c - b_c) + L'} \quad (2.3)$$

Dieser Index setzt sich zum einen aus grünem (G_c), rotem (R_c) und blauem (B_c) Reflexionskanal zusammen. Einen weiteren Teil des formelmäßigen Zusammenhangs bilden die Korrekturfaktoren des Hintergrunds im grünen (g_c), roten (r_c) und blauen (b_c) Wellenlängenbereich. Außerdem werden diese Terme durch kanalabhängige Faktoren gewichtet (α , β und γ). Den letzten Summand des Nenners bildet mit L' die angepasste Bodenkonstante (Elstone et al., 2020). Anhand dieses Algorithmus werden Trainingsdatensätze mit Hilfe des Schwellenwertverfahrens erzeugt, ähnlich zum Verfahren nach Tian und Slaughter (1998). In Abhängigkeit der Blattfläche werden dabei die segmentierten Bilder den Nutzpflanzen bzw. Unkräutern zugeordnet.

Die Kombination nahinfraroter und visueller Reflexionsinformationen wird auch bei echtzeitfähigen Unkrautererkennungssystemen verwendet, welches durch bi-spektrale Bildaufnahmen realisiert wird. In dem hier dargestellten Verfahren werden zwei CCD-Kameras verwendet, die zeitgleich jeweils ein Bild im NIR- sowie VIS-Bereich aufnehmen (Gerhards & Christensen, 2003). Die CCD-Technologie (charge-coupled device) nutzt den inneren photoelektrischen Effekt zur Energieübertragung des einfallenden Lichts auf die Sensorik (Burke et al., 2005). Der Entscheidungsalgorithmus zur Pflanzenerkennung ergibt sich aus der Subtraktion von nahinfraroten und visuellen Reflexionsdaten:

$$DB = NR_{770-1150} - NR_{550-570} \quad (2.4)$$

Die Rohdaten der Bilder werden zunächst normiert, wodurch aus den Reflexionen die normierten Reflexionen (NR) entstehen. Das Differenzbild (DB) setzt sich aus den normierten NIR-Reflexionen ($NR_{770-1150}$) sowie den normierten visuellen Reflexionen ($NR_{550-570}$) zusammen. Wie in Abb. 2-9 dargestellt, wirkt sich die Erzeugung eines Differenzbildes positiv auf die Trennung von Objekt (Pflanze) und Hintergrund (Boden) aus. Im Gegensatz zu der direkt aus der NIR-Reflexion erzeugten Binärdarstellung, reduziert die vorherige Subtraktion des visuellen Reflexionsanteils Störanteile des Hintergrundes, verursacht durch unterschiedlich ausgeprägte Bodenaggregate. Daraus resultiert die Möglichkeit einer Pflanzendiskriminierung durch die Pflanzenkontur aufgrund des Binärbildes (Gerhards & Christensen, 2003).

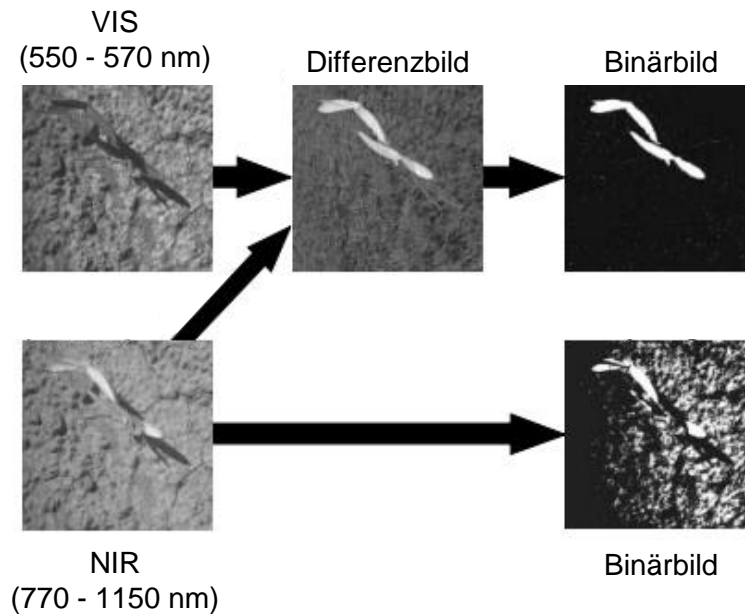


Abb. 2-9: Ablaufschema zur Erzeugung eines bispektralen Differenzbildes am Beispiel zweier Zuckerrübenpflanzen und daraus resultierender Steigerung der Differenzierbarkeit (Gerhards & Christensen, 2003)

Im Gegensatz zur Verwendung von CCD-Sensoren, resultiert der im folgenden Abschnitt dargestellte Algorithmus aus Reflexionsmessungen mittels CMOS-Sensoren, auf deren Technologie bereits in Kap. 2.2.3.1 eingegangen wurde. Die Untersuchungen von Laursen et al. (2016) dienen in erster Linie der verbesserten Erkennung monokotyle Unkräuter. Dazu wird ein normierter Grünüberschuss-Index (Normalized Excess Green Color Index, kurz ExG) nach folgendem Zusammenhang verwendet:

$$ExG = \frac{G_1 + G_2 - R - B}{R + \frac{G_1}{2} + \frac{G_2}{2} + B} \quad (2.5)$$

Dieser Index ist Bestandteil des Monocot and Dicot Coverage Ratio Vision (MoDiCoVi)-Algorithmus und dient der Herbizidapplikation in Maisbeständen (Laursen et al., 2016). Dazu werden virtuelle Quadrate mit einer Größe von 2×2 Pixeln aus den Rohdaten der Bildaufnahmen gebildet. Diese Quadrate enthalten jeweils zwei grüne Pixel (G_1 , G_2), ein roter (R) sowie ein blauer Pixel (B). Lieferten statische Schwellenwertverfahren nach (Ruiz-Ruiz et al., 2009) keine zuverlässigen Ergebnisse für Freilandbilder, so wird dies durch die Verwendung des Grünüberschuss-Index widerlegt. Die Bilder werden mittels fester Schwellenwerte segmentiert, woraus ein binäres Vegetations-/Boden-Bild resultiert. Oberhalb eines definierten Schwellenwertes werden die Pixel zur Vegetation gezählt, während die übrigen Pixel als Boden markiert werden. Durch Zusammenfügen aller Pixelquadrate der gesamten Bildaufnahme ergeben sich die Konturen der darauf abgebildeten Pflanzen. Daraus resultiert die Möglichkeit einer fremdlichtunabhängigen Pflanzendiskriminierung bei Verwendung eines statischen Schwellenwertverfahrens.

Nach (van der Weide et al., 2008) ist die reine Detektion von Nutzpflanzen durch Laufzeitmessungen eines Lichtstrahls auch ohne weitere Algorithmen für Reihenkulturen möglich. Sobald die Reflexionsmessung des ausgesendeten Lichtstrahls innerhalb eines definierten Zeitintervalls erfolgt, wird das Hackwerkzeug aus der Reihe heraus bewegt. Dabei wird sich ebenfalls dem Prinzip des Größenunterschieds zwischen Unkräutern und Nutzpflanze bedient. Vornehmlich im Salatanbau genutzt, findet dieses Prinzip bei Pflanzen mit ausgeprägtem Epikotyl Anwendung, da der Lichtstrahl bei dichtem Blattwerk zuverlässiger unterbrochen wird (van der Weide et al., 2008).

Aufgrund schnelllebiger Entwicklungen innerhalb des Forschungsbereichs zur Pflanzendiskriminierung werden in diesem Kapitel beispielhafte Möglichkeiten reflexionswertbasierter Auswertelgorithmen gegeben, ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

2.2.4 Systematisierung pflanzenspezifischer Applikationstechniken und deren Anwendung in der Praxis

Aus aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Unkrautkontrolle wird deutlich, dass eine Veränderung der bisherigen ganzflächigen Behandlung hin zu pflanzenspezifischen Lösungen stattfindet (Westwood et al., 2018). Die Definition der Begriffe Pflanzendetektion und Pflanzendifferenzierung, sowie deren Abgrenzung untereinander, ist eine Möglichkeit zur Aufarbeitung dieses Sachverhaltes. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in diesem Kapitel lediglich schleppergebundene Systeme behandelt. Eine Zuordnung praxisrelevanter Sensorsysteme in die entsprechenden Kategorien ist in Abb. 2-10 dargestellt.

Unter dem Begriff Pflanzendetektion werden Systeme verstanden, deren Aufgabe sich auf das Lokalisieren von Pflanzen beschränkt. Diese technischen Lösungen dienen häufig dazu, den Einsatz von Totalherbiziden zu reduzieren. Dabei unterscheidet sich das Reflexionsverhalten des Hintergrundes stark von dem der zu detektierenden Pflanzen. Gesunde Vegetation reflektiert durch den Chlorophyllgehalt der Blätter stärker im Infrarot- als im Rot-Bereich (Carlson & Ripley, 1997). Dieses Messverfahren kommt auch bei den Systemen AmaSpot der Amazonen-Werke H. Dreyer (Hasbergen, Deutschland), sowie WEED-IT Quadro von Rometron (Stenderen, Niederlande) zum Einsatz. Die Sensoren arbeiten fremdlichtunabhängig und senden Licht im Wellenlängenbereich von Rot und Infrarot (IR) aus. Die Unterscheidung von Grünpflanze und unbewachsenem Boden erfolgt anhand der Erkennung der Chlorophyll-Fluoreszenz. Die Sensoren weisen eine Arbeitsbreite von einem Meter auf und umfassen vier Kanäle, wodurch Abtaststreifen mit einer Breite von 25 cm resultieren (Amazonen-Werke, 2017; Rometron, 2021). Ebenfalls nach dem Prinzip der Chlorophyll-Fluoreszenz arbeiten die Systeme Weed Detection der Firma Optronica (Innsbruck, Österreich) sowie WeedSeeker der Firma Trimble Agriculture Division (Westminster CO, USA). Diese Systeme finden vor allem Anwendung in Anbauverfahren mit stark reduzierter mechanischer Bodenbearbeitung (Direktsaat-Verfahren) (Trimble, 2019).

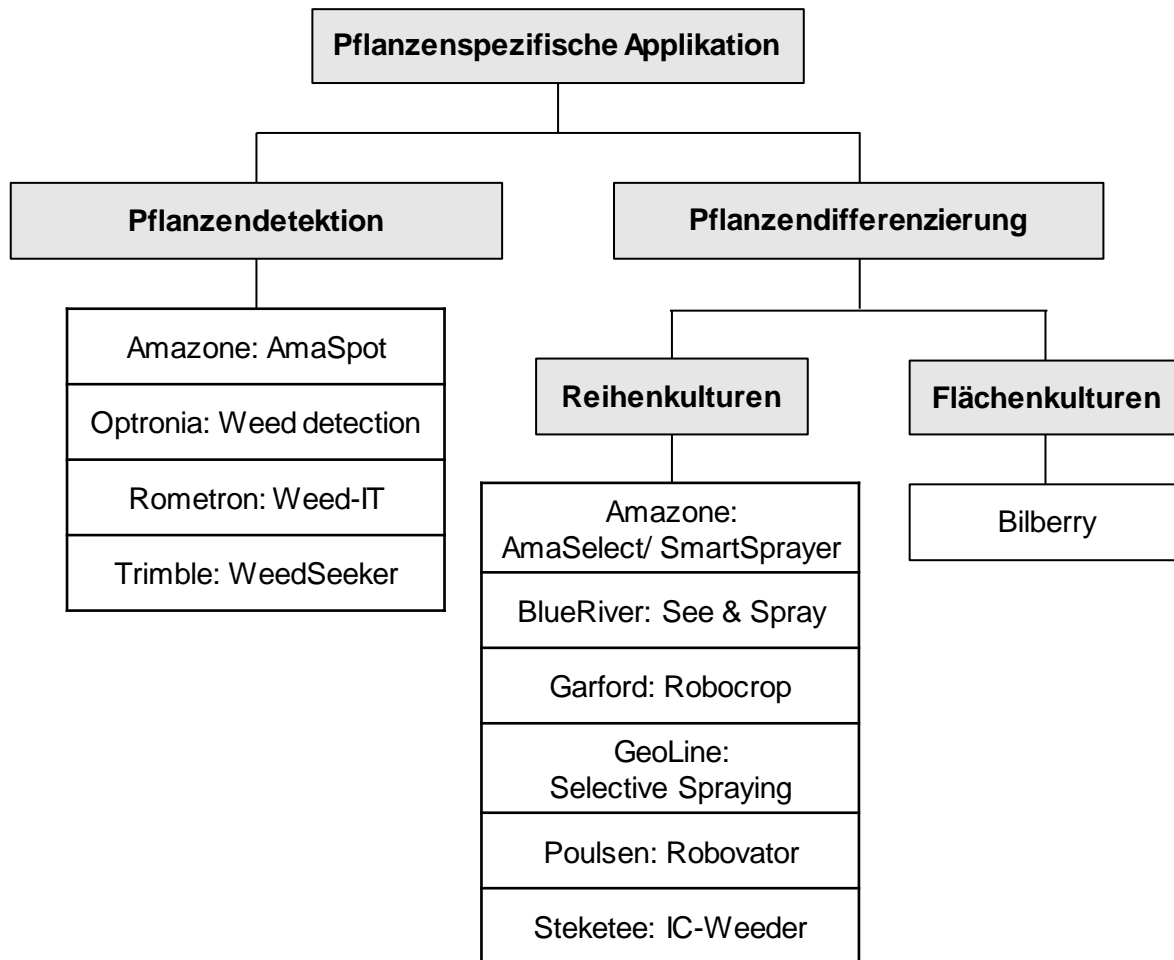


Abb. 2-10: Klassifizierung des Herstellerangebotes pflanzenspezifischer Applikationstechnik und deren Anwendungsbeispiele

Im Gegensatz zur Pflanzendetektion, stellt die Pflanzendifferenzierung höhere Anforderungen an die Auflösungsgenauigkeit des verwendeten Sensors. Die Unterscheidung von bewachsenem zu unbewachsenem Boden, sowie der Einfluss des Hintergrundes ist in vergangenen Studien ausführlich untersucht worden (Biucas-Dias et al., 2012; Jacobi et al., 2006; Ma et al., 2014; Schmittmann & Schulze Lammers, 2017). Die Herausforderung bei technischen Lösungen im Bereich der Pflanzendifferenzierung ist eine gewisse Mindestgröße der Objekte, um einen ausreichenden Kontrast zwischen Unkraut- und Kulturpflanze zu generieren. Bei der Pflanzendetektion ist dieser Kontrast zwischen grüner Pflanze und braunem Hintergrund ausgeprägter.

Pflanzendifferenzierung impliziert eine Unterscheidung von Kultur- und Unkrautpflanze. Während bei Reihenkulturen die Saatgutablage durch Vereinzelungsorgane in vorgegebenen Reihen erfolgt (Schmittmann et al., 2010), wird das Saatgut bei Flächenkulturen durch Drillsaat ohne Vereinzelungstechnik abgelegt. Daraus resultieren unterschiedliche Anforderungen an die Technik zur Pflanzendifferenzierung. Systeme wie AmaSelect bzw. SmartSprayer der Amazonen-Werke H. Dreyer, Selective Spraying von GeoLine (Reggio Emilia, Italien) oder See & Spray der Firma BlueRiver (Sunnyvale, Kalifornien) sind in der Lage, Unkräuter von

Kulturpflanzen in Reihenkulturen zu differenzieren. Zu Anfang beschränkte sich das Pflanzenerkennungssystem von BlueRiver auf die Vereinzelnung von Salatbeständen. Störeinflüssen durch vorhandene Unkräuter mit unterschiedlicher Pflanzengestalt wurde dabei keine Rechnung getragen (Fennimore & Cutulle, 2019). In der Folge dient das See & Spray-Verfahren vornehmlich der Reduktion von Herbizidtoleranzen in glyphosatresistenten Kulturpflanzen. Untersuchungen zu teilschlagspezifischen Applikationen von glyphosathaltigen Herbiziden zeigen Resistenzrückgänge von 77 % bei einem Unkrautbesatz von 7.500 Pflanzen ha⁻¹ (Evans et al., 2016).

Zur Unkrautregulierung in Reihenkulturen kommen neben den erwähnten Techniken zur selektiven Pflanzenschutzmittel-Applikation auch mechanische Maßnahmen in Form von sensorgesteuerten Hacken zum Einsatz. Bei der Unkrautbekämpfung in Beständen mit koordinatengestützter Aussaat, kann die bekannte Position der Nutzpflanzen ausgenutzt werden (Schulze Lammers et al., 2017). Während der Aussaat werden die GPS-Positionen der Kulturpflanzen in einer Datenbank hinterlegt. In den übrigen Bereichen rund um die Koordinatenpunkte, kommt das Hackwerkzeug zum Einsatz. Ein Beispiel dafür ist das an der Fachhochschule Osnabrück entwickelte Hackgerät (siehe Abb. 2-11).

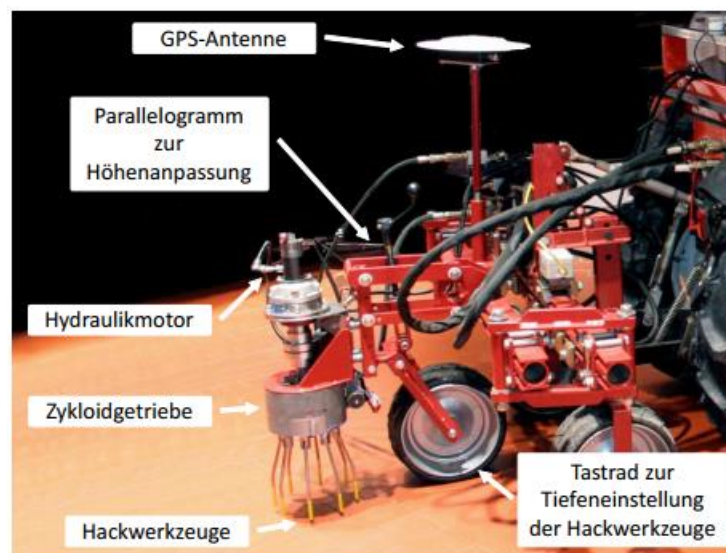


Abb. 2-11: Hackgerät der Fachhochschule Osnabrück zur georeferenzierten Unkrautbekämpfung (Müter, 2017)

Dieses System verfügt über einen hydraulisch angetriebenen Zylinder, der vertikal über der Pflanzenreihe rotiert. Daran montierte Zinken führen durch die Überlagerung aus Rotations- (Zylinder) und Translationsbewegung (Vorfahrt des Fahrzeugs) eine zyklische Bahnbewegung aus. Durch das Einschwenken einzelner Zinken sowie Drehzahländerungen des Zylinders kann diese Bahn geändert werden, um den Bereich der Nutzpflanze auszusparen. Durch Überlagerung mit reflexionsbasierten Sensoren zur Pflanzenerkennung können Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Hacke erhöht werden (Griepentrog et al., 2010).

Im Gegensatz zum kinematischen Ansatz des oben genannten Hackgeräts, wurde am Institut für Landtechnik der Universität Bonn eine Rotationshacke entwickelt, deren Drehachse in Fahrtrichtung angeordnet ist. Ziel dieser Bauform ist die Möglichkeit der Unkrautbekämpfung innerhalb der Reihe zwischen den Nutzpflanzen (intra-row) in Abhängigkeit des Pflanzenabstandes und -entwicklungsstadiums (Gobor, 2007). An einer Welle befestigte Arme mit Hackwerkzeugen werden von einem Schrittmotor angetrieben. Zu Anfang der Entwicklung erfolgte die Ansteuerung des Schrittmotors mittels Eingangsdaten aus Soll- und Ist-Pflanzenabstand. Zwei verschiedene Schwellenwerte dienten zur Pflanzendetektion. Über einen Laser-Reflexionstaster wurde durch die Messung der Signal-Laufzeit der Abstand zum Boden ermittelt. Durch die Erhebung der Pflanzen über dem Boden, sinkt der Abstand zum Sensor unterhalb eines festgelegten Schwellenwertes. Dieses zeitkontinuierliche, wertdiskrete Signal dient als Eingangssignal zur Ansteuerung des Schrittmotors. Eine Differenzierung zwischen Unkräutern und Nutzpflanzen oder anderen Fremdkörpern ist nicht möglich. Nach ähnlichem Prinzip wurden Versuche mit einem Farbsensor durchgeführt. Anstelle des Distanz-Schwellenwertes, wurde der Schrittmotor mittels Farb-Schwellenwert angesteuert. Der entsprechende Farbunterschied zwischen Boden und Pflanze wurde für die in diesen Versuchsreihen verwendete Kunstpflanze kalibriert. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen eine Anwendbarkeit dieses kinematischen Modells in einem praxisrelevanten Hacksystem (Gobor, 2007).

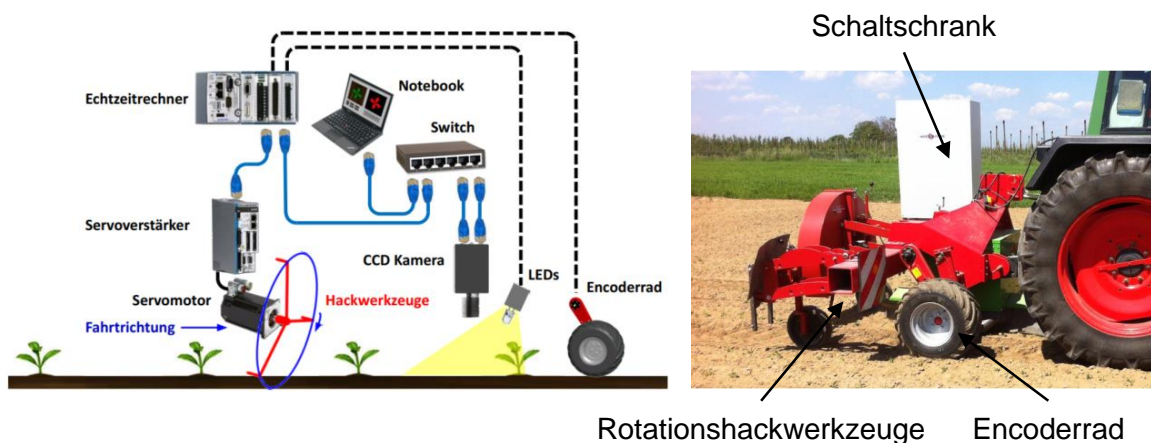


Abb. 2-12: Rotationshacke des Instituts für Landtechnik, Universität Bonn (Müter, 2017)

Die Weiterentwicklung von einem pflanzendetektierenden System zu einer pflanzendifferenzierenden Rotationshacke wurde im Rahmen der Dissertation von Müter (2017) am Institut für Landtechnik durchgeführt. Die Datenübertragung geschieht über ein Gigabit-Ethernet-Protokoll, welches die Echtzeitfähigkeit des Systems sicherstellt. Über das Encoderrad wird ein rechteckiges Trigger-Signal erzeugt, wodurch sowohl Kamera als auch Lichtquelle angesteuert werden. Das erzeugte Bild wird zum Notebook gesendet, dort ausgewertet und daraus die Pflanzenposition bestimmt. Zusammen mit der Vorfahrt-Position des Versuchsträgers sowie der Ist-Position des Servomotors, wird die Soll-Position des Motors in einem geschlossenen Regelkreis berechnet. Daraus resultiert die Bearbeitung des Bodens zwischen den Kulturpflanzen innerhalb der Reihe (intra-row Bereich) mittels der rotierenden Hackwerkzeuge.

Stellvertretend für kamerabasierte Hacksysteme im Schlepperanbau, werden im Folgenden drei Praxisgeräte vorgestellt. Herstellerübergreifend werden die Hackwerkzeuge durch vertikale Rotationsachsen angetrieben. Als Unterscheidungsmerkmal kann dabei die Energiequelle der Aktuatoren herangezogen werden. Sowohl die Hackwerkzeuge bei den Systemen von Garford (Peterborough, UK) als auch F. Poulsen (Hvalsø, Dänemark) werden hydraulisch betrieben. Bei Steketee (Stad aan 't Haringvliet, Niederlande) sind die Aktuatoren pneumatisch betätigt. Zwischen den Reihen wird der Boden mit üblichen Hackwerkzeugen bearbeitet, wie sie in konventionellen Hacken zum Einsatz kommen.

Das System Robocrop der Firma Garford verfügt über scheibenförmige Rotationshackwerkzeuge, die mit einer Ausbuchtung versehen sind. Wird eine Kulturpflanze detektiert, erfolgt die Ansteuerung der Hackwerkzeuge und die Scheiben rotieren passend zur Vorfahrtsgeschwindigkeit um die Kulturpflanze herum. Die Bildverarbeitungstechnik umfasst eine RGB-Kamera mit einer Auflösung von 320 x 240 Pixeln, die über eine serielle Schnittstelle mit dem Bordrechner kommuniziert. Durch Montage der Kamera in einer Höhe von 1,7 m, deckt die Kamera eine Arbeitsbreite von 2,5 m ab. Die Unkrautreduktion dieses Systems wurde mithilfe eines um die Nutzpflanze gelegten konzentrischen Kreises mit Radius $r = 240$ mm bewertet. Zur Detektion der Einzelpflanze wurde ein Algorithmus gewählt, der auf zweidimensionalen Wavelets basiert. Die Reduktionsrate berechnet sich aus der Anzahl Unkräuter vor der Überfahrt und den innerhalb von zwei Wochen wieder aufgelaufenen Pflanzen. Je nach Witterungsverhältnissen liegt die Unkrautreduktion bei diesem System zwischen 66 % und 74 % (Tillett et al., 2008).

Das System der Firma Steketee wird unter dem Markennamen IC-Weeder vertrieben. Ähnlich dem Robocrop von Garford, dienen sichelförmige Rotationshackwerkzeuge der mechanischen Unkrautregulierung in der Reihe. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale sind Position und Abschirmung der Kamera gegenüber Umwelteinflüssen. Pro Reihe wird eine RGB-Kamera verwendet, die durch ein Gehäuse von natürlichem Sonnenlicht abgeschirmt ist und mit einer weißen LED-Lichtquelle beleuchtet wird. Die Bildverarbeitung basiert auf Fast Fourier Transformationen (FFT) (Bontsema et al., 1991). Das System ist in der Lage, Unkräuter mit seinen pneumatisch angetriebenen Hackwerkzeugen in Beständen mit grünen Kulturpflanzen zu eliminieren. Möglichkeiten der Bestandesdokumentation bietet das System durch Aufzeichnung der Anzahl detektierter Unkräuter, Messung des Grünbedeckungsgrades sowie Bestimmung von Farbunterschieden innerhalb des Bestandes (Hemming et al., 2018).

Die dritte kameragesteuerte Hacke wird von der Firma F. Poulsen unter dem Markennamen Robovator vertrieben. Analog zum IC-Weeder ist eine Kamera pro Reihe installiert. Bei diesem System sind die Hackwerkzeuge in Form gebogener Rundstäbe ausgeführt. Zwei Rundstäbe pro Reihe werden hydraulisch aus der Reihe herausbewegt, wenn das System eine Nutzpflanze erkennt. Zur Unterscheidung von Unkraut und Nutzpflanze werden unterschiedliche Reflexionseigenschaften durch Größenunterschiede ausgenutzt. Aus diesem Grund sind entweder unterschiedliche Wachstumsstadien oder Differenzen im Größenwachstum zwischen Unkräutern und Kulturpflanzen notwendige Bedingung zum Einsatz dieser Hacktechnik, ähnlich des Auswertalgorithmus nach Elstone et al. (2020) (siehe Kap. 2.2.3.5). Das System wird durch den Bediener auf die vorliegenden Verhältnisse angepasst, sodass möglichst geringe

Beschädigungen an den Nutzpflanzen sowie eine größtmögliche Unkrautreduktion stattfinden. Deren Einflüsse auf Ertragsentwicklungen sowie der Vergleich mit manueller Unkrautregulierung und Herbizideinsatz wird in Lati et al. (2016) untersucht.

Im Gegensatz dazu ist das Kamerasystem der Firma Bilberry (Gentilly, Frankreich) in der Lage, auch Unkräuter in Flächenkulturen zu identifizieren. Zur Anwendung kommt dieser Sensor in Pflanzenschutzspritzen der Firma Agrifac (Steenwijk, Niederlande) bei der Applikation in Grünland, beispielsweise zur Detektion von Ampfer und Löwenzahn (Bilberry, 2020). Vorteil hierbei ist der markante Phänotyp von breitblättrigem Ampfer oder Löwenzahn in schmalblättrigem Gras. Dies bestätigen Voruntersuchungen zum Reflexionsverhalten des TrueColor-Sensors nach (Schmittmann & Schulze Lammers, 2017). Da die Blattform einen wesentlichen Einfluss auf die Luminanz hat, setzt an dieser Stelle der Einsatz des TrueColor-Sensors an, welcher in Kap. 3.1 näher beschrieben wird.

Im Folgenden wird der Stand des Wissens sensorgestützter Stickstoffdüngung erläutert. Dies dient als Hintergrund für den zweiten Anwendungsfall, welcher in Teil B dieser Arbeit behandelt wird.

2.3 Teil B: Sensorgestützte Stickstoffdüngung

2.3.1 Hintergrund und Effekte der Stickstoffdüngung im Getreidebau

Als Bestandesführung wird in der Pflanzenproduktion die vegetationsbegleitende Versorgung der Nutzpflanzen bezeichnet. Einen wichtigen Beitrag zu ressourcen- und umweltschonender Wirtschaftsweise spielen teilschlagspezifische Anwendungen durch digitalisierte Lösungsansätze (Auernhammer, 1999). Diese Maßnahmen basieren auf den grundlegenden pflanzenbaulichen Zusammenhängen zur ertragsorientierten Produktion landwirtschaftlicher Erzeugnisse und werden im Folgenden erläutert. Die Darstellung des Vegetationsverlaufes von Wintergetreide in Abb. 2-13 zeigt die Notwendigkeit einer termingerechten Versorgung der Pflanzen mit Stickstoff. Die Entwicklungsstadien entsprechen dabei dem BBCH-Code (Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie).

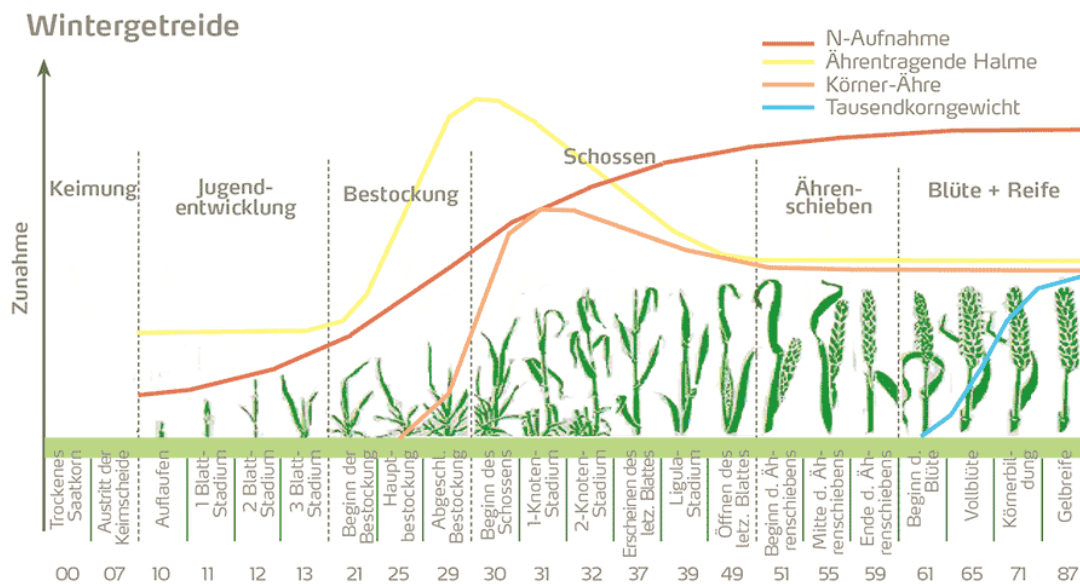


Abb. 2-13: Verlauf der Stickstoff-Aufnahme und deren Auswirkungen über die Entwicklungsstadien von Wintergetreide (Yara, 2021)

Die erste Stickstoff-Gabe erfolgt nach der Vegetationsruhe im Frühjahr und dient der Regulierung zu bildender Seitentriebe (Bestockung). Folglich nimmt die Anzahl ährentragender Halme zwischen BBCH 21 und BBCH 29 stetig zu und erreicht zum Ende der Bestockung den Höchststand. Wie der Verlauf zeigt, werden während des Schossens überzählige Ähren reduziert, sodass sich die tatsächliche Ährenzahl bis zum Ährenschieben verringert. Zwischen BBCH 30 und BBCH 32 wird die zweite Stickstoff-Gabe zu Beginn des Längenwachstums der Pflanzen appliziert (Yara, 2021). In dieser Entwicklungsphase haben die Pflanzen den höchsten Stickstoffbedarf, wie die Darstellung der N-Aufnahme in Abb. 2-13 zeigt. Eine bedarfsgerechte Nährstoffversorgung kommt in dieser Phase die höchste Bedeutung zu. In Kombination mit einer möglichst ressourcenschonenden Bewirtschaftung ist eine sensorgestützte Entscheidungshilfe zu diesem Zeitpunkt sinnvoll (McVeagh et al., 2012).

Wie in Abb. 2-13 zu erkennen, beginnt die Zunahme des Tausendkorngewichts (TKG) zum Beginn der Blüte. Um eine ausreichende Stickstoffversorgung in dieser Phase der Kornfüllung vorzuhalten, wird eine dritte Stickstoff-Gabe durchgeführt (Alcoz et al., 1993).

2.3.2 Auswertalgorithmen zur Stickstoffdüngung

Algorithmen zur Stickstoffdüngung dienen der Umrechnung von Reflexionsmesswerten in Düngerapplikationsmengen. Diese variieren je nach Pflanzenart und Standortbedingungen, wie Wasserverfügbarkeit und Ertragspotential (Auernhammer, 2001). Dazu ist eine Kalibrierung im Voraus der Düngerapplikation erforderlich, um quantifizierbare Düngeempfehlungen geben zu können. Ein Abgleich spektraler Eigenschaften mit pflanzenbaulichen Parametern ist dazu notwendig (Auernhammer, 1999). Unabhängig von der konkreten technischen Umsetzung einer pflanzenspezifischen Stickstoffversorgung, gilt es zunächst die grundsätzliche Strategie der Nährstoffapplikation zu klären. In der Literatur werden die Begrifflichkeiten Robin Hood- und King John-Funktion unterschieden (Agricon, 2021; Guerrero et al., 2021). Bei dem

Robin Hood-Verfahren wird eine Angleichung ertragsschwacher Standorte durch höhere Düngegaben angestrebt. An Teilschlägen mit höherem Ertragspotential wird die Stickstoffzufuhr reduziert. Im Gegensatz dazu wird die Düngemenge bei der King John-Funktion an ertragsstärkeren Standorten erhöht und im Gegenzug an Teilschlägen mit niedrigerem Ertragsniveau reduziert. Ziel beider Strategien ist die Einsparung von Düngemitteln bei höherem oder gleichbleibendem Ertrag. Nach Guerrero et al. (2021) ist das Robin Hood-Verfahren mit einem Mehrertrag von 10,4 % bei gleichzeitiger Düngereduzierung von 19,44 % sowohl ökonomisch als auch ökologisch dem King John-Verfahren überlegen. Beide Verfahrensarten sind vorteilhaft gegenüber einer einheitlichen Bewirtschaftung. Dem gegenüber zeigt die Studie nach Basso et al. (2011), dass die King John-Strategie bei ausreichender Wasserversorgung sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht präferiert wird. Bei geringeren Niederschlägen während der Vegetationszeit ist eine Steigerung der N-Gabe dagegen kontraproduktiv. In Folge des stark vegetativen Wachstums, wird das generative Wachstum negativ beeinflusst, was zu geringeren Kornerträgen führt (van Herwaarden et al., 1998). Dies zeigt beispielhaft, wie vielschichtig die Stickstoffdüngung aus pflanzenbaulichen Gesichtspunkten diskutiert werden muss. Da die Eignung eines TrueColor-Sensorarrays zur Stickstoffdüngung im Rahmen dieser Arbeit im Vordergrund steht, wird im Folgenden auf Studien zu reflexionsbasierten Stickstoffmessungen näher eingegangen.

Die bisher entwickelten Indizes zur sensorgesteuerten Düngung basieren auf der Verrechnung spektraler Kanäle aus dem sichtbaren und nahinfraroten (NIR) Wellenlängenbereich (Hedley, 2015). Die Spektralanalyse basiert auf dem Reflexionsverhalten pflanzlicher Zellkompartimente. Die Pigmente innerhalb der Chloroplasten werden in die beiden Photosysteme I (Absorptionsmaximum bei einer Wellenlänge von $\lambda = 700$ nm) und II (Absorptionsmaximum bei $\lambda = 680$ nm) eingeteilt (Nelson & Yocum, 2006). Die Absorptionseigenschaften der Pigmente im blauen und roten Wellenlängenbereich erzeugen die Komplementärfarbe Grün, wodurch sich die menschliche Wahrnehmung der Blattfärbung ergibt (Reckleben, 2014).

In der Literatur finden sich verschiedene Modellierungsansätze für die Spektralanalyse. Ein Unterscheidungsmerkmal ist die Anzahl verwendeter Frequenzbänder. Ein Ansatz zur Entwicklung von Indizes stellt die multivariate Verrechnung von bis zu drei Bereichen des Reflexionsspektrums dar. Während gesunde Vegetation einen geringen Reflexionsanteil im Wellenlängenbereich zwischen $\lambda = 600 - 700$ nm (rotes sichtbares Licht) aufweist, ist die Reflexion zwischen $\lambda = 700 - 1300$ nm (nahinfrarotes Licht) höher (Carlson & Ripley, 1997). Ein kostengünstiger Ansatz zur Abschätzung des Stickstoffgehalts anhand des Reflexionsverhältnisses R_{ratio} (R_{870}/R_{620}) ist mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,70$ (Diacono et al., 2014) bzw. 0,82 (Adhikari et al., 2020) möglich. Untersuchungen von Chen et al. (2010), Erdle et al. (2011), Westermeier und Maidl (2019) zeigen, dass die Güte der Indizes zur Bestimmung des Stickstoffgehaltes sowohl von Kulturart als auch Wachstumsbedingungen in den Versuchsjahren abhängt. Eine hinreichende Güte wird durch Verwendung unterschiedlicher diskreter Wellenlängen (Daughtry, 2000) sowie empirisch bestimmter Anpassungsfaktoren erreicht (Chen et al., 2010; Haboudane et al., 2002). Eine häufige Form zur Detektion pflanzlicher Inhaltsstoffe stellt die Partial Least Square Methode dar (Miyamoto & Kitano, 1995; Sánchez et al., 2003; Wedding et al., 2012). Im Gegensatz zu Ansätzen über Indexberechnungen erfordert

diese Art der multivariaten Regression eine Vorbehandlung der Datensätze. Das Signalrauschen wird durch Differenzieren des Rohsignals reduziert; wobei aus der zweiten Ableitung inklusive Beseitigung der Ausreißer die höchsten Bestimmtheitsmaße zur Stickstoff-Vorhersage resultieren (Wang et al., 2019).

Neben dem Reflexionsspektrum der Pflanzenzellen selber, haben sowohl die Frischmasse als auch der Bedeckungsgrad einen Einfluss auf die Einschätzung des Pflanzenzustandes. Online-Messungen der Frischmasse zeigen starke Korrelationen zum Pflanzenzustand und damit dem Ertrag (Padilla et al., 2019). Häufig geschieht die Ertragsabschätzung erst bei der Ernte. Eine davon unabhängige Abschätzung im Voraus lässt die Möglichkeit einer angepassten Strategie für die laufende Anbauphase offen (Ehlert et al., 2003; Gianquinto et al., 2011). Voraussetzung einer ertragssteigernden Pflanzenversorgung ist das Ertragspotenzial des Bodens. Stellt dieser den begrenzenden Faktor für das Pflanzenwachstum dar, werden die Gesichtspunkte zur pflanzenindividuellen Versorgung differenziert betrachtet (Arregui & Quemada, 2008). Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Nährstoffaufnahmefähigkeit der Pflanzen (Gianquinto et al., 2010). Grundlage für die Nährstoffversorgung von Kulturpflanzen wie Getreide ist die agronomische Beziehung zwischen Stickstoffaufnahme und Ertragszuwachs (Yara, 2021). Hohe Kornerträge setzen sich aus der Anzahl ährentragender Halme, dem Verhältnis Körner/Ähre sowie dem Tausendkorngewicht zusammen. Während der Pflanzenbedeckungsgrad vor allem die Bestockung und damit die Anzahl ährentragender Halme (ab BBCH 21) abbildet, wird die Anzahl der Körner pro Ähre durch die Düngegabe zu Beginn des Längenwachstums (BBCH 30-31) gesteuert. Dem gegenüber stellt eine Stickstoff-Gabe nach Ende des Ährenschiebens (ab BBCH 61) eine ausreichende Nährstoffversorgung zur Entwicklungsphase der Kornfüllung sicher (Yara, 2021).

Starke Korrelationen ergeben sich durch statistische Analyse im roten Wellenlängenbereich bei $\lambda = 678$ nm mit einem Korrelationskoeffizienten $r = -0,724$ sowie im NIR-Bereich zwischen $\lambda = 721 - 1050$ nm mit $r = 0,68$ zwischen dem Bedeckungsgrad und der Biomasse (Zheng et al., 2015). Untersuchungen zeigen eine Korrelation zwischen Biomasse und Ertrag von bis zu $R^2 = 0,56$ (Ehlert & Dammer, 2006).

2.3.3 Systeme zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung in der landwirtschaftlichen Praxis

Entstanden aus wissenschaftlichen Untersuchungen zum Einfluss der Nährstoffversorgung auf das Reflexionsverhalten von Pflanzen, existieren praxisrelevante Produkte diverser Hersteller. Eine Übersicht verfügbarer Reflexionssensoren zur Stickstoffdüngung mit aktiver Beleuchtung und deren technische Spezifikationen ist in Tab. 2-4 dargestellt. Neben Unterschieden bezüglich der Messtechnik, spielen für den Anwender ebenfalls konstruktive Gesichtspunkte wie der Anbau am Traktor eine Rolle. Entsprechend lässt sich eine Unterteilung anhand des Blickwinkels vornehmen. Zu den Systemen die senkrecht zum Bestand von oben messen, zählen Crop Circle (Holland Scientific Inc, Lincoln, Großbritannien), OptRx (Ag Leader Technology, Ames, USA), GreenSeeker (Trimble Inc., Sunnyvale, USA) und ISARIA PRO Active (Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Großhelfendorf). Im Gegensatz dazu werden die

Sensorsysteme CropSpec (Topcon Corporation, Tokyo, Japan) und N-Sensor ALS (Yara International ASA, Oslo, Norwegen) auf dem Kabinendach des Schleppers montiert und messen die Pflanzenreflexion schräg. Der resultierende Messfleck dieser Sensoren ist im Gegensatz zu den senkrecht messenden Systemen mit einer Breite von 6 m am größten.

Tab. 2-4: Technische Spezifikationen aktiv beleuchteter Reflexionssensoren zur Stickstoffdüngung (Drücker, 2016; Kendall et al., 2017; Whelan, 2015; Xu, 2008)

	Crop Circle	OptRx	GreenSeeker	ISARIA PRO Active	CropSpec	N-Sensor (ALS)
Hersteller	Holland Scientific	Ag Leader	Trimble	Fritzmeier	Topcon	Yara
Arbeits- höhe [m]	0,25 – 2,5		0,6		Kabinendach Traktor	
Messfleck- breite [m]	Höhe x 0,6		0,6 – 1,6		6	
Blinkwinkel	senkrecht			schräg		
Wellen- länge [nm]	670 730 780		656 774	670 – 780	730-740 800-810	730 760
	Vegetationsindex (NDVI oder NDRE)					
Daten- ausgabe	Band- information Benutzer- definierter Index	Empfehlung der N-Applikationsmenge				

Die spezifischen Wellenlängen unterscheiden sich zwar bei Produkten, das Prinzip kombinierter Lichtquellen aus dem roten und nahinfraroten Wellenlängenbereich ist aber bei allen Sensoren vergleichbar. Vegetationsindizes können von allen verfügbaren Sensoren ermittelt werden. Die Ausgabe benutzerdefinierter Indizes ist lediglich mit dem Crop Circle möglich, wohingegen bei den übrigen Sensorsystemen eine Empfehlung der Stickstoff-Applikationsmenge gegeben wird.

Auf die Sensorik angepasste Applikationstechniken sind Voraussetzung für eine teilschlagspezifische Düngung. Variable Applikationsraten sind bei konventionellen Scheiben-Düngerstreuern systembedingt nicht in kleinräumiger Auflösung möglich. Alternativ kann Dünger in granulierter Form teilflächenspezifisch mittels Tiefendepotdüngung (Klein et al., 2015) oder pneumatisch unterstützten Verteileinheiten oberflächlich ausgebracht werden (Kowalewsky & Scheufler, 2019). Die Einbringung des Düngers in den Boden erfolgt mit einer Ablagetiefe von bis zu 25 cm schlauchförmig und luftdicht durch Luftabscheidung während der Injektion. Dieses Verfahren wird zur Anwendung in Reihenkulturen, vornehmlich Mais und Gemüsekulturen, beschrieben (Eilbote, 2021). Bei der oberflächlichen Applikation erfolgt die Dosierung des Düngers aus dem Vorratsbehälter durch eine Nockenrad-Dosierwalze. Der Dünger wird auf Basis des Venturi-Effektes mittels Injektor durch das Verteilgestänge transportiert. Die einzelnen Düngerauslassöffnungen haben einen Abstand von 1,20 m und können unabhängig voneinander stufenlos elektrisch geregelt werden (Uppenkamp, 2021).

2.4 Zielsetzung und Anforderungsliste

Die sensorbasierte Ausbringung von Herbiziden sowie Stickstoff-Dünger ist Teil der praktischen Anwendung teilschlagspezifischer Anbauverfahren. Jedes Verfahren wird bisher separat durch unterschiedliche Technologien umgesetzt. Während in der Unkrauterkennerung vorwiegend kamerabasierte Technologien vertreten sind, wird der Stickstoffbedarf in der Regel durch multispektrale Reflexionssensoren realisiert (vgl. Kap. 2.2.4 und 2.3.3). Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen umfasst die kombinierte Anwendung in Form eines dualen Sensorprinzips. Aus agronomischen Gesichtspunkten ist diese Dualanwendung nicht zeitgleich, sondern zu entsprechenden Anwendungszeiten innerhalb der vegetationsbegleitenden Bestandesführung zu verstehen.

Entsprechend der VDI-Richtlinie 2221 (Verein deutscher Ingenieure e.V., 2019) wurde eine Anforderungsliste zur konstruktionsgerechten Verfahrensentwicklung erstellt (Tab. 2-5). Neben der Unterscheidung zwischen Fest- und Mindestforderungen sowie Ziel- und Wunschforderungen, wurde diese Darstellung der Anforderungsliste um die Teilaspekte der Pflanzendiskriminierung sowie Stickstoff-Düngung erweitert. Als Festforderung werden dabei Anforderungen gekennzeichnet, deren Erfüllung zwingend der Einsatzfähigkeit des Sensors dient. Dazu zählen die Fremdlichtunabhängigkeit (0.1) zum Einsatz der Sensoren ohne äußere Störeinflüsse. Des Weiteren ist die Anforderung zur Echtzeitfähigkeit (0.2) bei der Pflanzendiskriminierung fest formuliert. Zum einen weisen die Pflanzen in bekämpfungswürdigen Stadien eine zügige Jugendentwicklung auf, was den Einsatz in frühen Entwicklungsstadien erfordert (0.3). Gleichzeitig ist die notwendige Applikationsgenauigkeit bei kleinen Pflanzen hoch, was eine Unkrauterkennerung und –bekämpfung im Online-Verfahren notwendig macht. Im Gegensatz dazu soll die Einsatzfähigkeit von Sensoren zur Stickstoff-Düngung in möglichst weiten Entwicklungsstadien sichergestellt werden. Dies ist erforderlich, da die Bestandesführung mittels aufgeteilter Stickstoff-Gaben von der Bestockung bis zum Ährenschieben praktiziert wird.

Im Allgemeinen ist bei der Integration der Sensoren in vorhandene Systeme Wert auf ein geringes Einbaugewicht zu legen (1.2). Um eine hohe Einsatzsicherheit gewährleisten zu können, sind die Sensoren gegen mögliche äußere Einflüsse zu schützen. Dazu zählen neben dem Schutz gegen Staub und Spritzwasser (1.3) auch Maßnahmen gegen Überhitzung (1.5), um möglichst störungsarme Signale zu erhalten. Die Anwendung zur Herbizidapplikation mittels Pflanzenschutzspritze erfordert kaskadierbare Sensoren, um die Arbeitsbreite am Spritzgestänge mit möglichst geringem Verschaltungsaufwand abdecken zu können (2.1). Zu Wartungs- und Reparaturzwecken ist auf eine gute Zugänglichkeit der elektronischen sowie optischen Bauelemente zu achten (3.1).

Als Mindestforderung ist im Zusammenhang dieser Methodenentwicklung eine Verbindung zum Schlepper vorgesehen, welche durch Anzahl und Verbindungsart beliebig über das Mindestmaß hinaus erfüllt werden kann. Im Vergleich dazu, sind Wunschforderungen weder Voraussetzung zur Erfüllung der Funktionalität noch des Entwicklungsverfahrens. Dazu zählen im vorliegenden Fall sowohl die Eignung des Sensors in frühen Entwicklungsstadien zur Stickstoff-Düngung (0.3) sowie die Eignung in weiten Bereichen der Entwicklungsstadien bei der Pflanzendiskriminierung (0.4).

Tab. 2-5: Anforderungsliste zur Entwicklung eines Sensors zur dualen Anwendung in Anlehnung der Konstruktionsrichtlinien

	Anforderung	Wert	Pflanzen- diskriminierung	Stickstoff- Düngung
0	Allgemeines			
0.1	Fremdlichtunabhängigkeit		F	F
0.2	Echtzeitfähigkeit		F	Z
0.3	Eignung in frühen Entwicklungsstadien	BBCH 10 – 14	F	W
0.4	Eignung in weitem Bereich von Entwicklungsstadien	BBCH 30 – 59	W	F
0.5	Arbeitsgeschwindigkeit	> 10 km h ⁻¹	Z	Z
1	Geometrie/ Abmaße			
1.1	Kompatibilität mit Einzeldüsenschaltung	50 cm	F	Z
1.2	Geringes Gewicht		F	F
1.3	Staub- und spritzwassergeschützt	IP 64	F	F
1.4	Anfahrerschutz		Z	Z
1.5	Schutz gegen Überhitzung		F	F
2	Modularität			
2.1	Kaskadierung der Arrays am Spritzgestänge	36 m	F	Z
2.2	Schnittstelle zu Schlepper		M	M
3	Wartung			
3.1	Zugänglichkeit elektronischer Bauteile		F	F

F = Fest-, M = Mindest-, W = Wunsch, Z = Zielforderung

Zielforderungen sollen durch den Entwicklungsprozess erfüllt werden und sind nicht zwingend für die Funktionsfähigkeit der Sensorik. Beispielhaft dafür sind die Anforderungen an Arbeitsgeschwindigkeit (0.5) sowie Anfahrerschutz (1.4) zu nennen. Die Sensoren sind sowohl bei niedrigeren Geschwindigkeiten, als auch ohne Schutz vor mechanischen Einflüssen anwendbar. Im Rahmen der Weiterentwicklung können diese Aspekte aber durchaus als Zielforderung formuliert werden. Gleichzeitig können sowohl die Echtzeitfähigkeit (0.2) als auch Kompatibilität

mit Einzeldüsen-schaltung (1.1) bei der Stickstoff-Düngung als Ziel- und nicht als Festforderung formuliert werden. Grund dafür ist eine mögliche Implementierung der Sensorik in marktübliche Scheibenstreuer. Dadurch werden geringere Anforderungen an die räumliche Auflösung gestellt, da die Applikationstechnik systembedingte Mindestgrößen der teilschlagspezifischen Bewirtschaftung vorgibt. Die vorliegenden Untersuchungen zielen auf die spätere Verwendung der Sensoren in Feldspritzen ab, wodurch sich die Formulierung als Zielforderung ergibt. Da sowohl Düngemittel als auch Herbizide eine Applikation in flüssiger Formulierung erlauben, ist ein solches System im Rahmen von Untersuchungen zur dualen Anwendung von TrueColor-Sensoren zu bevorzugen.

Im Fokus dieser Arbeit stehen Untersuchungen im Zusammenhang mit der physikalischen Eignung des Sensorarrays. Das Datenmanagement bzw. eine praxisgerechte Umsetzung können Aufgabenpakete für zukünftige Forschungsarbeiten darstellen und sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.

3 Material und Methoden

In diesem Kapitel wird zunächst die verwendete Sensorik und deren technische Kenndaten näher erläutert. Im Anschluss erfolgt die Versuchsbeschreibung zur Pflanzendiskriminierung, in der sowohl Versuchsaufbau als auch –parameter dargestellt werden. Im dritten Abschnitt wird die Vorgehensweise bei den Feldversuchen beschrieben.

3.1 TrueColor-Sensorarray

Das Messverfahren des verwendeten Sensors beruht auf dem Prinzip der Reflexionsmessung von Echtfarbwerten und wurde in Array-Bauweise unter der Typ-Bezeichnung PR0262 von der Firma Premosys (Kalenborn-Scheuern, Deutschland) entwickelt. Darin sind fünf Einzelsensoren inklusive Lichtquellen mit einer Segmentbreite von jeweils 10 cm nebeneinander angeordnet (siehe Abb. 3-1).

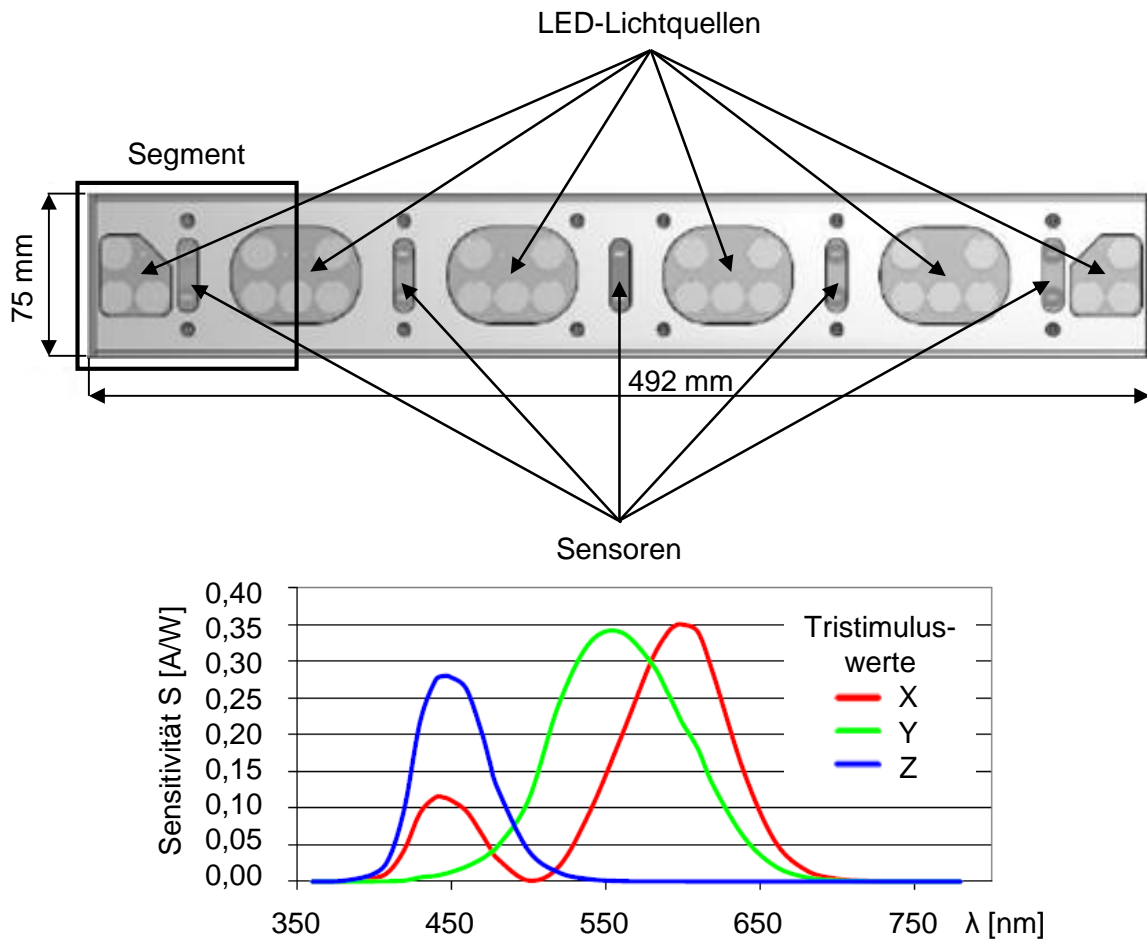


Abb. 3-1: Oben: Anordnung der Einzelsensoren/ Lichtquellen des verwendeten TrueColor-Sensorarrays, unten: Sensitivität S der Filterfunktionen nach Standard der CIE 1931 ohne IR-Kanal (Mazet, 2016)

Die frequenzgesteuerten Lichtquellen vollziehen einen ständigen Hell-Dunkel-Abgleich, der zur tageslichtunabhängigen Farbmessung des Sensors notwendig ist. Das System wird mit

einer 24 V DC-Spannungsquelle versorgt. Die aktive Beleuchtung zur Erfassung der Echtfarbwerte bilden weiße LED-Lichtquellen mit einer Farbtemperatur von 5700 Kelvin (Tageslichtweiß) (Deutsches Institut für Normung, 2018). Das Spektrum der Lichtquelle erstreckt sich von 300 nm bis 830 nm und bildet damit die Strahlungsfunktion der CIE-Normlichtart D65 ab (Deutsches Institut für Normung, 2021). Darüber hinaus ist dieser Sensor in einem Infrarot (IR)-Kanal mit der Wellenlänge $\lambda = 850$ nm sensitiv. Daraus ergeben sich mit den Tristimuluswerten X, Y, Z und IR = 850 nm vier Ausgangsgrößen pro Sensor.

Auf den Mikro-Chips der Sensoreinheiten sind Fotodioden mit Interferenzfiltern integriert. Die Dioden sind als Segmente einer mehrgliedrigen hexagonalen Matrixstruktur mit einem Durchmesser von 2 mm angeordnet. Diese Technologie wird auch als Pin-Silizium-Technologie bezeichnet und weist einen hohen Transmissionsgrad im Bandpassbereich auf (Mazet, 2016). Die Verschaltung der Sensoreinheiten folgt dem Prinzip integrierter Schaltkreise (integrated circuit, kurz IC-Technologie). Die Verläufe der Sensitivitäten für die XYZ-Farbwerte sind in Abb. 3-1 dargestellt. Aus der Kombination der Spektralwerte des einfallenden Lichtes, gewichtet mit den Funktionen der auf die Fotodiode aufgebrachten Interferenzfilter, ergeben sich die Ausgangsströme der Farbsensor-ICs. Die daraus resultierende Normierung der Messwerte ergibt die absoluten XYZ-Normspektralwerte (Mazet, 2012). Daraus berechnete CIE Lab-Farbwerte werden in den vorliegenden Untersuchungen als Datengrundlage der Reflexionsmessungen genutzt und im Folgenden verwendet.

Mit einer Gehäusebreite von 492 mm liegt der Erfassungsbereich eines Arrays bei 500 mm, was dem üblichen Düsenabstand bei Feldspritzen in Europa entspricht. Über ein Kommunikationskabel mit USB-Schnittstelle können sogenannte Master-Arrays mit dem Rechner verbunden werden. Ein Master kann mit zwei Slaves verbunden werden und die erfassten Reflexionsdaten an den Rechner übertragen.

Die technischen Daten des TrueColor-Sensorarrays können Tab. 3-1 entnommen werden. Der Einsatz des Sensorarrays erfordert eine DC-Spannungsversorgung von 22 V bis 26 V. Bei der Auslegung der Stromversorgung ist eine maximale Stromabnahme von 2 A zu berücksichtigen. Die Ansteuerung der Aktorik erfolgt mit einem Ausgangsstrom von 80 mA pro Ventilausgang. Es sind maximal fünf Ventilausgänge pro Array ansteuerbar. Das Gewicht eines Sensorarrays beträgt 1 kg und ist bei der konstruktiven Auslegung der Halterung durch statische und dynamische Lasten zu berücksichtigen.

Tab. 3-1: Technische Daten des TrueColor-Sensorarrays

Merkmal	Wert
DC-Spannungsversorgung	22 V – 26 V
Max. Stromabnahme	2 A
Ausgangsstrom	80 mA pro Ventilausgang
Sättigungsspannung	≤ 1,5 V
Ventilausgänge	5
max. Fahrgeschwindigkeit	25 km h ⁻¹
IR-Lichtquelle	LED, 850 nm
VIS-Lichtquelle	Weißer LED, 5700 Kelvin
Betriebstemperatur	10 °C bis 35 °C
Lagertemperatur	-10 °C bis 60 °C
Gewicht	1kg
Schnittstelle	RS485 (integriert in USB-Anschluss)
Gehäuse	Aluminium beschichtet
Schutzklasse	IP54 (staub- und wasserdicht)
Betriebsfeuchtigkeit	35 % bis 85 % rel. Feuchte

Mit der am Institut für Landtechnik entwickelten Software können die Reflexionsmesswerte in verschiedene Ausgabeformen konvertiert werden. Die gemessenen Werte können darin grafisch dargestellt und abgespeichert werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die Farbwerte aus den Tristimuluswerten X, Y, Z in den CIELab-Farbraum umgerechnet und zusammen mit dem aufgezeichneten IR-Kanal als csv-Datei abgespeichert. Die resultierenden vier Kanäle mit L (Luminanz), a (rot/grün), b (gelb/blau) und IR-Kanal bilden die Grundlage der Auswertungen.

3.2 Teil A: Versuche zur Pflanzendifferenzierung von Unkräutern und Nutzpflanzen am Beispiel von Zuckerrüben, Mais und Soja

3.2.1 Versuchsaufbau des statischen Prüfstands

Zur Erstellung einer Datenbank von Reflexionsmesswerten untersuchter Pflanzenarten diente ein Stativ mit Drehgestell, an dem sowohl ein TrueColor-Sensorarray als auch ein Punktlaser sowie eine Kamera befestigt waren (siehe Abb. 3-2).

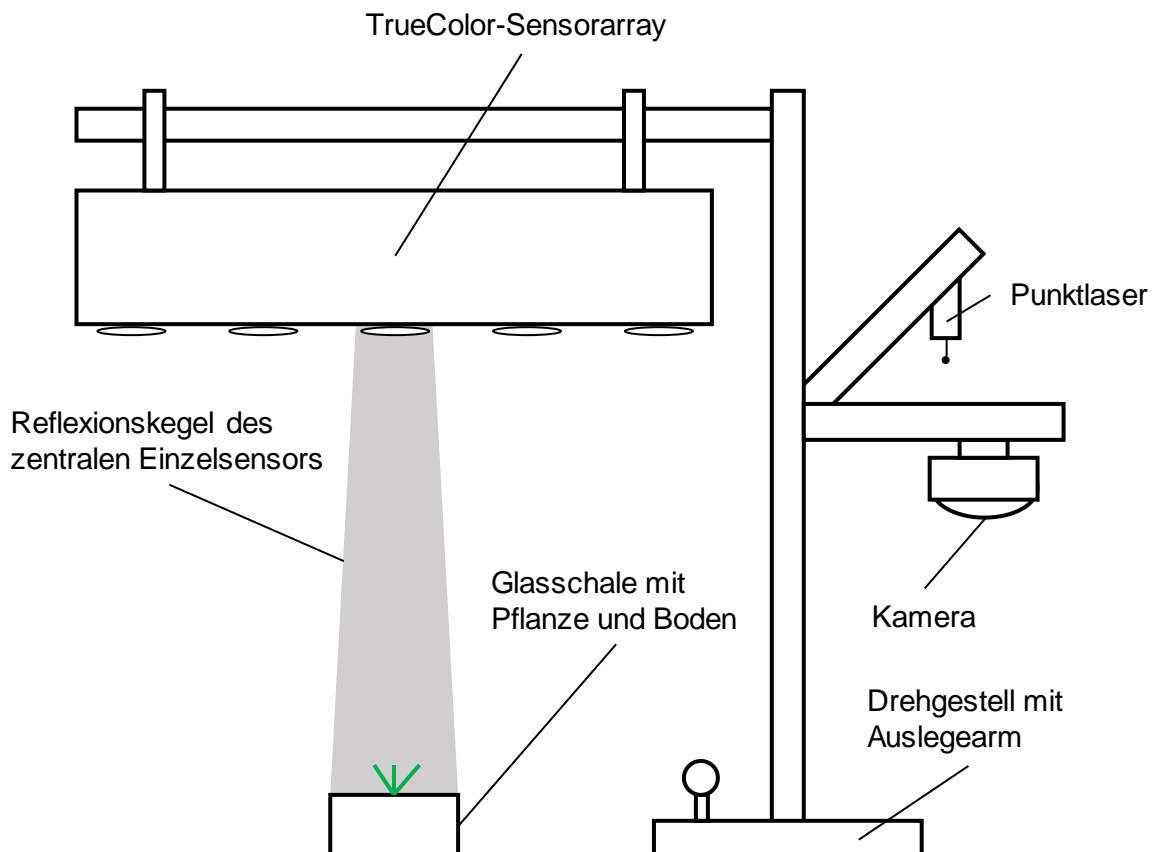


Abb. 3-2: Statischer Versuchsaufbau zur reproduzierbaren Aufnahme des Reflexionsverhaltens verschiedener Pflanzenarten inklusive Boden als Hintergrund

Die Pflanzen wurden anhand des Punktlasers reproduzierbar unter dem zentralen Einzelsensor des Arrays ausgerichtet. Aus dem Messabstand von 50 cm resultiert ein quadratischer Messfleck mit einer Fläche von 100 cm², welcher die gesamte Mischfläche aus Pflanze und Boden (Hintergrund) erfasst (siehe Abb. 3-2). Die Glasschalen wurden auch ohne Pflanzen zur Referenzmessung des Hintergrundes mittels TrueColor-Sensorarray vermessen. Dies wird im folgenden Kapitel als Bodenreferenz bezeichnet.

Die Bildaufnahme erfolgte mit einer Webcam Typ C922 PRO von Logitech (Lausanne, Schweiz) und einer Auflösung von 1080 x 720 Pixeln. Daraus wurde die Blattfläche mittels

Farbschwellenwertbildung mit Hilfe der Software ImageJ (Open Source) bestimmt. Alle Messungen wurden zur statistischen Absicherung und besseren Reproduzierbarkeit an zehn verschiedenen Pflanzen je Art und Entwicklungsstadium durchgeführt.

3.2.2 Beschreibung verwendeter Versuchsparameter zur Pflanzendiskriminierung

Zur Differenzierung verschiedener Nutzpflanzen von Unkräutern mittels TrueColor-Sensor wurden insgesamt 12 verschiedene Pflanzenarten im Gewächshaus angezogen. Eine Übersicht zu Anzahl und Entwicklungsstadien der untersuchten Pflanzen gibt Tab. 3-2.

Tab. 3-2: Übersicht verwendeter Pflanzenarten und deren botanische Einordnung

Nr.	Familie		Pflanzenart	Wissenschaftlicher Name
1			Rauhaariger Fuchsschwanz	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.
2	Amaranthaceae	Fuchsschwanzgewächse	Weißer Gänsefuß	<i>Chenopodium album</i> L.
3			Zuckerrübe	<i>Beta vulgaris</i> L.
4			Kornblume	<i>Centaurea cyanus</i> L.
5			Gänseblume	<i>Bellis perennis</i> L.
6	Asteraceae	Korbblütler	Echte Kamille	<i>Matricaria chamomilla</i> L.
7			Löwenzahn	<i>Taraxacum</i> sect. <i>Ruderalia</i>
8	Fabaceae	Hülsenfrüchtler	Sojabohne	<i>Glycine max</i> L.
9	Geraniaceae	Storchschnabelgewächse	Wiesenstorchschnabel	<i>Geranium pratense</i> L.
10	Poaceae	Süßgräser	Mais	<i>Zea mays</i> L.
11	Polygonaceae	Knöterichgewächse	Floh-Knöterich	<i>Persicaria maculosa</i>
12	Rubiaceae	Rötegewächse	Kletten-Labkraut	<i>Galium aparine</i> L.

Die Auswahl orientiert sich an einer möglichst großen Abdeckung relevanter Pflanzenfamilien. Neben den Fuchsschwanzgewächsen beinhaltet die Familie der Korbblütler die meisten Vertreter dikotyler Unkräuter. Des Weiteren zählen Storchschnabel-, Knöterich- sowie Rötegewächse zu bekannten Vertretern relevanter Acker-Unkräuter (vgl. Kap. 2.2.2 aus (Gerhards, 1998)).

Die untersuchten Pflanzenarten wurden im Gewächshaus bei einer Tag-/Nachttemperatur von 23 °C/20 °C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 ± 10 % und einer Beleuchtungsdauer von 16 Stunden kultiviert. Die Aussaat der Samen erfolgte in Anzuchtschalen auf einer Rasentragsschicht, deren feinkrümelige Bodenaggregate ein rasches Auflaufen gewährleisteten. Die Anzucht der Zuckerrüben erfolgte aufgrund höherer Ansprüche bezüglich Nährstoffversorgung auf einem tiefgründigen Saatbett in Kunststoff-Töpfen (Durchmesser 18 cm, Höhe 21 cm) mit Vermehrungserde (Typ VM) der Einheitserdenwerke (Sinntal-Altengronau, Deutschland). Dazu wurde das pillierte Saatgut in Einzelkornsaat in die Töpfe ausgebracht. Zu den in Tab. 3-3 dargestellten Messterminen wurden die Pflanzen vereinzelt und in Glasschalen pikiert, welche ebenfalls mit Rasentragsschicht gefüllt waren.

Tab. 3-3: Übersicht verwendeter Pflanzenarten und deren Entwicklungsstadien (BBCH) zur Erhebung der Pflanzenreflexionswerte

Nr.	Pflanzenart	BBCH-Stadium						
		10	11	12	13	14	16	32
1	Echte Kamille					X	X	
2	Flohknöterich	X	X					
3	Gänseblume	X	X	X	X			
4	Kletten-Labkraut	X	X	X				X
5	Kornblume	X		X	X	X		
6	Löwenzahn	X	X	X	X	X		
7	Mais	X		X	X			
8	Rauhaariger Fuchsschwanz	X	X	X	X	X		
9	Sojabohne			X				
10	Weißer Gänsefuß	X		X		X	X	
11	Wiesenstorchschnabel		X					
12	Zuckerrübe	X		X		X		

Mit Ausnahme des Kletten-Labkrauts erfolgten die Messungen nach BBCH-Skala ausschließlich im Blattentwicklungsstadium, dem Makrostadium 1. In den vorliegenden Untersuchungen wies das Kletten-Labkraut einen zügigen Übergang vom Blattentwicklungsstadium über die

Bestockung hin zum Schossbeginn auf. Gleichzeitig verläuft die Blattflächenzunahme während dieser Makrostadien-Übergänge auf vergleichsweise moderatem Niveau (vgl. Kap. 4.1.3). Damit ist das Kriterium eines bekämpfungswürdigen Entwicklungsstadiums als gegeben anzusehen, woraus die Einschätzung als relevantes Stadium zur messtechnischen Erfassung resultiert. Die Erhebung der Pflanzenreflexionsdaten erfolgte ab dem frühestmöglichen messtechnisch erfassbaren Stadium. Mit Ausnahme von Kamille, Sojabohne und Wiesenstorchnabel gelang dies ab dem Keimblattstadium (BBCH 10).

3.3 Teil B: Einsatz des TrueColor-Sensorarrays zur Messung der Stickstoffversorgung bei Winterweizen und Wintergerste

3.3.1 Feldversuchsaufbau zur Kalibrierung der TrueColor-Sensorarrays

Die Versuchsdurchführung im Freiland fand auf dem Versuchsgut Campus Klein-Altendorf (50°37'51" N, 6°59'32" E) der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn statt. Der Bodentyp stellt eine Parabraunerde dar, deren Bodenart sich von lehmigem Schluff bis hin zu tonigem Lehm zusammensetzt (CKA, 2020a). Der Jahresniederschlag beträgt im langjährigen Mittel 603 mm sowie die Jahresmitteltemperatur 9,4 °C bei einer durchschnittlichen Vegetationsperiode von 165 – 170 Tagen (CKA, 2020b).

Im ersten Versuchsjahr wurde als Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) die Sorte Quadriga der Saatzuchtfirma Secobra (Moosburg an der Isar, Deutschland) nach Vorfrucht Winterweizen verwendet. Nach einer wendenden Grundbodenbearbeitung erfolgte die Aussaat am 28.09.2019. Im zweiten Versuchsjahr wurde die mehrzeilige Wintergerstensorte Meridian der Saatzuchtfirma KWS (Einbeck, Deutschland) ebenfalls nach Vorfrucht Winterweizen und einer wendenden Grundbodenbearbeitung am 25.09.2020 ausgesät. Beide Sorten sind Vertreter mehrzeiliger Wintergerste und dienen der Futtermittelproduktion.

Als Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) wurde in beiden Versuchsjahren die Sorte RGT Reform der Firma RAGT (Rodez, Frankreich) verwendet, welche ein Vertreter der Kategorie A-Weizen (Qualitätsweizen) ist. In der Fruchtfolge jeweils nach Zuckerrübe gestellt, erfolgte die Aussaat für das erste Versuchsjahr im Mulchsaatverfahren am 30.10.2019. Im zweiten Versuchsjahr erfolgte die Aussaat am 11.11.2020 nach wendender Grundbodenbearbeitung. Die Bestandesführung beider Versuchsanlagen durch Applikation von Herbiziden, Fungiziden, Insektiziden und Wachstumsreglern erfolgte einheitlich betriebsüblich. Während bei der Wintergerste im ersten Versuchsjahr zusätzlich eine Grunddüngung der Makronährstoffe Phosphor (P) und Kalium (K) im Spätsommer 2019 durch gekörnten Mineraldünger (P = 31 %, K = 40 %) stattfand, wurden alle weiteren Düngegaben mit Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL) in flüssiger Form mit Feldspritze und Schleppschläuchen appliziert. Die einzelnen Düngetermine sind Tab. 3-4 zu entnehmen.

Tab. 3-4: Übersicht der Düngetermine in den Stickstoffsteigerungsversuchen 2020/ 2021

Versuchsjahr	2020		2021	
Kulturart	Wintergerste	Winterweizen	Wintergerste	Winterweizen
Grunddüngung	09.08.2019	-	-	-
1. Gabe	17.03.2020	19.03.2020	02.03.2021	03.03.2021
2. Gabe	03.04.2020	15.04.2020	01.04.2021	08.04.2021
3. Gabe	29.04.2020	20.05.2020	06.05.2021	31.05.2021

Die erste Düngerapplikation zur Regulierung der Bestockung erfolgte Mitte März nach der Vegetationsruhe. Während die Wintergerste zu diesem Zeitpunkt bereits drei bis vier Bestockungstriebe ausgebildet hatte (BBCH 23/ 24), befand sich der Winterweizen dem üblichen Vegetationsverlauf entsprechend im Drei- bis Vier-Blatt-Stadium (BBCH 13/ 14). Die zweite Gabe zu Schossbeginn der Pflanzen erfolgte in der Wintergerste Anfang April. Nach acht bzw. zwölf Tagen folgte die Schossgabe im Winterweizen. Abschließend wurde die dritte Gabe zu Beginn des Ährenschiebens für Wintergerste Ende April 2020 bzw. Anfang Mai 2021 appliziert. Mitte (2020) bis Ende Mai (2021) folgte diese Maßnahme dann im Winterweizen, die gleichzeitig die Qualitätsdüngung darstellt.

Die Versuchsanlage umfasst in beiden Kulturarten jeweils vier Parzellen mit unterschiedlichen Düngegaben (siehe Tab. 3-5). Parzelle I stellt die Kontroll-Variante ohne Düngegabe dar. In Parzelle II wurde eine betriebsübliche N-Düngung nach Düngebedarfsermittlung appliziert. Daraus resultierten für Wintergerste insgesamt 160 kg N ha⁻¹, sowie für Winterweizen 180 kg N ha⁻¹. In Parzelle III wurde eine Mangelversorgung mittels 50 % reduzierter Aufwandmenge pro Gabe erzeugt. Die Gesamt-Stickstoffzufuhr ergibt sich zu 80 kg N ha⁻¹ (Wintergerste) bzw. 90 kg N ha⁻¹ (Winterweizen). Die Versuchsanlage wird mit Parzelle IV und einer um 50 % erhöhten N-Zufuhr je Gabe komplettiert. Mit insgesamt 240 kg N ha⁻¹ in Wintergerste sowie 270 kg N ha⁻¹ in Winterweizen wurden die Pflanzen in dieser Variante einer Überversorgung ausgesetzt.

Die N-Zufuhr aus mineralisiertem Stickstoff im Boden (N_{\min}) ergibt sich nach Tab. 3-5 uniform für die jeweiligen Versuchsjahre und -flächen. Der N_{\min} -Gehalt für Wintergerste liegt im zweiten Versuchsjahr leicht oberhalb des Vorjahresniveaus. Im Gegensatz zu 2019, erfolgte beim Weizen als Vorfrucht für das zweite Versuchsjahr keine Strohbergrung. Die N_{\min} -Gehalte im untersuchten Winterweizen resultieren aus der Vorfrucht Zuckerrübe, welche betriebsüblich ohne Blattbergrung geerntet wurden. Mit einem Gehalt von 81 kg N ha⁻¹ (2020) sowie 38 kg N ha⁻¹ (2021) liegt die Versorgung durch mineralisierten Stickstoff auf einem weitaus höheren Niveau.

Tab. 3-5: Übersicht der Düngegaben sowie Grundversorgung aus mineralisiertem Stickstoff (N_{\min}) in den Stickstoffsteigerungsversuchen 2020/2021

Versuchsjahr	2020				2021			
Kulturart	Wintergerste		Winterweizen		Wintergerste		Winterweizen	
Parzelle	N_{\min}^*	AHL*	N_{\min}^*	AHL*	N_{\min}^*	AHL*	N_{\min}^*	AHL*
I		0/0/0		0/0/0		0/0/0		0/0/0
II	9	60/50/50	81	60/60/60	16	60/50/50	38	60/60/60
III		30/25/25		30/30/30		30/25/25		30/30/30
IV		90/75/75		90/90/90		90/75/75		90/90/90

*[kg N ha⁻¹]

Die vorherrschende Trockenperiode vom späten Frühjahr bis Frühherbst 2019 ist als Ursache einer reduzierten Stickstoffaufnahme der Zuckerrübe zu nennen (Deutscher Wetterdienst, 2019). Aufgrund von Trockenstress-Symptomen durch abiotische Umweltfaktoren im Frühjahr 2020 in Kombination mit der hohen N_{\min} -Versorgung wird die Vergleichbarkeit der Reflexionsmesswerte für Winterweizen aus dem ersten Versuchsjahr in Kap. 4.2 auf eine repräsentative Aussagefähigkeit überprüft.

Die Parzellenanordnung orientiert sich nach den Vorgaben zur Durchführung und Technik von Feldversuchen an der Versuchsanlage zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Düngung (Schenk & Baumgartel, 2007). Die Parzellen weisen eine Länge von 20 m sowie eine Breite von 6 m auf, sind durch 10 m breite Bereiche getrennt und wurden zur Befahrbarkeit mit dem Feldversuchsträger neben einer Fahrgasse angelegt. Durch die Randomisierung der Düngegestufen ergeben sich die aus Tab. 3-5 ersichtlichen Applikationsmengen. Die in Abb. 3-3 dargestellten schraffierten Flächen dienten dem Einsatz der TrueColor-Sensoren. Dazu wurden sechs Arrays mit einem Messbereich von jeweils 500 mm nebeneinander an einer Alu-Profilschiene montiert, wie in Abb. 3-3 dargestellt. Der Auslegearm ist an einem hydraulisch zu betätigenden Frontlader angebaut. Dadurch ist eine exakte Führung des Auslegearms bezüglich Abstand und Winkel zum Messobjekt gewährleistet. Die Spannungsversorgung erfolgte durch einen Stromerzeuger, ein Netzteil mit einstellbarer Ausgangsspannung und integriertem AC/DC-Wandler sorgte für eine Gleichspannungsversorgung der Arrays von 24 V. Der Messabstand beträgt 500 mm bei einem Winkel von 90° zur Horizontalen (Nadir). Die Messbreite beträgt 3 m und ergibt einen Gesamt-Messbereich von 60 m² je Parzelle, die zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die gesamte Versuchslaufzeit unberührt blieben. Die Überfahrten wurden mit dreifacher Wiederholung und einer konstanten Geschwindigkeit von 0,1 m s⁻¹ durchgeführt. Die übrigen 60 m² der Parzelle wurden zur Messung von Referenzgrößen herangezogen, die im nächsten Abschnitt näher erläutert werden.

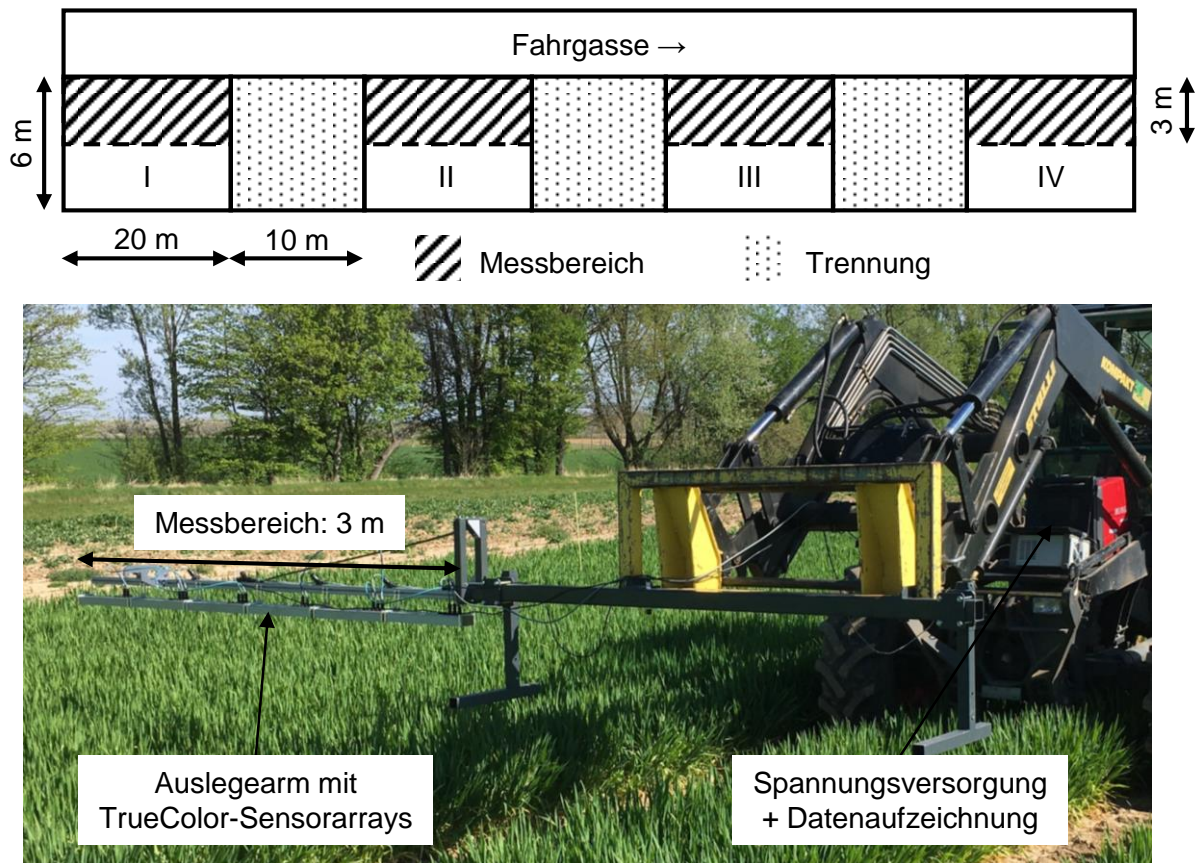


Abb. 3-3: Anordnung der Versuchspartellen zur Stickstoff-Kalibrierung des TrueColor-Sensors (oben) sowie Versuchsaufbau mit Auslegearm für TrueColor-Sensorarrays zur Messung der Stickstoffsteigerungspartellen (unten)

Durch Bestimmung des Pflanzenentwicklungsstadiums wurden die Messtermine gewählt. Es wurde darauf geachtet, die Bestände in möglichst homogenen Entwicklungsstadien zu vermessen sowie witterungsbedingte Einflüsse auf den Phänotyp zu minimieren. Besonders zu BBCH 39 (Fahnenblattstadium) weisen die Bestände heterogene Zustände auf. Während die Entwicklung des Fahnenblattes in Teilen des Bestandes noch nicht vollständig stattgefunden hat (BBCH 37-38), öffnete sich bei anderen Pflanzen bereits das oberste Blatt mit dem Übergang zum Ährenschieben (BBCH 49-51). Dies machte eine engmaschige visuelle Bestandeskontrolle erforderlich, um möglichst homogene Messbedingungen zu erreichen. Die Vermeidung von Einflüssen veränderter Reflexionseigenschaften durch Niederschlagsereignisse, Taubildung oder deutlich unterschiedliche Sonnenstände wurden zur besseren Reproduzierbarkeit ebenfalls berücksichtigt. Aus diesem Grund fanden die Messfahrten in den Feldversuchen lediglich bei abgetrockneter Blattoberfläche in einem Zeitfenster zwischen 10:00 Uhr und 12:00 Uhr statt. Daraus ergeben sich die in Tab. 3-6 dargestellten Mess- und Boniturtermine. Zwischen den Referenzmessungen der beiden Versuchsjahre im Zeitraum der ersten Düngergabe liegen witterungsbedingt zwölf Tage. Während der Unterschied zwischen den Messungen der WG zu BBCH 32 im ersten und zweiten Versuchsjahr vier Tage beträgt, vergrößern sich diese Abstände mit zunehmendem Vegetationsverlauf kontinuierlich. Daraus resultiert eine Differenz von 20 Tagen zwischen den beiden Versuchsjahren zur Messung in BBCH 59.

Dies ist auf deutlich niedrigere mittlere Temperaturwerte in der Hauptvegetationszeit von April bis Juni 2021 zurückzuführen (siehe Anhang).

Tab. 3-6: Mess- und Boniturtermine der Stickstoffsteigerungsversuche in den Versuchsjahren 2020/ 2021

Versuchsjahr	2020		2021	
Kulturart	Wintergerste*	Winterweizen*	Wintergerste*	Winterweizen**
BBCH 24*/ 13**	17.03.2020	17.03.2020	05.03.2021	05.03.2021
BBCH 32	16.04.2020	22.04.2020	20.04.2021	12.05.2021
BBCH 39	24.04.2020	20.05.2020	06.05.2021	02.06.2021
BBCH 59	07.05.2020	03.06.2020	27.05.2021	14.06.2021

Bei den Untersuchungen im WW lag der erste Messtermin zu BBCH 32 bereits 20 Tage hinter dem Datum aus 2020. Eine Überlagerung durch zwölf Tage spätere Aussaat sowie kühlere Wachstumsbedingungen bedingen entsprechend spätere Messtermine. Daraus resultieren veränderte Tageslängen bei gleichem Entwicklungsstadium der untersuchten Pflanzen.

Erkenntnisse aus den Messungen des Winterweizens im Jahr 2020 können aufgrund der anhaltenden Trockenheit in diesem Untersuchungszeitraum und daraus resultierender Trockenstress-Reaktionen des Bestandes nicht gezogen werden. Die limitierenden Faktoren bezüglich trockenstressbedingter Grenzen der Messfähigkeit werden in Kap. 4.2 näher erläutert.

3.3.2 Versuchsparemeter

Zur Bestimmung der Eignung von TrueColor-Sensoren zur Stickstoffdüngung sind agronomische Parameter zur Überführung pflanzenbaulicher Zustandsgrößen in optische Signale nötig. Ziel dieser Untersuchungen ist die Abbildung von Pflanzenparametern durch sensorisch erfassbare Reflexionsmesswerte. Dabei ist auf aussagekräftige Pflanzenparameter zur Abbildung der Bestandesentwicklung zu achten. Gleichzeitig ist eine hohe Reproduzierbarkeit und Praktikabilität im Rahmen von Versuchsdurchführungen zur technischen Entwicklung zu berücksichtigen. Unter Abwägung dieser Vorgaben, fiel die Auswahl auf drei Pflanzenparameter zusammen mit zwei Referenzmessverfahren.

– Pflanzenparameter

Neben der Bestimmung von Pflanzenbedeckung und –höhe wurde die Frischmasse als dritter Pflanzenparameter erhoben.

Zur Erhebung des Pflanzenbedeckungsgrades wurden pro Parzelle 10 Bilder mit einem Abstand von 50 cm zum Bestand und einem Winkel von 90° zur Horizontalen aufgenommen. Dies entspricht den gleichen Einstellungen wie zur Messwertaufnahme mittels TrueColor-Sensoren. Die Fotos wurden mit der Software ImageJ (Public Domain) ausgewertet. Eine Unterscheidung von grünen Pflanzen und Ackerboden lässt sich mittels Farbschwellenwerten erreichen. Eine sensitivere Differenzierung, beispielsweise von Stickstoffversorgungszuständen ist mit dieser Software nicht möglich. Der Pflanzenbedeckungsgrad resultiert aus der Normierung der Pflanzenbedeckungsfläche auf dem gesamten Fotoausschnitt. Die Bestimmung der Pflanzenhöhe erfolgte in den Entwicklungsstadien BBCH 32, 39 und 59 an jeweils 10 Einzelpflanzen pro Parzelle. Als dritter Pflanzenparameter erfolgte die Beprobung der Frischmasse auf einer Fläche von 0,5 m² mit 3 Wiederholungen pro Parzelle im Bereich der destruktiven Probenahme. Innerhalb des Untersuchungsbereichs wurden die Pflanzen vollständig oberhalb der Bodenoberfläche abgeschnitten, gesammelt und verwogen.

– Referenzmessverfahren

Die Erhebung einer beschreibenden Kenngröße zu Aussagen über den Chlorophyllgehalt während der Messungen im Feldversuch erfolgte mit einem Chlorophyll-Messgerät SPAD-502 der Firma Konica Minolta (Chiyoda, Japan). An 20 Einzelpflanzen pro Parzelle wurde die Untersuchung am jeweils jüngsten, vollständig entwickelten Blatt vorgenommen. Die Messmethode basiert auf dem Prinzip der Einzel-Photonen-Avalanche-Diode. Während des Kalibrierungsprozesses wandelt der Prozessor einen durch rotes Licht (λ_{650}) und Infrarotstrahlung (λ_{940}) erzeugten Strom in einen Spannungswert um. Die bei der Messung eines Blattes gewonnenen Transmissionswerte im roten (λ'_{650}) und infraroten (λ'_{940}) Wellenlängenbereich werden zu den Kalibrierungswerten (λ_{650} , λ_{940}) nach (1) hinzugefügt und bilden den SPAD-Wert (Markwell et al., 1995).

$$\text{SPAD-Wert} = \log \frac{\lambda'_{940} \cdot \lambda_{650}}{\lambda_{650} \cdot \lambda'_{940}} \quad (1)$$

Das C/N-Verhältnis wurde im Labor des Instituts für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES), Fachgebiet Agrarökologie und Organischer Landbau (AOL) der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn nasschemisch bestimmt und dient als Referenzgröße der tatsächlichen Stickstoff-Aufnahme. Das Probenmaterial dafür wurde ebenfalls aus dem Parzellenbereich für destruktive Proben entnommen. Dazu wurde eine Mischprobe aus 40 g Frischmasse in ca. 3 cm Stücke geschnitten und eingewogen um anschließend in einem Trockenschrank für 24 Stunden bei 60°C getrocknet zu werden. Kurz vor der Vermahlung wurden die Proben noch einmal bei 60°C getrocknet, um eventuell verbliebene Restfeuchte zu eliminieren.

3.3.3 Feldversuchsbeschreibung zur Anwendung der TrueColor-Sensorarrays unter Praxisbedingungen

Nachdem die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Stickstoffsteigerungsversuche zur Kalibrierung der TrueColor-Sensorarrays dienten, werden die Sensoren anhand des hier beschriebenen Praxisversuchs zum Unterbodenmanagement in der Anwendung getestet. Der in Abb. 3-4 dargestellte Versuchsaufbau wird im Folgenden näher erläutert.

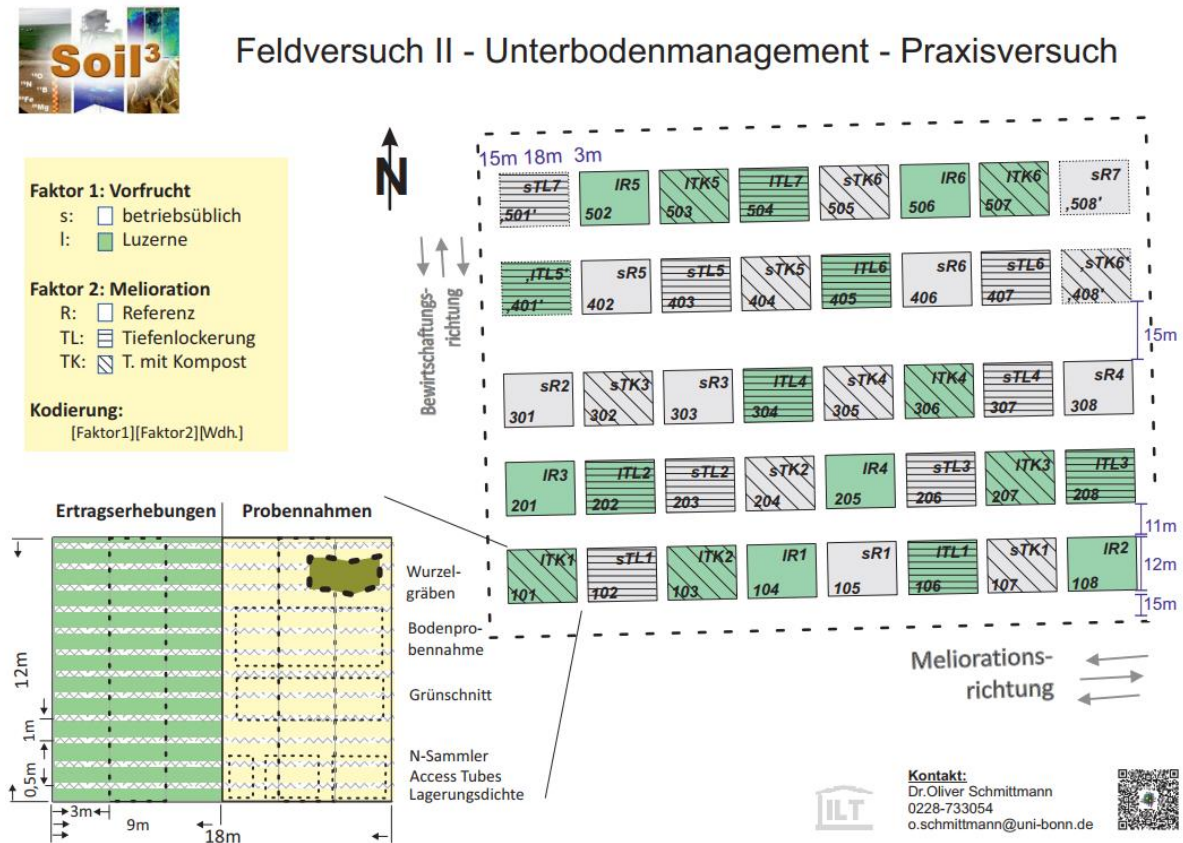


Abb. 3-4: Übersicht der Versuchsanlage zum Praxiseinsatz der TrueColor-Sensorarrays zur Messung der Stickstoffversorgung bei Winterweizen (Schmittmann, 2018)

Die Versuchsanlage folgt einem zweifaktoriellen randomisierten Aufbau. Als erster Faktor fließt die Vorfrucht in den Versuchsaufbau ein. Mit zwei Stufen setzt sich dieser aus einer betriebsüblichen Vorfrucht (s), sowie Luzerne (l) zusammen. In diesem Zusammenhang bezieht sich die Faktorstufe Vorfrucht auf die Hauptfrucht des ersten Versuchsjahres, Sommergerste zur Frühjahrsbestellung 2020. Der zweite Faktor beschreibt die Meliorationsart und setzt sich aus Referenz (R), Tiefenlockerung (TL) sowie Tiefenlockerung mit Kompost (TK) zusammen. Die Meliorationsrichtung verläuft nach Abb. 3-4 orthogonal zur Bearbeitungsrichtung. Durch Kombination der beiden Faktoren ergeben sich sechs Versuchsvarianten (sR, sTL, sTK, IR, ITL, ITK) mit jeweils sechs bzw. sieben Wiederholungen, woraus insgesamt 40 Parzellen resultieren.

Die Meliorationsmaßnahme wurde im September 2019 durchgeführt, worauf eine ganzflächig einheitliche Bearbeitung mit anschließender Aussaat einer Zwischenfrucht folgte. Die erste Hauptfrucht dieser Versuchsanlage bildete Sommergerste, die gleichzeitig die Vorfrucht des im Rahmen dieser Untersuchungen gemessenen Winterweizens war. Auf eine detailliertere Versuchsbeschreibung sowie Einordnung pflanzenbaulicher Aspekte der Meliorationsmaßnahme wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und ist Schmittmann et al. (2021) zu entnehmen. Die Verwendung dieses Versuchs als Funktionstest der TrueColor-Sensoren unter Praxisbedingungen ist in Erwartung heterogener Ertragsniveaus durch unterschiedliche Stickstoffversorgung sowie Dimensionierung der Versuchsanlage begründet. Unterschiedliche Stickstoffversorgungszustände resultieren einerseits aus dem Einfluss der Luzerne. Diese ist mit Hilfe ihrer Rhizobien in der Lage, Stickstoff aus der Luft in Aminosäuren umzuwandeln und somit im Boden zu speichern. Ein weiterer Stickstoffeintrag resultiert aus der Ausbringung von Kompost in den Unterboden. Daraus resultierende unterschiedliche Stickstoffversorgungszustände gilt es mittels der TrueColor-Sensorarrays zu untersuchen. Gleichzeitig eignet sich die praxisnahe Dimensionierung des Versuchs mit einer Gesamtfläche von 2,69 ha als Funktionserprobung hinsichtlich Auswirkungen zeitlicher Beanspruchungen.

Wie in Tab. 3-7 zusammengefasst, erfolgte die N-Zufuhr in zwei Düngegaben nach Düngebedarfsermittlung. Der Stickstoff wurde in Form von Kalkammonsalpeter in granulierter Form ausgebracht. Die übrige Bestandesführung erfolgte nach betriebsüblicher Verfahrensweise.

Tab. 3-7: Entwicklungsstadien und Termine zur Stickstoffapplikation und Datenerhebung

Entwicklungsstadium	Datum	N-Zufuhr [kg N ha ⁻¹]	Messung
BBCH 24	06.03.2021	56	
BBCH 30	15.04.2021	60	
BBCH 32	26.04.2021		X
BBCH 39	20.05.2021		X
BBCH 59	14.06.2021		X

Zwecks Vergleichbarkeit mit den Daten der Kalibrierung wurden die Reflexionsmessungen des Praxisversuchs ebenfalls in den Entwicklungsstadien BBCH 32, 39 sowie 59 durchgeführt. Mit 116 kg N ha⁻¹ liegt die N-Gabe im Vergleich zur betriebsüblichen Variante des Stickstoffsteigerungsversuchs im WW bei einer um 35 % gesenkten Zufuhr (vgl. Kap. 3.3.1). Die Parzellen weisen mit 18 m x 12 m eine Größe von 216 m² auf. Jede Versuchsparzelle ist in zwei Abschnitte unterteilt, welche zum einen der Ertragserhebung und zum anderen der Probennahme dienen. Im Rahmen dieser Auswertungen dienen die mittels Parzellen-Mähdrescher erhobenen Kornerträge als Zielgröße zum Abgleich mit den Sensorwerten. Sensorisch erfasst wurden

jeweils die linken Bahnen im Bereich der Ertragserhebung, welche eine Breite von 3 m aufweisen (siehe Abb. 3-4, unten links). Analog zu den Kalibrierversuchen, blieben diese Abschnitte über die gesamte Versuchslaufzeit unberührt. Die Erfassung von Pflanzenhöhe, Pflanzenbedeckungsgrad sowie SPAD-Werten erfolgte mit dreifacher Wiederholung innerhalb jeder Parzelle. Den Kalibrierversuchen entsprechend, diente die Erfassung dieser Pflanzenparameter sowie Referenzmessung zur Eignungsbeurteilung der Sensoren bezüglich einer messtechnischen Erfassung der Stickstoffversorgung.

3.4 Statistische Auswertung

Die statistische Analyse wurde mit der Software SPSS Statistics (IBM, Armonk, USA) durchgeführt. Sowohl die Reflexionsdaten zur Pflanzendiskriminierung als auch zur Stickstoff-Düngung wurden mittels einfaktorieller Varianzanalyse und einem Signifikanzniveau von $\alpha < 0,05$ geprüft. Lagen gleich große Stichprobenumfänge vor, wurde mittels des Tukey-Tests ein multipler Mittelwertvergleich durchgeführt. Bei unterschiedlich großen Stichprobenumfängen wurde der Post-hoc-Test nach Scheffé gewählt.

4 Ergebnisse und Diskussion

Die Beurteilung einer dualen Anwendbarkeit des TrueColor-Sensorarrays ist Inhalt des vorliegenden Kapitels. Die Ergebnisse in Teil A dienen der Potentialabschätzung einer pflanzenindividuellen Herbizidapplikation. In Teil B werden Daten analysiert, welche die Grundlage einer Düngebedarfsermittlung zur teilschlagspezifischen Stickstoff-Düngung darstellen.

4.1 Teil A: Einsatz des TrueColor-Sensorarrays zur Pflanzendiskriminierung

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Pflanzendiskriminierung mittels TrueColor-Sensorarray analysiert. Innerhalb dieses Teilgebiets wird zwischen Pflanzendetektion und Pflanzendifferenzierung unterschieden, deren Abgrenzung in Kap. 2.2.4 vorgenommen wurde. Für jeden Anwendungsbereich wird die Eignung der Reflexionskanäle untersucht. Ziel ist die Herleitung von Algorithmen zur Implementierung der Sensoreinheiten in feldtaugliche Systeme.

4.1.1 Wertebereiche charakteristischer Reflexionskanäle zur Pflanzendiskriminierung und deren statistische Beschreibung

Im ersten Schritt der Untersuchungen wurden die Reflexionswerte des TrueColor-Sensorarrays bei Variation des Pflanzenbedeckungsgrades aufgezeichnet. Analog zu der in Kap. 3.2.1 dargestellten Vorgehensweise, wurden die Reflexionswerte von möglichst homogen erscheinenden Laubblättern bei konstanten äußeren Einflüssen aufgezeichnet. Diese Reflexionswerte weisen eine starke Korrelation zur Pflanzenbedeckung auf, wie Tab. 4-1 zeigt. Die entsprechenden Regressionsmodelle sind in Abb. 7-1 im Anhang dargestellt.

Tab. 4-1: Korrelation zwischen der Pflanzenbedeckung und den Reflexionswerten bei homogen erscheinenden Laubblättern

	L	a	b	IR
r	-0,969	-0,981	0,980	0,990

Bei zunehmendem Bedeckungsgrad nimmt der Grün-Anteil (negativer a-Kanal) sowie die IR-Reflexion zu. Die Sensitivität des Sensorarrays ist unter Laborbedingungen ausreichend, um den Pflanzenbedeckungsgrad mit hoher Genauigkeit anhand der Reflexionskanäle abbilden zu können.

Die Basis der Pflanzendiskriminierung bildet die Datengrundlage der Reflexionskanäle für die untersuchten Pflanzenarten, deren Entwicklungsstadien sowie die verwendete Bodenreferenz. Zur statistischen Beschreibung der erhobenen Daten sind in Tab. 4-2 das arithmetische Mittel sowie die Standardabweichung dargestellt. Eine Plausibilitätsprüfung erfolgt anhand möglicher Tendenzen der Mittelwerte unterschiedlicher Entwicklungsstadien. Eine monotone Entwicklung der Reflexionswerte mit steigendem Entwicklungsstadium ist nicht für jede Pflanzenart gegeben. Dies wird am Beispiel von Rauhaarigem Fuchsschwanz (RF) deutlich. Ab

BBCH 12 sind monoton fallende Reflexionswerte mit zunehmendem Entwicklungsstadium über alle Reflexionskanäle zu beobachten. Die Reflexionskanäle in BBCH 10 und BBCH 11 sind auf vergleichbarem Niveau und tragen nicht zu einer aussagekräftigen Tendenz bei. Die Standardabweichungen der verschiedenen Entwicklungsstadien und Reflexionskanäle weisen keine Ausreißer auf. Der Betrag der Standardabweichungen wird mit steigendem Entwicklungsstadium größer, was auf stärkere Diversitäten des Phänotyps innerhalb älterer Stadien schließen lässt.

Innerhalb der Pflanzenart Gänseblume (GB) folgt die Entwicklung der Reflexionswerte einem anderen Verlauf. Die Mittelwerte des L-Kanals für BBCH 10 bis BBCH 13 steigen mit zunehmendem Entwicklungsstadium monoton an. Gleiches gilt für die IR-Reflexionswerte mit Ausnahme von BBCH 10. Bei a- und b-Kanal fallen die Mittelwerte vom Keimblattstadium bis Zweiblatt-Stadium monoton. Die Größenordnung der Standardabweichung ist mit Ausnahme des L-Kanals für BBCH 12 auf einem niedrigen Niveau. Eine monotone Steigerung der Reflexionsmittelwerte des L-Kanals mit zunehmendem Entwicklungsstadium ist bei Kletten-Labkraut (KL) und Löwenzahn (Lö) zu verzeichnen. Die anderen Reflexionskanäle dieser beiden Pflanzenarten weisen keine Stringenz bezüglich eines Zusammenhangs zwischen Mittelwert und Entwicklungsstadium auf. Analog zu vorherigen Pflanzenarten liegt die Standardabweichung auf einem vergleichbar niedrigen Niveau.

Die Reflexionsmittelwerte von Zuckerrüben (ZR) in BBCH 10 bis BBCH 14 haben mit Ausnahme des b-Kanals keinen monotonen Zusammenhang zu den Entwicklungsstufen. Zudem ist die Standardabweichung in BBCH 14 größer als bei den übrigen Entwicklungsstadien und Pflanzenarten, was durch deutlich größere Streuung der zugehörigen Blattflächen zu erklären ist (siehe dazu Kap. 4.1.3).

Im Gegensatz zu den bisher erläuterten Zusammenhängen weisen Kornblume (Ko) und Weißer Gänsefuß (WGä) sowohl im IR- als auch a- und b-Kanal eine stringente Entwicklung der Reflexionsmittelwerte über den Verlauf der Entwicklungsstadien auf. Mit fortschreitender Entwicklung nehmen die Mittelwerte in allen Reflexionskanälen monoton ab. Die L-Reflexion liefert in beiden Fällen keinen aussagekräftigen Verlauf. Für die Reflexionsmittelwerte der untersuchten Entwicklungsstadien von Mais sind die Erkenntnisse für den a-Kanal übertragbar. Dem gegenüber steht die monotone Zunahme der Reflexionsmittelwerte des b-Kanals, dessen Verlauf wiederum der b-Reflexion von Zuckerrüben entspricht.

Abschließend sind Tab. 4-2 die Reflexionswerte von feuchtem und trockenem Boden zu entnehmen. Die Reflexionswerte des trockenen Bodens liegen in allen Reflexionskanälen auf einem höheren Niveau bei vergleichbarer Größenordnung der Standardabweichung. Diese Vergleichbarkeit lässt auf homogene Bedingungen der Hintergrund-Reflexion schließen. Dadurch ist das im folgenden Kapitel beschriebene Verfahren der Analyse von Detektionslücken anhand der Extremwerte der Hintergrundreflexion anwendbar.

Tab. 4-2: Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (σ) der IR-, L-, a- und b-Reflexionswerte von Mischfläche (Pflanze + Boden) sowie Hintergrund (Boden)

	L		a		b		IR	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
RF_10	42,49	0,44	2,60	0,10	9,16	0,31	21,69	0,42
RF_11	42,75	0,30	2,60	0,09	9,18	0,30	22,26	0,20
RF_12	40,77	0,92	2,27	0,14	8,54	0,45	19,26	0,80
RF_13	39,55	0,69	1,85	0,23	7,98	0,48	18,70	0,63
RF_14	38,25	0,94	1,59	0,21	7,92	0,42	18,34	0,67
EK_14	38,74	0,99	1,90	0,13	9,73	0,43	18,73	0,49
EK_16	42,65	0,22	2,57	0,14	9,46	0,35	22,43	0,25
GB_10	33,09	0,71	1,68	0,08	7,08	0,36	14,34	0,38
GB_11	33,37	0,68	1,43	0,19	7,04	0,54	14,27	0,52
GB_12	33,91	1,17	1,16	0,23	6,11	0,58	14,69	0,55
GB_13	40,86	0,50	1,35	0,17	9,86	0,38	19,52	0,27
KL_10	38,62	0,92	1,59	0,12	9,68	0,40	18,61	0,55
KL_11	40,00	0,77	1,27	0,23	9,75	0,35	19,46	0,44
KL_12	42,09	0,60	1,39	0,16	7,29	0,39	17,48	0,40
KL_32	43,33	0,92	1,07	0,29	6,79	0,68	19,54	0,52
Lö_10	40,03	0,75	2,32	0,14	8,70	0,32	17,84	0,60
Lö_11	37,95	0,66	2,09	0,15	8,03	0,34	15,83	0,57
Lö_12	40,05	0,47	4,90	0,15	7,06	0,49	15,65	0,46
Lö_13	41,06	0,78	4,94	0,24	7,42	0,66	17,74	1,12
Lö_14	42,42	0,60	0,32	0,22	7,60	0,55	18,19	0,77
ZR_10	33,47	1,15	1,62	0,18	7,10	0,41	14,59	0,76
ZR_12	40,23	1,06	1,20	0,29	10,10	0,60	19,56	0,70
ZR_14	24,72	2,76	11,07	1,82	13,69	1,94	19,02	2,32
WS_11	41,61	0,96	0,45	0,26	7,59	0,69	16,37	0,48
FK_10	45,29	0,33	1,07	0,10	9,66	0,25	22,57	0,26
FK_11	45,69	0,26	0,51	0,14	8,39	0,29	22,15	0,33
Ko_10	44,46	0,32	0,94	0,09	8,84	0,32	22,48	0,47
Ko_12	45,28	0,21	0,35	0,12	8,60	0,19	22,29	0,28
Ko_13	45,26	0,31	0,28	0,08	8,52	0,28	22,17	0,33
Ko_14	44,89	0,40	0,11	0,29	8,38	0,42	21,63	0,05
Mais_10	40,56	0,80	2,51	0,20	9,45	0,54	18,43	0,45
Mais_12	45,40	0,68	2,16	0,18	9,50	0,61	23,83	0,49
Mais_13	44,35	0,53	0,27	0,51	10,09	0,54	22,39	0,51
Soja_12	45,31	0,35	1,74	0,30	9,15	1,10	25,46	0,98
WGä_10	45,93	0,38	2,54	0,17	9,70	0,35	23,36	0,58
WGä_12	45,57	0,40	0,93	0,19	9,53	0,40	22,54	0,28
WGä_14	45,41	0,26	0,59	0,12	8,59	0,34	22,09	0,24
WGä_16	45,62	0,16	0,44	0,12	8,20	0,20	22,07	0,29
Boden_feucht	33,85	0,91	1,54	0,12	6,81	0,68	14,67	0,67
Boden_trocken	40,32	0,62	2,52	0,13	8,94	0,33	18,97	0,66

RF = Rauhaariger Fuchsschwanz, EK = Echte Kamille, GB = Gänseblume, KL = Kletten-Labkraut, Lö = Löwenzahn, ZR = Zuckerrübe, WS = Wiesenstorchschnabel, FK = Flohknöterich, Ko = Kornblume, WGä = Weißer Gänsefuß

Zusammenfassend sind durch Analyse der Reflexionsmittelwerte innerhalb der Pflanzenarten erste Aussagen zur Eignung der Kanäle möglich. Während im Falle des L- und IR-Kanals sechs monotone Zusammenhänge von Entwicklungsstadium und Reflexionswerten vorhanden sind, ist dies mit Hilfe des a-Kanals bei sieben untersuchten Pflanzenarten der Fall. Aussagen über den Zusammenhang dieser beiden Reflexionskanäle sind mit Hilfe dieser Auswertung nicht möglich und sind Teil der Untersuchungen späterer Kapitel. Bei dieser Auswertungsform ist die höchste Aussagefähigkeit im b-Kanal zu finden. Häufig kommt es mit zunehmendem Entwicklungsstadium zu einem monotonen Verlauf der Reflexionswerte. Die Einsatzmöglichkeit dieses Reflexionskanals zur Objektdetektion von Pflanzen auf Boden wird durch Analyse der Detektionslücke im folgenden Kapitel analysiert.

4.1.2 Pflanzendetektion mittels IR-Kanal sowie CIELab-Farbraum

Zunächst wird das Detektionsvermögen anhand einzelner Reflexionskanäle untersucht. Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse werden im Weiteren die Signale in kombinierter Form analysiert. Anwendung können die hier dargestellten Ergebnisse in der Detektion grüner Pflanzen auf braunem Hintergrund finden.

4.1.2.1 Detektionslücken durch Analyse von Einzelkanälen

Abb. 4-1 zeigt die IR-Reflexionswerte der untersuchten Mischflächen sowie des Hintergrundes (trockener Boden).

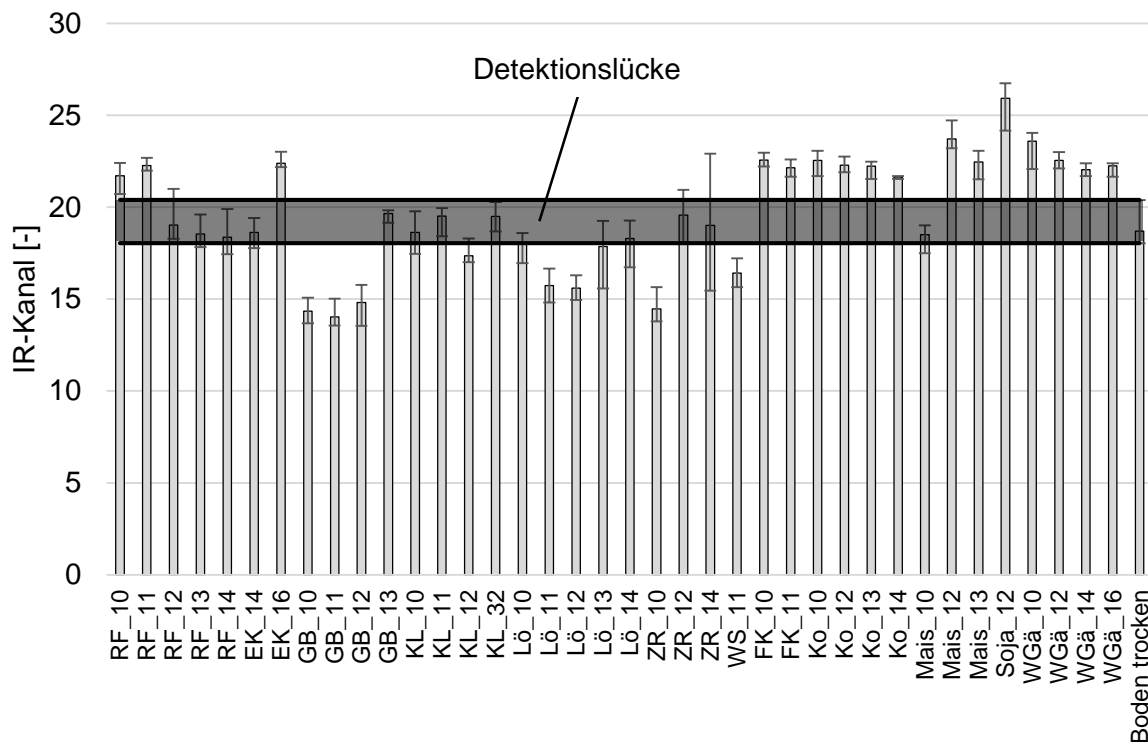


Abb. 4-1: IR-Reflexionswerte der untersuchten Pflanzenarten sowie Störeinfluss des Bodens

Die Säulen stellen die Median-Werte von Mischfläche und Hintergrund dar, Minimum und Maximum dieser Datenreihen sind durch Fehlerbalken dargestellt. Da der Median in der Mitte der Datenverteilung liegt, wird dieser im Gegensatz zum Mittelwert nicht von Extremwerten beeinflusst. Der Bereich zwischen Minimum und Maximum bildet die in Abb. 4-1 dargestellte Detektionslücke.

Im Wertebereich $18,04 < \text{IR-Wert} < 20,39$ sind die Reflexionssignale der untersuchten Objekte vom Hintergrund nicht signifikant unterschiedlich. Eine Differenzierung von Pflanze und Boden ist innerhalb dieses Bereiches nicht möglich. Dies trifft auf 15 untersuchte Objekte zu, bei denen kein direkter Zusammenhang zwischen fortschreitendem Entwicklungsstadium und zunehmender Detektierbarkeit zu erkennen ist. Bei rauhaarigem Fuchsschwanz, Gänseblume, Löwenzahn und Zuckerrübe sind die jüngeren Entwicklungsstadien detektierbar, während dies auf ältere Stadien mit höherem Bedeckungsgrad nicht zutrifft. Aus der Literatur sind Zusammenhänge bekannt, bei denen das unterschiedliche Reflexionsverhalten von gesunder Vegetation und Boden im IR-Bereich zur Pflanzendetektion genutzt wird (vgl. Kap. 2.2.4). Fortschreitende Pflanzenentwicklung und damit einhergehende Blattflächenvergrößerung verstärken die Intensität der Pflanzenreflexion im infraroten Wellenlängenbereich (Wartenberg et al., 2005). Dieser Zusammenhang lässt sich anhand von Abb. 4-1 nicht pauschal für alle untersuchten Pflanzenarten und –entwicklungsstadien bestätigen. Im Gegensatz dazu nimmt die Reflexionsintensität des IR-Kanals mit fortschreitendem BBCH-Stadium sogar teilweise ab. Aus Schmittmann und Schulze Lammers (2017) ist weiterhin bekannt, dass unterschiedliche Hintergründe Einfluss auf die Reflexionswerte des IR-Kanals haben. Um diesen Zusammenhang bei den vorliegenden Untersuchungen auszuschließen, wurden die identischen Schalen jeweils mit und ohne Pflanzen vermessen. Die daraus resultierende Spannweite der Reflexionswerte von trockenem Boden ohne Pflanzen, ist als Detektionslücke in Abb. 4-1 dargestellt. Da somit der Hintergrund der Mischfläche dem trockenen Boden der Referenzmessung entspricht, kann dieser Einfluss ausgeschlossen werden. Ob die Detektionsgenauigkeit durch Berücksichtigung weiterer Reflexionskanäle gesteigert werden kann, wird im Folgenden untersucht.

Durch die Datenausgabe der Reflexionswerte im CIELab-Farbraum, stellt die Verwendung der Luminanz eine weitere Möglichkeit der Auswertung zur Pflanzendetektion dar. Analog zu der Darstellung des IR-Kanals sind in Abb. 4-2 die L-Reflexionswerte der untersuchten Mischflächen sowie des Bodens abgebildet.

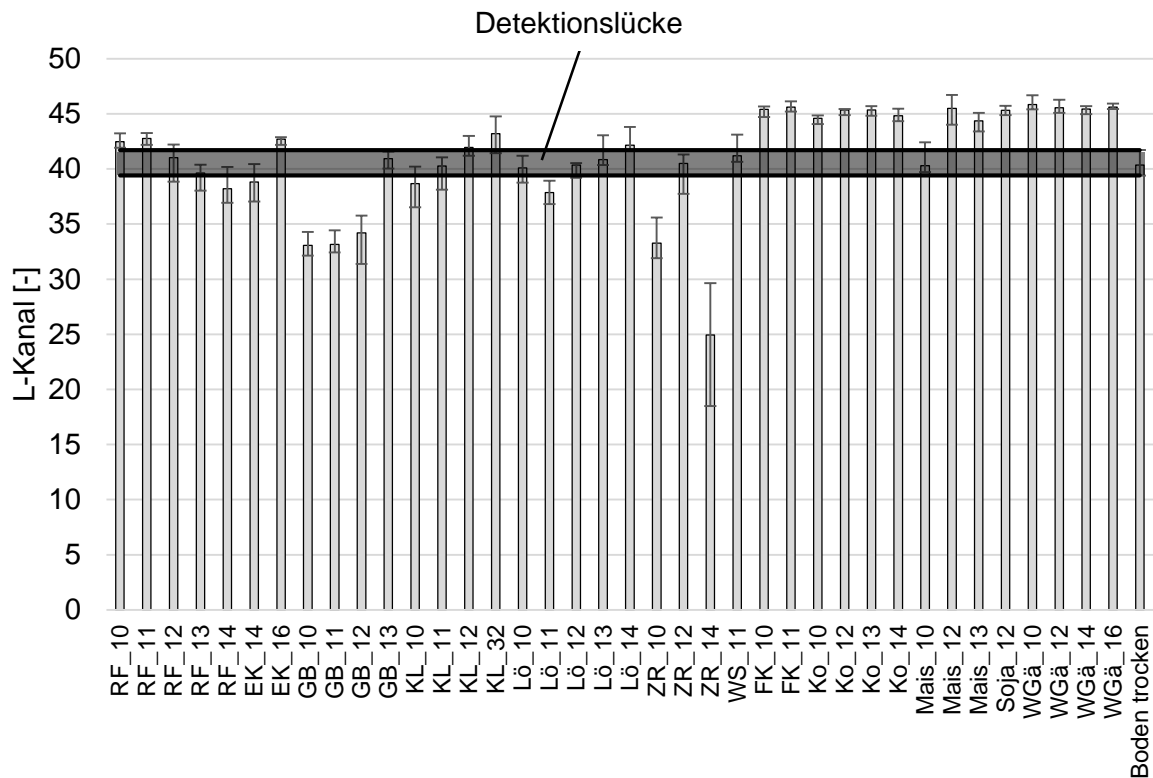


Abb. 4-2: L-Reflexionswerte der untersuchten Pflanzenarten sowie Störeinfluss des Bodens

Für diesen Kanal liegen die Reflexionswerte von trockenem Boden zwischen $L = 39,40$ und $L = 41,70$. Befinden sich die L-Werte der Mischflächen vollständig außerhalb dieser Detektionslücke, ist die Pflanzendetektion mittels L-Kanal eindeutig möglich. Trotz der natürlichen Vergrößerung der Blattfläche mit zunehmendem Entwicklungsstadium, ist auch mittels L-Kanal kein konsistenter Zusammenhang einer besseren Detektierbarkeit bei fortschreitendem Entwicklungsstadium festzustellen. Wie in Abb. 4-2 am Beispiel von Rauhaarigem Fuchschwanz zu erkennen, ist die Detektion ab BBCH 12 nicht mehr möglich, wohingegen BBCH 10 und 11 detektierbar sind. Gleiches gilt für Gänseblume in BBCH 13 und Zuckerrübe in BBCH 12. Bei Löwenzahn ist die Detektion lediglich in BBCH 11 möglich. Auf Grund des eingangs beschriebenen Vorgehens bei der Vermessung von Mischfläche und reinem Hintergrund, ist der Einfluss unterschiedlicher Hintergründe auszuschließen. Die Schwankungen innerhalb der Reflexionswerte des Bodens liegen im Bereich der dargestellten Spannweite. Die Umgebungsbedingungen wurden im Rahmen der statischen Prüfstandsmessungen konstant gehalten, wodurch ebenfalls Einflüsse unterschiedlicher Beleuchtungsverhältnisse auf die Luminanz ausgeschlossen werden können.

In gleicher Form werden nachfolgend die Reflexionswerte des a-Kanals für die untersuchten Mischflächen sowie die Bodenreferenz in Abb. 4-3 dargestellt.

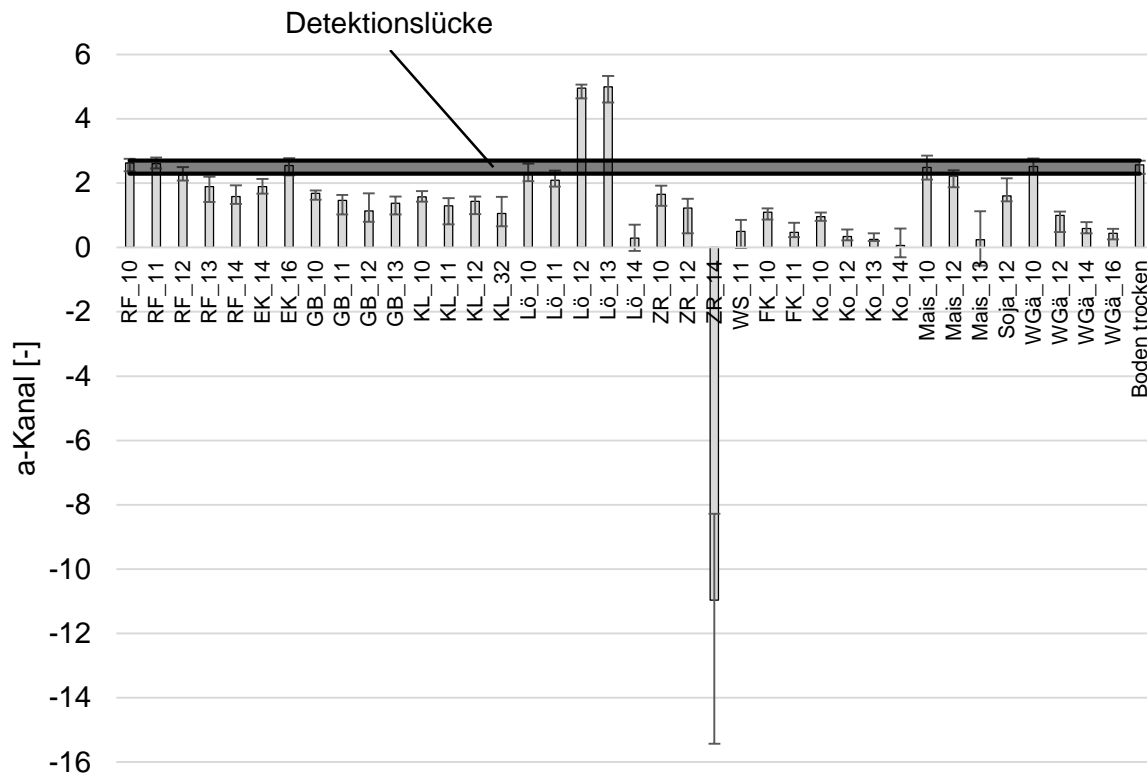


Abb. 4-3: a-Reflexionswerte der untersuchten Pflanzenarten sowie Störeinfluss des Bodens

Wie die Darstellung der Detektionslücke zeigt, liegen die Extremwerte mit $MIN = 2,29$ und $MAX = 2,70$ im Gegensatz zu den bisher untersuchten Reflexionskanälen deutlich enger zusammen. Eine kleinere Detektionslücke ist die Folge, wodurch mehr Objekte erkannt werden können. Bei der Detektion mittels IR- und L-Kanal ist mehrfach zu beobachten, dass Pflanzen größeren Entwicklungsstadiums innerhalb der Detektionslücke liegen, während jüngere und damit kleinere Pflanzen detektierbar sind. Diese Anomalie tritt bei den Reflexionswerten des a-Kanals lediglich bei Kamille in BBCH 16 auf. Im Gegensatz dazu können die Reflexionswerte der übrigen Pflanzenarten innerhalb der Detektionslücke auf zu geringe Entwicklungsstadien zurückgeführt werden. Die Reflexionswerte von rauhaarigem Fuchsschwanz liegen ab BBCH 13 außerhalb der Detektionslücke, während Löwenzahn, Mais und Weißer Gänsefuß ab BBCH 12 detektierbar sind.

Zur abschließenden Analyse der Einzelkanäle sind in Abb. 4-4 die Reflexionswerte des b-Kanals mit resultierender Detektionslücke dargestellt.

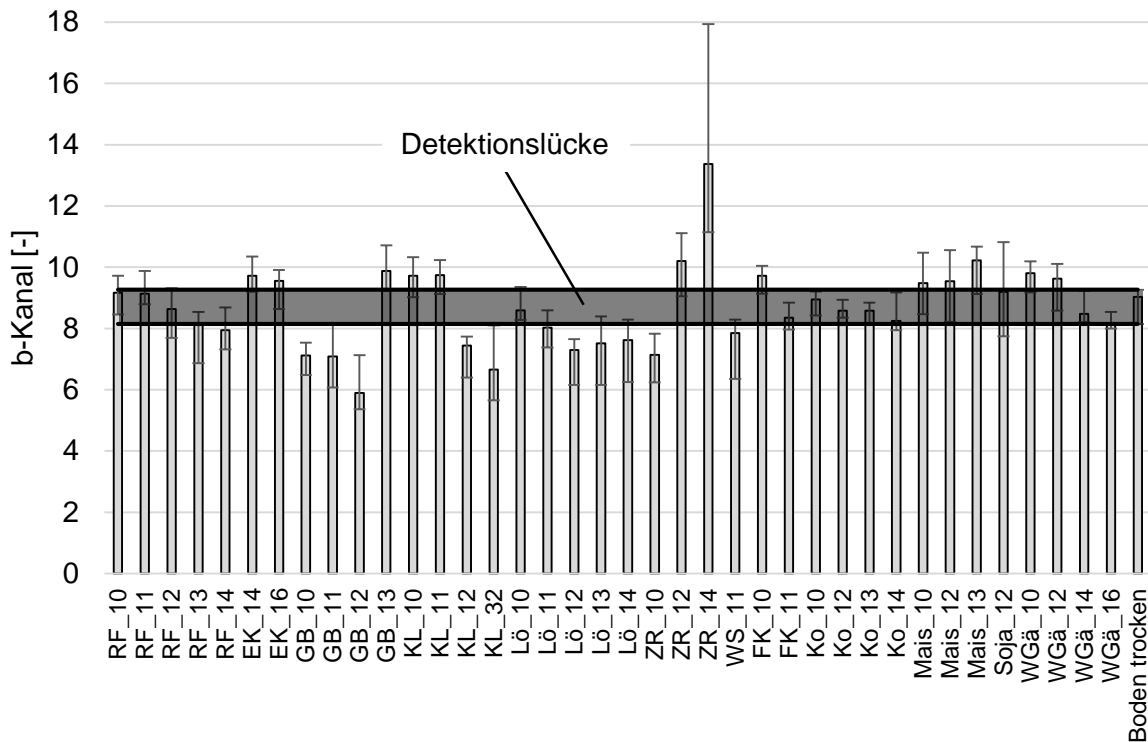


Abb. 4-4: b-Reflexionswerte der untersuchten Pflanzenarten sowie Störeinfluss des Bodens

Im Wertebereich des trockenen Bodens zwischen $8,15 < b\text{-Wert} < 9,27$ liegen 79 % der untersuchten Mischflächen, was die Möglichkeiten der Detektion mittels b-Kanal stark einschränkt. Die Ausprägung der Blau/Gelb-Achse ist als Kriterium zur Unterscheidung zwischen Pflanze und Boden nicht geeignet.

Die Herleitung eines Algorithmus zur Unterscheidung von Objekten (Pflanzen) und Hintergrund (Boden) dient der Entscheidungsfindung einer Herbizidapplikation bei detektierten Objekten. Basierend auf einem Schwellenwert-Verfahren, werden sowohl arithmetisches Mittel, als auch Standardabweichung zur Berechnung herangezogen. Die mathematische Beschreibung der Schwellenwerte wird definiert durch Gleichung (4.1)

$$\text{Schwellenwerte} := \begin{cases} \text{Obere Schwelle: } OS = \text{Maximum} \\ \text{Untere Schwelle: } US = \text{Minimum} \end{cases} \quad (4.1)$$

Wie in den vorangegangenen Abbildungen hergeleitet wurde, ist eine Objekt-Detektion möglich, wenn eine der folgenden Oder-Bedingungen erfüllt wird:

$$IR - \text{Reflexion} < US_{IR} \vee IR - \text{Reflexion} > OS_{IR} \quad (4.2)$$

$$L - \text{Reflexion} < US_L \vee L - \text{Reflexion} > OS_L \quad (4.3)$$

$$a - Reflexion < US_a \vee a - Reflexion > OS_a \quad (4.4)$$

$$b - Reflexion < US_b \vee b - Reflexion > OS_b \quad (4.5)$$

Sobald eine dieser Bedingungen erfüllt ist, kann die Abfrage gestoppt und ein Signal zur Herbizidapplikation an die Aktorik gegeben werden. Um möglichst geringe Rechenzeiten zu generieren, sollte mit der Abfrage begonnen werden, die den höchsten Detektionskoeffizienten (DK) aufweist. Der Detektionskoeffizient wird nach Gleichung (4.6) durch das Verhältnis aus gesamtem Wertebereich und Breite der Detektionslücke für den jeweiligen Kanal gebildet:

$$DK = 1 - \frac{MAX_{Lücke} - MIN_{Lücke}}{MAX_{Gesamt} - MIN_{Gesamt}} \quad (4.6)$$

Die Extremwerte der einzelnen Kanäle, sowie deren Verrechnung zum Detektionskoeffizienten sind in Tab. 4-3 dargestellt.

Tab. 4-3: Extremstellen für Wertebereich und Detektionslücke der einzelnen Reflexionskanäle inklusive des Detektionskoeffizienten

	MIN _{Gesamt}	MAX _{Gesamt}	MIN _{Lücke}	MAX _{Lücke}	DK
IR-Kanal	13,54	26,75	18,04	20,39	0,82
L-Kanal	18,50	46,71	39,40	41,70	0,92
a-Kanal	-15,43	5,34	2,29	2,70	0,98
b-Kanal	5,36	17,94	8,15	9,27	0,91

Durch die Relation zwischen dem gesamten Wertebereich und der Detektionslücke wird die Eignung der Reflexionskanäle zur Pflanzendetektion vergleichbar gemacht. Ohne diese Normierung ist eine quantitative Aussage über die Güte der Kanäle nicht möglich, da sich der Einfluss der Detektionslücke nach der Spreizung der Grundgesamtheit richtet. Dies wird durch Vergleich der Extremwerte des IR- und a-Kanals aus Tab. 4-3 deutlich. Der gesamte Wertebereich des IR-Kanals beträgt 13,21 bei einer Breite der Detektionslücke von 2,35. Dem gegenüber beträgt der Abstand zwischen Minimum und Maximum der Gesamtwerte des a-Kanals 20,77. Gleichzeitig liegen die Extremwerte der Bodenreflexion mit 0,41 deutlich enger beieinander. Die Streuung der Hintergrundreflexion ist um mehr als den Faktor 5 geringer, was mit diesem Kanal eine Pflanzendetektion in kleineren Entwicklungsstadien ermöglichen kann. Der Detektionskoeffizient ist aber nicht als hinreichende Bedingung eines hohen Detektionsvermögens zu verstehen, sondern dient in diesem Zusammenhang lediglich der Priorisierung zur Reihenfolge der Kanalabfrage.

Die Hypothese, dass quantitative Aussagen zur Bewertung farblicher Differenzen durch die Kombination mehrerer Kanäle möglich sind, wird im folgenden Kapitel behandelt.

4.1.2.2 Pflanzendetektion mittels euklidischem Abstand ΔE

Nachdem die Einzelkanäle hinsichtlich des Detektionsvermögens analysiert wurden, können die Reflexionswerte des IR-, L- und a-Kanals als geeignet bezeichnet werden. Im Gegensatz zur gesonderten Auswertung von Merkmalsausprägungen einzelner Kanäle, sind Aussagen zu Farbdifferenzen durch Kombination mehrerer Reflexionskanäle möglich. Wie in Kap. 2.1 beschrieben, liegt die Grundlage zur Bewertung von Farbdifferenzen in der Berechnung des euklidischen Abstandes (Deutsches Institut für Normung, 2019). Im Gegensatz zur klassischen Berechnung des euklidischen Abstandes kann der Term nach Schmittmann und Schulze Lamers (2017) auch um den Anteil der IR-Reflexion erweitert werden. Dadurch wird dem diagonalen Abstand zweier Punkte im dreidimensionalen Raum eine weitere Dimension hinzugefügt, welche nicht geometrisch greifbar ist. Die Summanden werden durch Subtraktion der beiden Koordinatenpunkte je Koordinatenachse gebildet und anschließend quadriert. Daraus entsteht nach Gleichung (4.7) eine quantifizierbare Größe für den Abstand zweier Punkte, in diesem Fall zwischen Pflanze (Objekt) und Boden (Referenz) in deren jeglicher Dimension.

$$\Delta E_{IR} = \sqrt{(L_{Obj} - L_{Ref})^2 + (a_{Obj} - a_{Ref})^2 + (b_{Obj} - b_{Ref})^2 + (IR_{Obj} - IR_{Ref})^2} \quad (4.7)$$

Da die Summanden durch Quadrieren keine negativen Werte annehmen können, gilt stets folgender Zusammenhang:

$$\Delta E_{IR} \geq \Delta E \quad (4.8)$$

Sollte der addierte IR-Kanal keine zusätzliche Information beinhalten ($IR_{Obj} = IR_{Ref}$), findet nach Gleichung (4.7) kein Informationsverlust statt, wodurch eine schlechtere Pflanzendetektion durch Einbeziehung des IR-Kanals ausgeschlossen ist. Welchen Beitrag der IR-Kanal zur Steigerung der wahrnehmbaren Farbdifferenz beitragen kann, zeigt Abb. 4-5. Dort sind sowohl ΔE als auch ΔE_{IR} dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber sind lediglich die Mischflächen abgebildet, deren Farbdifferenz kleiner als 6,0 ist. Da Farbunterschiede von $\Delta E > 5,0$ als andere Farbe wahrgenommen werden, ist eine Objekterkennung der hier nicht dargestellten Mischflächen eindeutig gegeben und bedarf keiner weiteren Untersuchungen.

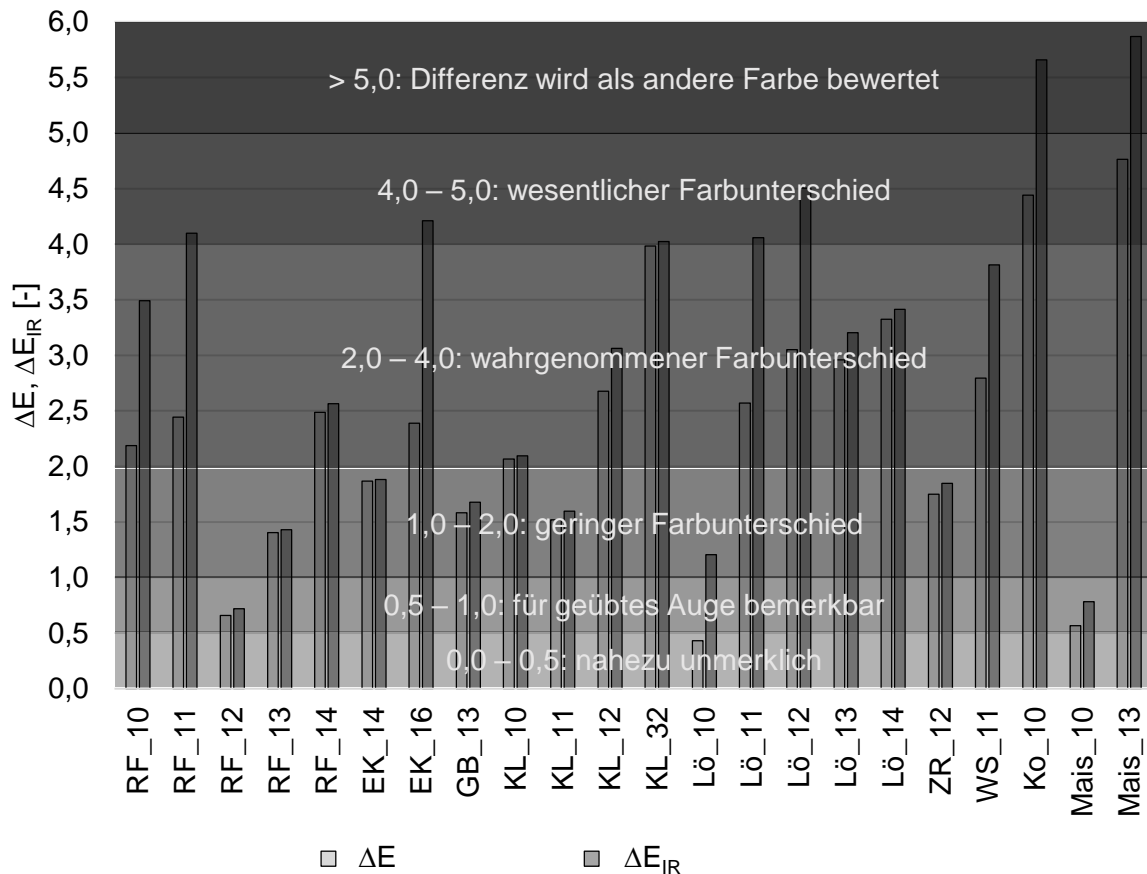


Abb. 4-5: Einfluss des IR-Kanals auf die Wahrnehmbarkeit des Farbunterschieds auf trockenem Boden nach DIN EN ISO/CIE 11664-4 (Deutsches Institut für Normung, 2019)

Nach DIN EN ISO/CIE 11664-4 sind die Kategorien zur Beurteilung von Farbunterschieden für Beobachter vorgesehen, die unter normierten Umgebungsbedingungen eine Unterscheidung zweier Farben mit natürlichem Augenlicht treffen können (Deutsches Institut für Normung, 2019). Da die Pflanzendetektion bei den vorliegenden Untersuchungen sensorisch erfolgt, dienen die Beurteilungskategorien zur Einordnung und können nicht wörtlich verstanden werden. Die Kategorie „nahezu unmerklich“ wird für das Sensorarray als nicht detektierbar eingestuft. Dem gegenüber gelten die Farbunterschiede ab „für geübtes Auge bemerkbar“ als ausreichend groß zur Detektion von Pflanzen auf Boden.

Mit Ausnahme von RF_12, Lö_10 und Mais_10 liegen alle der hier dargestellten Farbdifferenzen in einem Bereich von $\Delta E > 1,0$ und weisen damit mindestens einen geringen Farbunterschied zwischen Pflanze und Hintergrund auf. Während RF_12 und Mais_10 sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung des IR-Kanals in die Kategorie „für geübtes Auge bemerkbar“ fallen, ist der Informationsgewinnung durch Hinzunahme der IR-Reflexion bei Lö_10 deutlich zu erkennen. Während der Farbunterschied im visuellen Bereich mit $\Delta E = 0,43$ nahezu unmerklich ist, steigert die Reflexionsdifferenz des IR-Kanals den Farbunterschied auf einen Wert von $\Delta E_{IR} = 1,21$ und damit in den Bereich geringen Farbunterschiedes.

Analog zur schwankenden Aussagekraft bei der Einzelbetrachtung des IR-Kanals in Abb. 4-1, ist auch bei der Analyse der Farbdifferenz keine konsistente Tendenz zu erkennen. Wie am Beispiel von rauhaarigem Fuchsschwanz ab BBCH 12 zu erkennen, spielt die Hinzunahme des IR-Kanals in die Auswertung keine Rolle. Gleichzeitig vergrößert sich die Farbdifferenz in BBCH 10 und 11 jeweils um den Faktor 1,7 und verschiebt die Unterscheidbarkeit im Fall von RF_11 vom wahrgenommenen zum wesentlichen Farbunterschied.

4.1.2.3 Vergleich des Detektionsvermögens von Einzelkanälen und euklidischem Abstand

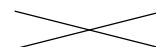
Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Detektionsvermögen der Reflexionskanäle (Abb. 4-1 bis Abb. 4-4) sind in Tab. 4-4 zusammengefasst. Daraus wird ersichtlich, dass die Pflanzendetektion der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Pflanzenarten unter Verwendung von ΔE_{IR} möglich ist. Durch Hinzunahme der IR-Reflexion vergrößert sich der euklidische Pixelabstand bei Löwenzahn in BBCH 10 von einem nahezu unmerklichen hin zu einem geringen Farbunterschied, welcher zur sensorbasierten Objekterkennung ausreichend groß ist.

Während sich das Detektionsvermögen des a-Kanals ab einem gewissen Entwicklungsstadium und damit verbundener Mindestgröße des Objektes verbessert, ist diesbezüglich für die übrigen Reflexionskanäle keine allgemeingültige Aussage zu treffen. Dies zeigt sich am Beispiel des Detektionsvermögens von Rauhaarigem Fuchsschwanz mittels IR- und L-Kanal. Während sich die Reflexionswerte von RF_10 und RF_11 außerhalb der Detektionslücke befinden, ist dies bei den höheren Entwicklungsstufen dieser Pflanzenart nicht mehr zu beobachten. Gleiches gilt auch für die Detektion von Gänseblume, Löwenzahn und Zuckerrübe. Bei diesen Pflanzenarten sind die Reflexionswerte der jüngeren Entwicklungsstadien vom Hintergrund sowohl im IR- als auch L- und b-Kanal unterscheidbar während Reflexionswerte weiter entwickelter Pflanzen innerhalb der jeweiligen Detektionslücken liegen. Zu erwarten wäre ein besseres Detektionsvermögen mit steigendem Entwicklungsstadium, hervorgerufen durch Blattflächenzuwachs und daraus resultierender stärkerer Farbdifferenzen (vgl. Tab. 2-1 in Kap. 2.1).

Für den a-Kanal ist eine derartige Anomalie lediglich für Echte Kamille festzustellen, welche durch bräunliche Verfärbungen älterer Pflanzenteile zu erklären ist. In diesem Fall ist die Verschiebung der Reflexionswerte in Richtung des positiven Wertebereichs durch Abnahme des Grünanteils trotz des zunehmenden Entwicklungsstadiums plausibel. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass die Erfassung der Pflanzenreflexionswerte nicht allein auf Basis numerischer Daten der einzelnen Kanäle erfolgen kann, sondern jeweils in einen pflanzenindividuellen Kontext gesetzt werden muss. Die größte Schnittmenge der Einzelinformationen ergibt sich durch Verrechnung dieser Reflexionskanäle. Dazu sind diverse Kombinationsmöglichkeiten durchführbar, die je nach Komplexität entsprechende Rechenleistung und damit Reaktionszeit benötigen. Gleichzeitig ist der Nutzen des resultierenden Informationszuwachses durch diesen höheren Rechenaufwand je nach Anwendungsfall abzuwägen.

Tab. 4-4: Detektierbare Pflanzenarten sowie deren Detektionsrate mit dazugehörigen Entwicklungsstadien mittels IR- und CIELab-Kanälen, sowie ΔE und ΔE_{IR} auf trockenem Boden

Pflanze	IR-Kanal	L-Kanal	a-Kanal	b-Kanal	ΔE	ΔE_{IR}
RF_10						
RF_11						
RF_12						
RF_13						
RF_14						
EK_14						
EK_16						
GB_10						
GB_11						
GB_12						
GB_13						
KL_10						
KL_11						
KL_12						
KL_32						
Lö_10						
Lö_11						
Lö_12						
Lö_13						
Lö_14						
ZR_10						
ZR_12						
ZR_14						
WS_11						
FK_10						
FK_11						
Ko_10						
Ko_12						
Ko_13						
Ko_14						
Mais_10						
Mais_12						
Mais_13						
Soja_12						
WGä_10						
WGä_12						
WGä_14						
WGä_16						
Detektionsrate	60,5 %	60,5 %	78,9 %	21,1 %	97,4 %	100 %

 = nicht detektierbar

Der effizienteste Weg zur Pflanzendetektion mit Hilfe des TrueColor-Sensorarrays basiert auf dem Schwellenwertverfahren durch Berechnung des euklidischen Abstandes zwischen den Quadrupeln (IR, L, a, b) von Mischfläche (Pflanze + Boden) und Hintergrund (Boden).

Zur Übertragung dieser Untersuchungen in die praktische Anwendung ist die Reduzierung des Rechenaufwandes zur Verminderung der Reaktionszeiten in Betracht zu ziehen. Dies kann durch ein zweistufiges Verfahren mit geringem Aufwand realisiert werden. Die in Tab. 4-4 angegebene Detektionsrate gibt die Sensitivität des jeweiligen Reflexionskanals zur Objektdetektion an. In 78,9 % der Abfragen reicht somit die Verwendung des a-Kanals zur Detektion der Pflanze. Lediglich in den verbleibenden 21,1 % der Anwendungsfälle liefert die Hinzunahme von ΔE_{IR} einen notwendigen Informationsgewinn. Durch diese Möglichkeit des reduzierten Rechenaufwandes ist im Rahmen der Pflanzendetektion ein hohes Potenzial zur praxisrelevanten Anwendbarkeit des vorliegenden Sensors zu sehen.

4.1.3 Blattflächenentwicklung untersuchter Pflanzenarten

Die pflanzenindividuelle Entwicklung der Blattflächenzunahme ist in Abb. 4-6 für die untersuchten Pflanzenarten abgebildet. Darin sind Mittelwert und Standardabweichung für jedes vermessene Entwicklungsstadium der Pflanzenarten dargestellt.

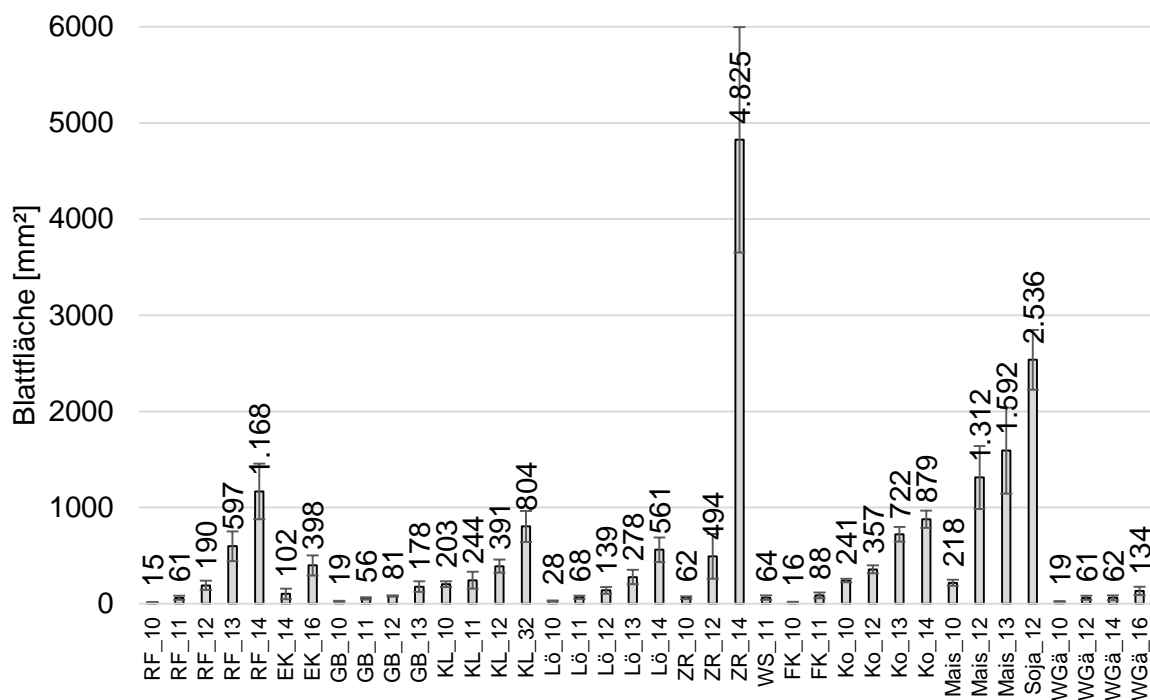


Abb. 4-6: Mittelwerte der Blattflächen in den ausgewählten Entwicklungsstadien der untersuchten Pflanzenarten inklusive Fehlerresiduen

Hintergrund der Untersuchungen zu Blattflächenunterschieden ist die Nutzung dieses Merkmals als Möglichkeit der Pflanzendifferenzierung. Wie in Kap. 2.2.3.5 bzw. Kap. 2.2.4 beschrieben, nutzen bereits Lati et al. (2016) und Elstone et al. (2020) die natürlich auftretenden Blattflächenunterschiede, um eine Differenzierung von Pflanzenarten zu generieren. Auf den Einfluss des pflanzlichen Phänotyps auf das Reflexionsverhalten des L-Kanals wurde von Schmittmann und Schulze Lammers (2017) bereits hingewiesen. Da die Blattflächenzunahme den Phänotyp der Pflanzen verändert, kann dieser Parameter zur Pflanzendifferenzierung herangezogen werden.

Während die Blattflächen der Keimblätter (BBCH 10) von RF_10, GB_10, Lö_10, ZR_10, FK_10 und WGä_10 annähernd homogen in der Größenordnung bis ca. 60 mm² liegen, weisen KL_10, Ko_10 und Mais_10 mit ca. 200 mm² bereits die mehr als dreifache Größe der Keimblätter auf. Gleichzeitig sind die Standardabweichungen unabhängig von der Pflanzenart auf einem niedrigen Niveau, was von einem homogenen Phänotyp in diesem frühen Entwicklungsstadium zeugt. Ab BBCH 11 beginnt die Ausbildung der Laubblätter und eine damit einhergehende Blattflächenzunahme. Diese folgt keiner Stringenz, die auf einen Zusammenhang bezüglich der Ausgangsgröße in BBCH 10 zurückzuführen ist. So legt RF_11 die vierfache Blattfläche zu, während GB_11 sowie WGä_11 das Dreifache und Lö_11 lediglich mit einem Faktor von 2,4 zulegen. Diese Pflanzenarten sind aber im Gegensatz zu FK_11 (Faktor 5,5), Mais_12 (Faktor 6) und ZR_12 (Faktor 8) einem moderaten Zuwachs zuzuordnen. Ein kausaler Zusammenhang zwischen der paarweisen statt einzelnen Ausbildung von Laubblättern und einem stärkeren Blattflächenzuwachs ist dabei ebenfalls nicht zu beobachten, da Ko_12 beispielsweise lediglich mit Faktor 1,5 an Blattfläche zulegt.

Eine exponentielle Blattflächenzunahme ist innerhalb einer Pflanzenart bei allen untersuchten Arten mit Ausnahme von WGä festzustellen. Wie am Beispiel von ZR_14 am deutlichsten erkennbar, ist die Dimension der Blattflächenzunahme jedoch stark unterschiedlich. Nach ZR_14 weist Soja im Zweiblatt-Stadium (BBCH 12) im Mittel die zweitgrößte Blattfläche aller untersuchter Pflanzen auf. Im Gegensatz dazu ist die Zunahme des WGä bis zum Ende der Untersuchungen in BBCH 16 mit 134 mm² auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Die folgenden Untersuchungen einzelner Reflexionskanäle zur Pflanzendifferenzierung sind unter dem Aspekt der pflanzenindividuellen Blattflächenentwicklung zu interpretieren.

4.1.4 Pflanzendifferenzierung mittels IR-Kanal sowie CIELab-Farbraum

Eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Unkräutern und Nutzpflanzen, nach Abb. 2-10 im Folgenden als Pflanzendifferenzierung bezeichnet, kann durch verschiedene Algorithmen erreicht werden. Die Komplexität des notwendigen Algorithmus hängt von verschiedenen Faktoren ab. Neben der allgemeinen Heterogenität zwischen den Entwicklungsstadien spielt der Phänotyp der Pflanzen innerhalb des zu untersuchenden Entwicklungsstadiums eine entscheidende Rolle, was den notwendigen Rechenaufwand betrifft. Untersuchte Pflanzenkombinationen zeigen eine deutliche Spanne im Hinblick auf den Aufwand zur Pflanzendifferenzierung. Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse erstrecken sich von signifikant unterschiedlichen Reflexionswerten des NIR-Bereiches, über die Nutzung vorhandener Indizes bis hin zu komplexeren multifaktoriellen Signalauswertungen.

4.1.4.1 Pflanzendifferenzierung durch Analyse von Einzelkanälen

– Differenzierung anhand des Reflexionsverhaltens im NIR-Bereich ($\lambda = 850 \text{ nm}$)

Im ersten Schritt werden die untersuchten Pflanzen zur Beurteilung der Differenzierbarkeit mit Hilfe der verschiedenen Reflexionskanäle in Abhängigkeit ihrer Blattfläche in vier verschiedene Klassen eingeteilt (siehe Abb. 4-7).

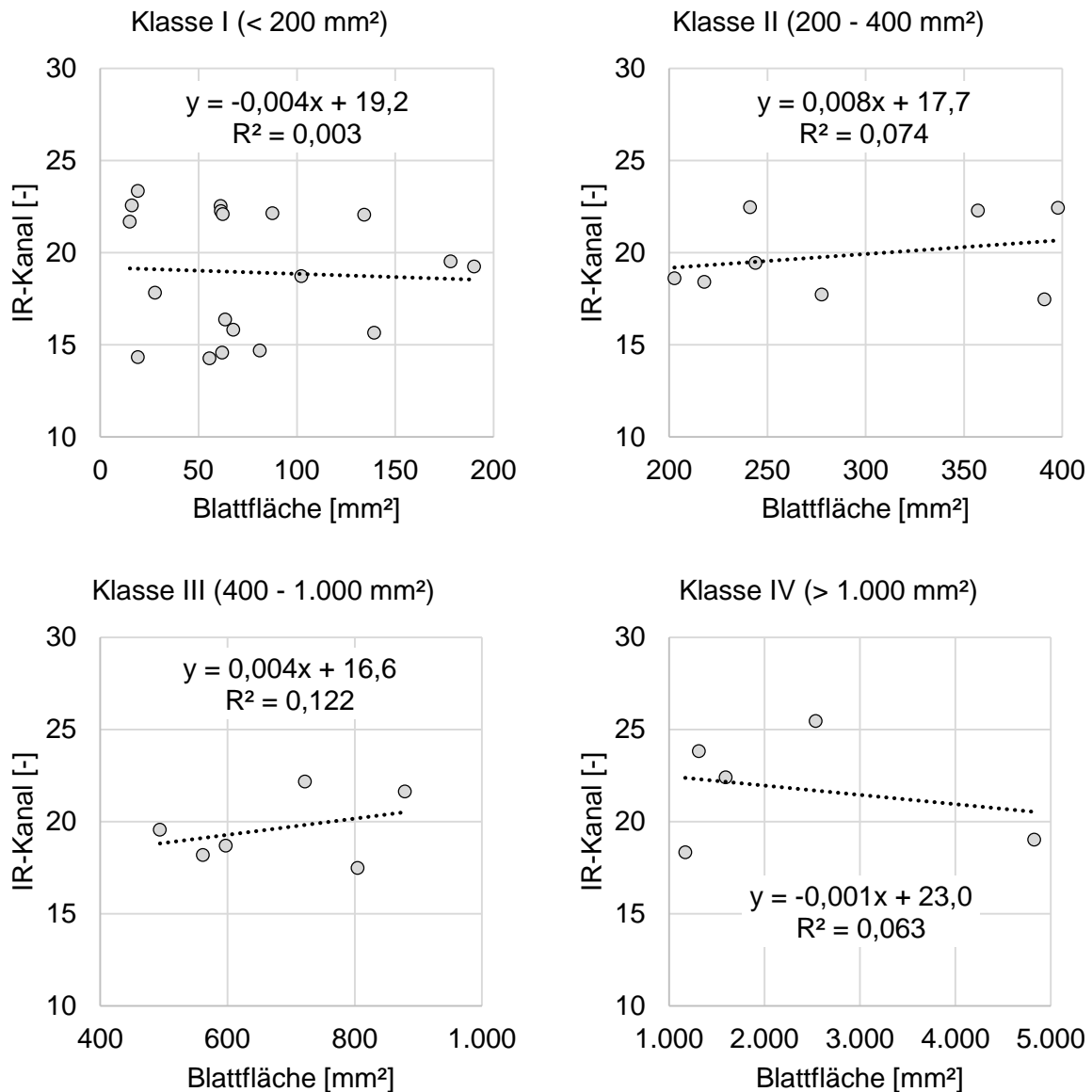


Abb. 4-7: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Blattfläche und IR-Kanal

Neben Pflanzen mit weniger als 200 mm² Blattfläche (Klasse I), stellen die Bereiche von 200 mm² bis 400 mm² (Klasse II), sowie 400 mm² bis 1.000 mm² (Klasse III) weitere Gruppierungen ähnlicher Pflanzengröße dar. Die größten Pflanzen sind mit Blattflächen von mehr als 1.000 mm² der Klasse IV zuzuordnen. Wie in Abb. 4-7 zu erkennen, ist die Pflanzenanzahl je

Klasse sehr unterschiedlich. In Klasse I ist mit 19 Pflanzen die größte Anzahl vertreten. Die Klassengröße nimmt mit zunehmender Blattfläche stetig ab. Klasse II umfasst noch acht Pflanzen, während Klasse III mit sechs Pflanzen bzw. Klasse IV mit 5 Pflanzen ungefähr auf einem Niveau liegen. Das maximale Bestimmtheitsmaß zwischen Blattfläche und IR-Kanal ist mit $R^2 = 0,122$ in Klasse III zu verzeichnen. Unabhängig von der Klasse sind lediglich sehr schwache Korrelationen zwischen Blattfläche und IR-Reflexion festzustellen.

In Abb. 4-8 sind ausschließlich die Pflanzen dargestellt, deren IR-Reflexionswerte außerhalb der Detektionslücke liegen und damit zur Differenzierung in Frage kommen. Wird das Bestimmtheitsmaß auf Basis dieser Pflanzen gebildet, fällt der Zusammenhang zur Blattfläche mit $R^2 = 0,233$ gegenüber den zuvor beschriebenen Klassen stärker aus. Insgesamt können diese Zusammenhänge als schwach bewertet werden. Aufgrund dessen stellen Algorithmen auf Basis von allgemeinen Regressionsmodellen zur Blattfläche keine praktikable Möglichkeit zur Pflanzendifferenzierung mittels IR-Kanal dar. Vielmehr sind Entscheidungsmodelle für diesen Reflexionskanal in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums zu gestalten. Eine Möglichkeit zur entwicklungspezifischen Differenzierung ist in Abb. 4-8 dargestellt. In Anlehnung an Entscheidungsmodelle der Pflanzendetektion, werden die beschreibenden Parameter Median, Minimum und Maximum der jeweiligen Datenreihen auch zur Pflanzendifferenzierung herangezogen.

Falls die Reflexionswerte der Mischfläche aus Unkraut und Boden keine Unterscheidung zu den Reflexionswerten des Hintergrundes (Boden) aufweisen, würde die Herbizidapplikation ebenfalls bei unbewachsenem Boden stattfinden. Im Gegensatz zu einer ganzflächigen Applikation besteht durch die Aussparung der Nutzpflanze bereits ein Einsparpotential. Im Rahmen dieser Untersuchungen soll die mögliche Einsparrate durch reine Unkrautbehandlung aber weiter gesteigert werden. Aus diesem Grund wird als notwendige Bedingung zur Differenzierbarkeit die eindeutige Unterscheidung von Nutzpflanze und Unkraut bei gleichzeitiger Unterscheidbarkeit von Unkraut und Boden festgelegt. Zur besseren Übersichtlichkeit findet eine vorausgewählte Darstellung von Pflanzenarten und –entwicklungsstadien statt. Diejenigen Pflanzen, welche sich in Kap. 4.1.2 bereits als nicht detektierbar herausgestellt haben, werden in Abb. 4-8 nicht dargestellt. Da die Unterscheidbarkeit von Unkraut und Boden nicht gegeben ist, erfüllen sie die notwendige Bedingung nicht. Dunkler dargestellte Säulen stellen die Nutzpflanzen dar, für die die notwendige Bedingung der Detektierbarkeit mittels IR-Kanal gilt. Aufgrund der Ausprägung von Minima und Maxima ist die Differenzierung von Zuckerrübe in BBCH 10 mit Ausnahme von Gänseblume, Löwenzahn und Wiesenstorchschnabel für die dargestellten Pflanzen möglich. Von großer Bedeutung ist dabei die Differenzierbarkeit zwischen Zuckerrübe und Echter Kamille bzw. Weißem Gänsefuß. Diese treten als Leitunkräuter im Zuckerrübenanbau in Erscheinung und stellen eine starke Konkurrenz zur Entwicklung der Nutzpflanze dar (Bosch, 1987).

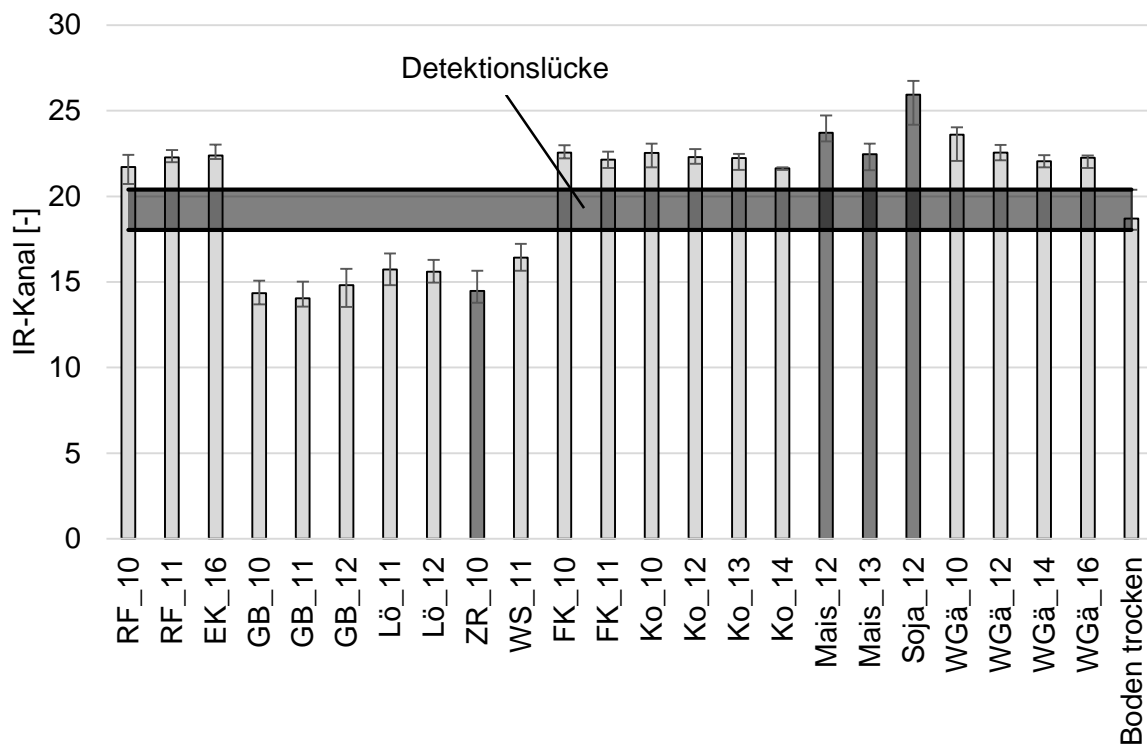


Abb. 4-8: Median, Minima und Maxima der Reflexionswerte zur Differenzierbarkeit der Pflanzenarten anhand des IR-Kanals

Im Gegensatz zu ZR_10 weist Mais in BBCH 12 eine höhere Anzahl differenzierbarer Unkräuter mittels IR-Kanal auf. Mit Ausnahme von WGä_10 lassen sich alle in Abb. 4-8 dargestellten Pflanzen differenzieren. Dies ist nicht auf Mais in BBCH 13 zu übertragen, da die Reflexionswerte trotz größerer Blattfläche mit zunehmendem Entwicklungsstadium sinken. Diese Inkonsistenz bedarf weiterer Untersuchungen und ist möglicherweise mit einer mangelnden Pflanzenversorgung und daraus resultierender Farbänderung zu erklären.

Soja in BBCH 12 ist im Rahmen dieser Untersuchungen als vollständig differenzierbar zu bezeichnen. Innerhalb des IR-Kanals sind die Extrema aller detektierbaren Unkrautarten in allen betrachteten Entwicklungsstadien vollständig von Soja_12 zu unterscheiden. Erklärt werden kann dies mit der zweitgrößten Blattfläche aller untersuchter Pflanzen und daraus resultierend hohem Chlorophyll-Gehalt innerhalb des Messbereichs.

– Differenzierung anhand des L-Kanals

Analog zu den Untersuchungen zur Differenzierbarkeit mit Hilfe des IR-Kanals, werden in Abb. 4-9 die Regressionsmodelle zwischen L-Kanal und Blattfläche in Abhängigkeit der eingeführten Blattflächen-Klassen dargestellt. Im Gegensatz zu den Zusammenhängen zwischen Blattfläche und IR-Kanal, liegen die Bestimmtheitsmaße im Falle des L-Kanals mit zunehmender Blattfläche auf einem deutlich höheren Niveau. Während ein Zusammenhang zwischen Blattfläche und L-Kanal für Klasse I nicht existiert, ist das Bestimmtheitsmaß für Blattflächen ab einer Größe von 200 mm² auf einem niedrigen Niveau von $R^2 = 0,301$. Kornblume in BBCH

10 (241 mm²) und BBCH 12 (357 mm²) stellen in diesem Regressionsmodell mit Reflexionswerten von $L > 44$ Ausreißer dar. Werden die Datenpaare der Kornblume aus dem Regressionsmodell entfernt, steigt das Bestimmtheitsmaß auf $R^2 = 0,834$. Diese sechs Objekte setzen sich aus den Pflanzenarten Kletten-Labkraut, Mais und Echter Kamille zusammen. Im Gegensatz zu diesen drei Pflanzenarten waren die Keimblätter der Kornblume stärker aufgehell, wodurch sich die höhere Luminanz bei geringerer Blattfläche erklären lässt.

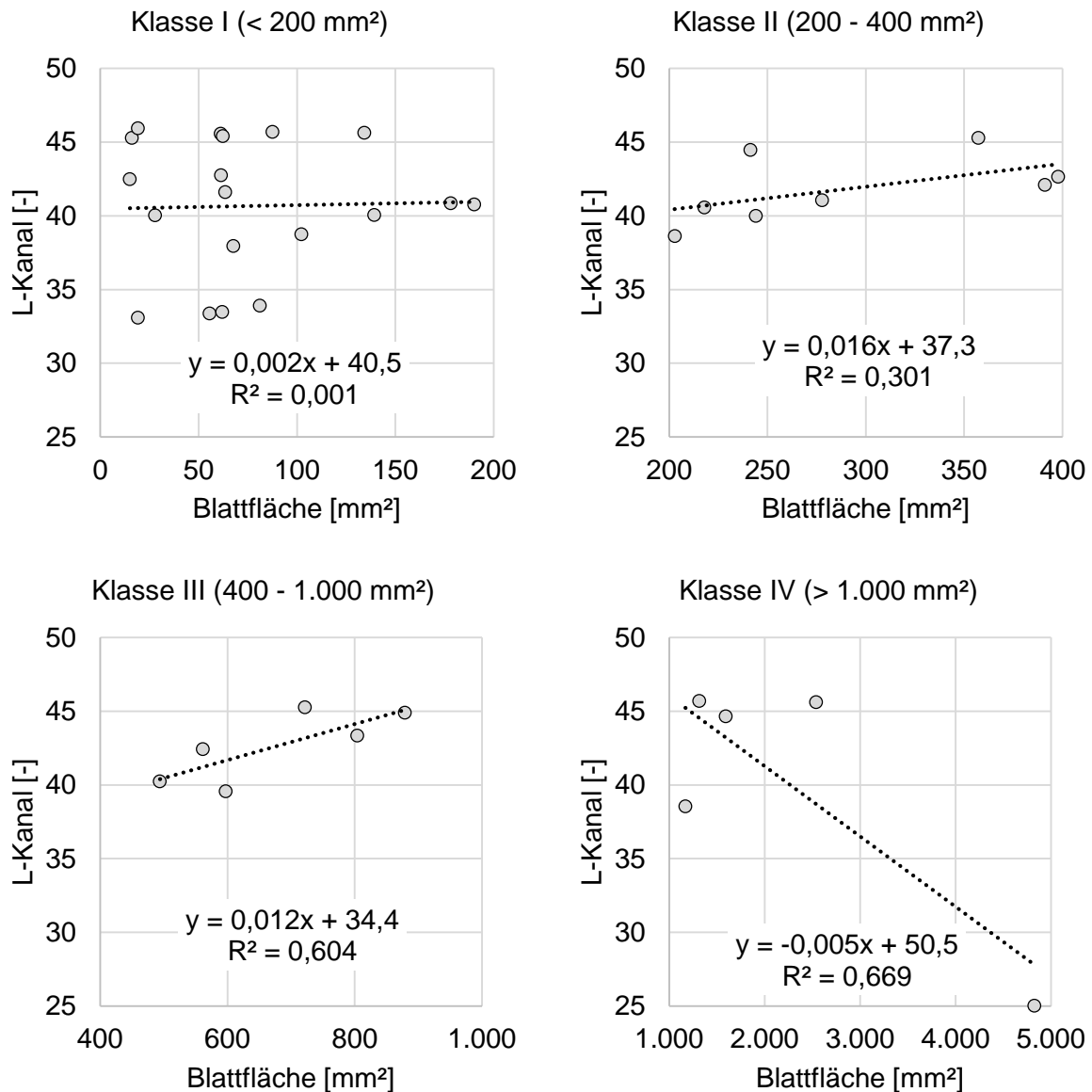


Abb. 4-9: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Blattfläche und L-Kanal

Die Reflexionswerte und Blattflächen in Klasse III weisen eine homogenere Verteilung ohne Ausreißer auf. Mit $R^2 = 0,604$ sind die Zusammenhänge des Regressionsmodells auf einem moderaten Niveau und in ähnlicher Größenordnung zu Klasse IV. In dieser Klasse weist Rauhaariger Fuchsschwanz in BBCH 14 mit 1.168 mm² die kleinste Blattfläche bei zweitkleinstem

L-Wert auf. Ohne diesen Ausreißer liegt der Zusammenhang für das Regressionsmodell des L-Kanals in Klasse IV bei $R^2 = 0,884$. Die verbleibenden vier Objekte umfassen Mais, Soja und Zuckerrübe ab BBCH 12. Als nachteilig ist eine geringe Objektanzahl sowie fehlende Unkrautart innerhalb des Regressionsmodells zu nennen. Ein Ansatz zur Pflanzendifferenzierung mit Hilfe einer Regressionsanalyse ist für den L-Kanal in Klasse IV trotz eines hohen Bestimmtheitsmaßes wegen zu geringer Werte zu verwerfen.

Deutlich wird an dieser Stelle, dass eine pflanzenindividuelle Analyse notwendig ist, um aussagekräftige Modelle zur Pflanzendifferenzierung evaluieren zu können. Ergebnisse zu starken Zusammenhängen zwischen Blattfläche und L-Kanal können aus der Literatur bestätigt werden (Schmittmann & Schulze Lammers, 2017). Bei dieser Studie stand der Einfluss der Hintergrundreflexion bei Kommunalflächen im Vordergrund. Das Spektrum relevanter Unkrautarten und Hintergründe unterscheidet sich deutlich von den vorliegenden Untersuchungen zur ackerbaulichen Anwendung. Aus diesem Grund ist eine Übertragung der Ergebnisse nicht vollumfänglich möglich und bedarf weiterer Analysen, die in Abb. 4-10 dargestellt sind.

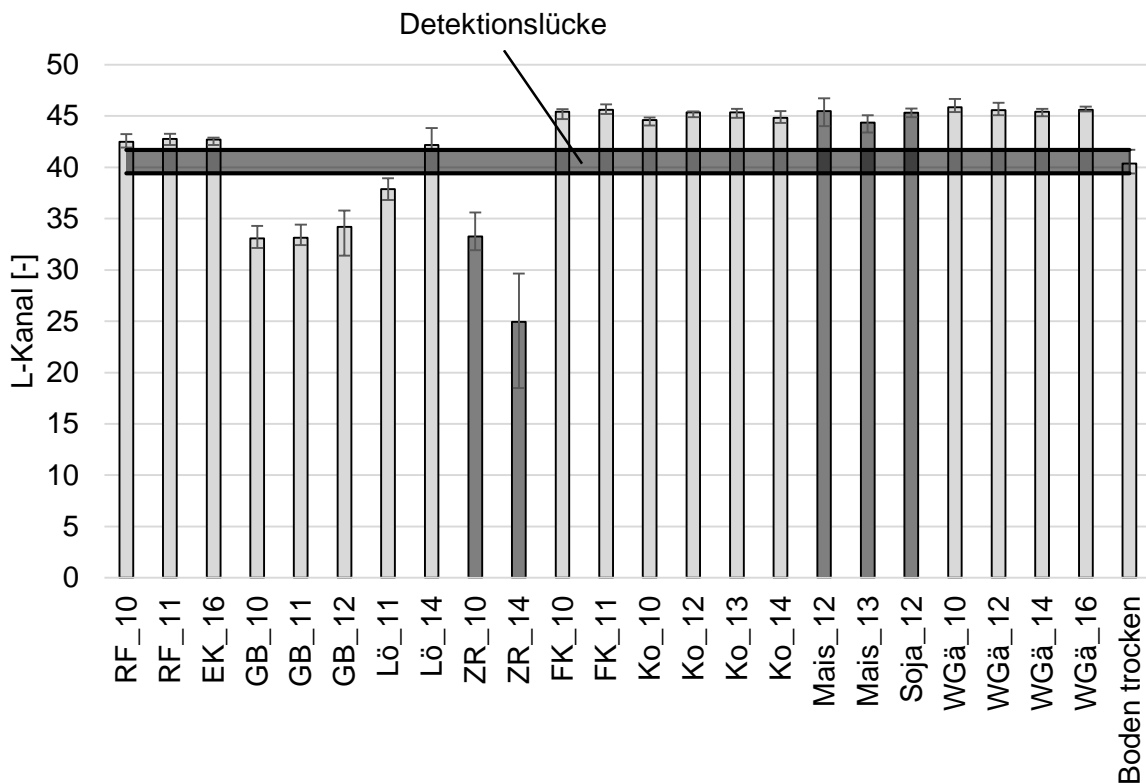


Abb. 4-10: Median, Minima und Maxima der Reflexionswerte zur Differenzierbarkeit der Pflanzenarten anhand des L-Kanals

Die Möglichkeit zur Differenzierung von Unkräutern und ZR_10 mit Hilfe des L-Kanals ist vergleichbar zur Differenzierbarkeit mittels IR-Kanal. Eine Ausnahme bildet der Wiesenstorchschnabel in BBCH 11, dessen L-Werte im Bereich der Bodenreflexion liegen und damit nicht differenzierbar sind (siehe Abb. 4-2 in Kap. 4.1.2.1). Im Gegensatz dazu ist Löwenzahn in BBCH 11 und 14 anhand der L-Werte differenzierbar gegenüber ZR_10. Wie in Abb. 4-10

auch zu erkennen ist, liegen die Extrema der Reflexionswerte von ZR_14 vollständig unterhalb aller weiteren dargestellten Pflanzenreflexionen. Damit ergibt sich für die Zuckerrübe in BBCH 14 mit Hilfe des L-Kanals eine vollständige Differenzierbarkeit aller detektierbarer Pflanzen. Anders gestaltet sich dies bei Mais und Soja in BBCH 12. Im Vergleich zur IR-Reflexion nimmt die Anzahl differenzierbarer Unkrautarten bei Mais_12 um 55 % ab. Mit einer Reduktion von 53 % liegt die Anzahl differenzierbarer Unkräuter von Soja_12 auf einem vergleichbaren Niveau. Auffällig ist in beiden Fällen ein Rückgang differenzierbarer Objekte bei Kornblume und Weißem Gänsefuß. Bei Mais_13 vergrößert sich die Differenzierbarkeit mittels L-Reflexion im Verhältnis zum IR-Kanal um 67 %.

Insgesamt zeigt die Verwendung des L-Kanals bei der Differenzierung der Zuckerrübe in BBCH 14 den größten Mehrwert. Entgegen den Ergebnissen aus den Untersuchungen von Wartenberg et al. (2005) generiert die starke Zunahme der Blattfläche von ZR_12 zu ZR_14 kein verbessertes Detektionsvermögen mit Hilfe des IR-Kanals durch zunehmenden Chlorophyll-Anteil. Eine mögliche Erklärung ist die Blattflächenzunahme bei gleichzeitiger partieller Aufhellung der Blattoberfläche durch abiotische Umweltfaktoren während der Pflanzenaufzucht im Gewächshaus. Dies gilt es in weiterführenden Untersuchungen zu verifizieren, beispielsweise durch Freilandversuche. Im Rahmen dieser Untersuchungen kann eine vollumfängliche Erklärung dazu nicht abschließend gegeben werden. Stattdessen kann die veränderte Luminanz durch den Zuwachs eines weiteren Blattpaares von BBCH 12 zu BBCH 14 nachgewiesen werden, wodurch die Differenzierbarkeit von ZR_14 gegenüber den oben genannten Unkrautarten möglich ist.

– Differenzierung anhand des a-Kanals

Wie in Kap. 2.1 erläutert, reicht der Wertebereich des a-Kanals von $a = -128$ (grün) bis $a = 127$ (rot). Die Verwendung der Grünfärbung zur Pflanzendifferenzierung liegt aufgrund der vornehmlich grünen Farbgebung der untersuchten Pflanzen und Untersuchungen anderer Studien nahe (Ruiz-Ruiz et al., 2009). Aus Abb. 4-11 geht hervor, dass der Zusammenhang zwischen Grünfärbung und Blattfläche lediglich schwachen Abhängigkeiten folgt. Die Reflexionswerte von Pflanzen mit Blattflächen von weniger als 1.000 mm^2 decken lediglich 2 % der gesamten Spannweite dieser Koordinatenachse ab. Dies entspricht den Darstellungen von Ruiz-Ruiz et al. (2009), deren Ziel ein angepasster Algorithmus zur Entzerrung von Farbpixeln des Hintergrunds und Vegetation ist, um deren Differenzierbarkeit zu verbessern.

Ausreißer sind trotz des engen Wertebereichs innerhalb des a-Kanals bei Löwenzahn in BBCH 12 (Klasse I) und 13 (Klasse II) mit Reflexionswerten von $a = 5$ zu beobachten. Diese sind aber nicht allein für die schwachen Zusammenhänge verantwortlich. Dieser Klasse zugehörige Pflanzenarten weisen bezüglich des a-Kanals bis zu einer Blattfläche von 400 mm^2 keinen statistischen Zusammenhang auf. Die Pflanzen der Klasse III weisen innerhalb des a-Kanals die geringste Spannweite des Wertebereichs auf. Die Regressionsgerade der Datenpunkte hat mit $R^2 = 0,207$ einen moderat fallenden Trend (siehe Abb. 4-11, Diagramm unten links). Innerhalb dieser Klasse sind die Blattflächen der Pflanzen annähernd homogen verteilt. Eindeutige Aussagen zur Relevanz hinsichtlich einer möglichen Pflanzendifferenzierung sind auf Grund dieser Zusammenhänge nicht möglich. Anders ist dies innerhalb der Klasse IV zu

bewerten, welche den größten Wertebereich aller Klassen hinsichtlich der Reflexionswerte sowie Blattflächen aufweist. Verantwortlich dafür ist die stark vergrößerte Blattfläche von Zuckerrüben in BBCH 14 mit einem arithmetischen Mittel von 4.825 mm². Der daraus resultierende hohe Grünanteil spiegelt sich in einem deutlich negativen a-Wertebereich von ZR_14 wider.

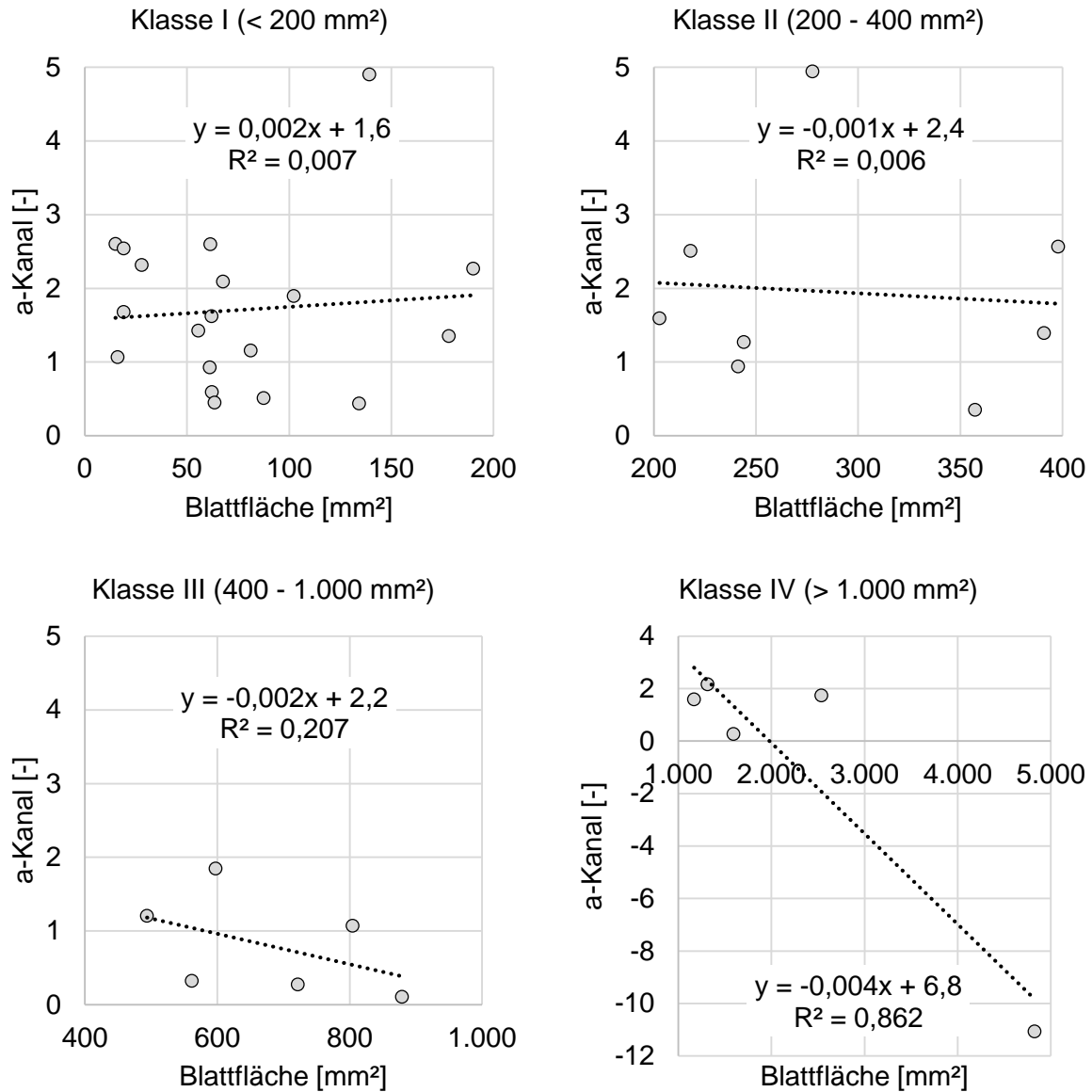


Abb. 4-11: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Blattfläche und a-Kanal

Diese Auswertungsform unterstreicht die Erkenntnisse aus den Untersuchungen des L-Kanals. Dort wurde bereits festgestellt, dass mit zunehmender Pflanzenentwicklung eine verbesserte Differenzierbarkeit einhergeht. Daraus kann für den Einsatz des a-Kanals abgeleitet werden, dass möglichst große Blattflächenunterschiede zwischen Pflanzenarten und -stadien genutzt werden sollten.

In der praktischen Anwendung können diese Unterschiede durch Wachstumsförderung der Nutzpflanze bei gleichzeitig verzögerter Entwicklung der Unkrautpflanzen unterstützt werden. Dieser Sachverhalt wird anhand des Anwendungsbeispiels für den Zuckerrübenanbau deutlich. Eine möglichst zügige Jugendentwicklung wird durch passende Saatbettvorbereitung in Kombination mit der Verwendung von pilliertem Saatgut gefördert. Durch den späten Reihenschluss sind im Allgemeinen mehrere Herbizid-Anwendungen notwendig. Eine ganzflächig bodenwirkende Herbizid-Behandlung hemmt die erste Generation auflaufender Unkräuter, bei gleichzeitig fortwährender Entwicklung der Nutzpflanzen. Eine Kombination aus dieser konventionellen Herbizid-Applikation im Voraufbau und einer anschließenden pflanzenspezifischen Unkrautbekämpfung würde für den notwendigen Vegetationsvorsprung der Nutzpflanze sorgen und eine eindeutige Unterscheidung anhand des a-Kanals ermöglichen. Wie in Abb. 4-12 dargestellt, ist die Differenzierung von ZR_14 von allen untersuchten Pflanzen möglich. Voraussetzung ist weiterhin die als notwendige Bedingung eingeführte Detektierbarkeit zur eindeutigen Abgrenzung hinsichtlich der Bodenreflexion.

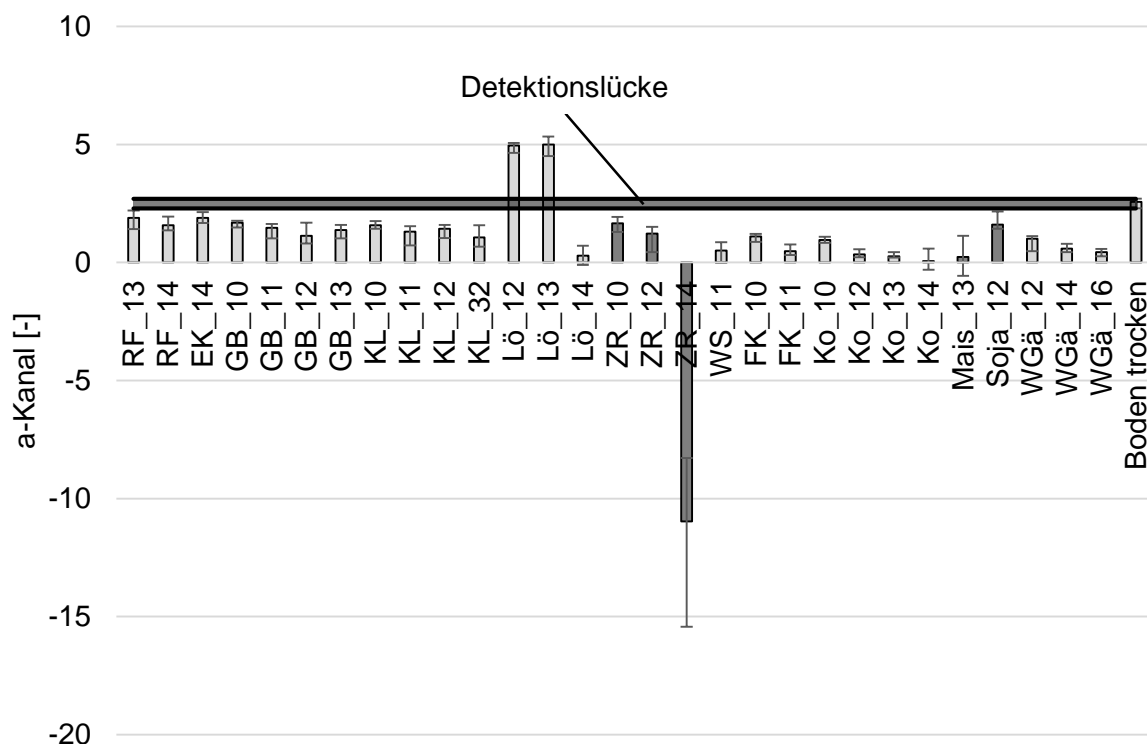


Abb. 4-12: Median, Minima und Maxima der Reflexionswerte zur Differenzierbarkeit der Pflanzenarten anhand des a-Kanals

Die Pflanzendifferenzierung profitiert neben einem großen Blattflächenunterschied ebenfalls von einer geringen Detektionslücke. Dieser Sachverhalt ist anhand des a-Kanals gegeben. Trotz schwacher Zusammenhänge zwischen Blattfläche und Reflexionswert innerhalb der Klassen, ist die Anzahl differenzierbarer Unkräuter in diesem Fall am höchsten. Dies unterstreicht das Bestimmtheitsmaß zwischen den in Abb. 4-12 dargestellten Pflanzenarten und der Blattfläche. Mit $R^2 = 0,593$ liegt ein annehmbarer Zusammenhang vor, der auf Grundlage der Klasseneinteilung nicht ersichtlich ist. Einhergehend mit der kleinsten Detektionslücke in allen

Reflexionskanälen, ist die Spannweite der Extremwerte für die jeweiligen Pflanzenreflexionswerte mit Ausnahme von ZR_14 am geringsten.

Für Zuckerrüben in BBCH 10 und 12, sowie Mais und Soja ist eine derartige Anzahl differenzierbarer Pflanzen nicht festzustellen. Im Gegensatz zu ZR_14 sind bei ZR_10 und ZR_12 weder Rauhaariger Fuchsschwanz, noch Gänseblume oder Kletten-Labkraut differenzierbar. Gleiches gilt für Soja in BBCH 12. Bei Mais_13 sind es vor allem Flohknöterich, Kornblume und Weißer Gänsefuß, die unabhängig des Entwicklungsstadiums trotz deutlicher Blattflächenunterschiede nicht differenzierbar sind.

Aussagen über Abhängigkeiten der Differenzierbarkeit zur Pflanzenfamilie sind nicht eindeutig möglich. Eine Differenzierung innerhalb der Familie der Fuchsschwanzgewächse (Zuckerrübe, Rauhaariger Fuchsschwanz, Weißer Gänsefuß) ist in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums möglich. Gleiches gilt für die Differenzierung der Zuckerrübe von Vertretern der Korbblütler-Familie (Kornblume, Gänseblume, Echte Kamille, Löwenzahn). Limitierend ist auch hier die aus dem Entwicklungsstadium resultierende Mindestgröße der Blattfläche.

– Differenzierung anhand des b-Kanals

Die abschließende Betrachtung hinsichtlich einer möglichen Differenzierbarkeit gilt der Regressionsanalyse von Reflexionswerten des b-Kanals und der gemessenen Blattflächen. Mit Hilfe des b-Kanals wird das Reflexionsverhalten der Objekte vom blauen ($b = -128$) bis gelben ($b = 127$) Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes beschrieben. Analog zu den Analysen des L- und a-Kanals, nimmt das Bestimmtheitsmaß mit steigender Blattfläche zu. Während in Klasse I kein Zusammenhang zwischen Blattfläche und b-Kanal festzustellen ist, liegt in Klasse II eine schwache Korrelation mit negativem Trend und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,206$ vor. Mit Lö_13 (277 mm²) sowie EK_16 (397 mm²) sind in dieser Klasse zwei Ausreißer vorhanden, deren Wertepaare das Bestimmtheitsmaß zwischen Reflexionswert und Blattfläche reduzieren. Eine Regressionsanalyse ohne diese beiden Objekte führt zu einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,79$ und somit zu einem deutlich stärkeren Zusammenhang.

Die größte Schnittmenge dieser Auswertemodelle zu den Analysen der übrigen Reflexionskanäle sind in Klasse III des a-Kanals festzustellen. Ähnlich negative Trendverläufe, sowie die vergleichbare Dimension des Bestimmtheitsmaßes liefern schwach negative Zusammenhänge zwischen Reflexionswerten und Blattfläche. In beiden Fällen sind keine eindeutigen Ausreißer auszumachen, die das niedrige Niveau des Trendverlaufs erklären könnten.

Das Regressionsmodell der Klasse IV bestätigt die Erkenntnisse aus den Analysen der anderen Reflexionskanäle. Mit $R^2 = 0,82$ liegt das Bestimmtheitsmaß der Klasse IV gegenüber den anderen Klassen deutlich höher. Durch größere Blattflächenunterschiede decken die Datenpaare des Regressionsmodells einen größeren Wertebereich ab, was die Vorhersagegenauigkeit zwischen diesen Wertepaaren verbessert.

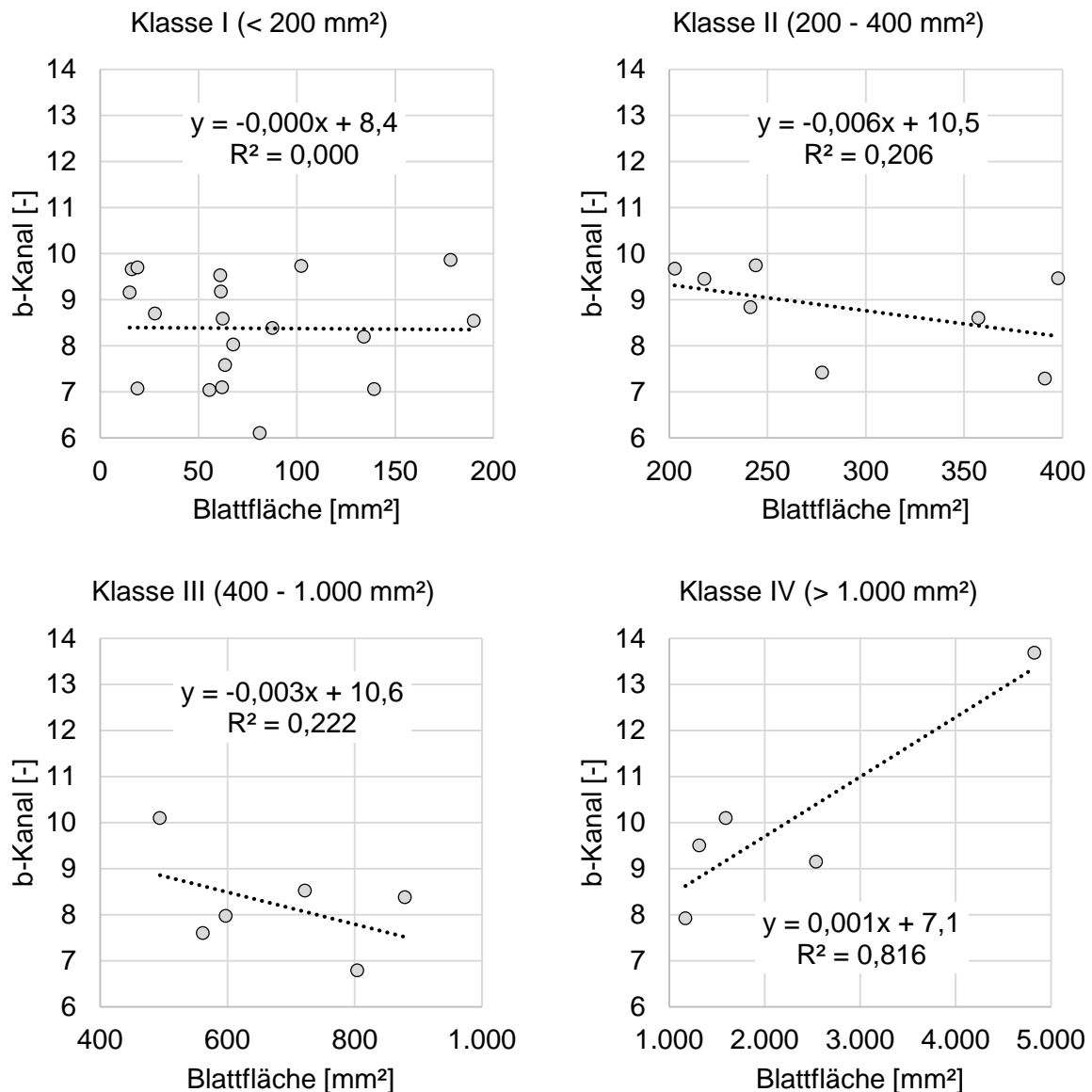


Abb. 4-13: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Blattfläche und b-Kanal

In Abb. 4-14 fällt auf, dass im Gegensatz zu den übrigen Reflexionskanälen deutlich weniger Objekte dargestellt sind. Wie in Kap. 4.1.2.1 analysiert, eignet sich der b-Kanal bei wesentlich weniger Objekten zur Pflanzendetektion. Das beschriebene zweistufige Verfahren zur Pflanzendiskriminierung besagt, dass nicht detektierbare Pflanzen aufgrund ihrer Ähnlichkeit zur Hintergrundreflexion nicht differenzierbar sind. Diese Pflanzen sind für weitere Untersuchungen nicht mehr relevant und aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abb. 4-14 nicht dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß zwischen den verbliebenen Pflanzenarten und deren Blattfläche ist mit $R^2 = 0,928$ deutlich höher, als bei der vorherigen Betrachtung einzelner Klassen. Ein derartiger Zusammenhang deutet auf aussagefähige Ergebnisse hinsichtlich der Eignung des b-Kanals hin. Es gilt die Zuckerrübe als verbleibende relevante Kulturpflanze hinsichtlich ihrer Differen-

zierbarkeit zu untersuchen. Die Spannweite von ZR_10 liegt vollständig im Bereich der Reflexionswerte von Gänseblume, Kletten-Labkraut und Löwenzahn. Aufgrund dessen ist keine Differenzierung möglich. Anders verhält sich dies für die Zuckerrübe in BBCH 14. Das Minimum der Datenreihe liegt mit $b = 11,14$ oberhalb aller übrigen Reflexionswerte.

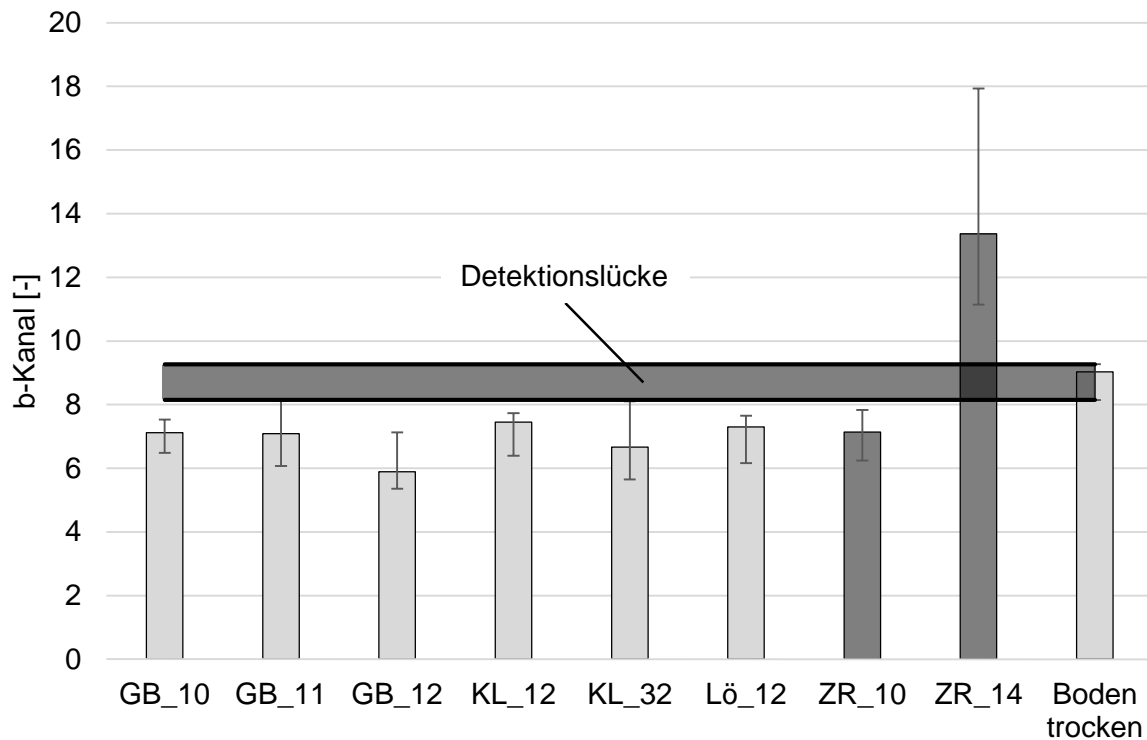


Abb. 4-14: Median, Minima und Maxima der Reflexionswerte zur Differenzierbarkeit der Pflanzenarten anhand des b-Kanals

Insgesamt weist der b-Kanal die geringste Eignung aller Einzelkanäle zur Pflanzendiskriminierung auf, was aufgrund der Sensitivität innerhalb des blauen und gelben Wellenlängenbereichs zu erwarten war. Vielmehr spielt dessen Verwendung beim Einsatz des TrueColor-Sensorrarrays zur teilschlagspezifischen Düngung in Kap. 4.2 eine wichtige Rolle, worauf an dieser Stelle verwiesen wird.

Abschließend wird die Pflanzendifferenzierung mittels Einzelkanal-Auswertung in einer Übersicht zusammengefasst. Im Rahmen dieser Arbeit steht die Differenzierung zwischen Kultur- und Unkrautpflanze im Vordergrund. Fragestellungen zur vollständigen wissenschaftlichen Erfassung der Differenzierungsmöglichkeit weiterer Pflanzenkombinationen sind beliebig erweiterbar. Die vorliegende Arbeit erhebt nicht den Anspruch auf vollständige Untersuchung dieser Zusammenhänge, sondern beschränkt sich auf die Klärung anwendungsorientierter Differenzierbarkeit. Als Maß zur Beurteilung der geeigneten Kanäle wird analog zu Kap. 4.1.2.3 die Differenzierungsrate berechnet. Diese in Tab. 4-5 zu entnehmende Kennziffer beschreibt den Anteil differenzierbarer Unkräuter je Nutzpflanze. Ein Unkraut gilt als differenzierbar, wenn eine Pflanzendifferenzierung durch mindestens einen Reflexionskanal möglich ist. Nicht diffe-

renzierbare Kombinationen aus Nutzpflanze und Unkraut sind markiert. Mit 93,5 % ist die Differenzierungsrate bei ZR_14 am höchsten. Mit deutlichem Abstand folgt Soja_12 mit 67,7 %, gefolgt von Mais_12 mit einer Differenzierungsrate von 61,3 %. Diese drei Nutzpflanzen gehören aufgrund ihrer Blattflächengröße zu Klasse IV. Dies unterstreicht eine verbesserte Differenzierbarkeit durch Ausnutzung unterschiedlicher Entwicklungsstadien. Damit ist nicht die Ausschöpfung weiter Teile der BBCH-Skala gemeint, da dies in einer verminderten Herbizidwirksamkeit resultieren würde.

Tab. 4-5: Differenzierbare Pflanzenkombinationen sowie deren Differenzierungsrate mit dazugehörigen Entwicklungsstadien mittels IR- oder CIELab-Kanälen

Pflanze	ZR_10	ZR_12	ZR_14	Mais_12	Mais_13	Soja_12
RF_10						
RF_11						
RF_12						
RF_13						
RF_14						
EK_14						
EK_16						
GB_10						
GB_11						
GB_12						
GB_13						
KL_10						
KL_11						
KL_12						
KL_32						
Lö_10						
Lö_11						
Lö_12						
Lö_13						
Lö_14						
WS_11						
FK_10						
FK_11						
Ko_10						
Ko_12						
Ko_13						
Ko_14						
WGä_10						
WGä_12						
WGä_14						
WGä_16						
Differenzierungsrate	58,1 %	12,9 %	93,5 %	61,3 %	54,8 %	67,7 %

= nicht differenzierbar

Vielmehr ist es ausreichend, unterschiedliches Verhalten der Blattentwicklung innerhalb des ersten Makrostadiums zu verwenden. Eine Ausnahme bildet bei diesem Verfahren die Zuckerrübe in BBCH 12. Trotz achtfacher Blattflächenzunahme gegenüber BBCH 10, ist die Differenzierungsrate mit 12,9 % mit Abstand am niedrigsten. Als plausible Erklärung ist eine unzureichende Nährstoffversorgung möglich, die durch Blattaufhellung in nicht repräsentativen Reflexionswerten resultiert. Dies gilt es in weiterführenden Studien zu untersuchen.

Nachdem die Grundlage zur Eignungsbeurteilung des TrueColor-Sensorarrays durch Analyse der Einzelkanäle erfolgt ist, zielen die nachfolgenden Untersuchungen auf Auswertemethoden durch Kombination von IR-, L-, a- und b-Kanal ab. Hintergrund dieser Erweiterung ist die Steigerung der Differenzierungsrate.

4.1.4.2 Pflanzendifferenzierung mittels euklidischem Abstand ΔE_{Diff}

Im Gegensatz zur Pflanzendetektion wird bei der Differenzierung eine abgewandelte Form des euklidischen Abstandes verwendet. Basierend auf der Farbunterscheidung nach DIN EN ISO/CIE 11664-4, wird ein angepasster Zusammenhang hergeleitet. Der euklidische Farbabstand zur Differenzierung (ΔE_{Diff}) ergibt sich durch den maximalen Abstand zwischen den Farbwerten des Unkrauts (L_{Un} , a_{Un} , b_{Un}) und der Nutzpflanze (L_{Nu} , a_{Nu} , b_{Nu}) zu:

$$\Delta E_{Diff} = \sqrt{(L_{Un} - L_{Nu})^2 + (a_{Un} - a_{Nu})^2 + (b_{Un} - b_{Nu})^2} \quad (4.9)$$

Auch im Falle der Differenzierung lässt sich der euklidische Abstand mittels IR-Kanal um eine Dimension erweitern. Dieser Zusammenhang wird durch Gleichung (4.10) beschrieben:

$$\Delta E_{IR_{Diff}} = \sqrt{(L_{Un} - L_{Nu})^2 + (a_{Un} - a_{Nu})^2 + (b_{Un} - b_{Nu})^2 + (IR_{Un} - IR_{Nu})^2} \quad (4.10)$$

Analog zur Einordnung der Bewertungskriterien aus Kap. 4.1.2.2, werden Pflanzenkombinationen als differenzierbar bewertet, wenn $\Delta E_{Diff} > 1,0$ gilt und damit der Zusammenhang eines geringen Farbunterschieds vorliegt.

Wie in Tab. 4-6 dargestellt, steigt die Differenzierbarkeit der Kulturpflanzen mit zunehmendem Entwicklungsstadium. Für ZR_14, Mais_13 und Soja_12 ist die Bedingung $\Delta E_{Diff} > 1,0$ für alle untersuchten Unkrautarten und –entwicklungsstadien gegeben. Vorherrschend ist auch hier der aus den Untersuchungen der Einzelkanäle analysierte Einfluss möglichst großer Blattflächenunterschiede. Bei ZR_10 und ZR_12 ist eine Differenzierungsrate von 93,5 % zu verzeichnen. Keinen ausreichenden Farbunterschied weist die Zuckerrübe in BBCH 10 und 12 mit Gänseblumen in BBCH 10, 11 sowie 13 auf. Dies ist für die praktische Anwendbarkeit von untergeordneter Relevanz, da Gänseblume kein Leitunkraut im Zuckerrübenanbau darstellt (Bosch, 1987). Mais und Löwenzahn lassen sich im Keimblattstadium ebenfalls nicht differenzieren, gleiches gilt für Mais_12 und WGä_10. Sowohl Löwenzahn als auch Weißer Gänsefuß lassen sich ab BBCH 11 bzw. 12 von Mais differenzieren. Nach Gehring und Mülleider (2004)

zählen diese Unkrautarten nicht zu den Leitunkräutern im Maisanbau. Daher ist eine Nachauf-
laufbekämpfung zu Lö_11 bzw. WGä_12 tolerierbar, um eine Wasser- und Nährstoffkonkur-
renz zwischen Kulturpflanze und Unkraut ausreichend verhindern zu können.

Tab. 4-6: Differenzierbare Pflanzenkombinationen sowie deren Differenzierungsrate mit dazu-
gehörigen Entwicklungsstadien mittels ΔE_{Diff}

Pflanze	ZR_10	ZR_12	ZR_14	Mais_10	Mais_12	Mais_13	Soja_12
RF_10							
RF_11							
RF_12							
RF_13							
RF_14							
EK_14							
EK_16							
GB_10							
GB_11							
GB_12							
GB_13							
KL_10							
KL_11							
KL_12							
KL_32							
Lö_10							
Lö_11							
Lö_12							
Lö_13							
Lö_14							
WS_11							
FK_10							
FK_11							
Ko_10							
Ko_12							
Ko_13							
Ko_14							
WGä_10							
WGä_12							
WGä_14							
WGä_16							
Differenzierung	93,5 %	93,5 %	100 %	96,8 %	96,8 %	100 %	100 %




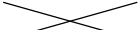


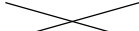
= nicht differenzierbar

Analog zu den Ergebnissen der Einzelkanalanalyse folgen die von ZR_12 differenzierbaren
Unkräuter einem nicht stringenten Zusammenhang. Während eine Differenzierung junger Ent-

wicklungsstadien (GB_10, GB_11, GB_12, KL_10) möglich ist, sind die Reflexionsunterschiede bei weiter entwickelten Unkräutern (GB_13, KL_11) zu gering. Bei den übrigen Nutzpflanzen ist dieses Phänomen nicht zu beobachten.

Die auf Basis von Gleichung (4.10) als differenzierbar einzustufenden Pflanzenkombinationen sind Tab. 4-7 zu entnehmen.

Tab. 4-7: Differenzierbare Pflanzenkombinationen sowie deren Differenzierungsrate mit dazugehörigen Entwicklungsstadien mittels ΔE_{IR_Diff}

Pflanze	ZR_10	ZR_12	ZR_14	Mais_10	Mais_12	Mais_13	Soja_12
RF_10							
RF_11							
RF_12							
RF_13							
RF_14							
EK_14							
EK_16							
GB_10							
GB_11							
GB_12							
GB_13							
KL_10							
KL_11							
KL_12							
KL_32							
Lö_10							
Lö_11							
Lö_12							
Lö_13							
Lö_14							
WS_11							
FK_10							
FK_11							
Ko_10							
Ko_12							
Ko_13							
Ko_14							
WGä_10							
WGä_12							
WGä_14							
WGä_16							
Differenzierung	93,5 %	93,5 %	100 %	100 %	96,8 %	100 %	100 %

 = nicht differenzierbar

Insgesamt ist die Differenzierungsrate unabhängig von Kulturpflanze und Unkraut auf einem hohen Niveau. Die Anzahl differenzierbarer Unkräuter übersteigt bei allen Kulturpflanzen die Ergebnisse aus der Einzelkanalanalyse. Durch Hinzunahme des IR-Kanals lässt sich lediglich bei Mais_10 eine verbesserte Differenzierbarkeit feststellen.

Der Reflexionsunterschied von Lö_10 (IR = 18,012) und Mais_10 (IR = 18,516) vergrößert den euklidischen Farbabstand von $\Delta E_{\text{Diff}} = 0,930$ zu $\Delta E_{\text{IR, Diff}} = 1,058$. Dadurch ändert sich die Farbdifferenz nach DIN EN ISO/CIE 11664-4 von der Kategorie „für geübtes Auge bemerkbar“ zu „geringer Farbunterschied“, was eine sensorische Erfassung zulässt (vgl. Kap. 4.1.2.2). Für die übrigen Pflanzenkombinationen ist eine Hinzunahme des IR-Kanals nicht relevant, da dieser keinen Einfluss auf die Kategorisierung der euklidischen Abstände hat.

4.1.4.3 Bewertung des Differenzierungsvermögens anhand des Vergleichs von Spannweite und Signifikanz

Bei den bisher vorgestellten Auswertemethoden wurde die Differenzierbarkeit auf Basis der Extremwerte und damit anhand der Spannweite der jeweiligen Datenreihe getroffen. Die erzeugte Datenbank beinhaltet auch Ausreißer, deren Ursachen unterschiedlich begründet sein können. Eine derartige Herangehensweise schätzt die Beurteilung zur sicheren Seite ab, indem die Differenzierbarkeit nur dann gegeben ist, wenn sich Minima und Maxima nicht überschneiden und die Wertebereiche der Datenreihen vollständig unterschiedlich sind. Daraus würde durch ausschließlich richtig positive Differenzierung bei der Applikation eine vollständige Einsparung des überschüssigen Herbizids erfolgen. Darüber hinaus gibt es noch weitere Szenarien zur Differenzierungsentscheidung, welche in Abb. 4-15 dargestellt sind.

		Differenzierung	
		möglich	nicht möglich
TrueColor-Sensorarray	differenziert	richtig positiv	falsch positiv
	nicht differenziert	falsch negativ	richtig negativ

Abb. 4-15: Wahrheitsmatrix zur Differenzierungsentscheidung des TrueColor-Sensorarrays

Die Farbgebung kategorisiert die Entscheidungsfelder in „korrekte Entscheidung“ (grün), „akzeptable Entscheidung“ (gelb) und „zu vermeidende Entscheidung“ (rot).

Eine falsch positive Differenzierung bedeutet, dass eine Applikation erfolgt, obwohl kein Unkraut vorhanden ist. Gegenüber einer flächigen Anwendung würde daraus bereits eine Mittelleinsparung resultieren und zu reduzierten Aufwandmengen führen. Auch eine falsch negative Differenzierung ist möglich. In diesem Fall würde eine Herbizidapplikation nicht erfolgen, obwohl ein Unkraut vorhanden ist. Eine daraus resultierende Restverunkrautung ist tolerierbar, da die Ertragsleistung erst ab einer gewissen Unkrautgröße durch Konkurrenz zu Licht, Wasser und Nährstoffen negativ beeinflusst ist (Schäufele, 1986).

Weil in diesem Fall eine gewisse Fehlerwahrscheinlichkeit toleriert wird, kann die Überprüfung auf Differenzierbarkeit durch Analyse der statistischen Signifikanz durchgeführt werden. Dazu werden die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse mittels Signifikanzmatrix für jeden Reflexionskanal dargestellt. Darin sind alle signifikant unterschiedlichen Objekte auf Basis eines Signifikanzniveaus von $\alpha < 0,05$ mit einem Stern (*) markiert. Die Darstellungen in den Tab. 4-8 bis Tab. 4-11 zeigen, welche Pflanzenkombinationen aufgrund ihrer Reflexionswerte mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 5 % signifikant unterschieden werden können.

Für den IR-Kanal bedeutet dies beispielsweise, dass die Reflexionswerte von Mais_10 zu 19 der 31 untersuchten Unkrautobjekte signifikant unterschiedlich sind. Während Mais_13 ebenfalls in dieser Größenordnung liegt, kann Mais_12 in 28 Fällen unterschieden werden. Soja_12 weist anhand der IR-Reflexionswerte eine vollständig signifikante Unterscheidbarkeit gegenüber den Unkräutern auf. ZR_12 und ZR_14 liegen mit 23 bzw. 20 signifikant unterschiedlichen Unkräutern im mittleren Bereich möglicher Differenzierbarkeit. Auch innerhalb dieses Analyseverfahrens zeigt sich, dass ZR_10 trotz kleinster mittlerer Blattfläche mit 26 signifikant unterschiedlichen Unkräutern eine hohe Differenzierungsrate aufweist.

Die Anzahl signifikant unterschiedlicher Reflexionswerte für den L-Kanal ist bei Mais_10, Mais_13, ZR_10 und ZR_12 vergleichbar zu den Ergebnissen des IR-Kanals. Dagegen unterscheidet sich Mais_12 mittels L-Kanal lediglich gegenüber 21 Unkräutern signifikant. Als vollständig signifikant unterschiedlich zu den untersuchten Unkräutern erweist sich ZR_14 im L-, a- und b-Kanal. Gleichzeitig reduziert sich die Gesamtanzahl signifikant unterschiedlicher Gruppen vom L-Kanal über den a-Kanal hin zum b-Kanal. Dieser Trendverlauf bestätigt die Ergebnisse der Spannweiten-Analyse in Kap. 4.1.4.1.

Als abschließende Analyse zur Pflanzendifferenzierung ist in Tab. 4-12 ein Vergleich zwischen differenzierbaren Pflanzenkombinationen durch Berücksichtigung von Spannweite (X) gegenüber signifikanter Unterscheidung (*) abgebildet. Diese Darstellung verdeutlicht den Einfluss der Fehlerwahrscheinlichkeit auf die tatsächliche Differenzierbarkeit. Im Gegensatz zu den Signifikanzmatrizen, sind in dieser Übersicht Nutzpflanzen und Unkräuter ausgenommen, deren Reflexionswerte sich nicht signifikant von der Bodenreflexion unterscheiden und damit nicht detektierbar sind. Übrig bleiben 744 Differenzierungsmöglichkeiten, welche sich aus der Kombination von detektierbaren Nutzpflanzen und Unkräutern, den Entwicklungsstufen sowie den Reflexionskanälen zusammensetzen.

Durch diesen Vergleich können die Pflanzenkombinationen in die Kategorien der Wahrheitsmatrix (Abb. 4-15) eingeordnet werden, um den Einfluss der Fehlerwahrscheinlichkeit von 5 % messbar zu machen. Eine richtig positive Entscheidung (grün) wurde dann getroffen, wenn eine Pflanzenkombination innerhalb eines Reflexionskanals sowohl durch die Spannweite, als auch Signifikanz als differenzierbar bewertet wurde. Richtig negativ (grün) gelten die nicht differenzierbaren Pflanzenkombinationen, die durch beide Bewertungsmethoden als solche eingestuft wurden. Falsch positive Pflanzenkombinationen (gelb) wurden mit Hilfe signifikanter Unterscheidung als differenzierbar eingestuft, sind aber auf Grund sich überschneidender Spannweiten nicht differenzierbar. Als letzte Kategorie beinhalten falsch negative Differenzierungsentscheidungen (rot) Pflanzenkombinationen, die durch das Spannweiten-Verfahren als differenzierbar ermittelt wurden, dies aber durch Überprüfung mittels signifikanter Unterschiede nicht bestätigt werden konnte.

Sowohl richtig positive als auch richtig negative Einträge der Wahrheitsmatrix werden im Rahmen dieser Auswertungsform gleichwertig als korrektes Ergebnis gewertet. Die beiden Kategorien haben bezogen auf alle relevanten Pflanzenkombinationen zusammen einen Anteil von 87,10 %. Eine falsch positive Entscheidung wurde bei der Auswertung signifikanter Unterschiede in 9,68 % der Testergebnisse getroffen. Für diesen Fall ist die Herbizideinsparung gegenüber der korrekten Entscheidung geringer, die Unkrautbekämpfung würde aber zuverlässig funktionieren. Die falsch negativen Entscheidungen zur Differenzierung stellen hingegen die kritische Kennzahl dar. Deren Anteil ist mit 3,23 % am geringsten und bleibt unterhalb der tolerierten Fehlerwahrscheinlichkeit von 5 %.

Insgesamt geht aus den Untersuchungen hervor, dass eine Pflanzendifferenzierung anhand von Einzelkanälen in Abhängigkeit der Kulturpflanze möglich ist. Die Vorgabe der zu differenzierenden Kulturpflanze und deren Entwicklungsstadium ist für zukünftige praktische Anwendungen obligatorisch und kann nur begrenzt verallgemeinert werden. Vorteilhaft ist hierbei der geringe Rechenaufwand durch Schwellenwertbildung einzelner Reflexionskanäle. Außerdem kann eine kombinierte Auswertung durch Berechnung des euklidischen Abstands der Reflexionskanäle die Anzahl differenzierbarer Pflanzenkombinationen steigern. Bei der Pflanzendetektion lässt sich die Detektionsrate durch Hinzunahme des IR-Kanals bei der Berechnung des euklidischen Abstandes auf 100 % der untersuchten Pflanzen steigern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse dieser statischen Versuche zur Abschätzung der Durchführbarkeit dienen und einer Validierung durch dynamische Versuchsanstellungen erfordern.

Tab. 4-12: Vergleich differenzierbarer Pflanzenkombinationen mittels Spannweite (X) und signifikanter Unterschiede (*), grün: richtig positiv + negativ, gelb: falsch positiv, rot: falsch negativ

Pflanze	ZR_10				ZR_12				ZR_14				Mais_12				Mais_13				Soja_12			
	IR	L	a	b	IR	L	a	b	IR	L	a	b	IR	L	a	b	IR	L	a	b	IR	L	a	b
EK_14							X				X								X					*
EK_16	X *	X *							X *	X *			X *	X *				X *			X *	X *		*
FK_10	X *	X *	X						X *	X *			X						*		X *	X *	X	
FK_11	X *	X *	X *						X *	X *			X *								X *			X *
GB_10								*	X *	X *	X *		X *	X *			X *	X *	X *	*	X *	X *		
GB_11								*	X *	X *	X *		X *	X *			X *	X *	*	*	X *	X *		
GB_12								*	X *	X *	X *		X	X *			X	X *	*	*	X	X *		
GB_13										X *			*				*		*		*			
KL_10		*							*	X *				*				*	X *			*		
KL_11										X *									*			*		
KL_12		*							*	X *	X			*			*		*	*		*		
KL_32		*							*	X *	X			*					*	*		*		
Ko_10	X *	X *	X						X *	X *			X *							*	X *	X	X *	
Ko_12	X *	X *	X *				*		X *	X *			X *							*	X *			X *
Ko_13	X *	X *	X *				X *		X *	X *			X *							*	X *			X *
Ko_14	X *	X *	X *				*		X *	X *			X *							*	X *			X *
Lö_10							*													*				
Lö_11		X *					*		X *				X *	X *			X *	X *		*	X *	X *		
Lö_12			X *				X *	*		X *	X *		X *				X *		X *	*	X *		X *	
Lö_13			X *				X *	*		X *	*	*							X *	*			X *	
Lö_14		X *	X *				*	*	X *	X *	*	*		X *			*		*	*		X *	X *	
RF_10	X *	X *					*		X *				X *	X *			X *			*	X *	X *		
RF_11	X *	X *					*		X *				X *	X *			X			*	X *	X *		
RF_12							*													*				
RF_13										X									X	*				
RF_14		*							*	X *				*			*	X *		*		*		
WGä_10	X *	X *	*	*			*		X *	X *							X	*	*	*	X *			
WGä_12	X *	X *	X						X *	X *			X				X			*	X *		X	
WGä_14	X *	X *	X *						X *	X *			X *							*	X *		X	
WGä_16	X *	X *	X *				*		X *	X *			X *				X			*	X *		X	
WS_11	X *		X *				*	*		X *	*	*	X *				X *		*	*	X *		X *	

4.2 Teil B: Einsatz des TrueColor-Sensorarrays zur teilschlagspezifischen Stickstoff-Düngung

Neben der Pflanzendiskriminierung stellt die teilschlagspezifische Stickstoff-Düngung die zweite Anwendung des Dualsensors dar. Neben der Auswertung des relevanten Reflexionswertebereichs, liegt der Fokus dieses Kapitels auf der Regressionsanalyse bezüglich der erhobenen pflanzenbaulichen Parameter und deren Relevanz für die praktische Anwendung.

4.2.1 Wertebereiche charakteristischer Reflexionskanäle zur Anwendung bei der Stickstoff-Düngung

Im Gegensatz zur Pflanzendiskriminierung erfolgt die Applikation bei der Stickstoff-Düngung nicht pflanzenindividuell, sondern teilschlagspezifisch. Aus diesem Grund wurde der Maßstab des Versuchsdesigns auf die in Kap. 3.3 dargestellte Ebene skaliert. Dieses Verfahren orientiert sich an vergleichbaren Systemen aus der Literatur (vgl. Kap. 2.3). Die N-Aufnahme von Getreidepflanzen steigt mit Bestockungsbeginn (BBCH 21) kontinuierlich an, wodurch eine Nährstoff-Nachlieferung ab diesem Stadium erforderlich ist (vgl. Kap. 2.3.1, Abb. 2-13). Auf Grund dieses Zusammenhangs wurden die Versuchspartellen mit einsetzendem Vegetationsbeginn im Frühjahr bis zur vollständigen Ausbildung der Ähren vermessen. Durch die gebildeten Seitentriebe (Bestockung) und das anschließende Längenwachstum (Schossen) überwiegen die Blattflächenanteile der gemessenen Mischflächen gegenüber den Reflexionsanteilen des Hintergrundes (Boden). Gleichzeitig können äußere Einflüsse mit zunehmendem Pflanzenalter zur Inhomogenität des Phänotyps führen. Eine teilschlagspezifische Unterscheidung auf Basis der Spannweite ist nicht zielführend, da Ausreißer zu starken Schwankungen führen würden. Im Gegensatz zur Pflanzendiskriminierung ist eine derartige Auswertung zur sicheren Seite nicht erforderlich, da aufgrund der Applikationsart eine niedrigere Auflösung genügt (vgl. Kap. 2.3.3).

Im ersten Auswertungsschritt werden die verwendeten statistischen Größen zur Beschreibung der untersuchten Stickstoff-Versorgungszustände vorgestellt. In Tab. 4-13 sind das arithmetische Mittel sowie die Standardabweichung der beiden Versuchsjahre für jeden Reflexionskanal in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums sowie der N-Stufe für Wintergerste (WG) gegenüber gestellt. Unabhängig von Reflexionskanal, N-Stufe oder BBCH-Stadium überwiegen die Differenzen zwischen den Versuchsjahren gegenüber den Standardabweichungen innerhalb einer Vegetationsperiode. Dies ist als ein erster Hinweis auf eine notwendige Kalibrierung vor jeder Applikation zu interpretieren. Sowohl die Jahresabweichungen als auch die Standardabweichungen sind für die Reflexionswerte des IR-Kanals am größten, gefolgt von den Abweichungen des L-Kanals. Die geringsten Differenzen zwischen den Versuchsjahren weist der b-Kanal auf.

Tab. 4-13: Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (σ) der IR-, L-, a- und b-Reflexionswerte für die Düngestufen von Wintergerste in den untersuchten Pflanzenstadien BBCH 24, 32, 39 und 59 in den Versuchsjahren 2020 und 2021

		IR				L				a				b			
	N-Stufe	2020		2021		2020		2021		2020		2021		2020		2021	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
BBCH 24	0 %	47,23	0,97	38,48	1,46	38,01	0,33	38,82	0,73	-6,34	0,15	-2,03	0,07	20,63	0,16	20,04	0,28
	50 %	46,55	1,07	42,69	1,40	37,80	0,30	38,19	0,72	-6,29	0,21	-3,81	0,02	20,31	0,10	19,26	0,27
	100 %	47,19	1,02	37,63	1,28	37,54	0,33	38,03	0,74	-6,70	0,18	-2,18	0,03	20,28	0,18	19,55	0,28
	150 %	47,58	0,55	40,55	1,03	38,54	0,20	36,24	0,54	-6,10	0,09	-4,35	0,05	20,54	0,11	18,19	0,18
BBCH 32	0 %	22,68	0,60	25,02	0,79	27,24	0,47	31,90	0,55	-4,20	0,19	-1,66	0,06	16,81	0,31	17,40	0,28
	50 %	22,17	0,80	24,75	1,03	24,98	0,62	26,16	0,72	-5,15	0,16	-5,48	0,05	14,29	0,25	12,68	0,10
	100 %	22,54	0,75	22,83	0,83	23,62	0,48	25,04	0,68	-5,99	0,14	-5,25	0,01	12,68	0,25	11,74	0,11
	150 %	20,35	1,55	25,24	0,93	21,19	1,05	24,63	0,65	-6,03	0,04	-6,70	0,04	11,51	0,13	10,51	0,13
BBCH 39	0 %	18,59	0,92	20,44	0,39	25,64	0,83	30,57	0,41	-3,30	0,05	-0,04	0,13	16,60	0,17	15,41	0,08
	50 %	16,03	0,44	17,44	0,23	21,42	0,53	21,94	0,22	-4,35	0,10	-4,24	0,05	14,49	0,92	11,45	0,08
	100 %	16,76	0,74	16,74	0,14	20,45	0,65	21,23	0,13	-5,52	0,07	-4,46	0,06	12,66	0,19	10,82	0,07
	150 %	16,80	0,41	18,31	0,20	19,91	0,25	20,50	0,19	-5,90	0,06	-6,07	0,05	11,63	0,08	9,56	0,04
BBCH 59	0 %	14,70	0,84	8,58	0,39	22,65	0,80	15,84	0,67	-2,62	0,13	-0,62	0,07	15,07	0,17	13,97	0,26
	50 %	14,69	0,44	10,37	0,24	18,18	0,28	12,84	0,27	-6,89	0,38	-5,77	0,05	11,63	0,14	11,39	0,06
	100 %	14,75	0,80	9,64	0,26	17,44	0,75	11,49	0,37	-6,94	0,63	-6,40	0,06	11,66	0,42	10,39	0,34
	150 %	15,62	0,24	11,76	0,26	17,84	0,25	12,66	0,34	-7,99	0,16	-7,58	0,12	10,88	0,13	10,35	0,21

Die Reflexionsmessungen in BBCH 24 stellen die Referenzwerte ohne Einfluss der Düngerapplikation dar. Als Referenz geben diese einen Aufschluss über die Homogenität der Versuchspartellen zu Vegetationsbeginn. Der Gehalt an mineralisiertem Stickstoff (N_{\min}) lag zum Frühjahr 2020 bei 9 kg N ha^{-1} . Auf vergleichbarem Niveau lag der N_{\min} -Gehalt im Frühjahr 2021 mit 16 kg N ha^{-1} . Diese Nährstoffmenge steht den Versuchspartellen uniform zur Verfügung und wird deshalb in den weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt. Eine Plausibilitätsprüfung wird ab BBCH 32 durch Analyse eines monotonen Werteverlaufs innerhalb eines Entwicklungsstadiums durchgeführt. Eine einheitliche Richtung der Mittelwertverläufe über die vier Düngerstufen ist mit Ausnahme des IR-Kanals in allen Reflexionskanälen festzustellen. Im ersten Versuchsjahr treten innerhalb des IR-Kanals ab BBCH 39 leicht monoton steigende Zusammenhänge mit den Düngerstufen 50 %, 100 % und 150 % auf. Die NIR-Reflexionswerte aus 2021 sind innerhalb von BBCH 32 und 39 hingegen jeweils monoton fallend mit den Düngerstufen 0 %, 50 % und 100 %. Aus der Literatur ist bekannt, dass die NIR-Reflexion mit steigendem Pflanzenanteil zunimmt (Ferrio et al., 2005). Daher werden diese Ergebnisse im Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Pflanzenbedeckung in Kap. 4.2.3 genauer analysiert.

Die Reflexionswerte des L-Kanals weisen durchweg monoton fallende Verläufe bei steigender N-Stufe auf. Ein dunkleres Erscheinungsbild bei höherer N-Versorgung stellt eine mögliche Erklärung für die abnehmende Helligkeit dar. Über beide Versuchsjahre hinweg bildet die höchste N-Stufe in BBCH 59 eine Ausnahme dieses Verlaufs. Möglicherweise ist dies durch Sättigungseffekte in der N-Aufnahme zu erklären, was in Kap. 4.2.6 näher erläutert wird.

Innerhalb der Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 des ersten Versuchsjahres nehmen die Reflexionswerte des a-Kanals mit steigender N-Stufe monoton ab. In BBCH 32 des zweiten Versuchsjahres ist dieser Zusammenhang nicht festzustellen. Eine mögliche Erklärung kann eine verzögerte N-Aufnahme durch die in diesem Zeitraum vorherrschende kühle Witterung sein (siehe Anhang, Abb. 7-3). Anhand der visuellen Bonitur lassen sich die Reflexionswerte des a-Kanals eindeutig plausibilisieren. Mit zunehmender N-Versorgung wird das grüne Erscheinungsbild der Pflanzen verstärkt, wodurch sich die Reflexionswerte des a-Kanals in den negativen Bereich verschieben. Werden die a-Reflexionswerte der Kontrollvariante (0 %) aus 2020 über die BBCH-Stadien hinaus miteinander verglichen, nehmen die a-Werte stetig zu. Auch dies ist ein Hinweis auf das korrekte Ansprechen des a-Kanals, da der Phänotyp der Pflanzen zunehmend durch Nährstoffmangel und damit verbundenem geringeren Grün-Anteil geprägt ist.

Die Reflexionswerte des b-Kanals bestätigen die vorangegangene Überprüfung des a-Kanals. Mit zunehmender N-Versorgung nimmt die Reflexion des Grün-Anteils durch steigenden Chlorophyll-Gehalt zu und dominiert gegenüber dem durch Carotinoide verursachten chlorotischen Erscheinungsbild (Prsa et al., 2007). Folglich sinken die Reflexionswerte des b-Kanals vom gelben in Richtung des blauen Wertebereichs. Die Reflexionswerte des ersten Versuchsjahres weisen innerhalb von BBCH 59 keinen monotonen Verlauf der b-Werte auf, das durch die Überlagerung mit abiotischen Stressfaktoren aus der anhaltend trockenen Witterung in diesem Zeitraum erklärbar ist (siehe Anhang, Abb. 7-2).

Im nächsten Abschnitt werden die Verläufe von arithmetischem Mittel sowie Standardabweichung des Winterweizens (WW) analysiert. Wie aus der Versuchsbeschreibung in Kap. 3.3.1 hervorgeht, ist der Bestand im ersten Versuchsjahr in zweifacher Hinsicht von abiotischen Umweltfaktoren betroffen. Einerseits lag die Nährstoffversorgung durch mineralisierten Stickstoff im Boden deutlich oberhalb der anderen Bestände. Andererseits war die gegenüber der Wintergerste später einsetzende Wachstumsphase des Winterweizens im Frühjahr 2020 ebenfalls vorwiegend durch trockene Witterungsverhältnisse beeinflusst. Aus Tab. 4-14 geht hervor, dass die Überlagerung der beschriebenen Effekte die Aussagekraft gegenüber den Reflexionswerten aus 2021 deutlich herabsetzt. Die erhöhte N-Versorgung der Kontrollvariante erklärt die geringen Reflexionsunterschiede zu Beginn der Messreihe in BBCH 23 und 32. In der Folge wird die N-Aufnahme durch eine erneute Trockenphase reduziert, wodurch sich die Wertebereiche der Varianten annähern. Diese Voruntersuchungen werden in Kap. 4.2.4 durch Analyse der Frischmasse unterstrichen.

Vergleichbare Aussagen zu den Referenzmessungen zu Vegetationsbeginn sind zwischen den Versuchsjahren nicht möglich, da sich die Entwicklungsstadien vor dem jeweils ersten Düngetermin aufgrund unterschiedlicher Saattermine und Witterungsverhältnisse deutlich unterscheiden. Die Dimension der Standardabweichung ist für die erhobenen Reflexionswerte unabhängig von Versuchsjahr, N-Stufe und Entwicklungsstadium vergleichbar. Analog zu den Ergebnissen der WG, unterscheiden sich die Reflexionswerte zwischen den Versuchsjahren zum Teil deutlich. Dies unterstreicht die erste Einschätzung einer notwendigen Kalibrierung vor einem Kulturwechsel oder bei unterschiedlichen Entwicklungsstadien.

Während im Jahr 2020 für den IR-Kanal keine plausibel erklärbaren Mittelwertverläufe festgestellt werden können, ist dies für die IR-Reflexion aus 2021 möglich. Mit zunehmender N-Stufe steigen die Reflexionswerte jeweils innerhalb von BBCH 32, 39 und 59 monoton an. Im Gegensatz zu den Untersuchungen der WG, sind bei WW im Jahr 2021 plausible Zusammenhänge zu verzeichnen.

Für den L-Kanal sind ab BBCH 32 monoton fallende Mittelwertverläufe mit steigender N-Stufe von 0 % N bis 100 % N erkennbar (siehe Tab. 4-14). Dieser Zusammenhang ist unabhängig von den Versuchsjahren zu beobachten. Analog zu den Ergebnissen der WG in BBCH 59, ist bei der 150 % N-Variante von Sättigungseffekten innerhalb des L-Kanals auszugehen. Ein weiterer Grund zu dieser Annahme ist die Monotonie bei den jüngeren Entwicklungsstadien, welche ebenfalls bei WG festzustellen ist. Die gegenüber der betriebsüblichen Variante um 50 % gesteigerte N-Zufuhr je Düngergabe kann die Aufnahmefähigkeit der Pflanzen übersteigen. Dieser Zusammenhang wird in Kap. 4.2.6 anhand von Ergebnissen aus der C/N-Analyse verifiziert.

Tab. 4-14: Mittelwerte (\bar{x}) und Standardabweichungen (σ) der IR-, L-, a- und b-Reflexionswerte für die Düngestufen von Winterweizen in den untersuchten Pflanzenstadien BBCH 13, 23, 32, 39 und 59 in den Versuchsjahren 2020 und 2021

		IR				L				a				b			
	N-Stufe	2020*		2021**		2020*		2021**		2020*		2021**		2020*		2021**	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
BBCH 13**/ BBCH 23*	0 %	41,71	0,71	18,18	0,41	37,58	0,23	29,86	0,38	-3,68	0,09	2,14	0,02	16,52	0,06	14,35	0,10
	50 %	43,39	0,58	18,93	0,44	38,30	0,20	30,37	0,41	-3,75	0,03	2,30	0,03	16,90	0,02	14,26	0,14
	100 %	40,73	0,56	17,63	0,32	37,64	0,24	29,41	0,31	-3,28	0,03	2,43	0,02	16,21	0,05	14,06	0,07
	150 %	45,58	0,53	19,04	0,62	42,41	0,06	30,57	0,57	-2,27	0,07	2,44	0,04	17,98	0,02	14,32	0,16
BBCH 32	0 %	28,74	0,16	17,43	0,89	27,01	0,14	21,18	0,82	-4,85	0,07	-3,25	0,06	12,07	0,05	12,27	0,22
	50 %	27,95	0,26	21,84	0,10	25,45	0,09	18,49	0,15	-5,11	0,07	-7,20	0,04	11,02	0,04	8,35	0,04
	100 %	28,66	0,16	23,00	1,41	25,04	0,11	17,97	1,06	-5,38	0,06	-7,78	0,08	10,21	0,04	7,14	0,22
	150 %	28,91	0,28	23,26	0,31	26,52	0,06	16,94	0,18	-4,57	0,08	-8,27	0,01	10,71	0,02	6,27	0,02
BBCH 39	0 %	18,98	0,12	15,88	0,47	21,21	0,04	22,32	0,31	-3,89	0,04	-1,37	0,13	9,67	0,07	11,46	0,11
	50 %	17,96	0,12	17,57	0,30	18,99	0,14	15,88	0,41	-4,32	0,03	-6,25	0,12	8,29	0,03	7,60	0,09
	100 %	17,35	0,34	18,02	0,34	15,47	0,28	13,99	0,27	-5,27	0,05	-7,43	0,01	5,62	0,05	6,16	0,04
	150 %	16,90	0,40	20,66	0,40	16,95	0,35	14,17	0,36	-4,21	0,07	-8,59	0,08	6,10	0,06	5,52	0,13
BBCH 59	0 %	17,52	0,26	12,87	0,28	22,43	0,39	20,49	0,40	-3,20	0,08	-1,71	0,03	9,19	0,25	9,68	0,06
	50 %	15,09	0,47	16,40	0,35	19,11	0,46	17,75	0,39	-2,98	0,10	-5,30	0,01	7,93	0,16	6,24	0,10
	100 %	16,85	0,52	17,63	0,22	18,52	0,48	16,82	0,31	-3,99	0,05	-5,89	0,00	6,23	0,15	4,86	0,06
	150 %	16,15	0,50	19,67	0,30	19,41	0,50	17,06	0,31	-3,09	0,10	-6,56	0,01	6,97	0,10	4,37	0,11

Anhand eines Vergleichs des a-Kanals zwischen den Jahren 2020 und 2021 werden die größten Unterschiede deutlich. Die betragsmäßige Differenz zwischen den Reflexionswerten ist bei diesem Kanal am größten. Außerdem sind für 2020 keine monotonen Zusammenhänge zwischen den Reflexionsmittelwerten eines Entwicklungsstadiums und den N-Stufen erkennbar. Einzige Ausnahme bildet hier BBCH 39 für die Düngervarianten 0 %, 50 % und 100 %. Für das zweite Versuchsjahr gelten erwartungsgemäß ab BBCH 32 monoton fallende Zusammenhänge zwischen den Reflexionsmittelwerten und den N-Stufen. Analog zu den Ergebnissen in WG, gibt das TrueColor-Sensorarray den steigende Grün-Anteil mit zunehmender N-Stufe wieder. Auffällig sind die einheitlich niedrigen Standardabweichungen innerhalb des a-Kanals. Eindeutige Aussagen zu Tendenzen über mehrere Entwicklungsstadien können bei WW nicht getroffen werden. Auch dies lässt auf eine notwendige Kalibrierung vor Messbeginn schließen. Analog zu den von Drücker (2016) beschriebenen praxisrelevanten Sensorsystemen könnte dazu ein Teilschlag als Referenz gemessen werden, der eine übliche Bestandesentwicklung aufweist.

Abschließend werden im Rahmen der Plausibilisierung die Reflexionswerte des b-Kanals für WW analysiert. Die schwachen Zusammenhänge für das erste Versuchsjahr lassen sich damit bestätigen. Analog zum a-Kanal, ist in BBCH 39 ein monoton fallender Mittelwertverlauf bei steigender N-Stufe mit Ausnahme der 150 %-Variante erkennbar. Im Falle des b-Kanals ist dieser Zusammenhang zusätzlich in BBCH 59 wiederzufinden. Eindeutig stärkere Zusammenhänge sind für das zweite Versuchsjahr zu verzeichnen. Auch hier können die Ergebnisse des a-Kanals bestätigt werden, da die Mittelwerte des b-Kanals innerhalb aller Entwicklungsstadien einen monoton fallenden Verlauf mit steigender N-Stufe aufweisen. Dem damit verbundenen Anstieg des Grün-Anteils durch Steigerung des Chlorophyll-Gehalts wird sowohl durch sinkende a- als auch b-Werte Rechnung getragen, da der für das gelbe Erscheinungsbild verantwortliche Carotinoid-Anteil sinkt (Prsa et al., 2007).

Die durchgeführte Plausibilisierung der Daten zeigt, dass generelle Zusammenhänge zwischen den erhobenen Reflexionswerten und dem Stickstoff-Steigerungsversuch vorliegen. Die Eignung des TrueColor-Sensorarrays wird in den folgenden Abschnitten durch eine detaillierte Datenanalyse bewertet, um konkrete Aussagen bezüglich der Anwendbarkeit zu generieren und Systemgrenzen aufzeigen zu können.

4.2.2 Einfluss der Messfläche auf die Aussagefähigkeit der Reflexionsmesswerte

Untersuchungen zum Einfluss der zu verwendenden Datenmenge auf die Aussagefähigkeit der Reflexionsmesswerte sind Parameter für die Systementwicklung und Beurteilung der Anwendungsfähigkeit. Das Zeitintervall zwischen zwei Messwertaufnahmen bestimmt die Prozessgeschwindigkeit und gibt dadurch Aufschluss über technisch mögliche Fahrgeschwindigkeiten. Abb. 4-16 zeigt die Reflexionsdaten der Sensorkanäle für die untersuchten Düngestufen und Erfassungsbereiche von WW in BBCH 32 aus dem zweiten Versuchsjahr.

Bei der zur Versuchsdurchführung verwendeten Vorfahrtsgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ resultieren aus einer Überfahrt durchschnittlich 3.493 Messwerte je Reflexionskanal und Parzelle.

Dies stellt die Summe der Messwerte dar, die mit sechs montierten Sensorarrays und demzufolge 30 Einzelsensoren aufgenommen wurden. Bei einer Messfläche von 60 m² ergibt sich daraus eine Auflösung von 0,017 m² pro Reflexionswert. Die Messbreite eines Einzelsensors beträgt 10 cm, sodass alle 17 cm ein Messwert pro Reflexionskanal aufgenommen wurde. Eine künstliche Verkleinerung der Messauflösung wurde durch einen reduzierten Stichprobenumfang generiert. In Abb. 4-16 sind das arithmetische Mittel sowie die Standardabweichung mit 0,1 %, 1 %, 10 % sowie 100 % der Datengrundlage für die untersuchten N-Stufen und Reflexionskanäle dargestellt.

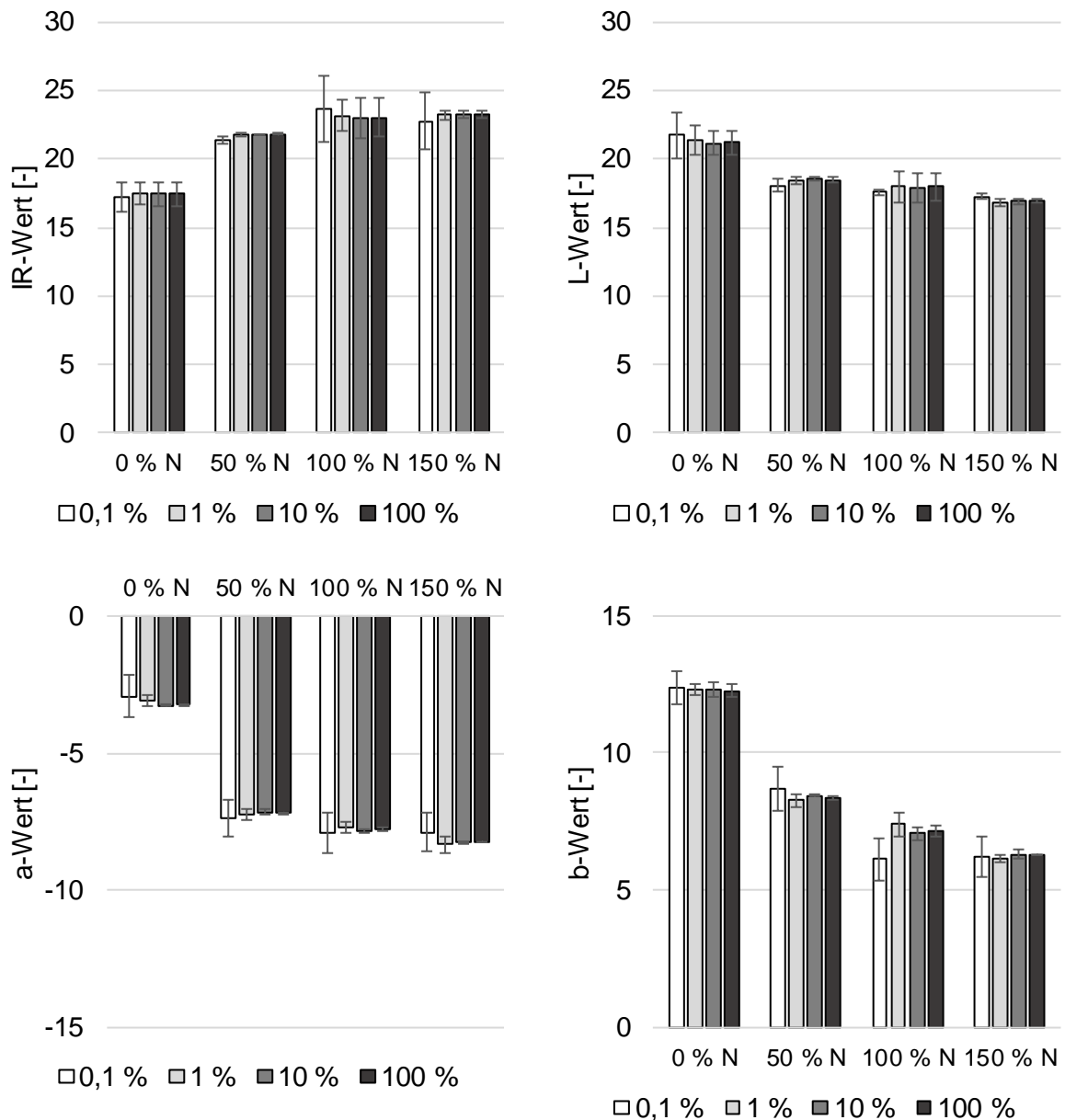


Abb. 4-16: Mittelwert und Standardabweichung der Reflexionsmesswerte (IR-, L-, a- und b-Kanal) in Abhängigkeit der verwendeten Datengrundlage am Beispiel von Winterweizen in BBCH 32 aus 2021

Aus der künstlichen Reduzierung der Datengrundlage von 0,1 % wird mit 17,14 m² pro Reflexionswert die niedrigste Messauflösung erzeugt. Gegenüber den anderen Stichprobenumfängen steigt die Standardabweichung deutlich an. Dies ist vor allem anhand des IR-Kanals bei den N-Stufen von 100 % und 150 % zu erkennen. Ein Zusammenhang von Standardabweichung und N-Stufe ist dabei nicht auszumachen, da sich die Verhältnisse am Beispiel des L-Kanals umkehren und die niedrigeren N-Stufen größere Standardabweichungen bei einer Datengrundlage von 0,1 % aufweisen. Sowohl bei den Standardabweichungen des a- als auch b-Kanals fehlen diese Zusammenhänge vollständig. Dort weisen die Fehlerbalken innerhalb der 0,1 %-Datengrundlage über alle N-Stufen eine ähnliche Dimension auf und fallen gegenüber den anderen Stichprobenumfängen deutlich größer aus.

Die Beurteilung der minimalen Messwertauflösung erfolgt anhand der homogenen Untergruppen des Post-hoc-Tests nach Scheffé innerhalb der jeweils genutzten Datengrundlage (siehe Anhang, Tab. 7-10 bis Tab. 7-13). Die in Tab. 4-15 dargestellte Übersicht der homogenen Untergruppen verdeutlicht die Anzahl signifikant unterschiedlicher N-Stufen auf Grundlage der variierten Anzahl von Messwerten.

Tab. 4-15. Homogene Untergruppen des Post-hoc-Tests nach Scheffé mit einem Signifikanzniveau von $\alpha < 0,05$ für Datengrundlagen von 0,1 % bis 100 % in Abhängigkeit der N-Stufe sowie des Reflexionskanals

N-Stufe	IR				L				a				b			
	0,1 %	1 %	10 %	100 %	0,1 %	1 %	10 %	100 %	0,1 %	1 %	10 %	100 %	0,1 %	1 %	10 %	100 %
0%	a	a	a	a	b	c	d	d	b	c	d	d	b	d	d	d
50%	ab	b	b	b	a	b	c	c	a	b	c	c	a	c	c	c
100%	b	c	c	c	a	b	b	b	a	ab	b	b	a	b	b	b
150%	b	c	c	d	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a

Die künstliche Reduzierung der Messauflösung durch die Nutzung von lediglich 0,1 % der Datengrundlage führt bei allen Reflexionskanälen zu zwei homogenen Untergruppen. Einzig die Reflexionswerte der 0 %-Variante unterscheiden sich signifikant von den restlichen Reflexionswerten. Die resultierende Messauflösung von 17,14 m² ist zur Unterscheidung der N-Versorgung nicht ausreichend.

Durch die Auswahl von 1 % der Datengrundlage resultieren für den IR-, L- und a-Kanal drei homogene Untergruppen. Trotz eines nicht plausiblen Werteverlaufs (vgl. Kap. 4.2.1) sind die Reflexionswerte der 0 % N- und 50 % N-Variante gegenüber den restlichen Reflexionsdaten

signifikant unterschiedlich. Eine Unterscheidung zwischen der 100 % N- und 150 % N-Variante ist auf Basis der statistischen Auswertung nicht möglich. Die Reflexionswerte des L-Kanals weisen zwischen der 50 % N- und 100 % N-Variante keine signifikanten Unterschiede auf. Gleiches gilt bei 1 % der Datengrundlage für die Messwerte des a-Kanals. Zusätzlich unterscheiden sich bei diesem Reflexionskanal die 100 % N- und 150 % N-Variant ebenfalls nicht signifikant. Innerhalb des b-Kanals ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Reflexionswerten aller N-Varianten festzustellen. Dies erlaubt den Einsatz des b-Kanals zur eindeutigen Unterscheidung der N-Versorgung ab einer Messauflösung von 1,71 m².

Die Reflexionswerte des L-, a- und b-Kanals unterscheiden sich ab einer Datengrundlage von 10 % zwischen allen N-Varianten signifikant. Eine Ausnahme bildet wiederum der IR-Kanal, bei dem sich die 100 % N- und 150 % N-Variante nicht signifikant unterscheiden. Neben der in Kap. 4.2.1 durchgeführten Plausibilitätsprüfung, wird eine Ursachenanalyse der geringen Eignung des IR-Kanals auch in Kap. 4.2.3 anhand der Korrelationen zur Pflanzenbedeckung durchgeführt.

Auf Grundlage der statistischen Auswertung liefert eine Messauflösung von 0,17 m² je Reflexionsmesswert ausreichend genaue Daten zur messtechnischen Erfassung der N-Versorgung. Die Verwendung von mehr als 10 % der erhobenen Messwerte steigert die Eignung der CIELab-Farbwerte zur Beurteilung der N-Versorgung nicht. Die Reduzierung der notwendigen Messauflösung um den Faktor 10 ergeben als Randbedingung zur weiteren Systementwicklung zwei Vorteile. Einerseits führt eine Erhöhung der Zeit zwischen zwei Messungen (Log-Intervall) bei konstanter Vorfahrtsgeschwindigkeit zu einer entsprechenden Verringerung der Rechnerleistung. Andererseits schränkt eine Erhöhung der Vorfahrtsgeschwindigkeit bei konstantem Log-Intervall bis zu dieser resultierenden Erfassungsfläche die Aussagekraft der Daten nicht ein. Auf Basis der vorliegenden Untersuchungen wird eine Vorfahrtsgeschwindigkeit von 1 m s⁻¹ empfohlen, ohne Einbußen bezüglich der Messqualität in Kauf zu nehmen. Diese Ergebnisse stellen das Ansprechverhalten des Sensorarrays bei gleichzeitiger Messwertaufnahme dar. Im Rahmen weiterer Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Prozessgeschwindigkeit maßgeblich durch die Rechenleistung der Datenaufzeichnung begrenzt wird. Falls die Datenaufzeichnung im Hinblick auf ein praxisrelevantes System beibehalten werden soll, sind weitere Entwicklungsschritte zur schnelleren Datenübertragung notwendig. Wird die Übertragung der Reflexionswerte zu einem Aktor (beispielsweise einer Düse) ohne Datenaufzeichnung angestrebt, so sind weitere Untersuchungen hinsichtlich der resultierenden Messauflösung zur Bestimmung der möglichen Vorfahrtsgeschwindigkeit notwendig.

4.2.3 Einfluss der Pflanzenbedeckung auf die Reflexionseigenschaften

Nachdem die Randbedingungen bezüglich der notwendigen Messfläche zur Abschätzung aussagefähiger Reflexionswerte evaluiert wurden, gilt es in den folgenden Schritten einen Zusammenhang zwischen den agronomischen Referenzgrößen sowie den Reflexionskanälen des TrueColor-Sensorarrays herzustellen. Nach Padilla et al. (2019) lassen sich anhand des Pflanzenbedeckungsgrades Aussagen über den Pflanzenzustand treffen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, quantifizierbare Größen zu untersuchen, mit deren Hilfe Aussagen zur Pflanzenver-

sorgung während des Vegetationsverlaufs gemacht werden können. Daraus kann eine teil-schlagspezifische Versorgung im Online-Verfahren durchgeführt werden. Zur Einordnung der Größenordnung des Pflanzenbedeckungsgrades sind in Abb. 4-17 das arithmetische Mittel sowie die Standardabweichung der Pflanzenbedeckung der untersuchten Entwicklungsstadien für Wintergerste in den beiden Versuchsjahren dargestellt.

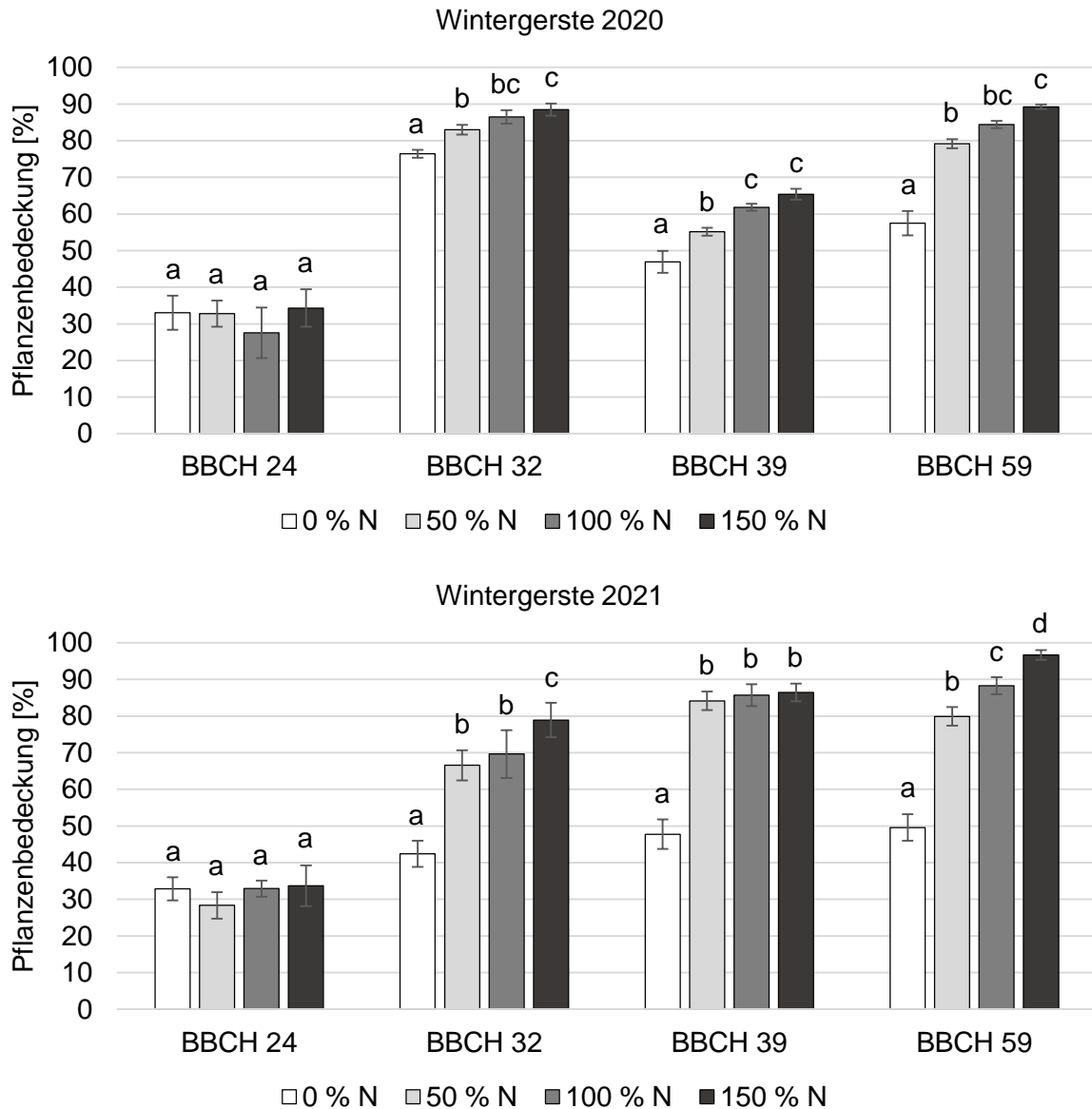


Abb. 4-17: Pflanzenbedeckung von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 24 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N in den Versuchsjahren 2020 (oben) und 2021 (unten)

Bevor das Längenwachstum einsetzt, liegt der Pflanzenbedeckungsgrad in 2020 zu BBCH 24 im Mittel zwischen 28 % und 34 %. Diese Reflexionsmessung wurde im Zeitraum der ersten Düngerapplikation durchgeführt und dient zwecks einheitlicher Anfangsbedingungen als Re-

ferenzgröße. Die applizierte Düngermenge zur ersten Gabe zeigt zu BBCH 24 keinen stringenten Zusammenhang bezüglich des Bedeckungsgrades der N-Stufen. Gegenüber dem ersten Versuchsjahr weist die Pflanzenbedeckung zu Vegetationsbeginn des Jahres 2021 einen vergleichbaren Wertebereich auf.

Anders verhält sich dies in BBCH 32, deren Pflanzenbedeckungsgrade zwischen 2020 und 2021 deutlichere Diskrepanzen aufweisen. Ein Aspekt der geringeren Pflanzenbedeckung kann die gegenüber dem ersten Versuchsjahr um 2 °C niedrigere Durchschnittstemperatur im Februar 2021 sein. Dadurch setzte die Blattflächenzunahme von BBCH 24 zu 32 gegenüber dem Vorjahr verzögert ein. Trotz der im weiteren Vegetationsverlauf vorherrschenden trockenen Witterung im ersten Versuchsjahr, fielen die Niederschläge im Februar 2020 gegenüber Februar 2021 deutlich höher aus (vgl. Anhang, Abb. 7-2 und Abb. 7-3). Die daraus resultierende Bodenfeuchte konnten die Bestände zu Beginn des Längenwachstums nutzen, wodurch sich die leicht erhöhten Pflanzenbedeckungsgrade im Jahr 2020 gegenüber 2021 zu BBCH 32 erklären lassen. Im weiteren Verlauf des ersten Versuchsjahres dominiert der Einfluss unterdurchschnittlicher Niederschläge und spiegelt sich in der Abnahme des Pflanzenbedeckungsgrades unabhängig der N-Versorgung in BBCH 39 wieder. Zum Ende des Ährenschiebens in BBCH 59 nimmt die Pflanzenbedeckung gegenüber BBCH 39 durch Hervortreten der generativen Pflanzenorgane zu. Der Bedeckungsgrad liegt zu diesem Zeitpunkt trotz vorheriger Reduktion von Seitentrieben auf vergleichbarem Niveau zur Bedeckung in BBCH 32. Eine Ausnahme bildet dabei die Kontrollvariante, bei der zu BBCH 59 die Pflanzenbedeckung unterhalb des Niveaus von BBCH 32 liegt.

Im Gegensatz zu 2020 nehmen die Pflanzenbedeckungsgrade im zweiten Versuchsjahr von BBCH 24 bis 59 mit Ausnahme der 50 %-Variante monoton zu. Bei dieser ist zwischen BBCH 24 und 32 eine Zunahme von 38 % zu verzeichnen und liegt damit auf vergleichbarem Niveau zur 100 %-Variante. Im Gegensatz dazu stellt sich bei der 50 %-Variante vom Übergang der vegetativen in die generative Wachstumsphase ein leichter Rückgang des Pflanzenbedeckungsgrades dar. Dies kann als Anzeichen einer mangelhaften N-Versorgung gedeutet werden und wird anhand der weiteren agronomischen Parameter in den folgenden Abschnitten untersucht. Erwartungsgemäß weist die Kontrollvariante die geringste Blattflächenzunahme auf. Sie erreicht zu BBCH 59 eine durchschnittliche Pflanzenbedeckung von 50 % und liegt damit gegenüber den anderen Varianten deutlich zurück. Mit einem Bedeckungsanteil von durchschnittlich 97 % weist die 150 %-Variante in BBCH 59 den höchsten Wert innerhalb des hier vorgestellten agronomischen Parameters auf.

Durch die Gegenüberstellung der Pflanzenbedeckungsgrade aus den beiden Versuchsjahren ist ersichtlich, dass dieser agronomische Parameter durch unterschiedliche abiotische Faktoren beeinflusst wird. Während die Pflanzenbedeckungsgrade nach Vegetationsbeginn in beiden Versuchsjahren auf vergleichbarem Niveau beginnen, steigt der Bedeckungsgrad im zweiten Versuchsjahr nach anfänglich schwächerer Entwicklung progressiver an und übersteigt die maximalen Werte aus 2020 im weiteren Vegetationsverlauf. Daran ist zu erkennen, dass die Möglichkeit einer angepassten Kalibrierung des Sensorarrays in Abhängigkeit der vegetationsabhängigen Pflanzenentwicklung geschaffen werden muss. Dies kann beispielsweise durch Aufnahme der Bestandesreflexion vor der ersten Düngergabe erfolgen. Zusätzlich geht

aus Abb. 4-17 hervor, dass die Bestandesentwicklung im weiteren Vegetationsverlauf Schwankungen unterzogen sein kann. Aus diesem Grund ist die Kalibrierung anhand eines repräsentativen Teilschlags jeweils vor Messbeginn zu empfehlen.

Nachdem die Bedeckungsverläufe der Wintergerste analysiert wurden, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse des Winterweizens diskutiert. Durch die in Kap. 4.2.1 durchgeführte Plausibilitätsprüfung wird deutlich, dass die Reflexionswerte des Winterweizens aus dem Jahr 2020 keinen stringenten Zusammenhängen folgen. Nach Makary et al. (2012) zeigt eine aufgeteilte Düngerapplikation bei Vorsommertrockenheit keinen signifikanten Einfluss auf den angestrebten Rohproteingehalt. Aufgrund der überlagerten Trockenstress-Erscheinungen sind die Versuchsergebnisse des Winterweizens aus dem Jahr 2020 daher nicht zielführend und werden nicht weiter diskutiert.

Die Notwendigkeit einer kulturspezifischen Kalibrierung zusätzlich zur vegetationspezifischen Datenverarbeitung wird in Abb. 4-18 deutlich.

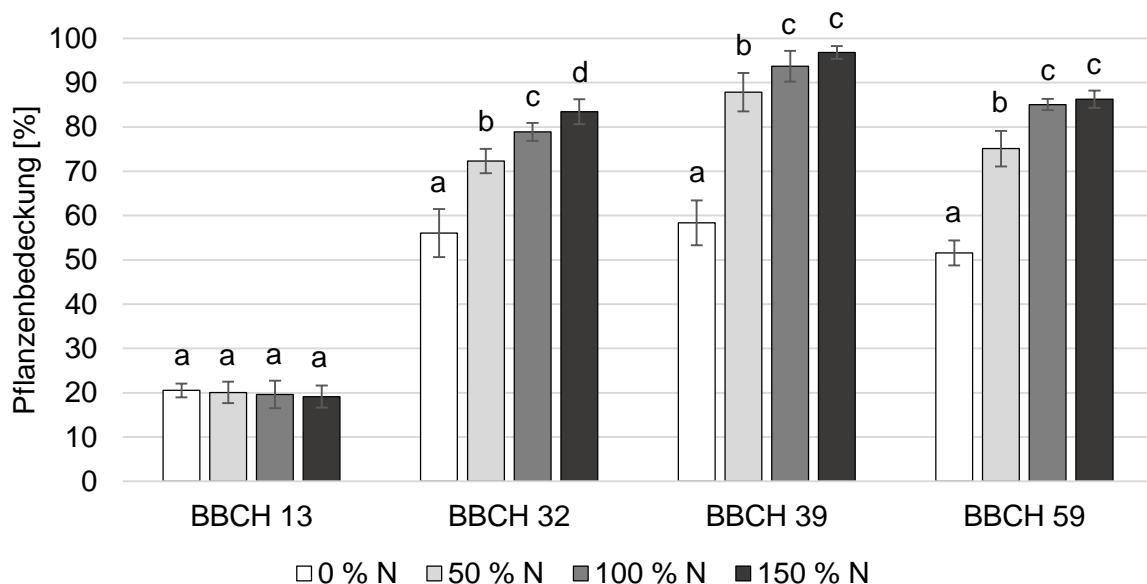


Abb. 4-18: Pflanzenbedeckung von Winterweizen in den Entwicklungsstadien BBCH 13 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2021

Aus pflanzenbaulichen Gesichtspunkten sind bei der teilschlagspezifischen N-Versorgung von Winterweizen teilweise andere Randbedingungen zu beachten. Die Verwendung als Backweizen stellt im Gegensatz zur Erzeugung von Futtergerste andere Anforderungen an Inhaltsstoffe, die durch die N-Düngung beeinflusst werden. Der Fokus soll an dieser Stelle nicht auf den pflanzenbaulichen Ansprüchen liegen, sondern die Notwendigkeit einer angepassten Kulturführung verdeutlichen, die auf Basis der sensorisch erfassten Reflexionseigenschaften bei der technischen Analyse berücksichtigt werden müssen. Da der erste Düngetermin nach Vegetationsbeginn durch die spätere Aussaat des Winterweizens bereits zu BBCH 13 erfolgte, wurden die ersten Bestandesparameter ebenfalls in diesem Stadium erhoben. Im Gegensatz

zu den bestockten Beständen der WG, liegt der Pflanzenbedeckungsgrad über alle Versuchsvarianten bei durchschnittlich 20 % (siehe Abb. 4-18).

Entsprechend der variierten N-Zufuhr steigt der Pflanzenbedeckungsgrad zum zweiten Messtermin auf ein deutlich höheres Niveau. Zu BBCH 32 weist die Kontrollvariante mit 56 % die geringste Pflanzenbedeckung auf. Mit 72 % (50 % N), 79 % (100 % N) und 83 % (150 % N) liegen die Bedeckungsgrade der weiteren N-Varianten insgesamt auf einem höheren Niveau und deutlich oberhalb der 0 %-Variante. Bei dieser steigt die Pflanzenbedeckung von BBCH 32 zu 39 mit durchschnittlich 2 % geringfügig an. Eine Abhängigkeit der Bedeckungszunahme von der applizierten N-Menge ist bei den weiteren Varianten von BBCH 32 zu 39 nicht festzustellen. Die Bedeckungsgrade der 50 % N- bis 150 % N-Variante steigen von BBCH 32 zu 39 einheitlich um ca. 15 % an, wobei die Standardabweichung der 150 %-Variante am niedrigsten ist und somit auf die homogenste Bestandesentwicklung schließen lässt.

Ein deutlicherer Einfluss des Phänotyps von WW ist bei der Entwicklung der Bedeckungsgrade zu BBCH 59 zu verzeichnen. Im Gegensatz zu den Verläufen bei WG, ist über alle Versuchsvarianten mit der Entwicklung generativer Pflanzenorgane eine Abnahme der Pflanzenbedeckung von BBCH 39 zu 59 festzustellen. Während die Bedeckungsrate der 0 %-Variante innerhalb des insgesamt niedrigen Niveaus den geringsten Rückgang aufweist, ist die Reduktion der Pflanzenbedeckung bei der 50 %-Variante mit 13 % am größten. Durch einen Rückgang von 11 % bei 150 % N, sowie 9 % bei 100 % N gleichen sich die Pflanzenbedeckungsgrade dieser beiden Varianten zu BBCH 59 ungefähr an. Wie in Kap. 2.3.1 beschrieben, kann in diesem Zeitraum eine aufgeteilte N-Gabe zur bedarfsgerechten N-Versorgung während der Kornfüllungsphase nach Alcoz et al. (1993) notwendig sein. Auf Grundlage dieser Ergebnisse ist die Pflanzenbedeckung als Referenzgröße zur sensorgestützten Düngerapplikation zwischen BBCH 39 und 59 als kritisch zu bewerten, da aufgrund von Angleichungseffekten eine eindeutige Aussage zur Pflanzenversorgung nicht gewährleistet werden kann.

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den Reflexionswerten und der Pflanzenbedeckung in Abhängigkeit der Kulturart und des Versuchszeitraums diskutiert. Dazu werden die Regressionsmodelle für WG aus den Jahren 2020 und 2021 mit den Modellen für WW 2021 verglichen. Analog zu den Untersuchungen bzgl. der Pflanzendifferenzierung durch Analyse von Einzelkanälen (Kap. 4.1.4.1), dienen die linearen Regressionsmodelle zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Reflexionskanal (abhängige Variable) und agronomischem Parameter (unabhängige Variable). Das Bestimmtheitsmaß kennzeichnet die Genauigkeit, mit der die abhängige Variable durch die unabhängige Variable abgebildet wird.

– Zusammenhang zwischen Pflanzenbedeckung und IR-Kanal ($\lambda = 850 \text{ nm}$)

In Abb. 4-19 sind die linearen Regressionsmodelle zwischen der Pflanzenbedeckung und dem IR-Kanal dargestellt. Unabhängig von Kulturpflanze und Versuchsjahr, weisen die Modelle keine eindeutig interpretierbaren Zusammenhänge auf. Die in Kap. 4.2.1 erläuterten Ergebnisse von Ferrio et al. (2005) zur steigenden NIR-Reflexion bei zunehmendem Pflanzenanteil, lassen sich anhand des verwendeten TrueColor-Sensorarrays nicht bestätigen. Auch die Untersuchungen von Carlson und Ripley (1997) bestätigen bei gesunder Vegetation eine höhere

NIR-Reflexion mit zunehmendem Chlorophyll-Anteil. Die aus Abb. 4-19 hervorgehenden gegenläufigen Zusammenhänge deuten auf einen Ausfall des IR-Kanals im Rahmen der Untersuchungen zur N-Düngung hin.

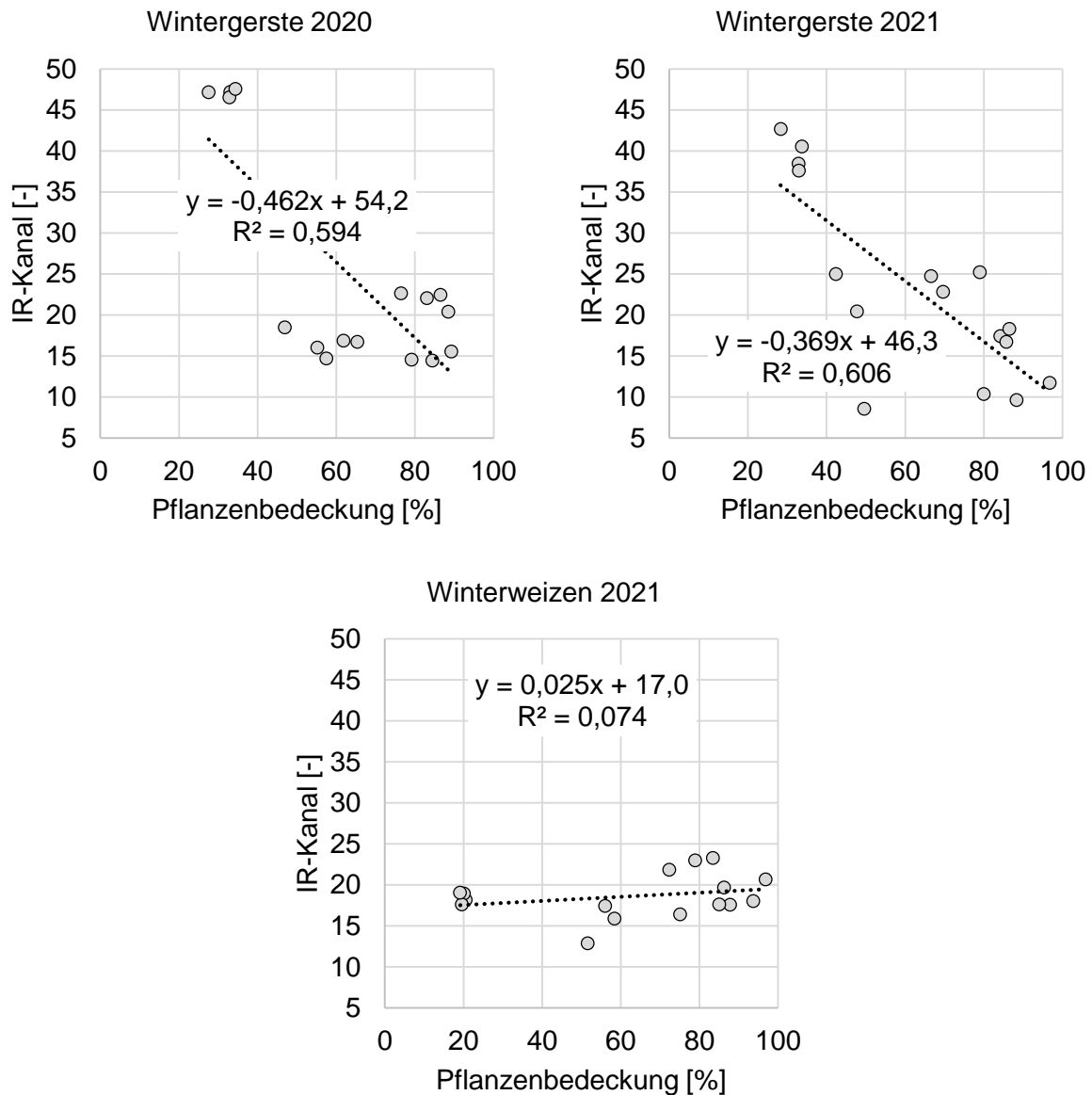


Abb. 4-19: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Pflanzenbedeckung und IR-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

Die Bestimmtheitsmaße für diese Modelle sind lediglich der Vollständigkeit halber aufgeführt und stellen in diesem Kontext keine belastbaren Größen dar. Insbesondere am Beispiel der Ergebnisse von WG 2020 und 2021 ist zu erkennen, dass Aussagen zur Güte von Reflexionskanälen während der technischen Entwicklung des Messsystems im Kontext agronomischer Parameter zu erfolgen haben. Zwar sind in beiden Versuchsjahren schwache Zusammenhänge zwischen der Pflanzenbedeckung und dem IR-Kanal zu erkennen, diese lassen sich

unter pflanzenbaulichen Gesichtspunkten aber nicht interpretieren. Aus diesem Grund ist eine Plausibilitätsprüfung vor Verrechnung der Messwerte erforderlich. Ebenfalls eindeutige Hinweise für einen technischen Defekt bei den Messwertaufnahmen stellen die stark divergierenden Reflexionswerte im Wertebereich der Pflanzenbedeckung von 20 % bis 40 % dar. Die im Rahmen des geförderten Forschungsprojektes ebenfalls erhobenen Hyperspektralaufnahmen weisen eine ähnliche Größenordnung zu den Messwerten von IR = 47 (WG 2020) auf. In künftigen Forschungsaufgaben gilt es den IR-Kanal des TrueColor-Sensorarrays auf Basis der hier geleisteten Vorarbeiten zu überarbeiten.

– Zusammenhang zwischen Pflanzenbedeckung und L-Kanal

Im Gegensatz zum IR-Kanal, weisen die Reflexionswerte des L-Kanals bezüglich des Pflanzenbedeckungsgrades plausibel erklärbare Verläufe auf. Mit zunehmender Pflanzenbedeckung nimmt die Helligkeit monoton ab. Aus den Untersuchungen zur Pflanzendifferenzierung ist eine charakteristische Helligkeit des Bodens von durchschnittlich $L = 40$ bekannt. Die im Rahmen der N-Düngung untersuchten Mischflächen weisen einen Bedeckungsgrad von mindestens 20 % auf, deren Reflexionswerte im L-Kanal vollständig unterhalb des unbewachsenen Bodens liegen (siehe Abb. 4-20).

Die Steigungen der Ausgleichsgeraden liegen mit $-0,205$ bis $-0,340$ in ähnlicher Größenordnung und sind damit unabhängig von Kulturart und Versuchsjahr vergleichbar. Trotzdem ist anhand der Bestimmtheitsmaße zu erkennen, dass die Zusammenhänge in Abhängigkeit von Kulturart und Vegetationsverlauf unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Die Pflanzenbedeckung wird bei WG 2020 anhand des L-Kanals im Wertebereich von 47 % bis 65 % einheitlich zu hoch abgeschätzt. Ab einem Pflanzenbedeckungsgrad von 80 % nimmt die Spannweite der Reflexionswerte zu. Diese schwanken für einen Bedeckungsgrad von 83 % zwischen 17,19 (BBCH 59) und 24,95 (BBCH 32). Ähnliche Differenzen sind bei WG 2021 und einem Bedeckungsgrad von 80 % zu beobachten. Die Reflexionswerte divergieren in vergleichbarer Größenordnung zwischen 12,84 (BBCH 59) und 24,63 (BBCH 32). Auch hier bestätigen sich die zu Anfang dieses Kapitels diskutierten Einflüsse des Pflanzenalters. Für WG ist in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums eine Kalibrierung des Sensorarrays notwendig, um Aussagen zur Abschätzung des Pflanzenbedeckungsgrades treffen zu können.

Anders stellen sich die Ergebnisse für WW 2021 dar. Mit $R^2 = 0,977$ wird der Pflanzenbedeckungsgrad mit geringer Abweichung durch die Reflexionswerte des L-Kanals beschrieben. Lediglich die Pflanzenbedeckung von 52 % wird durch den L-Reflexionswert zu hoch abgeschätzt. Dieses Wertepaar gehört zur 0 % N-Variante in BBCH 59 und stellt den einzigen Ausreißer des Regressionsmodells für WW 2021 dar. Auch der zu Beginn dieses Kapitels beschriebene Rückgang des Pflanzenbedeckungsgrades von BBCH 39 zu 59 hat keinen negativen Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Pflanzenbedeckung und Reflexionswert. Anders als bei den Modellen der WG hervorgeht, kann ein Einfluss des Pflanzenalters auf den Werteverlauf des L-Kanals für WW nicht bestätigt werden. Aussagen bezüglich dieser Stringenz innerhalb der Reflexionswerte können im Rahmen nachfolgender Untersuchungen durch mehrjährige Versuchsergebnisse validiert werden.

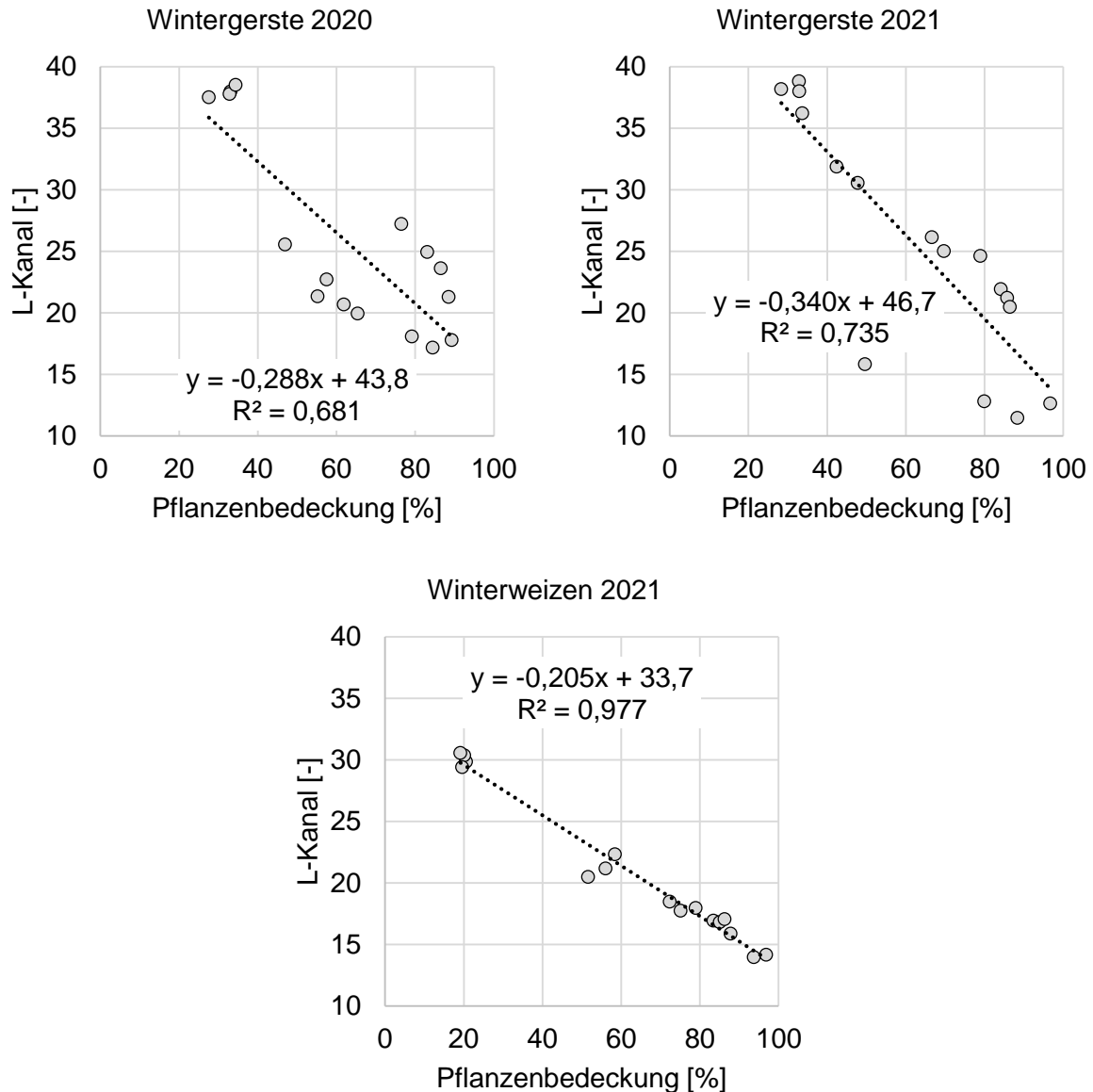


Abb. 4-20: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Pflanzenbedeckung und L-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

– Zusammenhang zwischen Pflanzenbedeckung und a-Kanal

Im Gegensatz zu den Ergebnissen des L-Kanals, erfolgt die Analyse des a-Kanals aufgrund heterogener Reflexionswerte zusätzlich in Abhängigkeit des Pflanzenalters. Dazu sind in Abb. 4-21 sowohl die Bestimmtheitsmaße für Zusammenhänge innerhalb der BBCH-Stadien, als auch über alle untersuchten Entwicklungsstadien hinweg dargestellt. Die Funktionen der entwicklungspezifischen Ausgleichsgeraden sind aus Gründen der Übersichtlichkeit Tab. 7-14 im Anhang zu entnehmen.

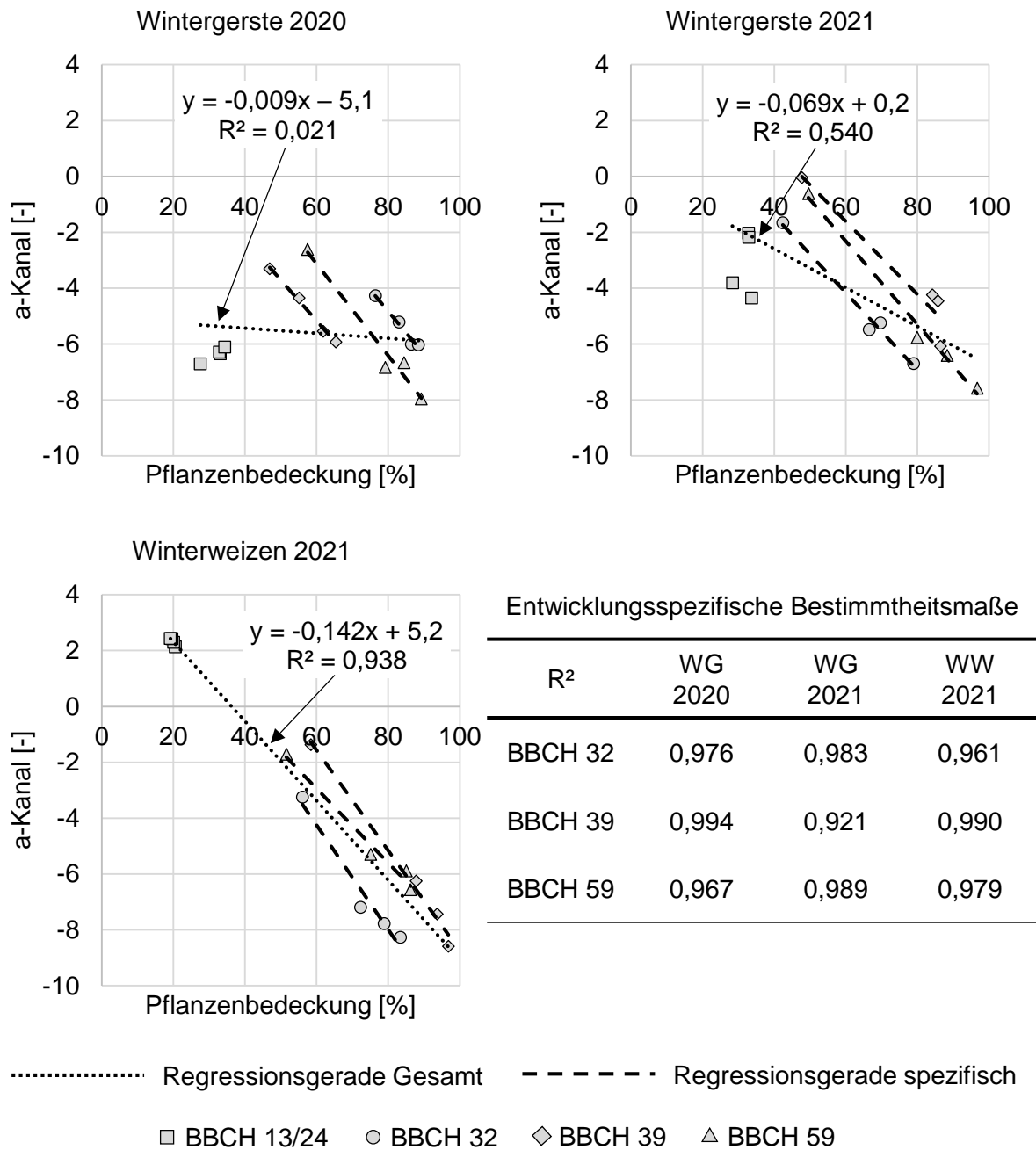


Abb. 4-21: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Pflanzenbedeckung und a-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

Bei WG 2020 sind die Unterschiede zwischen den entwicklungsspezifischen Bestimmtheitsmaßen sowie dem übergreifenden Zusammenhang am deutlichsten zu erkennen. Während aus dem Regressionsmodell über den gesamten Beobachtungszeitraum keine Zusammenhänge zwischen dem a-Kanal und der Pflanzenbedeckung resultieren ($R^2 = 0,021$), sind die Bestimmtheitsmaße innerhalb der Entwicklungsstadien BBCH 32 ($R^2 = 0,976$), 39 ($R^2 = 0,994$) und 59 ($R^2 = 0,967$) hoch.

Eine Erklärung ist der witterungsbedingte Einfluss auf den Phänotyp der Pflanzen, durch die bereits erwähnte Trockenperiode im April und Mai 2020. Daraus resultierende Blattaufhellungen überlagern die Farbunterschiede aufgrund unterschiedlicher N-Versorgung uniform. In Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums bedingt dies eine Verschiebung der y-Achsenabschnitte bei annähernd gleicher Steigung. Derartige Analogien sind unabhängig von der Kulturpflanze im zweiten Versuchsjahr nicht zu beobachten. Die Zusammenhänge innerhalb der Entwicklungsstadien liegen bei WG 2021 und WW 2021 auf ähnlichem Niveau, während das Regressionsmodell für WW auch über den gesamten Messzeitraum vergleichbar hohe Zusammenhänge zeigt.

Die Reflexionswerte des a-Kanals liegen bei WG im Bereich zwischen 20 % und 40 % Pflanzenbedeckung deutlich unterhalb der Reflexionswerte von WW mit diesem Bedeckungsgrad. Die Datenpunkte stellen die Reflexionsmessungen zu BBCH 24 dar und spiegeln einen höheren Grün-Anteil bei gleichem Pflanzenbedeckungsgrad in diesem frühen Entwicklungsstadium wider. Auswertelgorithmen auf Basis von Referenzmessungen zu Vegetationsbeginn sind mit Hilfe des a-Kanals für WG nicht möglich. Bei WW kann dies aufgrund kohärenter Reflexionswerte eine Möglichkeit der Referenzbildung sein.

– Zusammenhang zwischen Pflanzenbedeckung und b-Kanal

Der b-Kanal zeigt unabhängig von Versuchsjahr, Kulturart und Entwicklungsstadium monoton fallende Verläufe mit zunehmendem Pflanzenbedeckungsgrad (siehe Abb. 4-22).

Die Regression zwischen der Pflanzenbedeckung und den Reflexionswerten des b-Kanals von WG folgen vegetationsübergreifend einem ähnlichen funktionalen Zusammenhang. Analog zu den anderen Reflexionskanälen, weisen die Ergebnisse des zweiten Versuchsjahres ein höheres Bestimmtheitsmaß auf. Das Regressionsmodell für WW wird durch eine flachere Steigung und niedrigeren y-Achsenabschnitt beschrieben. Gegenüber den Ergebnissen der WG werden die Reflexionswerte der niedrigsten Pflanzenbedeckungsgrade mit geringerer Spannweite erfasst. Im Gegensatz zur WG 2021 weisen die Reflexionswerte von WW 2021 ab einem Bedeckungsgrad von 80 % stärkere Differenzen auf.

Gegenüber den anderen Reflexionskanälen weisen die Regressionsmodelle von Pflanzenbedeckung und b-Kanal zwischen den Versuchsjahren und der Kulturpflanze die geringsten Differenzen auf. Das Bestimmtheitsmaß liegt auch in dem witterungsbedingt beeinflussten ersten Versuchsjahr auf einem akzeptablen Niveau. Die Regressionsmodelle für WG weisen die höchste Eignung zur Übertragung auf das Folgejahr auf, da die funktionalen Zusammenhänge die größte Ähnlichkeit zeigen. Unterschiedliches Reflexionsverhalten innerhalb der Entwicklungsstadien sind nicht zu beobachten, wodurch dieser Reflexionskanal als robust gegenüber äußeren Einflüssen bezeichnet werden kann.

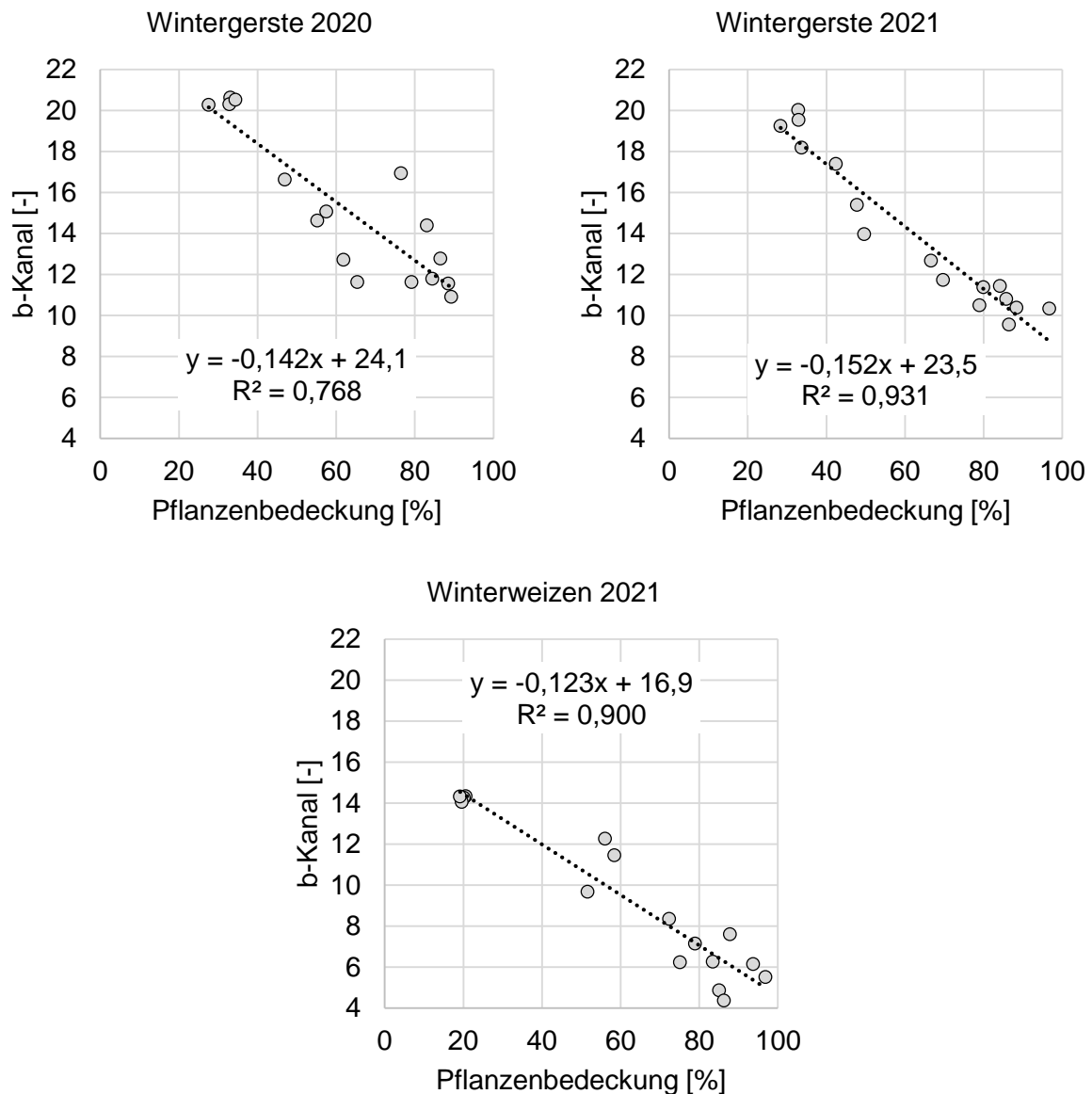


Abb. 4-22: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Pflanzenbedeckung und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

4.2.4 Einfluss der Frischmasse auf die Reflexionseigenschaften

Um Aussagen zur Abschätzung der N-Versorgung mittels TrueColor-Sensorarray anhand der Referenzgröße Frischmasse-Ertrag treffen zu können, wird zunächst eine Plausibilisierung der erhobenen Ertragsdaten durchgeführt. Die Verläufe der Frischmasse-Erträge von Wintergerste für 2020 und 2021 inklusive der homogenen Untergruppen sind Abb. 4-23 zu entnehmen.

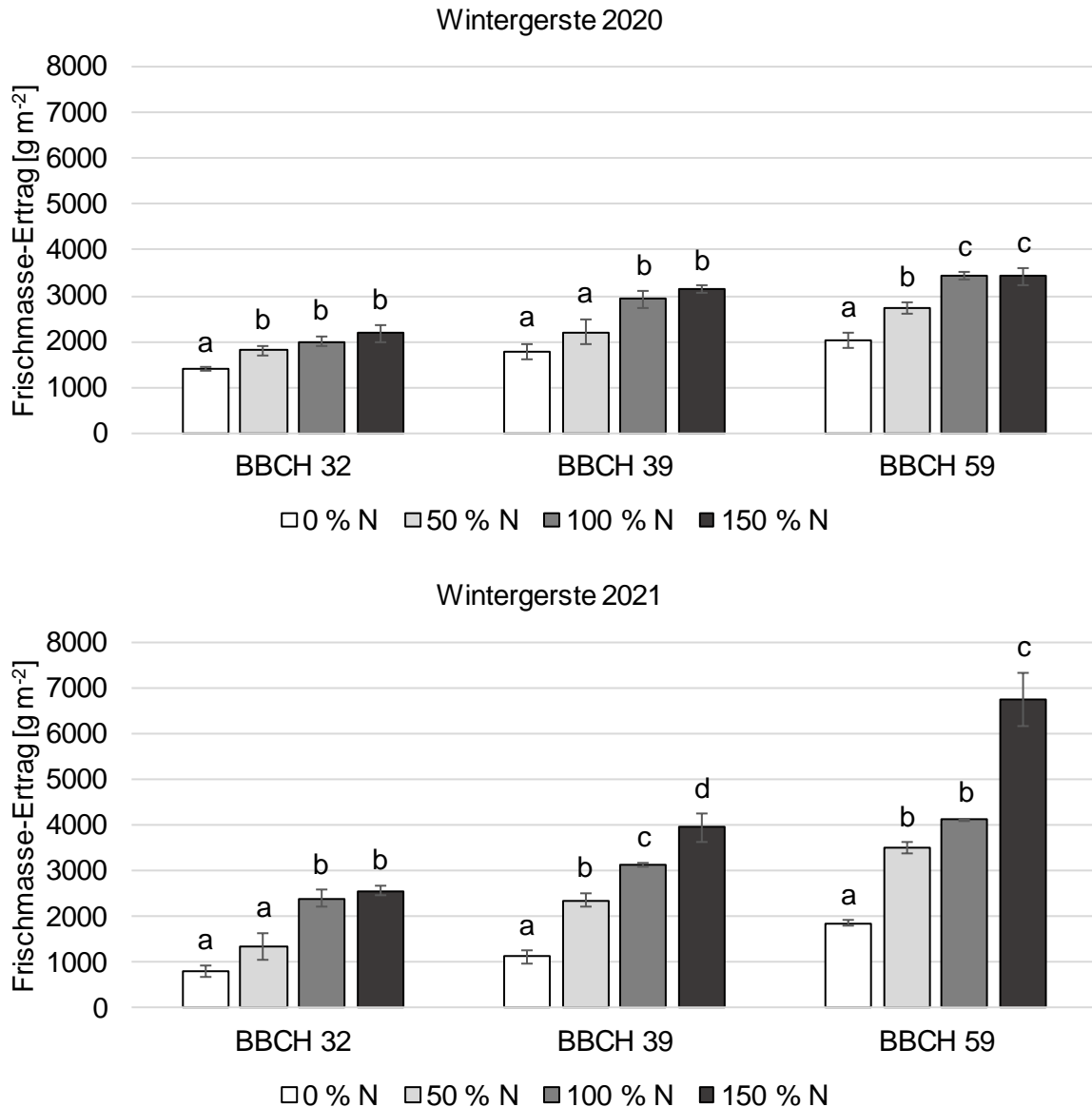


Abb. 4-23: Frischmasse-Ertrag von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N in den Versuchsjahren 2020 (oben) und 2021 (unten)

Zur einfacheren Vergleichbarkeit zwischen den Wertebereichen der beiden Versuchsjahre wurde die Dimension der y-Achsen vereinheitlicht dargestellt. Die Erträge der 0 % N-Variante des zweiten Versuchsjahres fallen gegenüber dem ersten Versuchsjahr über alle untersuchten Entwicklungsstadien geringer aus. Mit 784 g m⁻² gegenüber 1.386 g m⁻² liegt der Ertrag aus 2021 zu BBCH 32 um 43 % niedriger als 2020. Die Frischmasse-Erträge der 100 % N- bzw. 150 % N-Variante liegen in diesem Entwicklungsstadium gegenüber dem Vorjahr um ca. 20 % höher. Vergleichbare Ertragszuwächse sind bei der 150 % N-Variante in BBCH 39, sowie der 100 % N-Variante in BBCH 59 zu verzeichnen. Mit 6.727 g m⁻² fällt der Frischmasse-Ertrag bei 150 % N in BBCH 59 gegenüber dem Vorjahr fast doppelt so hoch aus.

Insgesamt liegt die Spannweite der Frischmasse-Erträge im Jahr 2021 deutlich über der des Vorjahres. Mit Ausnahme der 50 % N-Variante in BBCH 32 sowie den Ertragswerten der 0 % N-Variante, fallen die Frischmasse-Erträge der verschiedenen Düngevarianten in 2021 durchweg höher aus. Dies ist mit einer höheren N-Aufnahme der Bestände aufgrund höherer Niederschläge zu erklären. Unabhängig vom Versuchsjahr steigen die Erträge mit zunehmender N-Versorgung proportional an und weisen keine widersprüchlichen Verläufe bezüglich der N-Gabe auf.

Gleiches gilt für die Frischmasse-Erträge von WW im Versuchsjahr 2021. Zu BBCH 32 liegt die Spannweite zwischen den Ertragswerten der Varianten im Vergleich zu den beiden anderen Entwicklungsstadien auf einem niedrigeren Niveau. Die Standardabweichungen innerhalb der N-Varianten fallen ebenfalls geringer aus. Ab BBCH 39 sind die Frischmasse-Erträge der 50 % N- und 100 % N-Variante nicht mehr signifikant unterschiedlich. Der Frischmasse-Ertrag der 150 % N-Variante unterscheidet sich ab diesem Entwicklungsstadium signifikant. Zu BBCH 59 gleichen sich die Mittelwerte von 50 % N und 100 % N vollständig an (siehe Abb. 4-24). Ein Einfluss der N-Zufuhr auf die Frischmasse-Ertragszunahme innerhalb der jeweiligen Variante ist nicht festzustellen und steigt unabhängig der zugeführten Düngermenge von BBCH 32 zu 59 im Schnitt um einen Faktor von 2,7.

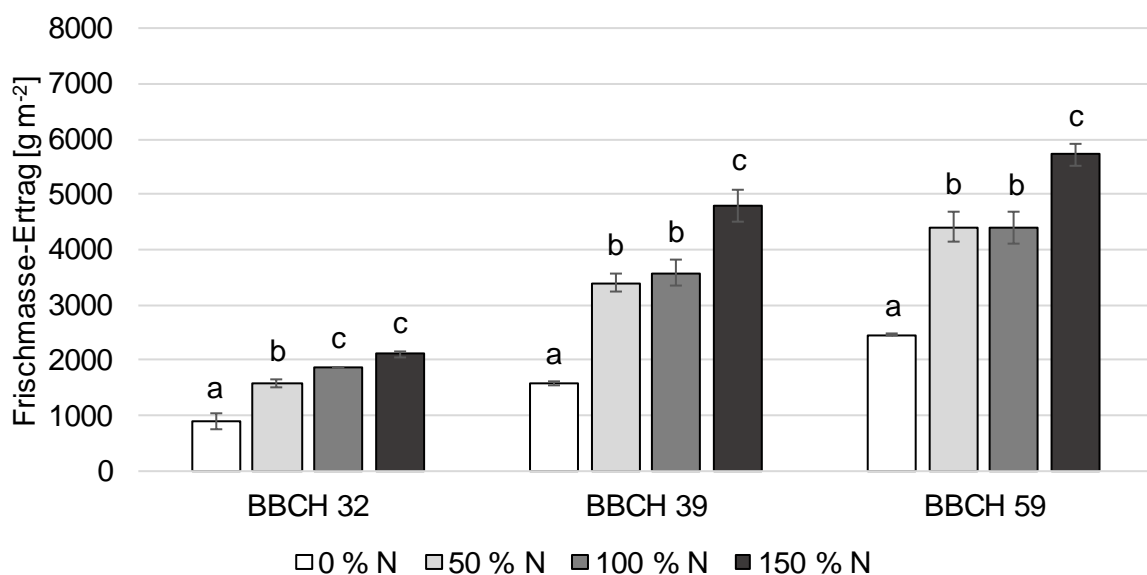


Abb. 4-24: Frischmasse-Ertrag von Winterweizen in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2021

Die Nutzung des Frischmasse-Ertrags als Referenzgröße zur Abschätzung der N-Versorgung mittels TrueColor-Sensorarray kann aufgrund der durchgeführten Plausibilisierung stringenter Werteverläufe erfolgen. Als Gütemaß zur Eignungsbeurteilung des Sensorarrays sind in Tab. 4-16 die Korrelationskoeffizienten zwischen den Frischmasse-Erträgen sowie den Reflexionskanälen dargestellt.

Tab. 4-16: Korrelationskoeffizienten zwischen den Frischmasse-Erträgen sowie dem IR-, L-, a- und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

	IR-Kanal			L-Kanal			a-Kanal			b-Kanal		
	WG 20	WG 21	WW 21	WG 20	WG 21	WW 21	WG 20	WG 21	WW 21	WG 20	WG 21	WW 21
BBCH 32	-0,73	-0,38	0,98	-0,98	-0,88	-0,99	-0,98	-0,82	-0,97	-1,00	-0,90	-0,99
BBCH 39	-0,52	-0,65	0,96	-0,89	-0,90	-0,92	-1,00	-0,96	-0,97	-0,99	-0,97	-0,96
BBCH 59	0,34	0,94	0,98	-0,91	-0,63	-0,89	-0,89	-0,87	-0,96	-0,88	-0,82	-0,94
Gesamt	-0,70	-0,56	-0,06	-0,93	-0,77	-0,65	-0,71	-0,72	-0,36	-0,81	-0,73	-0,82

Auf die grafische Darstellung der Regressionsmodelle analog zur Auswertung des Pflanzenbedeckungsgrades wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet, da eine Analyse der Modelle in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums notwendig ist. Allgemeingültige Zusammenhänge zwischen dem Frischmasse-Ertrag und den Reflexionswerten liegen nicht für jeden Kanal in allen Versuchsjahren vor. Insbesondere die IR-, L- und a-Werte bei Winterweizen korrelieren bei Verrechnung der Datenreihe „Gesamt“ nur schwach mit der Frischmasse. Ohne die grafische Darstellung wurde die Auswertungsform mittels Korrelationskoeffizienten gewählt, da durch mögliche Vorzeichenwechsel die Richtung der linearen Abhängigkeit erkennbar wird. Dies unterstreicht die kausalen Zusammenhänge zwischen dem Frischmasse-Verlauf und der resultierenden Pflanzenreflexion. Die Notwendigkeit der differenzierten Betrachtung wird am Beispiel der Ergebnisse des IR-Kanals deutlich. Die in Abb. 4-24 mit steigendem Entwicklungsstadium dargestellte Zunahme der Frischmasse sollte durch steigende IR-Reflexion abgebildet werden (siehe Kap. 4.2.1). Die Korrelation bei der Auswertung über den Untersuchungszeitraum „Gesamt“ fällt für alle Kulturarten und Versuchsjahre niedrig aus und weist ein negatives Vorzeichen auf. Eine plausibel erklärbare und hohe Korrelation liegt für den IR-Kanal bei Wintergerste lediglich in BBCH 59 des zweiten Versuchsjahres vor. Im Gegensatz dazu sind die Korrelationen für die IR-Reflexionswerte des Winterweizens innerhalb der Entwicklungsstadien hoch.

Ein Vorzeichenwechsel der Korrelationskoeffizienten findet bei den übrigen Reflexionskanälen nicht statt, wodurch die Voraussetzungen zur Eignung des CIELab-Farbraums aufgrund homogener Werteverläufe gegeben sind. Innerhalb des L-Kanals sind die Zusammenhänge zur Frischmasse bei WG 20 sowie WW 21 in BBCH 32 am stärksten. Am schwächsten ist der Zusammenhang bei WG 21 in BBCH 59. Dies steht im Gegensatz zum Regressionsmodell von WG 21 zwischen dem L-Kanal und der Pflanzenbedeckung, da dieser Pflanzenparameter mit $r = -0,778$ einen stärkeren Zusammenhang zum L-Kanal aufweist.

Analog zum IR- und L-Kanal sind die Tendenzen der Korrelationskoeffizienten auf den a-Kanal übertragbar. Den schwächsten Zusammenhang weist WW 21 in der Kategorie „Gesamt“ auf. Die Auswertung innerhalb der jeweils untersuchten Pflanzenstadien führt zu durchweg höheren Korrelationen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines individuellen Auswertalgorithmus in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums. Der b-Kanal bildet die Frischmasse-Erträge mit der durchschnittlich höchsten Korrelation ab, wobei auch in diesem Fall eine Auswertung über den gesamten Untersuchungszeitraum zu den niedrigsten Korrelationen führt.

Die negativ verlaufenden Zusammenhänge der Frischmasse mit dem L-, a- und b-Kanal bestätigen die Ergebnisse zu den Untersuchungen bezüglich des Pflanzenbedeckungsgrades. Aus der gesteigerten N-Düngung resultiert eine Biomasse-Zunahme, wodurch die Reflexion im blauen und grünen Wellenlängenbereich zunimmt. Das bodentypische Erscheinungsbild mit den rot und gelb dominierenden Farbanteilen nimmt ab. Gleichzeitig sinkt die Luminanz bei gut versorgten Beständen, da eine Abschattung durch den dichten Bestand erfolgt und das Erscheinungsbild der Mischfläche dunkler wird. Insgesamt ist mit Hilfe des CIELab-Farbraums die Erfassung des Frischmasse-Ertrages zur Abschätzung der Stickstoff-Versorgung bei Verwendung entwicklungspezifischer Regressionsmodelle mit ausreichender Genauigkeit möglich.

4.2.5 Einfluss der Pflanzenhöhe auf die Reflexionseigenschaften

Analog zu den Untersuchungen der Frischmasse als Referenzgröße zur Abschätzung der N-Versorgung mittels TrueColor-Sensorarray, erfolgt eine Plausibilisierung der erhobenen Pflanzenhöhen. Die Verläufe der Pflanzenhöhen von Wintergerste für 2020 und 2021 sind in Abb. 4-25 dargestellt. Mit Ausnahme der Fehlerresiduen in der 50 % N- sowie 150 % N-Variante von BBCH 59 im Versuchsjahr 2020, liegen die Standardabweichungen in den übrigen Varianten und Entwicklungsstadien auf einem einheitlich niedrigen Niveau. Die erhöhte Streuung bildet die durch Trockenstresssymptome gekennzeichneten heterogen erscheinenden Bestände ab.

Die N-Stufe hat nicht in jedem Entwicklungsstadium und Versuchsjahr einen signifikanten Einfluss auf die Pflanzenhöhe. Während sich die Pflanzenhöhen der 100 % N- und 150 % N-Versorgung zu Vegetationsbeginn des ersten Versuchsjahres nicht signifikant unterscheiden, trifft dies im zweiten Versuchsjahr auf die 0 % N- und 50 % N- bzw. 50 % N- und 100 % N-Variante zu. In umgekehrter Weise verhält es sich, wenn die Ergebnisse der beiden Versuchsjahre in BBCH 39 verglichen werden. Einzig bei WG 21 in BBCH 59 sind signifikant unterschiedliche Pflanzenhöhen je N-Stufe zu verzeichnen.

Weiterhin ist zu beobachten, dass die Entwicklung der Pflanzenhöhen zu BBCH 32 im Jahr 2021 gegenüber 2020 unabhängig der N-Stufe auf einem niedrigeren Niveau beginnt. Zu BBCH 39 nimmt dieser Effekt mit steigender N-Stufe ab und übersteigt bei der 100 % N-Variante sogar die Pflanzenhöhe aus dem Vorjahr. Die Spannweite zwischen der 0 % N-Variante und der 150 % N-Variante übersteigt im zweiten Versuchsjahr deutlich die Werte aus 2020. Im Jahr 2021 liegen die Pflanzenhöhen zu BBCH 59 einheitlich oberhalb der Werte aus 2020.

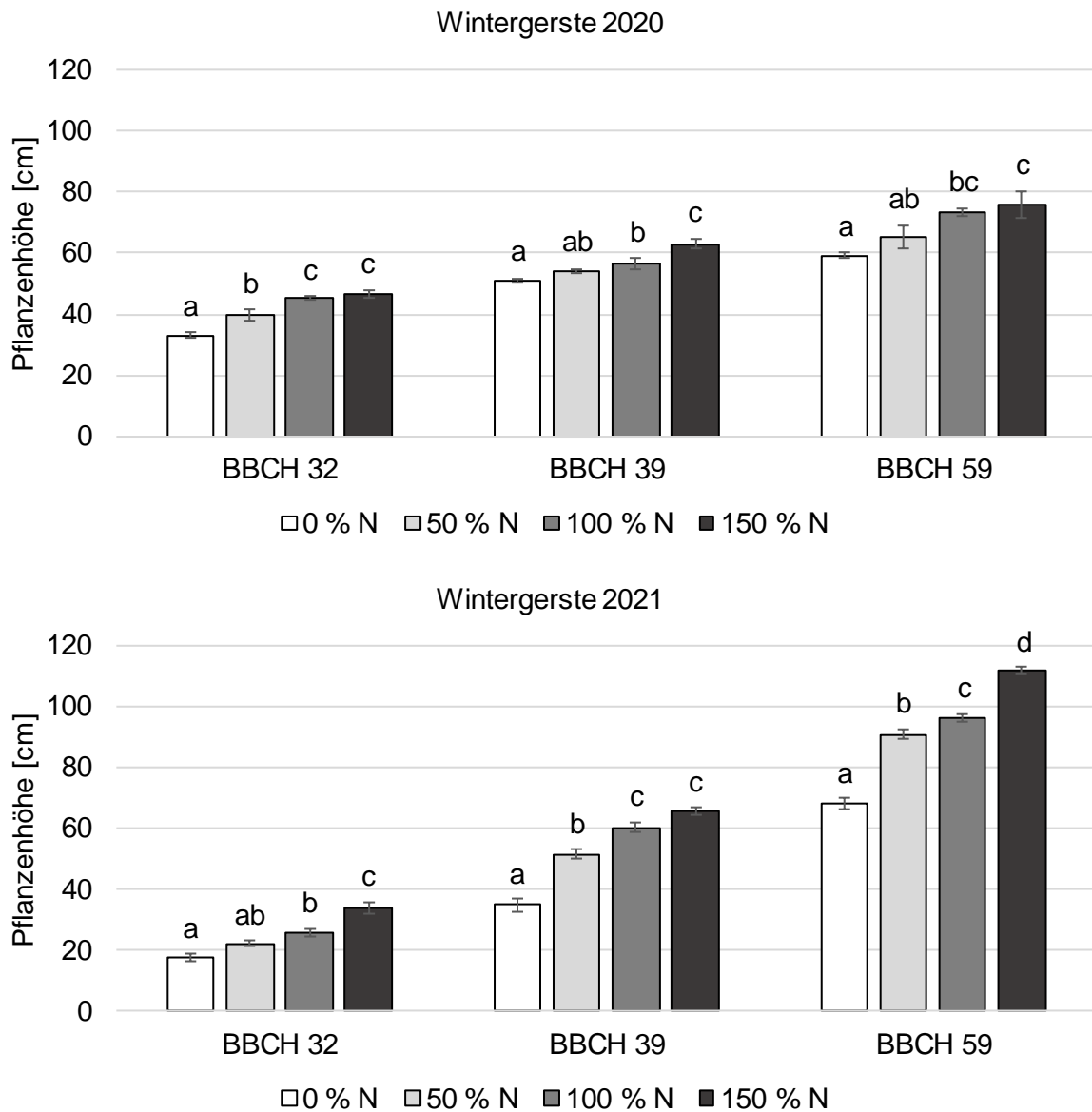


Abb. 4-25: Pflanzenhöhe von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N in den Versuchsjahren 2020 (oben) und 2021 (unten)

Diese Effekte repräsentieren ein weiteres Mal den witterungsbedingten Einfluss auf agronomische Parameter zur Abschätzung der N-Versorgung. Gegenüber den unter warmen und trockenen Bedingungen entwickelten Beständen in 2020 verlangsamte die im April und Mai 2021 vorherrschende kühle Witterung die Pflanzenentwicklung messbar. Durch gleichzeitige Niederschläge in diesem Zeitraum setzte sich das vegetative Wachstum mit einer gesteigerten Wasserverfügbarkeit länger fort und resultierte in insgesamt höhere Pflanzenbestände. Dar-

aus resultiert die Notwendigkeit einer zeitnahen Referenzierung unabhängig von der erhobenen Referenzgröße, um anhand der Reflexionswerte Aussagen über den aktuellen Pflanzenzustand treffen zu können.

In Abb. 4-26 ist der Zusammenhang zwischen der N-Stufe in den jeweiligen Entwicklungsstadien und der resultierenden Pflanzenhöhe von Winterweizen aus dem Versuchsjahr 2021 zu erkennen.

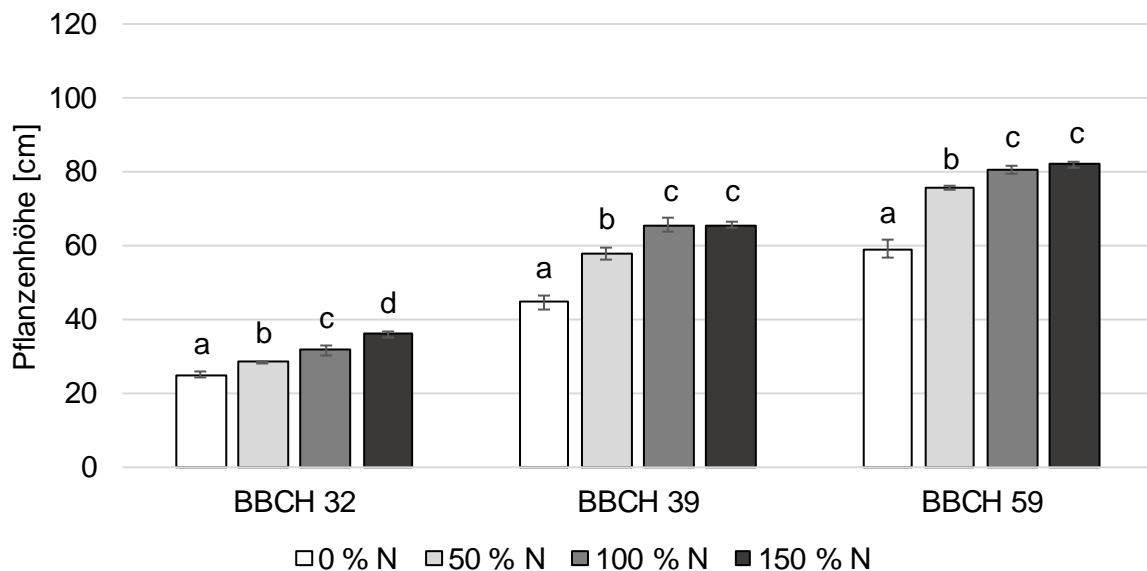


Abb. 4-26: Pflanzenhöhe von Winterweizen in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2021

Verglichen mit den Boniturdaten zur Pflanzenhöhe in BBCH 39, weisen die Bestände des WW in BBCH 32 deutlich geringere Standardabweichungen auf. Mit einer minimalen Pflanzenhöhe von 25,0 cm (0 % N), sowie einer maximalen Pflanzenhöhe von 36,0 cm (150 % N) unterscheiden sich die Varianten innerhalb einer Spannweite von 11 cm signifikant.

Zwischen den Pflanzenhöhen der niedrigsten sowie höchsten Versorgungsstufe liegt zu BBCH 39 eine Differenz von 21 cm und zu BBCH 59 von 23 cm vor. Aus Abb. 4-26 geht hervor, dass die Zunahme der Pflanzenhöhe mit steigender N-Stufe niedriger ausfällt. Die Unterschiede der Pflanzenhöhen von 100 % N- sowie 150 % N-Variante liegen im Bereich von weniger als einem Zentimeter. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Wintergerste ist eine eindeutige Zuordnung der Pflanzenhöhen zur N-Stufe damit nicht gegeben.

Die Pflanzenhöhe ist im Vergleich zum Frischmasse-Ertrag oder der Pflanzenbedeckung mit geringerem technischem Aufwand zu bestimmen und kommt damit als alternatives Verfahren zur Erhebung eines Referenzparameters in Frage. Durch die beschriebene Plausibilisierung der Boniturdaten in Kombination mit der vorteilhafteren Durchführbarkeit, kann diese Referenzgröße gegenüber bisherigen Verfahren einen Vorteil darstellen. Eine Eignungsbeurteilung wird im Folgenden anhand der Korrelationskoeffizienten zwischen der Pflanzenhöhe und den Reflexionskanälen vorgenommen.

In Tab. 4-17 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen Pflanzenhöhe und Reflexionskanal dargestellt. Analog zur Darstellung der Frischmasse-Erträge in Kap. 4.2.4 sind sowohl die Zusammenhänge innerhalb der einzelnen Entwicklungsstadien, als auch über den gesamten Untersuchungszeitraum abgebildet.

Tab. 4-17: Korrelationskoeffizienten zwischen den Pflanzenhöhen sowie dem IR-, L-, a- und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

	IR-Kanal			L-Kanal			a-Kanal			b-Kanal		
	WG 20	WG 21	WW 21	WG 20	WG 21	WW 21	WG 20	WG 21	WW 21	WG 20	WG 21	WW 21
BBCH 32	-0,65	0,03	0,86	-0,95	-0,81	-0,93	-1,00	-0,85	-0,86	-0,99	-0,88	-0,92
BBCH 39	-0,47	-0,75	0,83	-0,82	-0,95	-0,99	-0,92	-0,97	-0,98	-0,94	-0,98	-0,99
BBCH 59	0,51	0,92	0,96	-0,84	-0,81	-0,99	-0,87	-0,97	-1,00	-0,85	-0,94	-1,00
Gesamt	-0,89	-0,89	-0,38	-0,90	-0,93	-0,47	-0,50	-0,43	-0,07	-0,65	-0,55	-0,66

Die Korrelationskoeffizienten sind innerhalb der Reflexionskanäle einer starken Variabilität unterworfen. Diese ist sowohl in Abhängigkeit der Kulturpflanze, als auch des Versuchsjahres, sowie des Entwicklungsstadiums zu beobachten. Anhand der statistischen Auswertung werden stärkere Korrelationen zwischen der Pflanzenhöhe und den Reflexionswerten bei einer höheren Anzahl homogener Untergruppen vermutet. Grund für die Annahme ist eine bessere Unterscheidbarkeit der N-Stufen bei stärkeren Unterschieden innerhalb der Phänotypen. Dies lässt sich anhand der Korrelationskoeffizienten des IR-Kanals nicht bestätigen. Während die Pflanzenhöhen von WG 21 in BBCH 39 in Abhängigkeit der N-Stufe signifikant zunimmt (vgl. Abb. 4-25), ist die in Tab. 4-17 aufgeführte negative Korrelation (Abnahme der Reflexionswerte bei zunehmender Pflanzenhöhe) zu den Reflexionswerten nicht plausibel und sollte verworfen werden. Gleichzeitig weisen die Reflexionswerte in BBCH 59 eine stark positive Korrelation bezüglich der signifikant unterschiedlichen Pflanzenhöhen auf. Trotz teils nicht signifikant unterschiedlicher Pflanzenhöhen liegen die Korrelationskoeffizienten innerhalb der untersuchten Entwicklungsstadien von WW 21 in einem konstant positiven Wertebereich. Die niedrige Korrelation über den gesamten Untersuchungszeitraum zeigt, dass eine Düngerapplikation anhand eines pauschalen Regressionsmodells auch für diese Kombination aus Objekt (WW 21) und Reflexionskanal (IR-Kanal) nicht empfehlenswert ist.

Unter Berücksichtigung der übrigen Korrelationskoeffizienten der Kategorie „Gesamt“, ist eine geringe Eignung auch auf die Reflexionskanäle des CIELab-Farbraums übertragbar. Lediglich die Reflexionskanäle des L-Kanals liefern über den gesamten Messzeitraum für Wintergerste

annehmbar hohe Korrelationen. Eine gegenüber dem IR-Kanal höhere Eignung dieser Reflexionskanäle zur Beurteilung der Pflanzenhöhe wird durch die starken Korrelationen innerhalb der BBCH-Stadien mit einheitlichen und plausiblen Vorzeichen deutlich (siehe Tab. 4-17). Eine Abhängigkeit des Korrelationskoeffizienten vom Versuchsjahr, der Kulturart oder dem Entwicklungsstadium ist innerhalb des CIELab-Farbraums nicht festzustellen. Dies lässt auf eine einheitlich hohe Eignung schließen.

Analog zu den übrigen Referenzparametern hat die Bonitur der Pflanzenhöhe zur Referenzbildung vor jeder Messung zu erfolgen. Daraus können Entscheidungsalgorithmen abgeleitet werden, mit denen eine bedarfsgerechte Pflanzenversorgung möglich ist. Eine Validierung der Regressionsmodelle bezüglich des Zusammenhangs zwischen der Pflanzenhöhe und dem IR-Kanal sollte anhand weiterer Versuche mit den beschriebenen Kulturen erfolgen. Unabhängig von Kulturart und Reflexionskanal steht die N-Versorgung im Zusammenhang mit der Pflanzenhöhe lediglich stellvertretend für eine Erfassung des Pflanzenzustandes. Vielmehr könnten weiterführende Untersuchungen Aufschluss über die Nutzung der Algorithmen zur Applikation von Wachstumsreglern geben. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Datenerhebung zum Zusammenhang zwischen der Pflanzenhöhe und den Reflexionskanälen erfolgte applikationsunabhängig. Aufgrund der starken Korrelationen werden weitere Untersuchungen zur Nutzung der Reflexionswerte im Hinblick auf eine derartige Anwendung empfohlen.

4.2.6 Einfluss der N-Stufe auf die Reflexionseigenschaften

Nachdem die Eignung des TrueColor-Sensorarrays durch den Zusammenhang zwischen den Reflexionswerten und einzelnen Referenzparametern bewertet wurde, dient dieses Kapitel der ganzheitlichen Betrachtung des Reflexionsverhaltens der N-Stufe. Dazu werden zunächst die Ergebnisse des nasschemisch ermittelten C/N-Verhältnisses am Beispiel von WG 2020 vorgestellt. Diese Analyse dient zur Plausibilisierung des Zusammenhangs zwischen der N-Stufe und dem tatsächlichen N-Gehalt. Anschließend werden die Regressionsmodelle zwischen N-Stufe und Reflexionsdaten vorgestellt, welche die Entscheidungsgrundlage einer teilschlag-spezifischen Düngerapplikation bilden.

– Verlauf des C/N-Verhältnisses am Beispiel von WG 2020

In Abb. 4-27 sind die C/N-Verhältnisse der N-Stufen zwischen BBCH 32 und 59 dargestellt. Alle C/N-Verhältnisse der N-Stufen unterscheiden sich innerhalb eines Entwicklungsstadiums jeweils signifikant. Es besteht ein monoton fallender Zusammenhang zwischen der N-Stufe und dem C/N-Verhältnis.

Unabhängig von Entwicklungsstadium und N-Stufe bleibt der C-Gehalt der untersuchten Pflanzen nahezu konstant bei 45 % (siehe Anhang, Abb. 7-6). Innerhalb der Entwicklungsstadien steigt der N-Gehalt mit zunehmender N-Stufe konstant an. Mit zunehmendem Pflanzenalter sinkt der N-Gehalt innerhalb einer N-Stufe (siehe Anhang, Abb. 7-7). Eine Ausnahme bildet die 0 % N-Variante, bei der das C/N-Verhältnis von BBCH 32 zu BBCH 39 zurückgeht. Aufgrund des beschriebenen konstanten C-Gehaltes ist ein gesteigerter N-Gehalt die Konsequenz. Nach Müller (1985) können höhere Bodentemperaturen bei gleichzeitiger Trockenheit

zu einer gesteigerten N-Nachlieferung aus dem Boden führen. Da entsprechende Witterungsverhältnisse in diesem Zeitraum vorlagen (siehe Anhang, Abb. 7-2), ist die N-Zufuhr der 0 % N-Variante auf den mineralisierten Bodenstickstoff (N_{\min}) zurückzuführen.

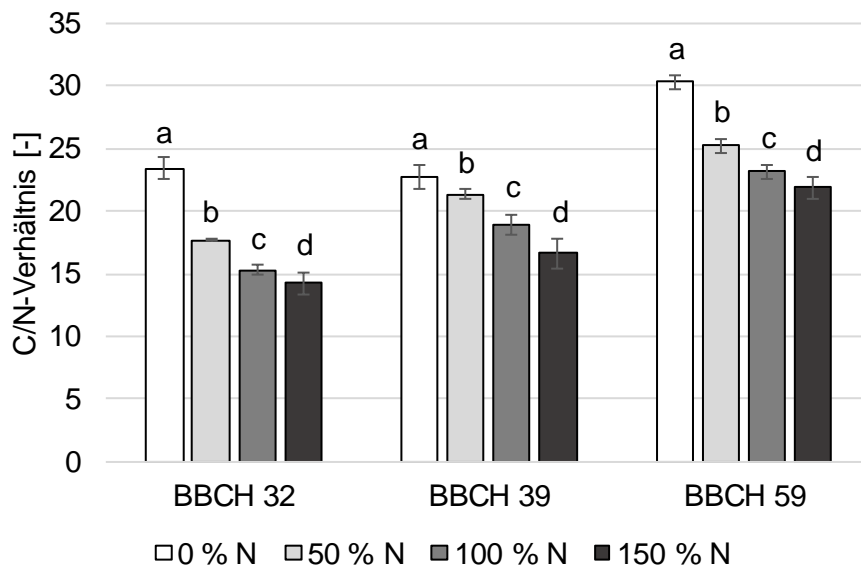


Abb. 4-27: C/N-Verhältnis von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 32 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2020

Insgesamt geht aus Abb. 4-27 hervor, dass der Zusammenhang zwischen N-Stufe und tatsächlichem N-Gehalt gegeben ist. Aufgrund dieser Plausibilisierung kann im nächsten Schritt das Reflexionsverhalten der N-Stufen mittels Regressionsmodellen beschrieben werden.

– Regressionsmodelle zur Abbildung der N-Stufe durch den IR-Kanal

Nachdem die Zusammenhänge zwischen dem C/N-Verhältnis und der N-Stufe in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums diskutiert wurden, gilt es in diesem Kapitel den Einfluss der N-Stufe durch Ableitung von Regressionsmodellen messbar zu machen. Die Regressionsgeraden sowie die resultierenden Bestimmtheitsmaße für den IR-Kanal sind in Abb. 4-28 dargestellt.

Analog der Darstellungsweise des Pflanzenbedeckungsgrades in Kap. 4.2.3, sind die Regressionsmodelle in Abhängigkeit der Kulturpflanze und des Versuchsjahres separat dargestellt. Innerhalb dieser Abbildung werden die Regressionsgeraden je Entwicklungsstadium gebildet und tabellarisch zusammengefasst. Die Regressionsmodelle setzen sich aus der Regressionsgeraden und dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß zusammen.

Im Gegensatz zu den Regressionsmodellen bei WW 21, heben sich die Reflexionsaufnahmen von WG in BBCH 24 deutlich gegenüber den übrigen Entwicklungsstadien ab. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Referenzparameter, sind zu Vegetationsbeginn keine Zusammenhänge zwischen Reflexionswerten und N-Stufe festzustellen. Sowohl niedrige Bestimmtheitsmaße, als auch flache Geradensteigungen machen dies unabhängig von Kulturart und Versuchsjahr deutlich. Insgesamt sind zwischen der IR-Reflexion und den N-Stufen der

Wintergerste lediglich schwache Zusammenhänge festzustellen. Unabhängig von der N-Versorgung sind eindeutige Unterschiede zwischen den Reflexionswerten der untersuchten Entwicklungsstadien festzustellen. Anhand der jeweiligen Regressionsgeraden ist der y-Achsenabschnitt bekannt, welcher mit zunehmendem Entwicklungsstadium abnimmt (siehe Abb. 4-28).

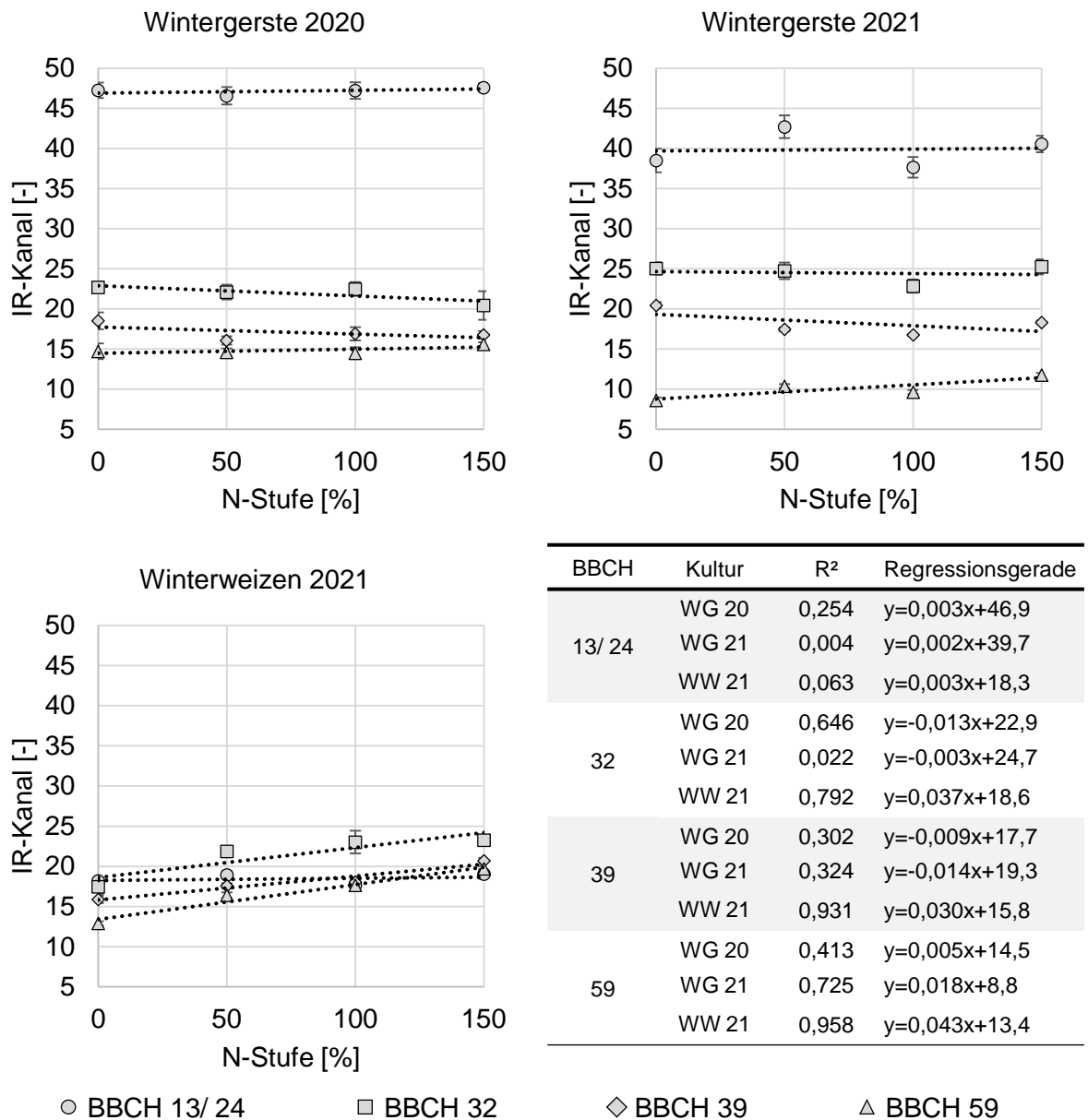


Abb. 4-28: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen N-Stufe und IR-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

Diese Regressionsmodelle dienen als Vergleichswerte für zukünftige Messwertaufnahmen, durch deren Berechnung von y-Achsenabschnitten Aussagen über das vorherrschende Entwicklungsstadium möglich sein können. Bei WG können die Informationen der IR-Reflexion nicht zur direkten Bestimmung des N-Gehalts genutzt werden, sondern dienen als Entscheidungshilfe zur Plausibilisierung der vorliegenden Messwerte.

Anders verhält sich dies für die Regressionsmodelle von WW 21. Die Wertebereiche der IR-Reflexion weisen unabhängig des Entwicklungsstandes sowie der N-Versorgung eine deutlich geringere Spannweite auf. Eine eindeutige Unterscheidung zwischen den Reflexionsdaten zu Vegetationsbeginn in BBCH 13 und den weiteren Messreihen ist nicht möglich. Wie an den Bestimmtheitsmaßen zu erkennen ist, weisen die Reflexionsdaten innerhalb eines BBCH-Stadiums in Abhängigkeit der N-Stufe gegenüber den Messreihen bei WG einen engeren Wertebereich auf.

Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Untersuchungen, sind die Zusammenhänge zwischen der IR-Reflexion und den Referenzparametern über die gesamten Entwicklungsstadien als niedrig und teilweise gegenläufig zu bezeichnen. Aus diesem Grund ist eine eindeutige Aussage zur Eignung des IR-Kanals bei WW nicht möglich. Als Erklärung der starken linearen Zusammenhänge innerhalb der Entwicklungsstadien ist ein summierender Effekt der einzelnen Referenzgrößen in Abhängigkeit der N-Versorgung zu nennen. Jede der Referenzgrößen weist plausibel erklärbare stringente Zusammenhänge zur N-Stufe auf (siehe Kap. 4.2.3 bis 4.2.5). Analog zum optischen Erscheinungsbild, resultieren die Reflexionseigenschaften der N-Varianten aus der Kombination dieser Referenzgrößen. Die Abhängigkeit der Reflexionswerte von einzelnen Referenzgrößen ist gegenüber deren Kombination als geringer zu bewerten und entspricht dem in Abb. 4-28 dargestellten Zusammenhang. Aufgrund der einjährig auswertbaren Versuchsergebnisse bei WW wird eine Verifizierung dieser Interpretation durch mehrjährige Versuchswiederholung empfohlen. Der IR-Kanal des zum Zeitpunkt der Untersuchungen spezifizierten TrueColor-Sensorarrays ist zur Bestimmung der N-Stufe bei WG eindeutig nicht geeignet.

– Regressionsmodelle zur Abbildung der N-Stufe durch den L-Kanal

Anders stellt es sich für die Regressionsmodelle des L-Kanals dar. Nach Abb. 4-29 unterscheiden sich die Reflexionswerte zum ersten Messtermin sowohl für WG in BBCH 24 als auch WW in BBCH 13 eindeutig von den späteren Messwertaufnahmen.

Mit einem y-Achsenabschnitt von 37,8 (WG 20) bzw. 39,0 (WG 21) sowie jeweils einer geringen Steigung, bilden die Regressionsgeraden den Wertebereich des L-Kanals zum ersten Messtermin unabhängig des Versuchsjahres in ähnlicher Weise ab. Auffällig gleichmäßige Steigungskoeffizienten weisen die Regressionsgeraden von WG 20 in BBCH 32, 39 und 59 auf. Der y-Achsenabschnitt sinkt mit zunehmendem BBCH-Stadium, wodurch eine eindeutige Zuordnung zwischen dem Regressionsmodell und dem Entwicklungsstadium möglich ist. Eine vollständige Übertragbarkeit auf die Messreihen des zweiten Versuchsjahres ist nicht möglich, da sowohl die Steigungskoeffizienten, als auch die y-Achsenabschnitte größeren Differenzen unterworfen sind. Die L-Reflexion der 0 % N-Variante weist zwischen BBCH 32 und 39 keinen eindeutigen Unterschied auf. Dies schränkt die Eignung der Regressionsmodelle nicht ein, da die Messungen zeitversetzt stattfinden. Gleiches gilt für die Regressionsmodelle von WW 21, bei denen die Spannweite des Reflexionsbereiches gegenüber WG geringer ausfällt. Mit Ausnahme von BBCH 13 liegen die Bestimmtheitsmaße unabhängig des BBCH-Stadiums bei WW 21 im Bereich $R^2 > 0,74$, wodurch die Eignung der L-Reflexion zur Abbildung der N-Stufe gegeben ist.

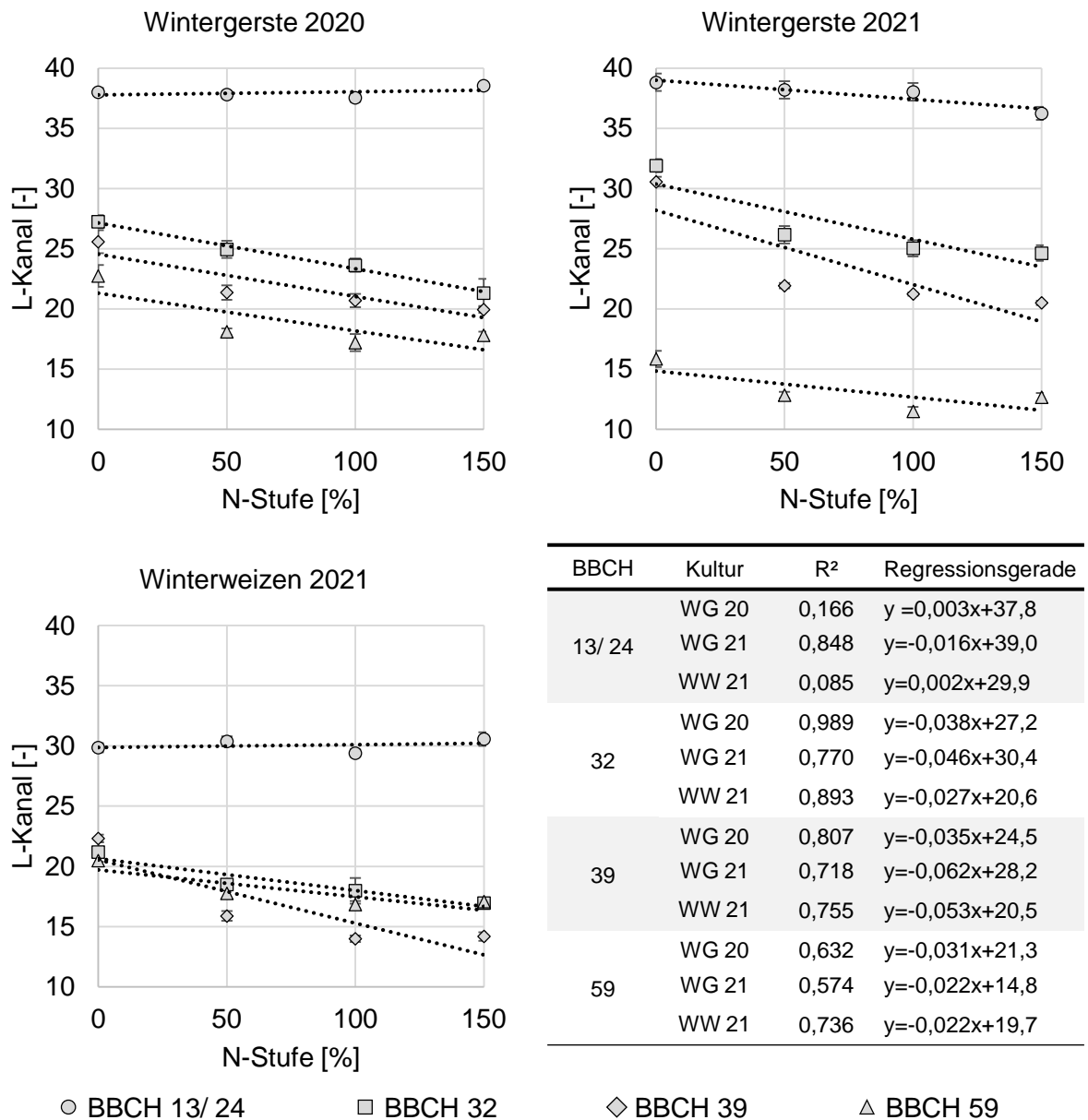


Abb. 4-29: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen N-Stufe und L-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

Bei WG 20 sind die Reflexionsunterschiede von 50 % N, 100 % N und 150 % N innerhalb der Entwicklungsstadien BBCH 32 und 39 trotz geringer Standardabweichungen nicht eindeutig differenzierbar. In Abb. 4-27 ist zu erkennen, dass das C/N-Verhältnis innerhalb des Entwicklungsstadiums BBCH 32 mit zunehmender N-Stufe degressiv abnimmt. Dieser Zusammenhang ist anhand der L-Reflexion ebenfalls festzustellen. Zur Überprüfung der Eignung wurde die maximale N-Zufuhr im Rahmen der Versuchsanlage gegenüber der betriebsüblichen Variante um 50 % gesteigert, um die Extremwerte abschätzen zu können. Dadurch traten Sättigungseffekte auf, da der Bestand die gesteigerte N-Zufuhr nicht vollständig aufnehmen konnte. Da von derartigen Effekten bei einer bedarfsgerechten Düngung in der späteren An-

wendung nicht auszugehen ist, werden lineare Regressionsmodelle zur reflexionswertbasierten Abbildung der N-Stufe gewählt. Das Ziel ist die Übertragung der Reflexionswerte in messbare Größen, um reproduzierbar vergleichbare Aussagen zur N-Versorgung heterogener Bestände machen zu können und in einem weiteren Schritt Ertragsabschätzungen durchzuführen. Dazu werden in Kap. 4.3 die Zusammenhänge zwischen den Reflexionswerten und den Kornerträgen untersucht.

– Regressionsmodelle zur Abbildung der N-Stufe durch den a-Kanal

Wie in Abb. 4-30 zu erkennen, resultiert aus dem vorwiegend grünen Erscheinungsbild der gemessenen Mischflächen unabhängig von Kulturart und Versuchsjahr eine geringe Spannweite der a-Reflexion.

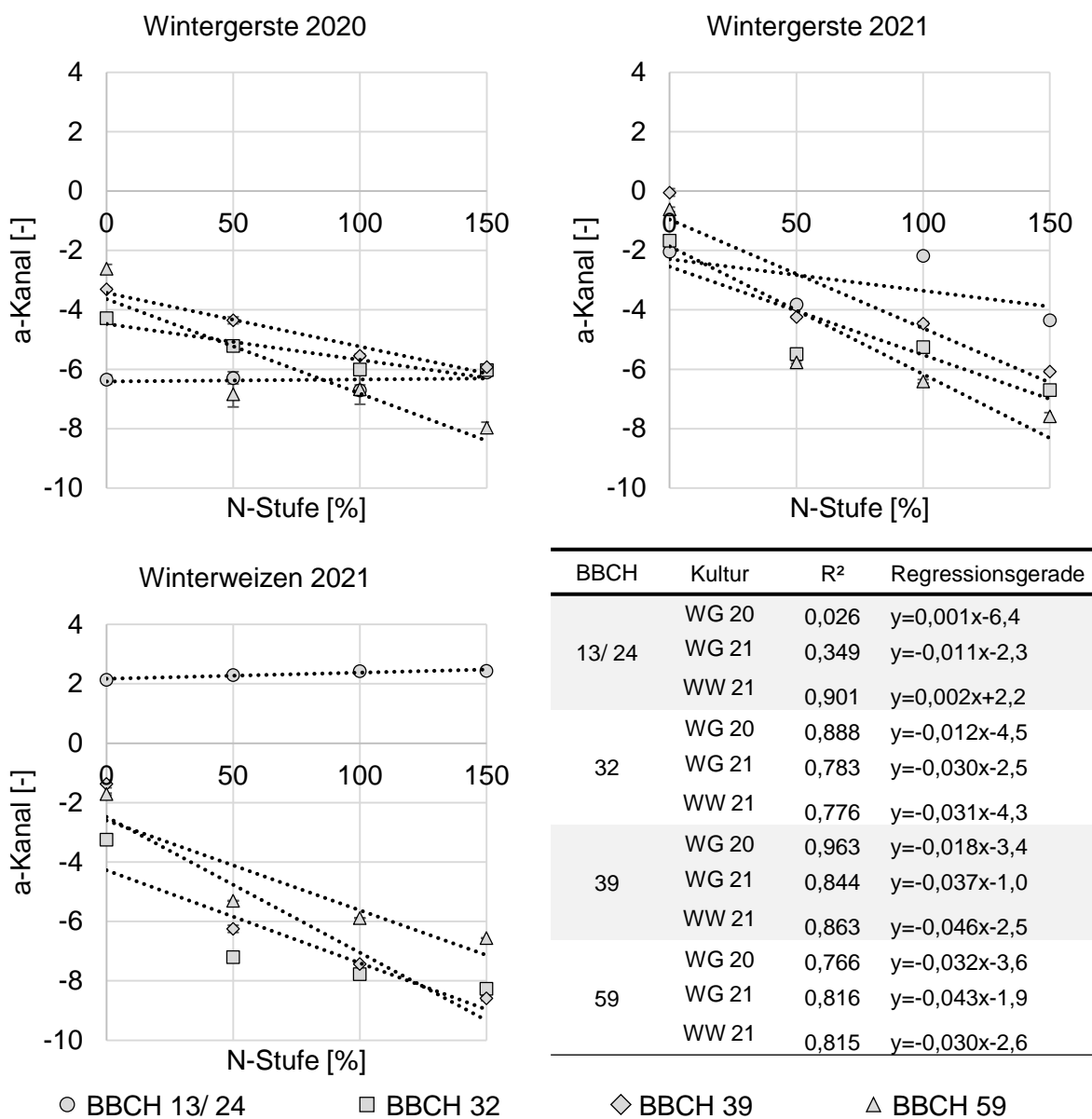


Abb. 4-30: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen N-Stufe und a-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

Nahezu konstante Reflexionswerte in BBCH 13 bzw. 24 werden durch die geringen Steigungskoeffizienten der Regressionsgeraden abgebildet und unterstreichen ein weiteres Mal den homogenen Versuchsbestand zu Vegetationsbeginn. In Bezug auf die weiteren Entwicklungsstadien weist WW 21 in BBCH 13 einen höheren a-Wert auf, da der Blattflächenanteil vor der ersten N-Gabe gegenüber WG in BBCH 24 deutlich niedriger ausfällt. Ab BBCH 32 sind die Bestimmtheitsmaße zwischen den N-Stufen und den Reflexionswerten mit durchweg $R^2 > 0,77$ konstant hoch. Die Regressionsmodelle auf Basis des a-Kanals können aufgrund der niedrigen Standardabweichungen sowie der starken linearen Zusammenhänge als geeignet beurteilt werden. Bezüglich der Untersuchungen des L-Kanals sind weniger Gemeinsamkeiten zwischen den Regressionsmodellen der untersuchten Kulturpflanzen und Versuchsjahre festzustellen. An dieser Stelle wird deutlich, dass die Eignung nicht pauschal aufgrund plausibler Werteverläufe oder beschreibender Modelle bewertet werden kann. Zum jetzigen Entwicklungsstand ist vor jeder Anwendung eine ganzheitliche Einordnung der Reflexionsdaten durch Referenzmessungen erforderlich, um die a-Reflexion als vergleichbare Kenngröße zur Düngerapplikation nutzen zu können.

– Regressionsmodelle zur Abbildung der N-Stufe durch den b-Kanal

Die eindeutig stärksten linearen Zusammenhänge weist der b-Kanal gegenüber den N-Stufen auf. Während sich der Wertebereich der Reflexionsdaten von WG in BBCH 24 deutlich gegenüber den übrigen Messwerten unterscheidet, ist eine derartige Abstufung bei WW 21 nicht zu beobachten (siehe Abb. 4-31). Ein wesentlicher Unterschied gegenüber den übrigen Reflexionskanälen ist der nahezu identische Verlauf der b-Reflexion in BBCH 32 und 39. Unabhängig von Kulturart und Versuchsjahr sind die Reflexionswerte, und damit die Regressionsgeraden, während des Längenwachstums annähernd deckungsgleich. Im Gegensatz zu BBCH 32 und 39 weisen die Regressionsmodelle in BBCH 59 niedrigere Bestimmtheitsmaße auf, können aufgrund des insgesamt hohen Niveaus aber als geeignet zur Abbildung der N-Stufe bezeichnet werden.

Der b-Kanal weist in BBCH 32 und 39 die betragsmäßig größten Differenzen zwischen den N-Stufen auf. Dies steht im Kontrast zum degressiven Verlauf des N-Gehaltes mit zunehmender N-Stufe (vgl. Abb. 4-27). In Kap. 4.2.3 wurde gezeigt, dass der lineare Zusammenhang zwischen der Pflanzenbedeckung und dem b-Kanal stark ausgeprägt ist. Nach Abb. 4-17 und Abb. 4-18 ist der Zusammenhang zwischen der N-Stufe und dem Pflanzenbedeckungsgrad für beide untersuchten Kulturarten eindeutig gegeben. Dies führt zu dem Schluss, dass der Zusammenhang zwischen N-Stufe und b-Kanal aus dem Einfluss der Pflanzenbedeckung resultiert und keinen direkten Rückschluss auf den tatsächlichen N-Gehalt liefert. Aus diesem Grund ist in BBCH 32 und 39 kein Sättigungseffekt der Reflexionswerte festzustellen. Trotz der analog zu BBCH 32 und 39 in Kap. 4.2.3 dargestellten stringenten Zusammenhänge zwischen N-Stufe und Pflanzenbedeckung, ist eine derartige Kausalkette für BBCH 59 nicht festzustellen. Sowohl bei WG als auch WW weisen die b-Reflexionswerte der 50 % N- und 100 % N-Variante keinen monoton fallenden Verlauf auf. Da ein abweichendes Reflexionsverhalten in beiden Kulturarten und Versuchsjahren einheitlich erst zu BBCH 59 auftritt, stellt ein veränderter Phänotyp die Ursache dar. Es ist davon auszugehen, dass die Reflexionswerte vornehmlich durch die vollständig hervorgetretenen Ähren beeinflusst werden. Die Ausfärbung

und Anzahl der darunterliegenden Blätter und Triebe stellt in BBCH 59 lediglich die Hintergrundreflexion dar. Trotz konstanter Bestandesdichte sinkt der Reflexionsanteil des Bodens, da der Reflexionsanteil der Ähren an der zu messenden Bestandesoberfläche dominiert. Unabhängig der N-Stufe führt diese Mischfläche zu einer niedrigeren b-Reflexion. Die Begrenzung der WG hat gegenüber dem WW keinen Einfluss auf die Reflexionswerte (siehe Abb. 4-31).

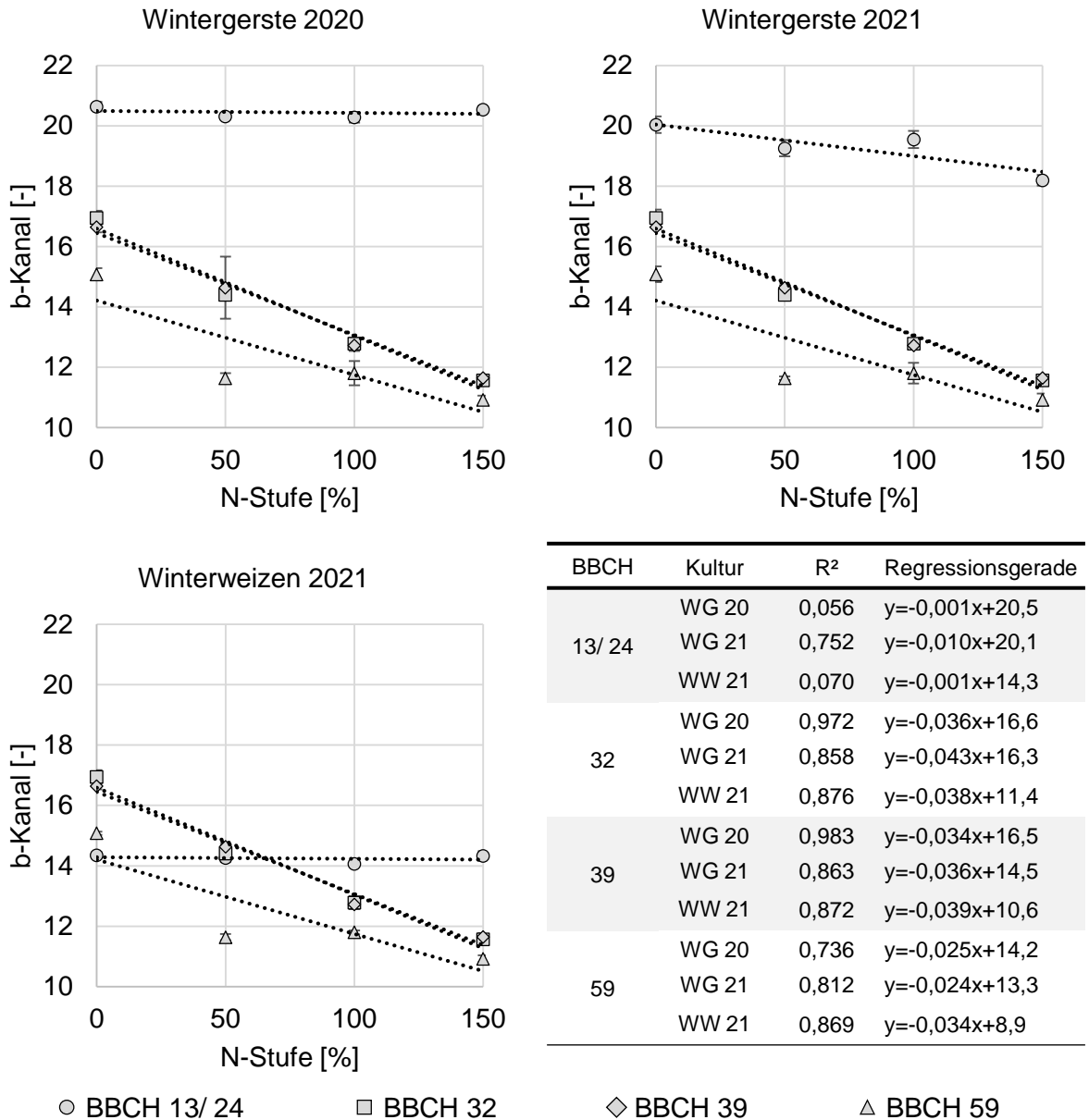


Abb. 4-31: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen N-Stufe und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

Insgesamt weist der b-Kanal bis zum Ährenschieben die höchste Eignung zur Bestimmung der N-Stufe an WG und WW auf. Mit Auftreten der generativen Pflanzenorgane ist die optische Unterscheidung der 50 % N- und 100 % N-Variante lediglich eingeschränkt möglich. Aber

auch in diesen Stadien liegen die Bestimmtheitsmaße auf vergleichbarem Niveau zu den Regressionsmodellen des a-Kanals. Sowohl der a- als auch der b-Kanal eignen sich zur Ermittlung der N-Stufe gegenüber dem IR- und L-Kanal besser.

4.2.7 Vergleich zwischen den Reflexionskanälen und den SPAD-Werten

Die in Kap. 3.3.2 beschriebene Methode zur Bestimmung der SPAD-Werte wird im praktischen Gebrauch des N-Sensors der Firma Yara mit Hilfe des N-Testers eingesetzt, um vor einer variablen Düngerapplikation manuelle Beprobungen am jeweils jüngsten, vollständig entwickelten Laubblatt der Kulturpflanze durchzuführen (Yara, 2021). Anhand dieser dimensionslosen Kennzahl wird eine Klassifizierung des Bestandes durch die Ermittlung des Biomasseindex vorgenommen, sodass mehr Stickstoffdünger in den Bereichen ausgebracht wird, in denen die Stickstoffaufnahme der Kulturpflanze am niedrigsten ist (Whelan, 2015). Die zu Vegetationsbeginn durchgeführten Messungen wurden der Vollständigkeit halber zu Vergleichszwecken aufgenommen. Nach Herstellerangaben liefern Messungen ab BBCH 29 plausible Ergebnisse (Drücker, 2016). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die SPAD-Werte keine linearen Zusammenhänge zum Chlorophyll-Gehalt aufweisen. Sowohl die Streueigenschaften, als auch die inhomogene Chlorophyll-Verteilung innerhalb der Pflanzenzellen beeinflussen zerstörungsfreie Messsysteme (Monje & Bugbee, 1992). Dieses Untersuchungsergebnis kann mit Hilfe der folgenden Darstellungen bestätigt werden. In Abb. 4-32 sind die Zusammenhänge zwischen der N-Stufe und den SPAD-Werten für Wintergerste in den beiden Versuchsjahren dargestellt. In beiden Versuchsjahren überlagert in BBCH 24 die Streuung jeweils die Unterschiede zwischen den SPAD-Werten der einzelnen N-Stufen. Statistisch abgesicherte Aussagen durch signifikante Unterschiede können nur eingeschränkt gegeben werden. Dagegen sind Tendenzen durch Vergleich der Mittelwerte ab BBCH 32 erkennbar. Während im Versuchsjahr 2020 sowohl in BBCH 32 als auch 59 zwischen der 50 % N- und 100 % N-Variante lediglich sehr geringe Mittelwertunterschiede zu erkennen sind, ist in BBCH 39 eine stetige Zunahme der SPAD-Werte bei steigender N-Versorgung festzustellen. Eine derartige Angleichung von Mittelwerten ist bei den in Kap. 4.2.3 – 4.2.5 vorgestellten Referenzparametern nicht zu beobachten.

Ein entsprechender Mittelwertverlauf bestätigt sich in BBCH 32 des zweiten Versuchsjahres. Zusätzlich sind geringe Unterschiede zwischen den SPAD-Werten der 100 % N- und 150 % N-Variante festzustellen. In ähnlicher Weise liegen die SPAD-Werte dieser beiden N-Stufen in BBCH 59 nahe beieinander. Unabhängig vom Versuchsjahr, lassen sich die N-Stufen in BBCH 39 mit Hilfe der SPAD-Werte am ehesten abbilden. Diese Aussagen können durch die in Abb. 4-32 dargestellten homogenen Untergruppen statistisch belegt werden. Aufgrund der geringen Anzahl signifikanter Unterschiede bei WG ist die Aussagekraft dieser Datenerhebung als niedrig zu bewerten. Auf Basis der Mittelwertverläufe können lediglich Tendenzen gegeben werden.

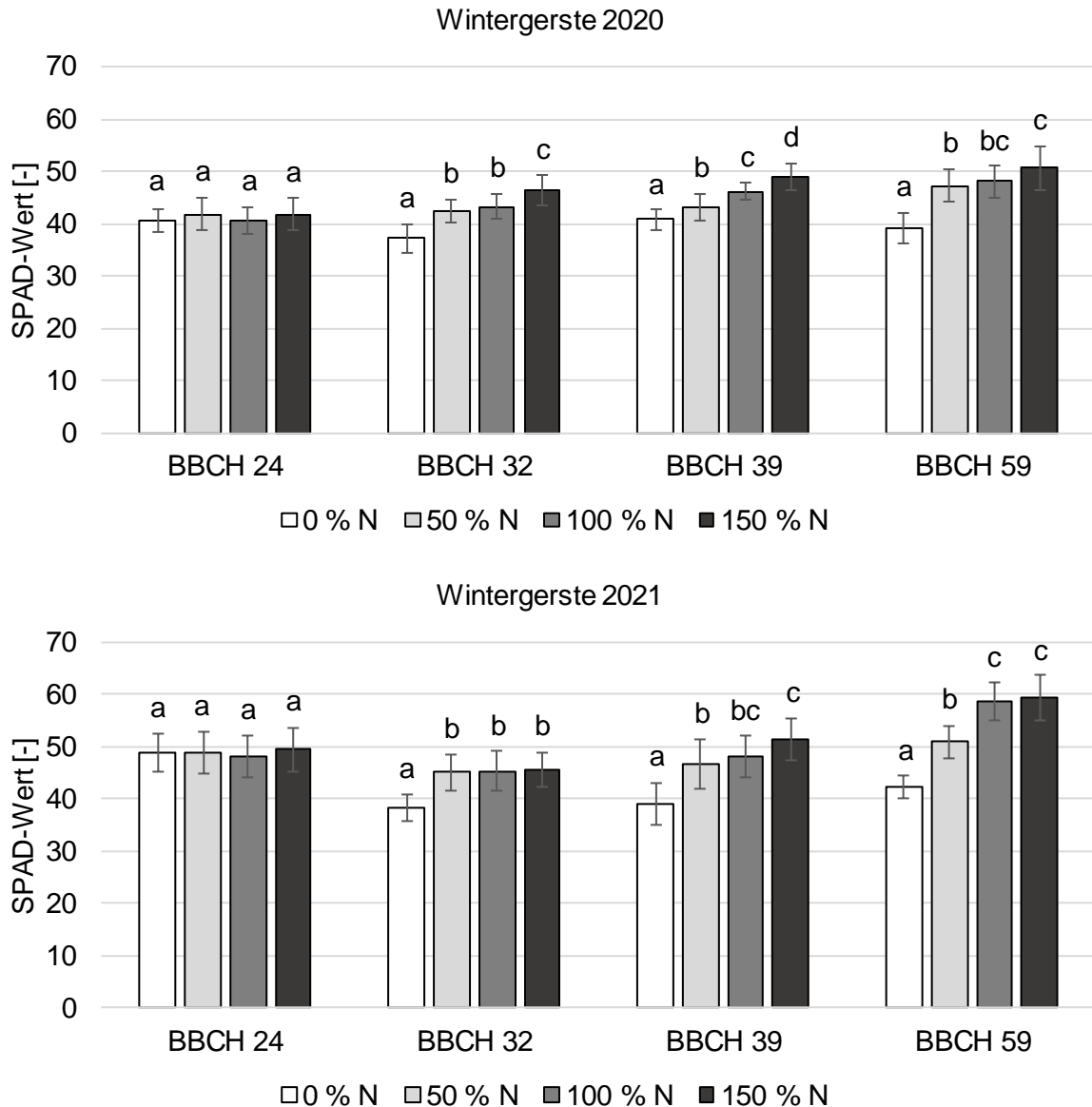


Abb. 4-32: SPAD-Werte von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 24 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N in den Versuchsjahren 2020 (oben) und 2021 (unten)

Die erhobenen SPAD-Werte des WW 21, sowie deren homogene Untergruppen zeigen analog zu WG eine geringe Anzahl signifikant unterschiedlicher N-Stufen (siehe Abb. 4-33). Neben der erneut hohen Streuung, sind vor allem die gegenläufigen Tendenzen der 150 % N-Stufe über die untersuchten Entwicklungsstadien zu nennen. Der SPAD-Wert dieser Variante bleibt in BBCH 13 und 39 gegenüber der 100 % N-Variante konstant, während der Mittelwert in BBCH 32 sinkt und in BBCH 59 zunimmt. Aufgrund der starken Streuung bei gleichzeitig geringer Spannweite der SPAD-Werte, sind die dargestellten Zusammenhänge als Tendenzen zu sehen. Eindeutige Aussagen zur Vergleichbarkeit von SPAD-Werten und TrueColor-Reflexionswerten können im Rahmen dieser Untersuchungen nicht gegeben werden.

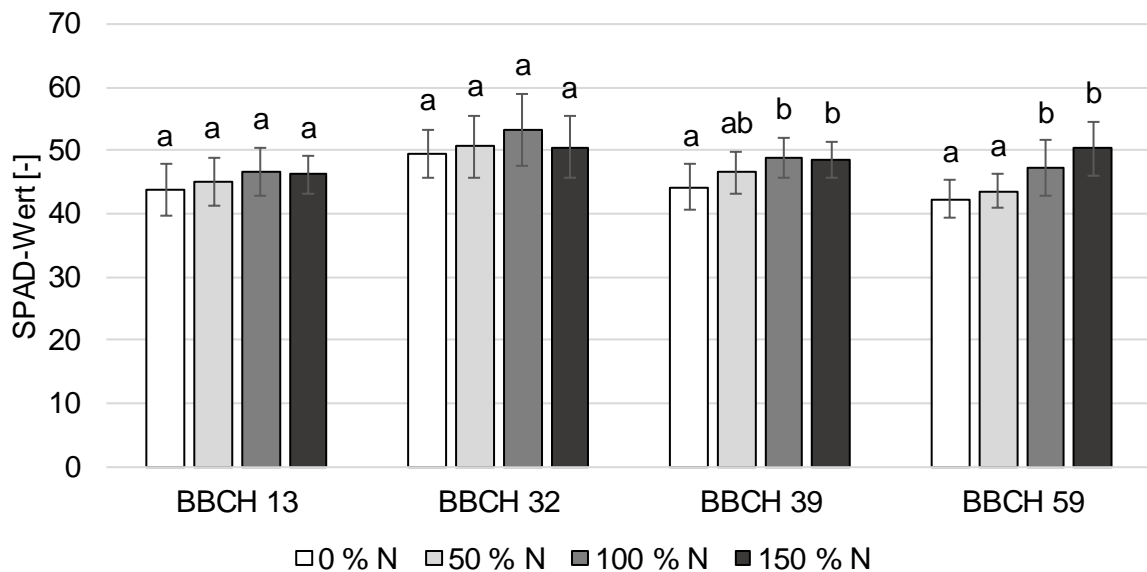


Abb. 4-33: SPAD-Werte von Wintergerste in den Entwicklungsstadien BBCH 24 bis 59 für die N-Stufen von 0 % N bis 150 % N im Versuchsjahr 2021

Die von Monje und Bugbee (1992) beschriebenen nichtlinearen Zusammenhänge zwischen den SPAD-Werten und dem Chlorophyll-Gehalt sind auf die dargestellten N-Stufen übertragbar. Die Mittelwertverläufe in BBCH 59 zeigen die stärkste Tendenz eines monoton steigenden Reflexionsverhaltens mit zunehmender N-Stufe. Während sich in BBCH 39 eine degressive Zunahme der Messwerte beobachten lässt, widerspricht der im Mittel abnehmende SPAD-Wert der 150 % N-Variante in BBCH 32 den übrigen Untersuchungsergebnissen. Analog zu den Versuchsergebnissen der WG ist eine eindeutige Klassifizierung der N-Stufen bei WW im Rahmen dieser Untersuchungen nicht möglich. Zur Eignungsbeurteilung sind weiterführende Untersuchungen notwendig, um den Einfluss des Versuchsjahres oder sortenbedingte Unregelmäßigkeiten ausschließen zu können.

Da die Versuchsanlage eine Vergleichbarkeit von SPAD-Werten und TrueColor-Reflexionswerten zulässt, sind die Zusammenhänge dieser beiden reflexionswertbasierten Messverfahren mit Hilfe der Korrelationskoeffizienten in Tab. 4-18 dargestellt. Unabhängig des Versuchsjahres, Entwicklungsstadiums oder Reflexionskanals sind durchweg positive Korrelationen zu verzeichnen. Dies stellt eine notwendige Bedingung plausibel erklärbarer Zusammenhänge dar. Als hinreichende Bedingung zur Bewertung vorhandener Zusammenhänge wird der Betrag der Korrelationskoeffizienten herangezogen. Hierzu können auf Basis der Ergebnisse von Tab. 4-18 nur begrenzt Aussagen getroffen werden. Wie zu erwarten, sind die zu BBCH 13 (WW) bzw. 24 (WG) gebildeten Korrelationskoeffizienten konstant niedrig. Dies ist durch die Verwendung des SPAD-Meters vor dem eigentlichen Einsatzzeitpunkt plausibel zu erklären und stellt kein Bewertungskriterium zur Eignung des TrueColor-Sensorarrays dar.

Unabhängig des Entwicklungsstadiums und der Kulturart, sind die Korrelationskoeffizienten zwischen den SPAD-Werten und dem b-Kanal am höchsten. Durchschnittlich leicht niedrigere

Korrelationen weisen die SPAD-Werte zum a-Kanal auf. Es folgen die Zusammenhänge zum L-Kanal, mit deutlichem Abstand gefolgt vom IR-Kanal.

Innerhalb des CIELab-Farbraums fallen die Zusammenhänge in BBCH 32 bei WG ($r > 0,88$) gegenüber WW ($r < 0,35$) deutlich höher aus. Dies ist in abgeschwächter Form ebenfalls in BBCH 59 zu beobachten.

Tab. 4-18: Korrelationskoeffizienten zwischen den SPAD-Werten sowie dem IR-, L-, a- und b-Kanal für Wintergerste und Winterweizen in den Versuchsjahren 2020 und 2021

	IR-Kanal			L-Kanal			a-Kanal			b-Kanal		
	WG 20	WG 21	WW 21	WG 20	WG 21	WW 21	WG 20	WG 21	WW 21	WG 20	WG 21	WW 21
BBCH 13/ 24	0,08	0,36	0,00	0,25	0,28	0,00	0,56	0,54	0,98	0,01	0,36	0,43
BBCH 32	0,64	0,11	0,43	0,96	0,98	0,26	0,88	0,94	0,37	0,96	0,95	0,35
BBCH 39	0,25	0,54	0,67	0,76	0,93	0,92	0,96	0,99	0,91	0,98	0,99	0,95
BBCH 59	0,19	0,56	0,86	0,90	0,84	0,58	0,99	0,90	0,66	0,98	0,96	0,73

4.3 Teil C: Vergleich zwischen den Reflexionskanälen und den Kornerträgen

Der in Kap. 3.3.3 beschriebene Versuchsaufbau umfasst 40 Parzellen, deren Kornertragsdaten die Basis der folgenden linearen Regressionsmodelle bilden. Von den mittels Parzellen-Mähdrescher beernteten Ertragsparzellen wurden die Erträge der ersten Fahrspur verwendet und eine Cluster-Bildung mit einer Breite von $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ durchgeführt, woraus fünf Ertragsniveaus resultieren. Zusammen mit den erfassten Referenzparametern sind die entsprechenden Regressionsmodelle je Entwicklungsstadium in Abb. 4-34 dargestellt.

Unabhängig von dem Referenzparameter wird anhand der Regressionsmodelle deutlich, dass die Zusammenhänge zum Kornertrag lediglich schwach ausgeprägt sind. Rückschlüsse auf den Kornertrag durch Messung vegetationsbegleitender Parameter sind im Rahmen dieser einjährigen Versuchsergebnisse nur im Einzelfall möglich. Im Vergleich zu den restlichen Referenzgrößen, weisen die SPAD-Werte in BBCH 32 ($R^2 = 0,886$) und 59 ($R^2 = 0,765$) die stärksten Zusammenhänge auf. In BBCH 32 ist mit $R^2 = 0,391$ ein schwacher Zusammenhang zur Pflanzenhöhe festzustellen. Derartige Zusammenhänge sind für die Ergebnisse des Pflanzenbedeckungsgrades nicht festzustellen. In Kap. 4.2.3 konnte gezeigt werden, dass durch unterschiedliche N-Versorgung eine Variation der Pflanzenbedeckung resultiert und daraus Abhängigkeiten bezüglich der Reflexionseigenschaften festgestellt werden können. Da derartig unterschiedliche Bedeckungsgrade im Rahmen der vorliegenden Versuchsdurchführung nicht festzustellen sind, kann von einer geringen Variation der N-Versorgung ausgegangen

werden. Im Rahmen des Versuchsdesigns erfolgte unabhängig von der Kompost-Zufuhr eine einheitlich betriebsübliche Düngung. Dies unterstützt die aufgrund des Bedeckungsgrades aufgestellte Hypothese der ausreichenden N-Versorgung.

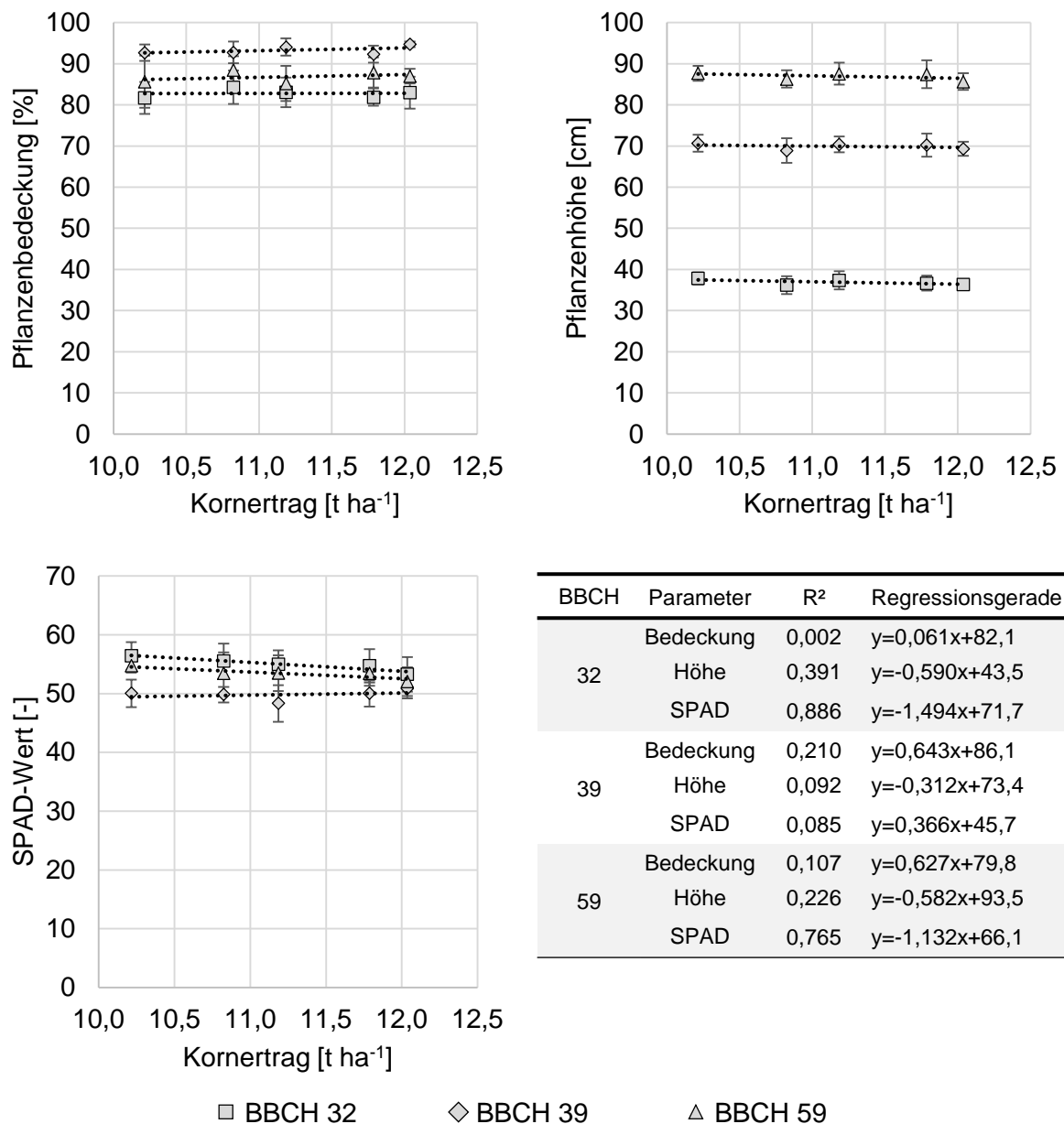


Abb. 4-34: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Kornertrag und Pflanzenbedeckung, Pflanzenhöhe sowie SPAD-Wert in Winterweizen

Im Rahmen des vorliegenden Ergebnisteils C bildet der Zusammenhang zwischen den Reflexionswerten und den Kornerträgen die wesentliche Zielgröße. Aus diesem Grund werden die Zusammenhänge zwischen den Reflexionswerten und den in Abb. 4-34 dargestellten Referenzparametern (Pflanzenbedeckung, Pflanzenhöhe, SPAD-Wert) nicht weiter analysiert. Die pflanzenbaulichen Ursachen der Ertragsbildung sind im Rahmen der vorliegenden Sensorentwicklung nicht relevant und können Schmittmann et al. (2021) entnommen werden. Die Erträge

erstrecken sich von $10,22 \text{ t ha}^{-1}$ bis $12,04 \text{ t ha}^{-1}$, woraus ein mittlerer Kornertrag von $11,21 \text{ t ha}^{-1}$ mit einer Spannweite von $1,82 \text{ t ha}^{-1}$ resultiert. Deutschlandweit lag der mittlere Kornertrag von Weizen im Jahr 2020 bei $7,88 \text{ t ha}^{-1}$ (Statistisches Bundesamt, 2021). Aufgrund des insgesamt überdurchschnittlichen Ertragsniveaus lassen die Ertragsdaten keine Rückschlüsse auf eine mangelhafte Pflanzenversorgung zu. Dies bestätigt die geringe Variation des Pflanzenbedeckungsgrades, sowie die schwachen Zusammenhänge dieses Pflanzenparameters hinsichtlich des Kornertrages (siehe Abb. 4-34).

Analog zu den geringen Unterschieden der Ertragsniveaus sowie der Referenzparameter, ist die Variation innerhalb der Reflexionswerte ebenfalls als gering einzustufen. Trotz konstanter Pflanzenbedeckung bei zunehmendem Kornertrag nehmen die Reflexionswerte des IR-Kanals ab. Dies widerspricht den Zusammenhängen zwischen Chlorophyll-Gehalt und IR-Reflexion von Pflanzenkompartimenten (Carlson & Ripley, 1997; Ferrio et al., 2005). Aus diesem Grund sind die in Abb. 4-35 dargestellten IR-Reflexionsverläufe als nicht plausibel zu bewerten. Zusätzlich fallen die IR-Reflexionswerte für Pflanzenbedeckungsgrade von mehr als 80 % zu niedrig aus (vgl. Modellversuch in Kap. 4.1.1). Analog zu den Ausführungen hinsichtlich der Pflanzenbedeckung in Kap. 4.2.3, sind aufgrund dieser Diskrepanzen auf Basis des IR-Kanals keine Aussagen zum Kornertrag möglich.

Mit Ausnahme der L-Reflexion in BBCH 32, weisen die Trendlinien dieses Kanals einen sinkenden Verlauf bei steigendem Kornertrag auf. Dieser Zusammenhang stimmt mit den Untersuchungen zur Pflanzenbedeckung der N-Steigerungsversuche überein (vgl. Kap. 4.2.3). Der konstante L-Werteverlauf zu BBCH 32 ist aufgrund des konstanten Pflanzenbedeckungsgrades sowie der konstanten Pflanzenhöhe in diesem Entwicklungsstadium ebenfalls als plausibel zu bewerten. Folglich reagiert der L-Kanal in diesem BBCH-Stadium nicht auf den abnehmenden Werteverlauf der SPAD-Werte.

Unabhängig vom BBCH-Stadium verlaufen die Trendlinien des a-Kanals mit zunehmendem Kornertragsniveau leicht ansteigend. Dies ist weder mit den konstanten Pflanzenbedeckungsgraden noch Pflanzenhöhen in Verbindung zu bringen. Die anhand des N-Steigerungsversuches ermittelten positiven Korrelationen zwischen den SPAD-Werten und a-Reflexionswerten (siehe Tab. 4-18), können durch die in Abb. 4-34 und Abb. 4-35 dargestellten Zusammenhänge nicht bestätigt werden.

Im Falle des b-Kanals weisen die Trendlinien in BBCH 32 und 59 gegenläufige Verläufe auf. Dies ist weder mit den Werteverläufen der Referenzparameter, noch mit den Ergebnissen der Kornerträge zu interpretieren. Analog zur a-Reflexion lassen sich die Ergebnisse aus den N-Steigerungsversuchen anhand dieser Anwendung nicht bestätigen.

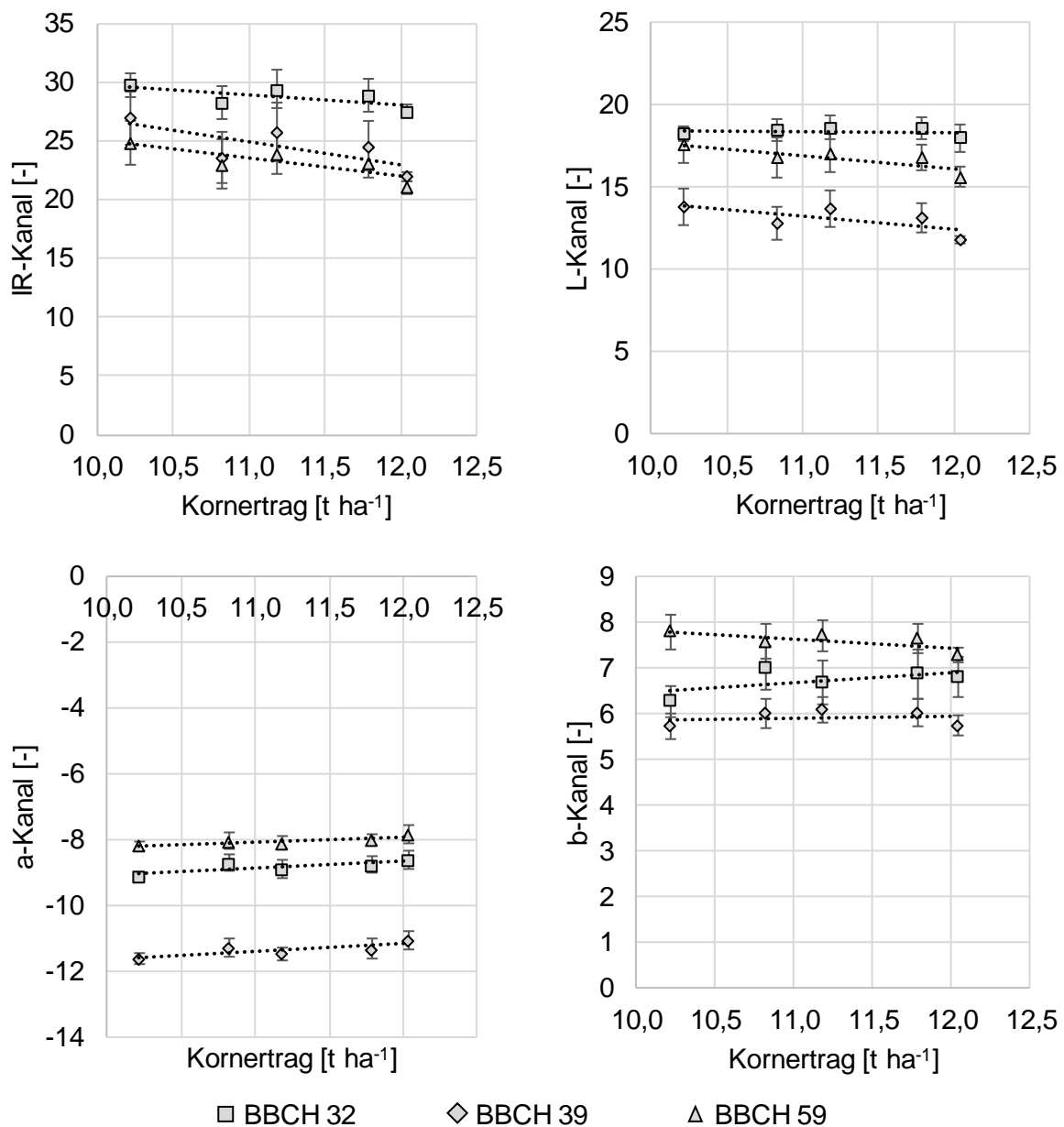


Abb. 4-35: Lineare Regressionsmodelle des Zusammenhangs zwischen Kornertrag und IR-, L-, a- und b-Kanal von Winterweizen mittels Cluster-Bildung mit einer Breite von 0,5 t ha⁻¹

Die in Tab. 4-19 zusammengefassten Regressionsmodelle der in Abb. 4-35 angegebenen Zusammenhänge bestätigt die geringen Übereinstimmungen anhand der niedrigen Bestimmtheitsmaße sowie unterschiedlicher Geradengleichungen.

Die in den Abb. 4-28 bis Abb. 4-31 dargestellten Regressionsmodelle zwischen den Reflexionskanälen und der N-Stufe von Winterweizen sind nicht mit den in Tab. 4-19 dargestellten Regressionsmodellen vergleichbar. Die Hypothese der Übertragbarkeit von Ergebnissen aus den zur Modellbildung genutzten N-Steigerungsversuchen auf die vorliegende praxisrelevante Versuchsanordnung lässt sich nicht bestätigen. Grund dafür ist die unzureichende Differenz

des Phänotyps innerhalb des Versuchszeitraums. Anhand des überdurchschnittlich hohen Kornertragsniveaus ist ein ausreichender Versorgungsgrad des Bestandes zu erkennen, der den Einsatz des Sensors zur teilflächenspezifischen Düngung im durchgeführten Zeitraum nicht erforderlich macht.

Tab. 4-19: Bestimmtheitsmaß sowie Regressionsgeradengleichung des Zusammenhangs zwischen Kornertrag und IR-, L-, a- und b-Kanal von Winterweizen mittels Cluster-Bildung mit einer Breite von 0,5 t ha⁻¹

BBCH	Kultur	R ²	Regressionsgerade
32	IR	0,433	$y = -0,806x + 37,8$
	L	0,045	$y = -0,074x + 19,2$
	a	0,630	$y = 0,208x - 11,2$
	b	0,352	$y = 0,225x + 4,2$
39	IR	0,562	$y = -1,953x + 46,5$
	L	0,490	$y = -0,794x + 22,0$
	a	0,693	$y = 0,244x - 14,1$
	b	0,016	$y = 0,029x + 5,6$
59	IR	0,693	$y = -1,591x + 41,0$
	L	0,667	$y = -0,797x + 25,7$
	a	0,766	$y = 0,149x - 9,7$
	b	0,538	$y = -0,197x + 9,8$

Im Rahmen der weiteren Sensorentwicklung wird zu Validierungszwecken empfohlen, diese Versuchsanlage erneut zu vermessen. Zum einen ist die Befahrbarkeit durch die angelegten Fahrspuren entlang der Versuchspartellen gegeben. Aufgrund der großflächigen Dimensionierung und des daraus resultierenden Zeitbedarfs für die Überfahrt, können Daten über das

zeitabhängige Verhalten der TrueColor-Sensorarrays ermittelt werden. Eine Funktionsüberprüfung der Hardware-Komponenten über den zeitlichen Rahmen gängiger Versuchsanlagen hinaus, ist dadurch möglich. Zum anderen erfolgen aufgrund der Applikation von Kompost langfristige Veränderungen hinsichtlich der Nährstoffversorgung durch biologische Umwandlungsprozesse im Boden (Schmittmann et al., 2021). Durch den beschriebenen Abgleich der Reflexionswerte mit den erhobenen Referenzparametern sind Aussagen zu Veränderungen des Versorgungszustandes der Pflanzen möglich.

4.4 Diskussion der Entwicklungsstände

– Einsatz des TrueColor-Sensorarrays zur Pflanzendiskriminierung

Die in der Landwirtschaft bisher durchgeführten ganzflächigen Verfahrensschritte werden nach Westwood et al. (2018) zunehmend durch pflanzenspezifische Prozesse abgelöst. Die Entwicklung eines Verfahrens zur Anwendung von TrueColor-Sensoren bei der Pflanzendiskriminierung ist aus dem daraus resultierenden Bedarf an entsprechenden technischen Systemen zur Erfüllung dieser Anforderungen begründet. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Pflanzendiskriminierung gliedern sich in die Teilbereiche der Pflanzendetektion (Unterscheidung von Pflanze und Boden) sowie der Pflanzendifferenzierung (Unterscheidung aufgrund des Phänotyps). Nach Wellhausen et al. (2020) dient die Pflanzendetektion zur Informationsgewinnung über die Pflanzenverteilung, woraus reduzierte Herbizidaufwandmengen resultieren können. Des Weiteren liefert die Pflanzendifferenzierung Informationen zur vorliegenden Pflanzenart und kann in Kombination mit einer geeigneten Applikationstechnik zu einer angepassten Herbizidauswahl führen.

Im Rahmen der Pflanzendetektion ist die reine Lokalisierung von Pflanzen durch das Prinzip der Chlorophyll-Fluoreszenz möglich. Durch den Chlorophyllgehalt der Blätter reflektiert gesunde Vegetation im Infrarot-Bereich stärker als im Rot-Bereich (Carlson & Ripley, 1997). Ein Nutzen dieses Prinzips kann die reduzierte Aufwendung von Totalherbiziden bei Anbauverfahren mit stark reduzierter mechanischer Bodenbearbeitung (Direktsaat-Verfahren) sein (Trimble, 2019). Auch die Reihenerkennung bei Systemen zur mechanischen Unkrautregulierung in Reihenkulturen erfordert eine Pflanzendetektion. Zur farbwertbasierten Pflanzendetektion ist nach Gai et al. (2020) die Verrechnung der Bildpixel anhand von Gewichtungsfunktionen notwendig, um eine Klassifizierung von Objekt (Pflanze) und Hintergrund (Boden) vornehmen zu können. Wie in Tab. 4-4 dargestellt, liefern die Rohdaten der a -Reflexionswerte bei 78,9 % der untersuchten Pflanzen ausreichende Farbunterschiede zur eindeutigen Pflanzendetektion. Zusätzliche Berechnungsschritte sind dazu nicht notwendig. Die Berechnung der euklidischen Farbdifferenz ΔE führt zu einer Detektionsrate von 97,4 % . Anhand der nach Schmittmann und Schulze Lammers (2017) erweiterten euklidischen Farbdifferenz wird die Detektionsrate durch Hinzunahme der IR-Reflexion auf 100 % gesteigert. Wie in Kap. 4.1.2.3 beschrieben, kann eine zweistufige Vorgehensweise den Auswertalgorithmus zur Pflanzendetektion beschleunigen. Im ersten Schritt erfolgt der Abgleich des gemessenen a -Reflexionswertes mit der ermittelten Spannweite der a -Reflexion des Bodens. Liegt die gemessene a -Reflexion innerhalb der Spannweite des Bodens, stellt ΔE_{IR} das Entscheidungskriterium zur

Pflanzendetektion dar. Nach aktuellem Entwicklungsstand ist dieser zweistufige Auswertalgorithmus mit den untersuchten Sensorarrays aufgrund der internen Datenübertragungsrate in Echtzeit durchführbar. Die einphasige Durchführung von Messung und Applikation (Online-Verfahren) gilt es zukünftig anhand von Feldversuchen zu erproben.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde die Eignung des Sensorarrays zur Pflanzendifferenzierung analog zur Vorgehensweise bei der Pflanzendetektion gewählt. In beiden Anwendungsfällen beruht die Entscheidungsfindung auf Auswertalgorithmen von Reflexionsdaten ohne bildgebende Verfahren. Im Gegensatz dazu bildet die Auswertung von Bildpixeln auf Basis bildgebender Messverfahren einen Großteil vergangener sowie aktueller Untersuchungen im Bereich der Phänotypisierung (Elstone et al., 2020; Ruiz-Ruiz et al., 2009; Tian & Slaughter, 1998; Wartenberg et al., 2005). Im Gegensatz zu den beim TrueColor-Sensor genutzten Echtfarbwerten, hängen die wesentlichen Herausforderungen mit der Fremdlichtabhängigkeit dieser Systeme zusammen. Aus diesem Grund sind statische Schwellenwertverfahren zur Pflanzendifferenzierung nach Ruiz-Ruiz et al. (2009) nicht geeignet. In Kap. 4.1.4.2 wurde gezeigt, wie die euklidische Farbdifferenz durch Hinzunahme der NIR-Reflexion und die geänderte Referenzbildung zur Pflanzendifferenzierung genutzt werden kann. Eine Kombination aus VIS- und NIR-Reflexion ist auch bei bildgebenden Verfahren Gegenstand aktueller Untersuchungen (Elstone et al., 2020). Daraus kann ein normierter Grünüberschuss errechnet werden, wodurch sich die Farbdifferenz der Pixel erhöht und statische Schwellenwertverfahren möglich sind (Laursen et al., 2016). Dies ist vergleichbar mit dem vorliegenden Auswertalgorithmus auf Basis von ΔE_{IR_Diff} . Aufgrund der quadrierten Summanden ist eine Verkleinerung dieses Terms nicht möglich, was zu einer gleichbleibenden oder größeren Farbdifferenz führt. Die Spannweite der Reflexionswerte innerhalb der untersuchten Entwicklungsstadien stellt den statischen Schwellenwert dar. Dadurch ist das Prinzip des statischen Schwellenwertverfahrens sowohl für pixelbasierte als auch echtfarbwertbasierte Auswertemethoden möglich. Für die echtfarbwertbasierte Auswertemethode mittels Sensorarray spricht der geringere Rechenaufwand.

Die Bewertung der korrekten Pflanzendifferenzierung erfolgt im Bereich des maschinellen Lernens mit Hilfe einer Wahrheitsmatrix (Souza et al., 2020). Diese Auswertungsform wurde in Kap. 4.1.4.3 auf die echtfarbwertbasierte Auswertemethode übertragen. Dabei wird die tatsächliche Differenzierbarkeit (vollständig unterschiedliche Spannweite der Reflexionswerte) mit der Differenzierungsentscheidung des Sensors (Analyse der statistischen Signifikanz) verglichen. Eine richtig positive Entscheidung wurde dann getroffen, wenn eine Pflanzenkombination innerhalb eines Reflexionskanals sowohl durch die Spannweite, als auch Signifikanz als differenzierbar bewertet wurde. Richtig negativ gelten die nicht differenzierbaren Pflanzenkombinationen, die durch beide Bewertungsmethoden als solche eingestuft wurden. Sowohl richtig positive als auch richtig negative Einträge der Wahrheitsmatrix werden im Rahmen dieser Auswertungsform gleichwertig als korrektes Ergebnis gewertet. Die beiden Kategorien haben bezogen auf alle relevanten Pflanzenkombinationen zusammen einen Anteil von 87,10 %. Diese Größenordnung liegt im Bereich der Auswertalgorithmen bildgebender Verfahren (Bawden et al., 2017; Souza et al., 2020).

Falsch positive Pflanzenkombinationen wurden mit Hilfe signifikanter Unterscheidung als differenzierbar eingestuft, sind aber auf Grund sich überschneidender Spannweiten nicht differenzierbar. Eine falsch positive Entscheidung wurde bei der Auswertung signifikanter Unterschiede in 9,68 % der Testergebnisse getroffen. Für diesen Fall ist die Herbizideinsparung gegenüber der korrekten Entscheidung geringer, die Unkrautbekämpfung würde aber zuverlässig funktionieren.

Als letzte Kategorie beinhalten falsch negative Differenzierungsentscheidungen diejenigen Pflanzenkombinationen, die durch das Spannweiten-Verfahren als differenzierbar ermittelt wurden, dies aber durch Überprüfung mittels signifikanter Unterschiede nicht bestätigt werden konnte. Die falsch negativen Entscheidungen zur Differenzierung stellen hingegen die kritische Kennzahl dar. In diesem Fall würde eine Herbizidapplikation nicht erfolgen, obwohl ein Unkraut vorhanden ist. Eine daraus resultierende Restverunkrautung ist nach Schäufele (1986) tolerierbar, da die Ertragsleistung erst ab einer gewissen Unkrautgröße durch Konkurrenz zu Licht, Wasser und Nährstoffen negativ beeinflusst ist. Deren Anteil ist mit 3,23 % am geringsten und bleibt unterhalb der tolerierten Fehlerwahrscheinlichkeit von 5 %.

Neben den beschriebenen Ansätzen zur Unkrauterkenntnis durch reflexionswertbasierte Messverfahren, kann durch koordinatengestützte Aussaatverfahren die Position der Kulturpflanze bei der Unkrautbekämpfung genutzt werden (Schmittmann et al., 2010; Schulze Lammer et al., 2017). Die Durchführbarkeit hängt zum einen von der Standgenauigkeit der Kulturpflanze ab, welche durch die Ablagegenauigkeit, die Variation der Abwurfkurven, Verrolleffekte und den nicht erektophilen Wuchs des Keimlings beeinflusst wird (Schmittmann et al., 2010). Zum anderen ist die Qualität der Zielort-Positionsbestimmung zur präzisen Pflanzendiskriminierung entscheidend (Griepentrog et al., 2005). Nach Schmittmann et al. (2010) wird die Zielgenauigkeit des abgelegten Saatguts mit ± 2 cm beziffert. Innerhalb dieser Toleranz hat die Positionsbestimmung zu erfolgen, was bei ausreichender Satellitenabdeckung mit einem GPS-System und Korrektursignal (RTK-GPS) möglich ist (Pohl et al., 2019). Werden die beschriebenen Randbedingungen erfüllt, stellt dies zur Pflanzendiskriminierung eine praktikable Alternative gegenüber optischen Sensorsystemen dar.

Alternativ zu den bisher diskutierten bodenbetriebenen Systemen, stellt die Verwendung optischer Messverfahren aus der Luft ein weiteres Forschungsfeld dar (Backes, 2004). Neben dem Einsatz von Drohnen wird auf satellitenbasierte Fernerkundungsaufnahmen zurückgegriffen (Jacobi et al., 2006). Durch multispektrale Analysen der Satellitenaufnahmen werden Informationen über die räumliche Verteilung von Pflanzen generiert, deren Auflösungsgenauigkeit gegenüber bodenbetriebenen Sensorsystemen deutlich niedriger ausfällt und eine Applikation im Online-Verfahren systembedingt nicht möglich ist (Manevski et al., 2011; Underwood et al., 2003). Bei Drohnen mit Kamerasystemen werden von der Sensorik und Aktorik divergente Anforderungen an die notwendige Flughöhe gestellt. Aufgrund der Kameraauflösung und des Luftstroms der Rotoren sind Mindestabstände zum Objekt einzuhalten, die im Gegensatz zu abdriftmindernden Applikationstechniken stehen. Zusätzlich schränken politische Reglementierungen bezüglich eines maximalen Startgewichts den Einsatz von Drohnen im Online-Verfahren weiter ein (Reger et al., 2018).

Insgesamt sind die vorgestellten Systeme zur Pflanzendiskriminierung von unterschiedlichen Rahmenbedingungen beeinflusst, von denen potentielle Einsatzmöglichkeiten abhängen. Technisch sowie pflanzenbaulich sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten der verschiedenen Systeme gilt es in zukünftigen Untersuchungen unter Berücksichtigung der jeweils gültigen Rahmenbedingungen zu eruieren, um Lösungsvorschläge zur pflanzenspezifischen Unkrautregulierung in der praktischen Anwendung liefern zu können.

– Einsatz des TrueColor-Sensorarrays zur teilschlagspezifischen Stickstoff-Düngung

Eine teilschlagspezifische Bestandesführung durch digitalisierte Lösungsansätze leistet nach Auernhammer (1999) einen wichtigen Beitrag zu einer ressourcen- und umweltschonenden Wirtschaftsweise. Algorithmen zur Stickstoffdüngung dienen der Umrechnung von Reflexionsmesswerten in Düngerapplikationsmengen. Sowohl aufgrund biotischer als auch abiotischer Faktoren können variable Düngermengen zur bedarfsgerechten Pflanzenernährung notwendig sein. Daher ist nach Drücker (2016) eine Kalibrierung der praxisrelevanten Sensorsysteme im Voraus der Düngerapplikation erforderlich, um quantifizierbare Düngeempfehlungen geben zu können. Die Variation der Düngermenge erfolgt bei konventionellen N-Sensoren auf Reflexionsmessungen, deren Messfläche herstellerabhängig zwischen 5 % und 17 % der Arbeitsbreite beträgt (Drücker, 2016). Durch die Kaskadierbarkeit des TrueColor-Sensorarrays lässt sich die Messfläche bis zur vollständigen Abdeckung der Arbeitsbreite erweitern. Die daraus resultierende gesteigerte Messauflösung kann bei geeigneter Applikationstechnik zu einer kleinräumigeren Variation der N-Menge genutzt werden.

Gegenstand aktueller Untersuchungen ist die pflanzenindividuelle Bestimmung der Nährstoffversorgung. Diverse Modellierungsansätze zur Untersuchung der N-Versorgung basieren auf der Spektralanalyse diskreter Wellenlängen aus dem Reflexionsspektrum der Pflanzenzellen (Adhikari et al., 2020; Diacono et al., 2014). Nach Chen et al. (2010), Erdle et al. (2011), Westermeier und Maidl (2019) hängt die Güte der daraus berechneten Indizes sowohl von der Kulturart als auch den Wachstumsbedingungen in den Versuchsjahren ab. Aus diesem Grund sind die mathematischen Zusammenhänge zwischen den Reflexionswerten und der N-Versorgung an diese Faktoren anzupassen. Eine hinreichende Güte wird durch Verwendung unterschiedlicher diskreter Wellenlängen (Daughtry, 2000) sowie empirisch bestimmter Anpassungsfaktoren erreicht (Chen et al., 2010; Haboudane et al., 2002). Da ein solcher Ansatz nur bedingt auf bestehende praxisrelevante Applikationstechniken anwendbar ist, erfolgte im Rahmen dieser Untersuchungen in Anlehnung an Auernhammer (1999) ein Abgleich der spektralen Messwerte mit den pflanzenbaulichen Parametern. Im Gegensatz zur pflanzenindividuellen Entscheidungsfindung bei der Pflanzendiskriminierung, werden Entscheidungen zur bedarfsgerechten N-Düngung auf teilschlagspezifischer Ebene durchgeführt. Neben dem Phänotyp der Einzelpflanze spielt bei dieser Anwendung vor allem das Erscheinungsbild des Pflanzenbestandes in Form der Bestandesdichte eine entscheidende Rolle, um quantifizierbare Aussagen zur Eignung des Sensorarrays hinsichtlich einer teilschlagspezifischen Düngung geben zu können. Die erhobenen Referenzparameter Frischmasse und Pflanzenbedeckung können auch über die Bestandesdichte abgeleitet werden. Sowohl die Frischmasse als auch der Bedeckungsgrad haben nach Padilla et al. (2019) einen Einfluss auf die Einschätzung des Pflanzenzustandes und damit auf den zu erwartenden Ertrag. Häufig geschieht die

Ertragsabschätzung erst während des Ernteprozesses. Eine davon unabhängige Abschätzung im Voraus lässt die Möglichkeit einer angepassten Strategie für die laufende Anbauphase offen (Ehlert et al., 2003; Gianquinto et al., 2011). Im Gegensatz zur pflanzenindividuellen Betrachtung können diese Synergieeffekte durch die in Kap. 4.2.3 und 4.2.4 vorgestellte Auswertungsform genutzt werden.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen bezüglich der Pflanzendiskriminierung, bilden die Reflexionswerte des IR-Kanals keinen der erhobenen Referenzparameter zur N-Düngung mit ausreichender Güte ab. Aus der Literatur ist eine steigende NIR-Reflexion bei zunehmendem Chlorophyllanteil bekannt (Nelson & Yocum, 2006; Reckleben, 2014). Auch die Untersuchungen von Zheng et al. (2015) zeigen mit $r = 0,68$ positive Korrelationen zwischen der Pflanzenbedeckung und der NIR-Reflexion. Während dies im Rahmen von statischen Voruntersuchungen mit einer Korrelation von $r = 0,990$ eindeutig bestätigt werden konnte (Tab. 4-1 in Kap. 4.1.1), sind derartige Zusammenhänge bei den dynamischen Messwertaufnahmen nicht festzustellen. Diese Diskrepanz gilt es in zukünftigen Versuchsdurchführungen zu untersuchen, da ein Ausfall des IR-Kanals während der Feldversuchsdurchführung vermutet wird.

Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,977$ kann ein starker Zusammenhang zwischen dem L-Kanal und der Pflanzenbedeckung von Winterweizen nachgewiesen werden. Informationen über die Luminanz sind den Reflexionswerten des CIELab-Farbraums vorbehalten und stellen einen Mehrwert gegenüber Auswertelgorithmen auf Basis von Spektralanalysen dar. Nach Ganesan et al. (2010) ähnelt die Farbdarstellung unter Berücksichtigung der Helligkeit dem Wahrnehmungsverhalten des menschlichen Auges. Nach Schmittmann und Schulze Lammer (2017) ist die Luminanz abhängig von der Blattstellung. Durch die Übertragung dieses phänotypischen Merkmals auf die N-Düngung, kann der L-Kanal anhand der vorliegenden Zusammenhänge zur Pflanzenbedeckung (Kap. 4.2.3) zur reflexionswertbasierten Bestandesbonitur bezüglich der N-Versorgung als geeignet bewertet werden.

Die bezüglich des L-Kanals diskutierten Zusammenhänge zur Pflanzenbedeckung sind unabhängig der untersuchten Entwicklungsstadien gültig. Dies lässt sich auf den a-Kanal nicht übertragen, weshalb entwicklungspezifische Regressionsmodelle verwendet werden. Innerhalb der untersuchten Entwicklungsstadien liegen die Zusammenhänge zwischen der Pflanzenbedeckung und dem a-Kanal (Rot-Grün-Achse) mit $R^2 > 0,96$ in einem sehr hohen Bereich und damit deutlich oberhalb des von Zheng et al. (2015) nachgewiesenen Zusammenhangs zwischen der Pflanzenbedeckung und dem roten Wellenlängenbereich ($r = -0,724$). Mit Werten zwischen $r = -0,82$ und $r = -1,00$ sind die Korrelationen zwischen der Frischmasse und dem a-Kanal ebenfalls auf einem hohen Niveau (Tab. 4-16). Gleiches gilt für die in Abb. 4-30 dargestellten Zusammenhänge bezüglich der N-Stufe. Mit Ausnahme der Zusammenhänge zur Pflanzenbedeckung gelten die Regressionsmodelle unabhängig von dem Entwicklungsstadium, der Pflanzenart oder dem Versuchsjahr, wodurch die Eignung des a-Kanals als hoch bewertet werden kann.

Im Gegensatz zur unterdurchschnittlichen Eignung des b-Kanals hinsichtlich der Pflanzendiskriminierung, weist dieser Reflexionskanal im Anwendungsbereich der N-Düngung überdurch-

schnittlich hohes Potential auf. Neben starken Zusammenhängen bezüglich der Pflanzenbedeckung mit $R^2 = 0,931$ (Abb. 4-22), Frischmasse (Tab. 4-16) und Pflanzenhöhe (Tab. 4-17), weist der b-Kanal mit $R^2 = 0,736$ bis $R^2 = 0,983$ (Abb. 4-31) sehr hohe Bestimmtheitsmaße bezüglich der N-Stufe auf. Im Verhältnis zum a-Kanal fallen die Abweichungen der Reflexionswerte zwischen den Entwicklungsstadien geringer aus, sodass die Parameter der Regressionsgeraden (Steigung und y-Achsenabschnitt) homogener ausfallen. Dies ist zur Implementierung in praktische Anwendungen gewünscht, da es für eine bessere Übertragbarkeit der Regressionsmodelle zwischen den Entwicklungsstadien sorgt und die Auswertalgorithmen robuster gegenüber unterschiedlichen Beständen machen kann.

Die beschriebene Analyse zur Beurteilung der Eignung hinsichtlich der N-Düngung zeigt, dass die vom Sensorarray aufgenommenen Reflexionswerte des CIELab-Farbraums für eine derartige Anwendung geeignet sind. Die Reflexionsaufnahmen des IR-Kanals liefern zum Zeitpunkt der Untersuchungen keine aussagekräftigen Ergebnisse, die zur teilschlagspezifischen Düngung angewendet werden können. Da die generelle Funktionalität zwischen Chlorophyll-Gehalt und NIR-Reflexion anhand von Vorversuchen gezeigt werden konnte, sind die Ursachen für den Kanalausfall im anwendungsspezifischen Kontext dynamischer Feldversuche zu untersuchen. Ein geeigneter Versuchsaufbau zur Untersuchung der Funktionsfähigkeit des IR-Kanals könnte in Anlehnung an die Untersuchungen von Stettmer et al. (2021) erfolgen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Eignung von TrueColor-Sensoren zur Pflanzendiskriminierung sowie Stickstoff-Düngung konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden. Zur Pflanzendiskriminierung wurden repräsentative Unkrautarten im Gewächshaus angezogen. Die Reflexionsmessungen der vereinzelt Pflanzen erfolgten in fortschreitenden Entwicklungsstadien. Reproduzierbare Messbedingungen wurden durch die Verwendung eines Stativs mit integriertem Positionslaser geschaffen. In Abhängigkeit der Pflanzenart und des Entwicklungsstadiums ist eine Pflanzendetektion mit Hilfe der a-Reflexion bei 78,9 % der untersuchten Objekte möglich. Die Berechnung der euklidischen Farbdifferenz ΔE führt zu einer Detektionsrate von 97,4 %. Durch Hinzunahme der IR-Reflexion zur Berechnung der modifizierten euklidischen Farbdifferenz ΔE_{IR} lässt sich die Detektionsrate des TrueColor-Sensors für die untersuchten Pflanzenarten und Entwicklungsstadien auf 100 % steigern.

Bei der Pflanzendifferenzierung erfolgt die Beurteilung über die Differenzierungsrate in Abhängigkeit der untersuchten Kulturpflanze. Zuckerrüben bis BBCH 12 sind mit Hilfe der modifizierten euklidischen Farbdifferenz ΔE_{Diff} von 93,5 % der untersuchten Unkräuter differenzierbar. Durch Hinzunahme der IR-Reflexion lässt sich die Differenzierungsrate nicht steigern. Aufgrund der zunehmenden Blattfläche ist eine vollständige Differenzierbarkeit der Zuckerrübe ab BBCH 14 möglich. Eine vollständige Differenzierbarkeit gilt für Soja bereits ab BBCH 12 und Mais ab BBCH 13.

Im Rahmen der dynamischen Reflexionswertaufnahmen zur N-Düngung weisen die Kanäle des CIELab-Farbraums durchweg starke Zusammenhänge bezüglich der N-Stufe sowie den erhobenen Referenzparametern auf. Über die untersuchten Pflanzenarten und Entwicklungsstadien hinweg, weist der L-Kanal bezüglich der N-Stufe ein durchschnittliches Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,764$ auf. Der a-Kanal kann aufgrund eines durchschnittlichen Bestimmtheitsmaßes von $R^2 = 0,835$ gegenüber dem L-Kanal als besser geeignet bezeichnet werden. Mit durchschnittlich $R^2 = 0,871$ ist der Zusammenhang zwischen der b-Reflexion und den N-Stufen am höchsten. Zusätzlich weisen die Reflexionswerte dieses Kanals die geringsten Differenzen in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums auf. Aufgrund zweier Versuchsjahre mit deutlich unterschiedlicher Witterung sind ebenfalls Rückschlüsse zur Abhängigkeit auf äußere Einflüsse möglich. Die Verwendung des Sensors ist bei Beständen mit Trockenstresssymptomen aufgrund von Blattverfärbungen nicht zu empfehlen. Da die Stickstoff-Aufnahme der Pflanzen unter trockenen Witterungsbedingungen eingeschränkt stattfindet, sollte dies unter pflanzenbaulichen Gesichtspunkten bei der Düngerapplikation berücksichtigt werden. Eine Unterscheidung zwischen Nährstoffmangel- und Trockenstresssymptomen ist anhand des Phänotyps mit Hilfe der reflexionswertbasierten Auswertalgorithmen nicht eindeutig möglich.

Für den IR-Kanal können keine eindeutigen Aussagen hinsichtlich der Eignung zur N-Düngung getroffen werden. Grund dafür sind widersprüchliche Zusammenhänge zwischen der Pflanzenbedeckung und den aufgezeichneten Reflexionswerten. Da die Funktionsfähigkeit durch Voruntersuchungen überprüft wurde, ist von einem temporären Ausfall des IR-Kanals auszugehen. Eine abschließende Eignungsbeurteilung kann anhand des aktuellen Entwicklungsstands nicht gegeben werden und bedarf weiterer Untersuchungen.

Die Kombination dieser beiden Anwendungsgebiete stellt gegenüber marktüblichen Sensoren eine technische Neuentwicklung dar. Eine duale Anwendung wurde mit bestehenden Sensoren bisher nicht erreicht und kann einen weiteren Anreiz zur Marktetablierung sensorbasierter Pflanzenschutztechnik schaffen. Gegenüber der Anschaffung von zwei getrennten Sensorsystemen weist der Einsatz eines Dualsensors diverses Einsparpotential auf. Hinsichtlich des Herstellungsprozesses kann die Reduktion technischer Komponenten einen Beitrag leisten, um die aktuellen Folgen der vorherrschenden Lieferengpässe abzuschwächen. Darüber hinaus können sich für den Anwender durch eine erweiterte Systemauslastung Vorteile bezüglich der Amortisationszeit ergeben.

Neben den erwähnten ökonomischen Aspekten sind darüber hinaus auch ökologische Vorteile erwähnenswert. Nitrat-Belastungen im Grundwasser können aufgrund einer überschüssigen Stickstoff-Düngung auftreten und durch eine sensorgestützte bedarfsgerechte Pflanzenernährung reduziert werden. Gleichzeitig stellt eine ausreichende Pflanzenversorgung die Bereitstellung von Lebensmitteln durch ein konstantes Ertragsniveau sicher. Durch die pflanzenindividuelle Unkrautregulierung wird die Konkurrenz der Unkräuter gegenüber den Nutzpflanzen bezüglich Licht, Wasser und Nährstoffen reduziert. Dies stellt eine weitere Maßnahme zur Ertragssicherung in Kombination mit einer reduzierten Herbizidaufwandmenge dar.

Insgesamt stellt das untersuchte Sensorarray eine geeignete Alternative gegenüber bildgebenden Sensoren dar. Die Auswertelgorithmen zur Pflanzendiskriminierung gilt es im Rahmen zukünftiger Untersuchungen bei dynamischen Feldversuchen zu validieren. Hinsichtlich der N-Düngung sind die Auswertelgorithmen um die Kombination der Reflexionskanäle zu erweitern. Des Weiteren sollte eine Validierung des IR-Kanals erfolgen, um die phänotypischen Informationen dieses Wellenlängenbereichs in die Auswertung einzubeziehen. Die Hinzunahme weiterer Spektralkanäle könnte die Eignung zur Beurteilung der N-Versorgung weiter steigern. Die Verwendung des plasmonischen Effekts könnte aufgrund niedriger Herstellungskosten eine geeignete Alternative zur gegenwärtigen Technologie darstellen. Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojekts werden die Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit genutzt, um anhand von 15 diskreten Wellenlängen multispektrale Auswertelgorithmen zur Pflanzendiskriminierung sowie N-Düngung zu entwickeln. Eine wesentliche Herausforderung für die Nutzung des plasmonischen Effektes stellt das beim TrueColor-Sensor vorhandene fremdlichtunabhängige Messprinzip dar, welches es in zukünftigen Arbeitsschritten zu entwickeln gilt.

6 Literaturverzeichnis

- Adhikari, R., Li, C., Kalbaugh, K. & Nemali, K. (2020). A low-cost smartphone controlled sensor based on image analysis for estimating whole-plant tissue nitrogen (N) content in floriculture crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, 105–173. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105173>
- Agricon, F. (2021). *Precision Farming mit Satellit oder Sensor?* <https://www.agricon.de/aktuelles/blog/2019/07/22/precision-farming-mit-satellit-oder-sensor>, zuletzt geprüft: 05.07.2022
- Alcoz, M. M., Hons, F. M. & Haby, V. A. (1993). Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil nitrogen. *Agronomy*, 85(6), 1198–1203. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500060020x>
- Amazonen-Werke. (2017). *Anhängespritze UX AmaSpot: mit intelligentem Sensor-Düsen-System zur Reduzierung der Aufwandmengen im Pflanzenschutz*. Hasbergen-Gaste, Deutschland. Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG.
- Arregui, L. M. & Quemada, M. (2008). Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions. *Agronomy Journal*, 100(2), 277–284. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0187>
- Auernhammer, H. (1999). Informationssystem Kleinräumige Bestandesführung Dürnast. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.15150/LT.1999.2214> (214–215 Seiten / LANDTECHNIK, Bd. 54 Nr. 4 (1999) / LANDTECHNIK, Bd. 54 Nr. 4 (1999).
- Auernhammer, H. (2001). Precision farming — the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1-3), 31–43. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00153-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00153-8)
- Backes, M. B. (2004). *Methodische Probleme bei der Erstellung von Unkrautverteilungskarten mit Geoinformationssystemen (GIS)* [Dissertation]. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Basso, B., Ritchie, J. T., Cammarano, D. & Sartori, L. (2011). A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. *European Journal of Agronomy*, 35(4), 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.06.004>
- Bawden, O., Kulk, J., Russell, R., McCool, C., English, A., Dayoub, F., Lehnert, C. & Perez, T. (2017). Robot for weed species plant-specific management. *Journal of Field Robotics*, 34(6), 1179–1199. <https://doi.org/10.1002/rob.21727>
- Beyerer, J., Puente León, F. & Frese, C. (2012). *Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23966-3>
- Bilberry. (2020). *Intelligent Agriculture Technology for a better Environment*. <https://bilberry.io>, zuletzt geprüft: 05.07.2022
- Bioucas-Dias, J. M., Plaza, A., Dobigeon, N., Parente, M., Du, Q., Gader, P. & Chanussot, J. (2012). Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(2), 354–379. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2194696>

- Bontsema, J., Griff, T. & Pleijsier, K. (1991). Mechanical weed control in sugar beet growing: The detection of a plant in a row. *IFAC Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*, 24(11), 207–211. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-041273-3.50041-0>
- Bosch, J. (1987). Der Einfluß einiger dominanter Ackerunkräuter auf Nutz- und Schadarthropoden in einem Zuckerrübenfeld. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 94(4), 398–408.
- Burke, B., Jorden, P. & Vu, P. (2005). CCD technology. *Experimental Astronomy*(19), 69–102.
- Cameron, K. C., Di, H. J. & Moir, J. L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*, 162(2), 145–173. <https://doi.org/10.1111/aab.12014>
- Campbell, E. G. (1923). What is a weed? *Science*, 58(1490), 50.
- Carlson, T. N. & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Chen, P., Haboudane, D., Tremblay, N., Wang, J., Vigneault, P. & Li, B. (2010). New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 1987–1997. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.006>
- CKA. (2020a). *Standort Campus Klein-Altendorf: Boden*. https://www.cka.uni-bonn.de/standort/copy_of_boden, zuletzt geprüft: 05.07.2022
- CKA. (2020b). *Standort Campus Klein-Altendorf: Klima*. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. <https://www.cka.uni-bonn.de/standort/Klima>, zuletzt geprüft: 05.07.2022
- Coenenberg, H. H., Homburg, H. & Ziems, H. (1977). Tastvorrichtung zur Seitenführung einer Erntemaschine. Patentschrift DE2705491C2.
- Daughtry, C. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74(2), 229–239. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9)
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.). (2019). *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Presse - Deutscher Wetterdienst zur Pflanzenentwicklung im Sommer 2019*. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2019/20190926_agrarwetter_sommer2019_news.html, zuletzt geprüft: 07.07.2020
- Deutsches Institut für Normung (10.2017). *Farbmessung - Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung* (Norm DIN 5033-1). Berlin. Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung (06.2018). *Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung* (Norm DIN EN 12665). Berlin. Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung (04.2019). *Farbmessung - Teil 4: CIE_1976 L*a*b* Farbraum* (DIN EN ISO/CIE 11664-4). Berlin. Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung (11.2021). *Farbmessung - Teil 2: CIE Normlichtarten* (Norm DIN EN ISO/CIE 11664-2). Berlin. Beuth Verlag.

- Diacono, M., Castrignanò, A., Vitti, C., Stellacci, A. M., Marino, L., Coccozza, C., Benedetto, D. de, Troccoli, A., Rubino, P. & Ventrella, D. (2014). An approach for assessing the effects of site-specific fertilization on crop growth and yield of durum wheat in organic agriculture. *Precision Agriculture*, 15(5), 479–498. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9347-8>
- Dicke, D. (2005). *Lenkung teilschlagspezifischer Unkrautkontrollverfahren unter Berücksichtigung der Populationsdynamik von Unkräutern mit computergestützten Modellen* [Dissertation]. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Diekhans, N. (1998). Automatisch lenkbare Erntemaschine(EP0878121A1).
- Drücker, H. (Hrsg.). (2016). *KTBL-Heft: Bd. 113. Precision Farming: Sensorgestützte Stickstoffdüngung*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V., Darmstadt.
- Ebner, M. (2007). *Color constancy. Wiley-IS&T series in imaging science and technology*. John Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470510490>
- Ehlert, D. & Dammer, K.-H. (2006). Widescale testing of the Crop-meter for site-specific farming. *Precision Agriculture*, 7, 101–115. <https://doi.org/10.1007/s11119-006-9003-z>
- Ehlert, D., Hammen, V. & Adamek, R. (2003). On-line sensor pendulum-meter for determination of plant mass. *Precision Agriculture*, 4(2), 139–148. <https://doi.org/10.1023/A:1024553104963>
- Ehlert, D., Horn, H.-J. & Adamek, R. (2008). Measuring crop biomass density by laser triangulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(2), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.09.013>
- Eilbote (2021). "Bewährtes neu definiert": Relaunch nach 14 Jahren. *eilbote*, 69(42), 24–25.
- Elstone, L., How, K. Y., Brodie, S., Ghazali, M. Z., Heath, W. P. & Grieve, B. (2020). High speed crop and weed identification in lettuce fields for precision weeding. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(455), 1–15.
- Erdle, K., Mistele, B. & Schmidhalter, U. (2011). Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Research*, 124(1), 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.007>
- Eßer, C. (2020). Unkrautbekämpfung vorerst gesichert. *Zuckerrübenjournal*, 9(1/2020), S. 16–18.
- Evans, J. A., Tranel, P. J., Hager, A. G., Schutte, B., Wu, C., Chatham, L. A. & Davis, A. S. (2016). Managing the evolution of herbicide resistance. *Pest Management Science*, 72(1), 74–80. <https://doi.org/10.1002/ps.4009>
- Fender, F., Hanneken, M., Linz, A., Ruckelshausen, A. & Spicer, M. (2005). *Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung* [Paper]. Fachhochschule Osnabrück, Osnabrück.
- Fennimore, S. A. & Cutulle, M. (2019). Robotic weeders can improve weed control options for specialty crops. *Pest Management Science*, 75(7), 1767–1774. <https://doi.org/10.1002/ps.5337>
- Ferrio, J. P., Villegas, D., Zarco, J., Aparicio, N., Araus, J. L. & Royo, C. (2005). Assessment of durum wheat yield using visible and near-infrared reflectance spectra of canopies. *Field Crops Research*, 94(2-3), 126–148. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.12.002>

- Gai, J., Tang, L. & Steward, B. L. (2020). Automated crop plant detection based on the fusion of color and depth images for robotic weed control. *Journal of Field Robotics*, 37(1), 35–52. <https://doi.org/10.1002/rob.21897>
- Ganesan, P., Rajini, V. & Rajkumar, R. I. (Hrsg.) (2010). *International Conference on Emerging Trends in Robotics and Communication Technologies (INTERACT), 2010: 3 - 5 Dec. 2010, Chennai, India.*
- Gegenfurtner, K. R. (2012). Farbwahrnehmung und ihre Störungen. In H.-O. Karnath & P. Thier (Hrsg.), *Kognitive Neurowissenschaften* (S. 45–52). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25527-4_4
- Gehring, K. & Müllleder, N. (2004). Vergleichende Bewertung von Liberty Link und Roundup Ready zur Bekämpfung von Problemunkräutern in Mais. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 111(Sonderheft XIX), 855–862.
- Gerhards, R. (1998). *Verfahren zur teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle* [Habilitation]. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Gerhards, R. & Christensen, S. (2003). Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley. *Weed Research*, 43(6), 385–392. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00349.x>
- Gianquinto, G., Fecondini, M., Mezzetti, M. & Orsini, F. (2010). Steering nitrogen fertilisation by means of portable chlorophyll meter reduces nitrogen input and improves quality of fertigated cantaloupe (*Cucumis melo* L. var. *cantalupensis* Naud.). *Journal of the science of food and agriculture*, 90(3), 482–493. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3843>
- Gianquinto, G., Orsini, F., Sambo, P. & D'Urzo, M. P. (2011). The use of diagnostic optical tools to assess nitrogen status and to guide fertilization of vegetables. *HortTechnology*, 21(3), 287–292. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.21.3.287>
- Gobor, Z. (2007). *Development of a novel mechatronic system for mechanical weed control of the intra-row area in row crops based on detection of single plants and adequate controlling of the hoeing tool in real-time* [Dissertation]. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Graeber, E. (1970). Control system for the direction of movement of agricultural machines. Patentschrift US000003550362A.
- Griepentrog, H. W., Nørreemark, M. & Nielsen, J. (Hrsg.) (2006). *Autonomous intra-row rotor weeding based on GPS. 16. CIGR world congress, Bonn.*
- Griepentrog, H. W., Nørreemark, M., Nielsen, H. & Blackmore, B. S. (2005). Seed mapping of sugar beet. *Precision Agriculture*, 6(2), 157–165. <https://doi.org/10.1007/s11119-005-1032-5>
- Griepentrog, H. W., Ruckelshausen, A., Jørgensen, R. N. & Lund, I. (2010). Autonomous systems for plant protection. In E.-C. Oerke (Hrsg.), *Precision crop protection - the challenge and use of heterogeneity* (S. 323–334). Springer, Berlin, Germany. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9_20
- Guerrero, A., Neve, S. de & Mouazen, A. M. (2021). Data fusion approach for map-based variable-rate nitrogen fertilization in barley and wheat. *Soil and Tillage Research*, 205, 104789. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104789>

- Guyer, D. E., Miles, G. E., Schreiber, M. M., Mitchell, O. R. & Vanderbilt, V. C. (1986). Machine vision and image processing for plant identification. *Transactions of the ASAE*, 29(6), 1500–1507. <https://doi.org/10.13031/2013.30344>
- Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J. & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81(2-3), 416–426. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4)
- Hedley, C. (2015). The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(1), 12–19. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6734>
- Hemming, J., Jong, H. de, Struik, L., van Meer, J. & van Henten, E. J. (Hrsg.) (2018). *Field performance evaluation method for a machine vision based intra row hoeing machine*. Wageningen University & Research.
- Jacobi, J., Backes, M., Kühbauch, W. & Plümer, L. (2006). Identifikation von Unkräutern in Zuckerrüben anhand spektraler Reflexionsunterschiede in Fernerkundungsaufnahmen. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 241-248.
- Kendall, S. L., Storer, K. & Berry, P. M. (2017). Measuring canopy size and nitrogen content in oilseed rape for variable plant growth regulator and nitrogen fertiliser application. *Advances in Animal Biosciences*, 8(2), 299–302. <https://doi.org/10.1017/S2040470017000875>
- Klein, F., Citerne, S. & Jacquier, P. (2015). Pneumatische Verteilmaschine. Patentschrift DE 10 2013 014 386 A1.
- Kowalewsky, H.-H. & Scheufler, B. (2019). Düngung: Ausbringung von Mineraldüngern mit Pneumatikstreuern. In K. Köller & O. Hensel (Hrsg.), *Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion* (1. Aufl., S. 121). Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, Deutschland.
- Lang, H. (1998). Color Displays. In K. Nassau (Hrsg.), *Azimuth (Amsterdam, Netherlands): v. 1. Color for science, art and technology* (Bd. 1, S. 423–472). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1387-6783\(98\)80018-4](https://doi.org/10.1016/S1387-6783(98)80018-4)
- Lati, R. N., Siemens, M. C., Rachuy, J. S. & Fennimore, S. A. (2016). Intrarow weed removal in broccoli and transplanted lettuce with an intelligent cultivator. *Weed Technology*, 30(3), 655–663. <https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00179.1>
- Lau, J. (1991). *K. W. Bonfig: Sensoren und Sensorsysteme: Ultraschallsensoren für die Füllstandsmessung* (5. Aufl.). Expert Verlag.
- Laursen, M. S., Jørgensen, R. N., Midtby, H. S., Jensen, K., Christiansen, M. P., Giselsø, T. M., Mortensen, A. K. & Jensen, P. K. (2016). Dicotyledon weed quantification algorithm for selective herbicide application in maize crops. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16(11).
- Leake, J. R. (2004). Myco-heterotroph/epiparasitic plant interactions with ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal fungi. *Current Opinion in Plant Biology*, 7(4), 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2004.04.004>
- Ma, W.-K., Bioucas-Dias, J. M., Chan, T.-H., Gillis, N., Gader, P., Plaza, A. J., Ambikapathi, A. & Chi, C.-Y. (2014). A Signal processing perspective on hyperspectral unmixing: Insights from remote sensing. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(1), 67–81. <https://doi.org/10.1109/MSP.2013.2279731>

- Makary, T., Schulz, R., Müller, T. & Pekrun, C. (2012, 18. Oktober). Mit frühjahrsbetonten N-Düngestrategien Erträge und Qualitäten bei Winterweizen trotz Vorsommertrockenheiten sichern. In Deubel, Annette, Orzessek, Dieter (Vorsitz), *Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanzenbestände unter den Bedingungen der Klimaerwärmung*. Symposium im Rahmen der Tagung von Hochschule Anhalt, Fachbereich Landwirtschaft, Ökotropologie und Landschaftsentwicklung, Bernburg-Strenzfeld.
- Manevski, K., Manakos, I., Petropoulos, G. P. & Kalaitzidis, C. (2011). Discrimination of common Mediterranean plant species using field spectroradiometry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(6), 922–933.
- Marggraf, U. (2019). *Ermittlung der Prozessqualität bei der Vermischung der Wirkstoffe in Pflanzenschutzspritzen* (1. Aufl.). *Forschungsberichte aus dem Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge*. Shaker Verlag, Düren, Deutschland.
- Markwell, J., Osterman, J. C. & Mitchell, J. L. (1995). Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, 46(3), 467–472.
- Marshall, E. (1988). Field-scale estimates of grass weed populations in arable land. *Weed Research*, 28(3), 191–198. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1988.tb01606.x>
- Mazet. (2012). *Jencolor - TrueColor-Farbsensoren: Farbmessung nach DIN 5033/ CIE 1931*. <https://pdf.directindustry.de/pdf/ams-sensors-germany-gmbh/jencolor-true-color-farbsensoren/15658-338761.html>, zuletzt geprüft: 07.04.2022
- Mazet. (2016). *Datasheet MTCSiCF: Integral True Color Sensor*.
- McVeagh, P., Yule, I. & Mackenzie, J. (2012). A comparison of the performance of VIS/NIR sensors used to inform nitrogen fertilization strategies. In ASABE (Hrsg.) (S. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph MI, USA. <https://doi.org/10.13031/2013.41973>
- Miyamoto, K. & Kitano, Y. (1995). Non-destructive determination of sugar content in satsuma mandarin fruit by near infrared transmittance spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 3(4), 227–237. <https://doi.org/10.1255/jnirs.73>
- Monje, O. A. & Bugbee, B. (1992). Inherent limitations of nondestructive chlorophyll meters: A comparison of two types of meters. *HortScience*, 27(1), 69–71. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.27.1.69>
- Müller, K. (1985). Abhängigkeit des pflanzenverfügbaren Stickstoffs (N_{min}) von den Humusgehalten und der mineralischen N-Düngung auf einem fränkischen Weinbaustandort. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 148(2), 169–178. <https://doi.org/10.1002/jpln.19851480206>
- Müter, M. (2017). *Kameragesteuerte mechanische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen* [Dissertation]. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Nelson, N. & Yocum, C. F. (2006). Structure and function of photosystems I and II. *Annual review of plant biology*, 57, 521–565. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105350>
- Padilla, F. M., Souza, R. de, Peña-Fleitas, M. T., Grasso, R., Gallardo, M. & Thompson, R. B. (2019). Influence of time of day on measurement with chlorophyll meters and canopy reflectance sensors of different crop N status. *Precision Agriculture*, 20(6), 1087–1106. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09641-1>

- Pohl, J.-P., Rautmann, D., Nordmeyer, H. & Hörsten, D. von (2019). Direkteinspeisung im Präzisionspflanzenschutz - Teilflächenspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln. *Gesunde Pflanzen*, 71(1), 51–55.
- Prsa, I., Stampar, F., Vodnik, D. & Veberic, R. (2007). Influence of nitrogen on leaf chlorophyll content and photosynthesis of 'Golden Delicious' apple. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science*, 57(3), 283–289. <https://doi.org/10.1080/09064710600982878>
- Reckleben, Y. (2014). Sensoren für die Stickstoffdüngung - Erfahrungen in 12 Jahren praktischem Einsatz. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.5073/JFK.2014.02.02> (1,41 MB / Journal für Kulturpflanzen 66(2) 2014 / Journal für Kulturpflanzen 66(2) 2014).
- Reger, M., Bauerdick, J. & Bernhardt, H. (2018). Drohnen in der Landwirtschaft: Aktuelle und zukünftige Rechtslage in Deutschland, der EU, den USA und Japan. *Landtechnik*, 73(3), 62–80.
- Rometron. (2021). *WEED-IT Quadro*. <https://www.weed-it.com/weedit-quadro>, zuletzt geprüft: 15.10.2021
- Ruiz-Ruiz, G., Gómez-Gil, J. & Navas-Gracia, L. M. (2009). Testing different color spaces based on hue for the environmentally adaptive segmentation algorithm (EASA). *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1), 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.04.009>
- Sánchez, N. H., Lurol, S., Roger, J. M. & Bellon-Maurel, V. (2003). Robustness of models based on NIR spectra for sugar content prediction in apples. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 11(2), 97–107. <https://doi.org/10.1255/jnirs.358>
- Schäufele, W. R. (1986). Einfluss hochwachsenden Unkrautes (*Chenopodium album* L.) auf Entwicklung und Ertrag der Zuckerrübe. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 93(2).
- Schenk, M. & Baumgartel, G. (2007). Düngungsversuche: Anlage von Düngungsversuchen. In F. Wagner (Hrsg.), *Der Feldversuch - Durchführung und Technik: Bd. 2. Der Feldversuch - Durchführung und Technik: Teil 2: Spez. Versuchsdurchführung - Berechnungen - Tabellen - Bezugsquellen* (3. Aufl., Bd. 2, S. 113–115). Selbstverlag Fritz Wagner.
- Schmittmann, O. (2002). *Teilflächenspezifische Ertragsmessung von Zuckerrüben in Echtzeit unter besonderer Berücksichtigung der Einzelrübenmasse* [Dissertation]. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Schmittmann, O. (2018). *Feldversuch II - Unterbodenmanagement - Praxisversuch, unveröffentlicht*. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Schmittmann, O., Christ, A. & Schulze Lammers, P. (2021). Subsoil melioration with organic material—Principle, technology and yield effects. *Agronomy*, 11(10), 1970. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101970>
- Schmittmann, O., Kam, H. & Schulze Lammers, P. (2010). Entwicklung eines Präzisionsgeräteantriebs zur koordinatengesteuerten Ablage von Saatgut. *Landtechnik*, 65(2), 286–289.
- Schmittmann, O. & Schulze Lammers, P. (2017). A True-Color sensor and suitable evaluation algorithm for plant recognition. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 17(8).

- Schulze Lammers, P., Schmittmann, O., Klingbeil, L., Wieland, M. & Kuhlmann, H. (2017). Coordinate controlled placement of sugar beet seeds. *45th International Symposium of Actual Tasks on Agricultural Engineering*, 21. - 24.02.2017, Opatija, Kroatien, 293–301.
- Sensor Instruments. (2019). *Was ist Farbe?* <https://www.sensorinstruments.de/whatis-what.php?subpage=11&language=de>, zuletzt geprüft: 11.02.2019
- Smaniotta, P. (2006). Licht und Elektromagnetismus. *Dental Dialogue*, 7, 92–105.
- Souza, M. F. de, Amaral, L. R. d., Oliveira, S. R. d. M., Coutinho, M. A. N. & Ferreira Netto, C. (2020). Spectral differentiation of sugarcane from weeds. *Biosystems Engineering*, 190, 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.023>
- Statistisches Bundesamt (2021). Wachstum und Ernte: Feldfrüchte. *Fachserie 3, Reihe 3.2.1*, 9.
- Stettmer, M., Maidl, F.-X., Schwarzensteiner, J., Hülsbergen, K.-J. & Bernhardt, H. (2021). Sustainability of site-specific fertilization systems. 48. International Symposium of Actual Tasks on Agricultural Engineering, 02. – 04. März 2021, Opatija, Kroatien, 69 – 75.
- Tian, L. F. & Slaughter, D. C. (1998). Environmentally adaptive segmentation algorithm for outdoor image segmentation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 21(3), 153–168. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(98\)00037-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(98)00037-4)
- Tillett, N. D., Hague, T., Grundy, A. C. & Dedousis, A. P. (2008). Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. *Biosystems Engineering*, 99(2), 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.026>
- Trimble. (2019). *WeedSeeker 2: System für die punktgenaue Spritzung*. Westminster, Colorado, USA.
- Uhlig, T. (1978). Berührungsloser Nachweis natürlicher Leitlinien der Pflanzenproduktion mit Hilfe von Ultraschall. *Agrartechnik, landtechnische Zeitschrift der DDR*, 28(12), 563–565.
- Underwood, E., Ustin, S. & DiPietro, D. (2003). Mapping nonnative plants using hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 86(2), 150–161.
- Uppenkamp, N. (2021). Mineralische Düngung: Entwicklungen bei der teilflächenspezifischen Düngung. In L. Frerichs (Hrsg.), *Jahrbuch Agrartechnik 2020* (Bd. 32), 116–121.
- van der Weide, R. Y., Bleeker, P. O., Achten, V T J M, Lotz, L. A. P., Fogelberg, F. & Melander, B. (2008). Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed Research*, 48(3), 215–224. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00629.x>
- van Herwaarden, A. F., Angus, J. F., Richards, R. A. & Farquhar, G. D. (1998). 'Haying-off', the negative grain yield response of dryland wheat to nitrogen fertiliser II. Carbohydrate and protein dynamics. *Australian Journal of Agricultural Research*, 49(7), 1083. <https://doi.org/10.1071/A97040>
- Verein deutscher Ingenieure e.V. (11.2019). *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung* (VDI-Richtlinie VDI 2221 Blatt 1:2019-11). Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- VHS-Seminar. (2019). *Farbmodelle*. <https://www.vhs-seminar.de/farbmodelle.html>, zuletzt geprüft: 11.02.2019

- Wahmhoff, W. & Heitefuss, R. (1985). Untersuchungen zur Anwendung von Schadensschwelle für Unkräuter in Wintergerste I. Einflußfaktoren und Prognosemöglichkeiten der Entwicklung von Unkrautbeständen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*(92), 1–6.
- Wang, C [Ce], Li, X., Wang, L., Yang, C., Chen, X., Li, M. & Ma, S. (2019). Prediction of N, P, and K contents in sugarcane leaves by VIS-NIR spectroscopy and modeling of NPK interaction effects. *Transactions of the ASABE*, 62(6), 1427–1433.
<https://doi.org/10.13031/trans.13086>
- Wartenberg, G. & Dammer, K.-H. (2002). Erfahrungen bei der Verfahrensentwicklung zur teilflächenspezifischen Herbizidanwendung in Echtzeit. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*(Sonderheft XVIII), 443–450.
- Wartenberg, G., Langner, H.-R., Böttger, H. & Schmidt, H. (2005). *Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens* (Nr. 44).
- Weatherall, I. L. & Coombs, B. D. (1992). Skin color measurements in terms of CIELAB color space values. *The Journal of investigative dermatology*, 99(4), 468–473.
<https://doi.org/10.1111/1523-1747.ep12616156>
- Wedding, B. B., Wright, C., Grauf, S. & White, R. d. (2012). The application of near infrared spectroscopy for the assessment of avocado quality attributes. In T. M. Theophanides (Hrsg.), *Infrared spectroscopy: Life and biomedical sciences*. InTech.
<https://doi.org/10.5772/35644>
- Wellhausen, C., Pflanz, M., Pohl, J.-P. & Nordmeyer, H. (2020). Generierung von Unkrautverteilungskarten auf der Basis automatischer Annotierungen in Feldaufnahmen. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.5073/JKA.2020.464.034> (222 Seiten / Julius-Kühn-Archiv, Nr. 464 (2020), Braunschweig / Julius-Kühn-Archiv, Nr. 464 (2020): Tagungsband 29. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und - bekämpfung, 3. - 5. März 2020, Braunschweig, Germany).
- Westermeier, M. & Maidl, F.-X. (2019). Vergleich von Spektralindizes zur Erfassung der Stickstoffaufnahme bei Winterweizen (*Triticum aestivum* L.). Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.5073/JFK.2019.08-09.02> (Journal für Kulturpflanzen, Bd. 71 Nr. 8/9 (2019) / Journal für Kulturpflanzen, Bd. 71 Nr. 8/9 (2019)).
- Westwood, J. H., Charudattan, R., Duke, S. O., Fennimore, S. A., Marrone, P., Slaughter, D. C., Swanton, C. & Zollinger, R. (2018). Weed management in 2050: Perspectives on the future of weed science. *Weed Science*, 66(3), 275–285.
<https://doi.org/10.1017/wsc.2017.78>
- Whelan, B. (2015). *Proximal Crop Reflectance Sensors: A guide to their capabilities and uses*. ISBN: 978-1-921779-54-1
- Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4269–4276.
<https://doi.org/10.1080/01431160802039957>
- Yara. (2021). *Düngefibel: effizient düngen* (5. Aufl.). im Selbstverlag. https://www.effizientduengen.de/duengefibel-bestellen/?gclid=Cj0KCQiAu62QBhC7ARIsALXijXRbfcx0-fzJ6vOkaq_U40eQDICm0yIRCmuL2YVaArzEvhcqUsBgKwAaAnbBEALw_wcB, zuletzt geprüft: 05.07.2022

Zheng, L., Zhu, D., Liang, D., Zhang, B., Wang, C [Cheng] & Zhao, C. (2015). Winter wheat biomass estimation based on canopy spectra. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(6), 30–36. <https://doi.org/10.25165/ijabe.v8i6.1311>

7 Anhang

7.1 Modellversuch zum Ansprechverhalten der Reflexionskanäle in Abhängigkeit des Pflanzenbedeckungsgrades

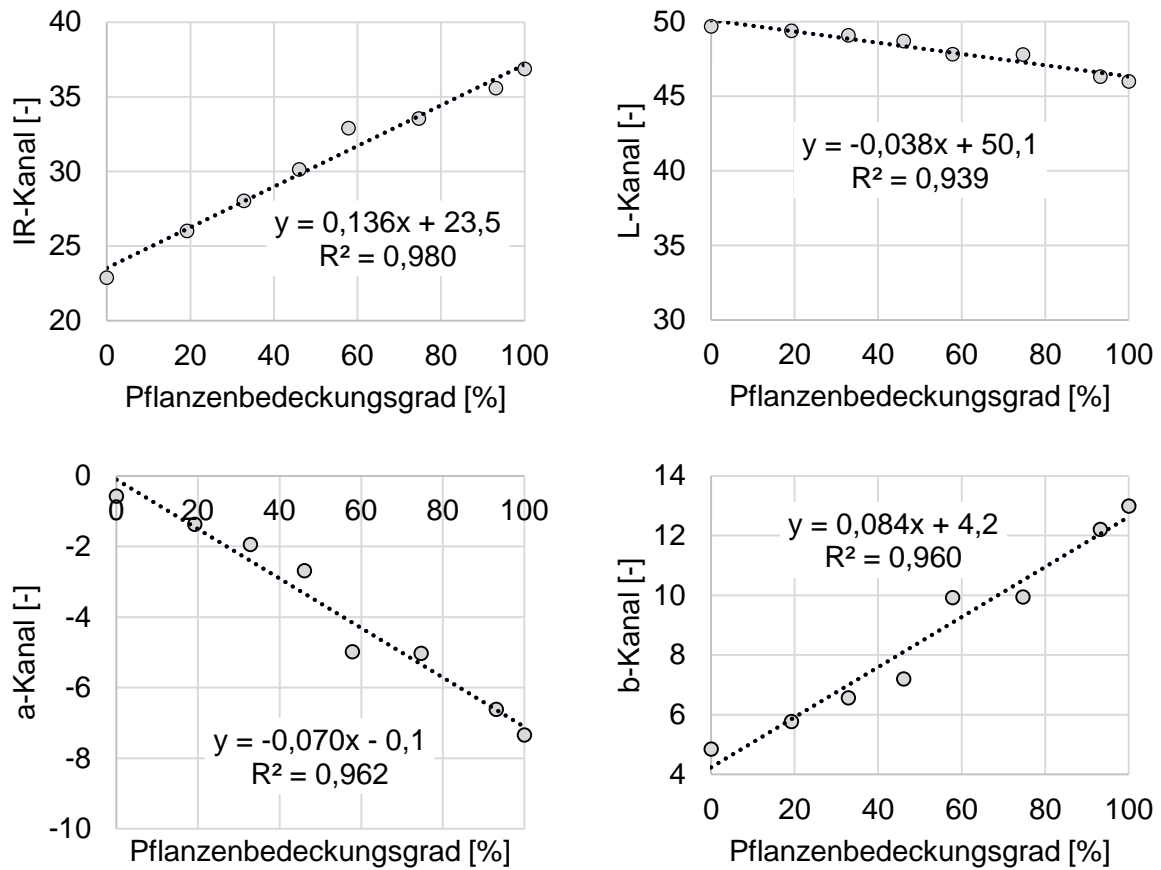


Abb. 7-1: Reflexionswertverläufe in Abhängigkeit des Pflanzenbedeckungsgrades durch Vermessung von homogenen Laubblättern (Objekt) unter konstanten äußeren Einflüssen

7.2 Witterungsbedingungen während der Vegetationszeit der Freilandversuche

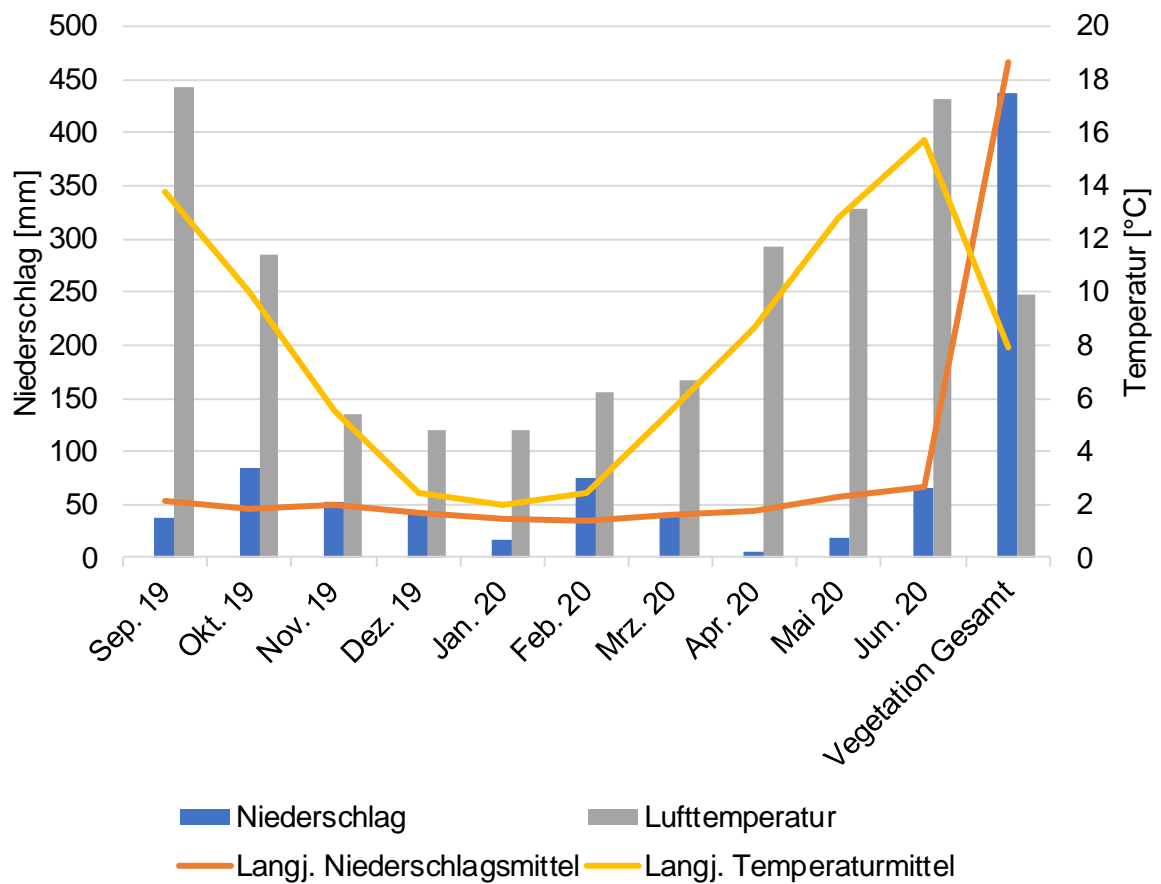


Abb. 7-2: Monatliche Niederschlags- und Temperaturwerte über den Versuchszeitraum 2019/2020 im Vergleich zum langjährigen Niederschlags- und Temperaturmittel am Campus Klein-Altendorf (CKA, 2020b)

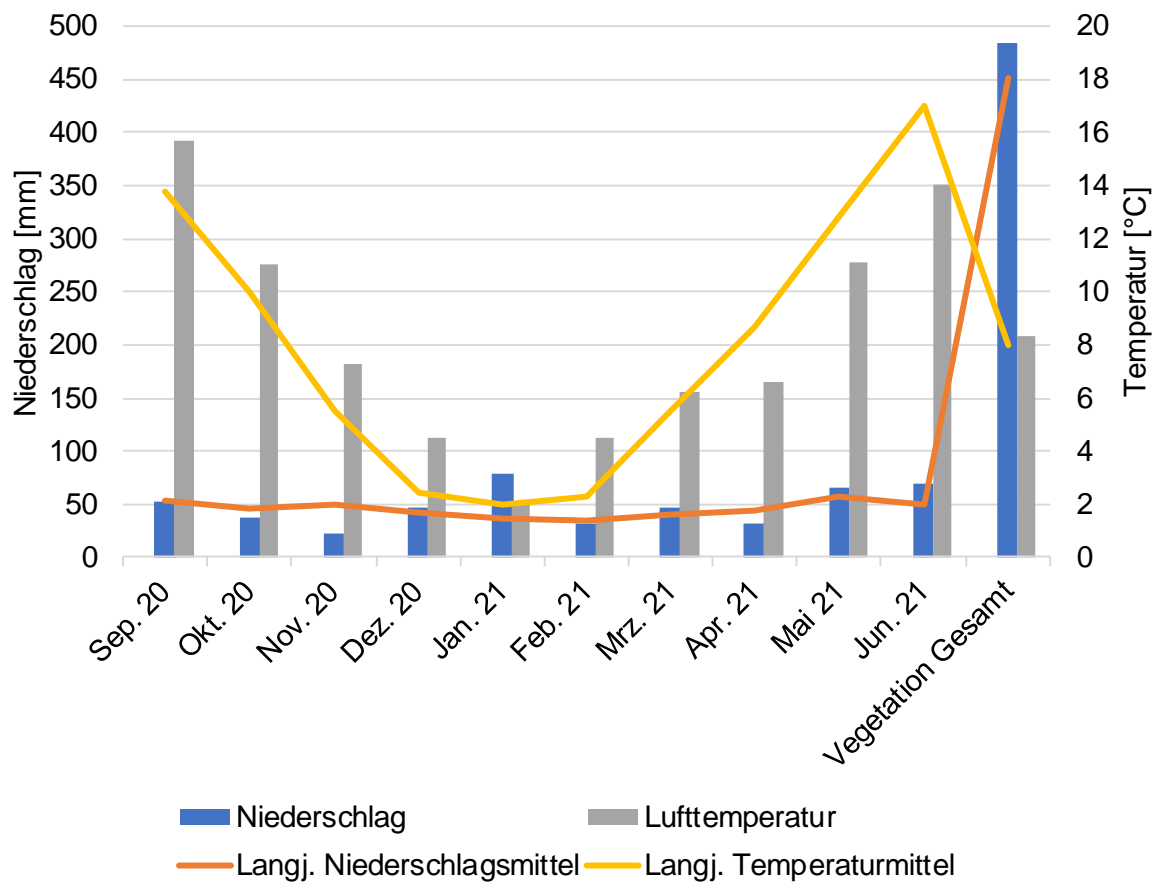


Abb. 7-3: Monatliche Niederschlags- und Temperaturwerte über den Versuchszeitraum 2020/2021 im Vergleich zum langjährigen Niederschlags- und Temperaturmittel am Campus Klein-Altendorf (CKA, 2020b)

7.3 Homogene Untergruppen der Reflexionswerte zur Pflanzendiskriminierung

Tab. 7-1: Homogene Untergruppen des IR-Kanals

Objekt	n	Untergruppe																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
GB_11	10	14,271																
GB_10	10	14,342	14,342															
ZR_10	10	14,588	14,588	14,588														
Boden_feucht	10	14,666	14,666	14,666														
GB_12	10	14,691	14,691	14,691														
Lö_12	10		15,651	15,651	15,651													
Lö_11	10			15,825	15,825													
WS_11	10				16,371	16,371												
KL_12	10					17,48	17,48											
Lö_13	10						17,736	17,736										
Lö_10	10						17,839	17,839										
Lö_14	10						18,191	18,191	18,191									
RF_14	10						18,34	18,34	18,34	18,34								
Mais_10	10						18,427	18,427	18,427	18,427	18,427							
KL_10	10						18,615	18,615	18,615	18,615	18,615							
RF_13	10						18,696	18,696	18,696	18,696	18,696							
EK_14	10						18,732	18,732	18,732	18,732	18,732							
Boden_trocken	10							18,967	18,967	18,967	18,967							
ZR_14	10							19,023	19,023	19,023	19,023							
RF_12	10								19,256	19,256	19,256							
KL_11	10								19,456	19,456	19,456							
GB_13	10								19,524	19,524	19,524							
KL_32	10									19,541	19,541							
ZR_12	10									19,559	19,559							
Ko_14	5										21,632							
RF_10	10										21,687							
WGä_16	5										22,068	22,068						
WGä_14	5										22,09	22,09						
FK_11	10										22,149	22,149						
Ko_13	5										22,167	22,167						
RF_11	10										22,258	22,258						
Ko_12	5										22,292	22,292						
Mais_13	10										22,394	22,394						
EK_16	10										22,434	22,434						
Ko_10	5										22,475	22,475						
WGä_12	10										22,545	22,545	22,545					
FK_10	10										22,571	22,571	22,571	22,571				
WGä_10	10											23,361	23,361	23,361				
Mais_12	10												23,825	23,825				
Soja_12	5																	25,459
Sig.		1	0,067	0,127	0,987	0,326	0,112	0,082	0,053	0,149	0,725	0,078	0,087					1

Tab. 7-2: Homogene Untergruppen des L-Kanals

Objekt	n	Untergruppe															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ZR_14	10	24,723															
GB_10	10		33,087														
GB_11	10		33,371														
ZR_10	10		33,474														
Boden_f	10		33,846														
GB_12	10		33,914														
Lö_11	10			37,952													
RF_14	10			38,248													
KL_10	10			38,620	38,620												
EK_14	10			38,741	38,741	38,741											
RF_13	10			39,554	39,554	39,554	39,554										
KL_11	10			39,996	39,996	39,996	39,996	39,996									
Lö_10	10			40,026	40,026	40,026	40,026	40,026									
Lö_12	10			40,052	40,052	40,052	40,052	40,052									
ZR_12	10			40,234	40,234	40,234	40,234	40,234									
Boden_t	10					40,315	40,315	40,315									
Mais_10	10					40,559	40,559	40,559	40,559								
RF_12	10					40,773	40,773	40,773	40,773	40,773							
GB_13	10					40,858	40,858	40,858	40,858	40,858	40,858						
Lö_13	10					41,063	41,063	41,063	41,063	41,063	41,063	41,063					
WS_11	10							41,615	41,615	41,615	41,615	41,615	41,615	41,615			
KL_12	10								42,092	42,092	42,092	42,092	42,092	42,092	42,092		
Lö_14	10									42,42	42,42	42,42	42,42	42,42	42,42		
RF_10	10										42,490	42,490	42,490	42,490	42,490		
EK_16	10											42,646	42,646	42,646	42,646		
RF_11	10												42,746	42,746	42,746	42,746	
KL_32	10													43,334	43,334	43,334	43,334
Mais_13	10														44,350	44,350	44,350
Ko_10	5															44,463	44,463
Ko_14	5															44,892	44,892
Ko_13	5																45,260
Ko_12	5																45,278
FK_10	10																45,290
Soja_12	5																45,310
Mais_12	10																45,396
WGä_14	5																45,413
WGä_12	10																45,570
WGä_16	5																45,625
FK_11	10																45,687
WGä_10	10																45,933
Sig.		1	0,997	0,090	0,082	0,109	0,168	0,080	0,144	0,064	0,072	0,103	0,802	0,602	0,088	0,122	0,103

Tab. 7-3: Homogene Untergruppen des a-Kanals

Objekt	n	Untergruppe																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
ZR_14	10	-11,071																
Ko_14	5		0,106															
Mais_13	10		0,267	0,267														
Ko_13	5		0,275	0,275														
Lö_14	10		0,324	0,324														
Ko_12	5		0,352	0,352	0,352													
WGä_16	5		0,439	0,439	0,439	0,439												
WS_11	10		0,449	0,449	0,449	0,449												
FK_11	10		0,514	0,514	0,514	0,514	0,514											
WGä_14	5		0,594	0,594	0,594	0,594	0,594	0,594										
WGä_12	10			0,928	0,928	0,928	0,928	0,928	0,928									
Ko_10	5			0,939	0,939	0,939	0,939	0,939	0,939									
FK_10	10				1,068	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068								
KL_32	10				1,069	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069								
GB_12	10					1,158	1,158	1,158	1,158	1,158								
ZR_12	10						1,205	1,205	1,205	1,205	1,205							
KL_11	10							1,270	1,270	1,270	1,270							
GB_13	10								1,352	1,352	1,352	1,352						
KL_12	10								1,394	1,394	1,394	1,394	1,394					
GB_11	10								1,428	1,428	1,428	1,428	1,428					
Boden_f	10								1,545	1,545	1,545	1,545	1,545	1,545				
RF_14	10								1,591	1,591	1,591	1,591	1,591	1,591				
KL_10	10								1,593	1,593	1,593	1,593	1,593	1,593	1,593			
ZR_10	10								1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624			
GB_10	10									1,680	1,680	1,680	1,680	1,680	1,680			
Soja_12	5									1,743	1,743	1,743	1,743	1,743	1,743			
RF_13	10										1,847	1,847	1,847	1,847	1,847			
EK_14	10										1,896	1,896	1,896	1,896	1,896	1,896		
Lö_11	10											2,091	2,091	2,091	2,091	2,091		
Mais_12	10												2,163	2,163	2,163	2,163		
RF_12	10												2,266	2,266	2,266	2,266		
Lö_10	10													2,316	2,316	2,316		
Mais_10	10														2,510	2,510		
Boden_t	10														2,519	2,519		
WGä_10	10														2,540	2,540		
EK_16	10														2,566	2,566		
RF_11	10															2,599		
RF_10	10																2,604	
Lö_12	10																	4,902
Lö_13	10																	4,942
Sig.		1	0,800	0,119	0,055	0,053	0,087	0,112	0,082	0,114	0,091	0,088	0,079	0,052	0,051	0,054	0,066	1

Tab. 7-4: Homogene Untergruppen des b-Kanals

Objekt	n	Untergruppe																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
GB_12	10	6,106																	
KL_32	10	6,788	6,788																
Boden_f	10	6,813	6,813																
GB_11	10	7,041	7,041	7,041															
Lö_12	10	7,059	7,059	7,059	7,059														
GB_10	10	7,076	7,076	7,076	7,076														
ZR_10	10	7,097	7,097	7,097	7,097														
KL_12	10		7,287	7,287	7,287	7,287													
Lö_13	10		7,422	7,422	7,422	7,422	7,422												
WS_11	10		7,586	7,586	7,586	7,586	7,586	7,586			7,586								
Lö_14	10		7,604	7,604	7,604	7,604	7,604	7,604			7,604								
RF_14	10		7,919	7,919	7,919	7,919	7,919	7,919	7,919		7,919								
RF_13	10			7,975	7,975	7,975	7,975	7,975	7,975		7,975								
Lö_11	10			8,030	8,030	8,030	8,030	8,030	8,030	8,030	8,030	8,030							
WGä_16	5				8,199	8,199	8,199	8,199	8,199	8,199	8,199	8,199							
Ko_14	5					8,376	8,376	8,376	8,376	8,376	8,376	8,376	8,376						
FK_11	10					8,388	8,388	8,388	8,388	8,388	8,388	8,388	8,388						
Ko_13	5						8,521	8,521	8,521	8,521	8,521	8,521	8,521						
RF_12	10						8,543	8,543	8,543	8,543	8,543	8,543	8,543	8,543					
WGä_14	5							8,593	8,593	8,593	8,593	8,593	8,593	8,593					
Ko_12	5							8,601	8,601	8,601	8,601	8,601	8,601	8,601					
Lö_10	10							8,698	8,698	8,698	8,698	8,698	8,698	8,698	8,698				
Ko_10	5								8,840	8,840	8,840	8,840	8,840	8,840	8,840	8,840	8,840	8,840	
Boden_t	10								8,944	8,944	8,944	8,944	8,944	8,944	8,944	8,944	8,944	8,944	
Soja_12	5									9,153	9,153	9,153	9,153	9,153	9,153	9,153	9,153	9,153	9,153
RF_10	10									9,158	9,158	9,158	9,158	9,158	9,158	9,158	9,158	9,158	9,158
RF_11	10										9,175	9,175	9,175	9,175	9,175	9,175	9,175	9,175	9,175
Mais_10	10											9,453	9,453	9,453	9,453	9,453	9,453	9,453	9,453
EK_16	10												9,463	9,463	9,463	9,463	9,463	9,463	9,463
Mais_12	10													9,501	9,501	9,501	9,501	9,501	9,501
WGä_12	10														9,534	9,534	9,534	9,534	9,534
FK_10	10															9,6612	9,6612	9,6612	9,6612
KL_10	10																9,676	9,676	9,676
WGä_10	10																	9,699	9,699
EK_14	10																	9,732	9,732
KL_11	10																		9,749
GB_13	10																		9,864
Mais_13	10																		10,095
ZR_12	10																		10,095
ZR_14	10																		13,688
Sig.		0,227	0,057	0,232	0,051	0,079	0,064	0,071	0,171	0,059	0,257	0,061	0,051	0,056	0,052	0,132	0,172	0,337	1

7.4 Aufschlüsselung der Einzelkanäle zur Pflanzendifferenzierung

Tab. 7-5: Übersicht differenzierbarer Pflanzen durch Analyse der Einzelkanäle

Pflanze	ZR_10				ZR_12				ZR_14				Mais_12				Mais_13				Soja_12			
	IR	L	a	b	IR	L	a	b	IR	L	a	b	IR	L	a	b	IR	L	a	b	IR	L	a	b
RF_10	X	X							X				X	X			X			X	X			
RF_11	X	X							X				X	X			X			X	X			
RF_12																								
RF_13											X								X					
RF_14											X								X					
EK_14							X				X								X					
EK_16	X	X							X				X	X			X	X		X	X			
GB_10									X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X			
GB_11									X	X	X	X	X	X		X	X			X	X			
GB_12									X	X	X	X	X		X	X				X	X			
GB_13											X													
KL_10											X								X					
KL_11											X													
KL_12											X	X												
KL_32											X	X												
Lö_10																								
Lö_11		X							X				X	X		X	X			X	X			
Lö_12			X				X			X	X	X	X		X		X			X		X		
Lö_13			X				X				X							X					X	
Lö_14		X	X						X	X				X							X		X	
WS_11	X		X							X			X			X				X		X		
FK_10	X	X	X						X	X			X							X		X		
FK_11	X	X	X						X	X			X							X		X		
Ko_10	X	X	X						X	X			X							X	X	X		
Ko_12	X	X	X						X	X			X							X		X		
Ko_13	X	X	X				X			X	X		X							X		X		
Ko_14	X	X	X						X	X			X							X		X		
WGä_10	X	X							X								X			X				
WGä_12	X	X	X						X	X			X				X			X		X		
WGä_14	X	X	X						X	X			X							X		X		
WGä_16	X	X	X						X	X			X				X			X		X		

7.5 Reflexionsdatenbank zur Pflanzendiskriminierung sowie N-Düngung

Tab. 7-6: Wertebereiche der IR-, L-, a- und b-Reflexion von Mischfläche (Pflanze + Boden) sowie Hintergrund (Boden) durch die Verrechnung der Mittelwerte (\emptyset) und Standardabweichungen (σ)

	IR		L				a				b					
	\emptyset	σ	$\emptyset - \sigma$	$\emptyset + \sigma$	\emptyset	σ	$\emptyset - \sigma$	$\emptyset + \sigma$	\emptyset	σ	$\emptyset - \sigma$	$\emptyset + \sigma$	\emptyset	σ	$\emptyset - \sigma$	$\emptyset + \sigma$
RF_10	21,69	0,42	21,27	22,11	42,49	0,44	42,05	42,93	2,60	0,10	2,51	2,70	9,16	0,31	8,85	9,47
RF_11	22,26	0,20	22,05	22,46	42,75	0,30	42,45	43,04	2,60	0,09	2,51	2,69	9,18	0,30	8,88	9,47
RF_12	19,26	0,80	18,46	20,06	40,77	0,92	39,85	41,70	2,27	0,14	2,13	2,40	8,54	0,45	8,10	8,99
RF_13	18,70	0,63	18,07	19,32	39,55	0,69	38,86	40,25	1,85	0,23	1,61	2,08	7,98	0,48	7,49	8,46
RF_14	18,34	0,67	17,67	19,01	38,25	0,94	37,31	39,19	1,59	0,21	1,38	1,80	7,92	0,42	7,50	8,34
EK_14	18,73	0,49	18,24	19,23	38,74	0,99	37,75	39,73	1,90	0,13	1,76	2,03	9,73	0,43	9,30	10,17
EK_16	22,43	0,25	22,18	22,68	42,65	0,22	42,42	42,87	2,57	0,14	2,42	2,71	9,46	0,35	9,11	9,81
GB_10	14,34	0,38	13,97	14,72	33,09	0,71	32,37	33,80	1,68	0,08	1,60	1,76	7,08	0,36	6,72	7,43
GB_11	14,27	0,52	13,75	14,79	33,37	0,68	32,69	34,06	1,43	0,19	1,24	1,62	7,04	0,54	6,50	7,58
GB_12	14,69	0,55	14,14	15,24	33,91	1,17	32,75	35,08	1,16	0,23	0,93	1,39	6,11	0,58	5,53	6,68
GB_13	19,52	0,27	19,26	19,79	40,86	0,50	40,36	41,36	1,35	0,17	1,19	1,52	9,86	0,38	9,48	10,24
KL_10	18,61	0,55	18,07	19,16	38,62	0,92	37,70	39,54	1,59	0,12	1,48	1,71	9,68	0,40	9,27	10,08
KL_11	19,46	0,44	19,01	19,90	40,00	0,77	39,23	40,77	1,27	0,23	1,04	1,50	9,75	0,35	9,40	10,10
KL_12	17,48	0,40	17,08	17,88	42,09	0,60	41,49	42,69	1,39	0,16	1,23	1,56	7,29	0,39	6,90	7,68
KL_32	17,48	0,40	17,08	17,88	43,33	0,92	42,41	44,26	1,07	0,29	0,78	1,36	6,79	0,68	6,11	7,46
Lö_10	17,84	0,60	17,24	18,44	40,03	0,75	39,27	40,78	2,32	0,14	2,18	2,45	8,70	0,32	8,37	9,02
Lö_11	15,83	0,57	15,25	16,40	37,95	0,66	37,29	38,61	2,09	0,15	1,94	2,24	8,03	0,34	7,69	8,37
Lö_12	15,65	0,46	15,19	16,11	40,05	0,47	39,58	40,52	4,90	0,15	4,76	5,05	7,06	0,49	6,57	7,55
Lö_13	17,74	1,12	16,62	18,86	41,06	0,78	40,29	41,84	4,94	0,24	4,71	5,18	7,42	0,66	6,76	8,08
Lö_14	18,19	0,77	17,42	18,97	42,42	0,60	41,82	43,02	0,32	0,22	0,10	0,55	7,60	0,55	7,06	8,15
ZR_10	14,59	0,76	13,83	15,34	33,47	1,15	32,33	34,62	1,62	0,18	1,45	1,80	7,10	0,41	6,69	7,51
ZR_12	19,56	0,70	18,86	20,26	40,23	1,06	39,18	41,29	1,20	0,29	0,91	1,50	10,10	0,60	9,50	10,69
ZR_14	19,02	2,32	16,70	21,35	24,72	2,76	21,96	27,48	11,07	1,82	12,89	9,26	13,69	1,94	11,75	15,63
WS_11	16,37	0,48	15,90	16,85	41,61	0,96	40,66	42,57	0,45	0,26	0,19	0,71	7,59	0,69	6,90	8,28

FK_10	22,57	0,26	22,31	22,84	45,29	0,33	44,96	45,62	1,07	0,10	0,96	1,17	9,66	0,25	9,41	9,91
FK_11	22,15	0,33	21,82	22,48	45,69	0,26	45,43	45,94	0,51	0,14	0,37	0,65	8,39	0,29	8,10	8,67
Ko_10	22,48	0,47	22,00	22,95	44,46	0,32	44,15	44,78	0,94	0,09	0,84	1,03	8,84	0,32	8,53	9,16
Ko_12	22,29	0,28	22,01	22,58	45,28	0,21	45,07	45,48	0,35	0,12	0,23	0,47	8,60	0,19	8,41	8,79
Ko_13	22,17	0,33	21,84	22,49	45,26	0,31	44,95	45,57	0,28	0,08	0,19	0,36	8,52	0,28	8,25	8,80
Ko_14	21,63	0,05	21,58	21,68	44,89	0,40	44,50	45,29	0,11	0,29	-0,18	0,39	8,38	0,42	7,96	8,80
Mais_10	18,43	0,45	17,98	18,87	40,56	0,80	39,76	41,36	2,51	0,20	2,31	2,71	9,45	0,54	8,91	9,99
Mais_12	23,83	0,49	23,33	24,32	45,40	0,68	44,72	46,07	2,16	0,18	1,99	2,34	9,50	0,61	8,89	10,11
Mais_13	22,39	0,51	21,88	22,91	44,35	0,53	43,82	44,88	0,27	0,51	-0,24	0,77	10,09	0,54	9,56	10,63
Soja_12	25,46	0,98	24,47	26,44	45,31	0,35	44,96	45,66	1,74	0,30	1,44	2,05	9,15	1,10	8,05	10,25
WGä_10	23,36	0,58	22,78	23,94	45,93	0,38	45,55	46,32	2,54	0,17	2,37	2,71	9,70	0,35	9,35	10,05
WGä_12	22,54	0,28	22,26	22,83	45,57	0,40	45,17	45,97	0,93	0,19	0,74	1,11	9,53	0,40	9,13	9,93
WGä_14	22,09	0,24	21,85	22,33	45,41	0,26	45,16	45,67	0,59	0,12	0,47	0,72	8,59	0,34	8,25	8,93
WGä_16	22,07	0,29	21,78	22,36	45,62	0,16	45,46	45,79	0,44	0,12	0,32	0,56	8,20	0,20	8,00	8,40
Boden	14,67	0,67	21,27	22,11	33,85	0,91	42,05	42,93	1,54	0,12	2,51	2,70	6,81	0,68	8,85	9,47

Tab. 7-7: Wertebereiche der IR-, L-, a- und b-Reflexion durch die Verrechnung der Mittelwerte (\emptyset) und Standardabweichungen (σ) in Abhängigkeit des BBCH-Stadiums sowie der N-Stufe

	N-Stufe	IR				L				a				b				c = L*b			
		\emptyset	σ	$\emptyset - \sigma$	$\emptyset + \sigma$	\emptyset	σ	$\emptyset - \sigma$	$\emptyset + \sigma$	\emptyset	σ	$\emptyset - \sigma$	$\emptyset + \sigma$	\emptyset	σ	$\emptyset - \sigma$	$\emptyset + \sigma$	\emptyset	σ	$\emptyset - \sigma$	$\emptyset + \sigma$
BBCH 24	0 % N	47,64	1,10	46,54	48,74	38,15	0,39	37,77	38,54	-2,03	0,06	-2,09	-1,98	20,65	0,14	20,51	20,79	788,04	12,41	775,63	800,45
	50 % N	47,02	1,23	45,78	48,25	37,95	0,36	37,58	38,31	-3,81	0,02	-3,83	-3,79	20,35	0,11	20,24	20,46	772,20	11,37	760,82	783,57
	100 % N	47,70	1,24	46,46	48,93	37,68	0,37	37,30	38,05	-2,18	0,02	-2,21	-2,16	20,29	0,15	20,14	20,44	764,48	12,43	752,05	776,92
	150 % N	47,84	0,66	47,18	48,50	38,60	0,20	38,40	38,80	-4,35	0,05	-4,39	-4,30	20,51	0,11	20,41	20,62	791,92	6,83	785,09	798,74
BBCH 32	0 % N	22,68	0,60	22,08	23,28	27,27	0,46	26,81	27,74	-4,20	0,18	-4,38	-4,02	16,84	0,35	16,49	17,19	459,31	10,03	449,28	469,34
	50 % N	22,16	0,78	21,37	22,94	24,88	0,62	24,26	25,51	-5,15	0,17	-5,32	-4,98	14,31	0,27	14,04	14,59	356,17	10,15	346,02	366,32
	100 % N	22,56	0,77	21,79	23,33	23,62	0,47	23,15	24,09	-6,02	0,13	-6,15	-5,88	12,67	0,26	12,41	12,92	299,16	5,72	293,45	304,88
	150 % N	20,34	1,58	18,76	21,92	21,11	1,12	19,98	22,23	-6,04	0,07	-6,11	-5,97	11,49	0,10	11,39	11,59	242,49	12,76	229,73	255,26
BBCH 39	0 % N	18,61	0,89	17,72	19,49	25,65	0,82	24,83	26,47	-3,30	0,05	-3,35	-3,25	16,65	0,15	16,49	16,80	427,03	16,11	410,92	443,14
	50 % N	16,06	0,48	15,57	16,54	21,25	0,51	20,74	21,76	-4,30	0,08	-4,38	-4,22	14,14	0,34	13,80	14,49	300,56	13,78	286,78	314,33
	100 % N	16,77	0,74	16,03	17,50	20,36	0,65	19,71	21,02	-5,53	0,06	-5,59	-5,46	12,70	0,16	12,54	12,87	258,67	10,82	247,86	269,49
	150 % N	16,66	0,44	16,23	17,10	19,65	0,26	19,39	19,92	-5,95	0,03	-5,98	-5,92	11,70	0,06	11,63	11,76	229,90	3,91	225,99	233,81
BBCH 59	0 % N	14,70	0,84	13,86	15,54	22,65	0,80	21,85	23,44	-2,62	0,13	-2,75	-2,50	15,07	0,17	14,89	15,24	341,19	14,68	326,52	355,87
	50 % N	13,18	0,59	12,59	13,76	17,65	0,54	17,11	18,18	-4,61	0,10	-4,71	-4,50	13,02	0,28	12,74	13,30	229,85	8,56	221,30	238,41
	100 % N	14,59	0,63	13,96	15,21	17,24	0,54	16,71	17,78	-6,35	0,08	-6,43	-6,27	12,13	0,29	11,84	12,42	209,18	9,65	199,53	218,84
	150 % N	15,31	0,49	14,82	15,79	16,88	0,37	16,51	17,25	-7,17	0,13	-7,30	-7,04	11,32	0,31	11,01	11,63	191,08	6,03	185,05	197,11

7.6 Absolute N-Zufuhr der Stickstoffsteigerungsversuche

Tab. 7-8: Zugeführte absolute Stickstoffmenge je Entwicklungsstadium und Variante in Wintergerste

BBCH-Stadium	Parzelle I [kg N]	Parzelle II [kg N]	Parzelle III [kg N]	Parzelle IV [kg N]
32	0	0,72	0,36	1,08
39	0	1,32	0,66	1,98
59	0	1,92	0,96	2,88

Tab. 7-9: Zugeführte Stickstoffmenge je Messtermin und Variante in Winterweizen

BBCH-Stadium	Parzelle I [kg N]	Parzelle II [kg N]	Parzelle III [kg N]	Parzelle IV [kg N]
32	0	0,72	0,36	1,08
39	0	1,44	0,72	2,16
59	0	2,16	1,08	3,24

7.7 Untersuchung des Einflusses der Messfläche bei der Stickstoff-Düngung

Tab. 7-10: Homogene Untergruppen bei 0,1 % Datengrundlage

IR			
N-Stufe	n	Untergruppe	
		1	2
I	10	17,241	
III	11	21,442	21,442
IV	10		22,683
II	10		23,330
Sig.		0,068	0,670

L			
N-Stufe	n	Untergruppe	
		1	2
IV	10	17,285	
II	10	17,548	
III	11	18,043	
I	10		21,575
Sig.		0,851	1

a			
N-Stufe	N	Untergruppe	
		1	2
IV	10	-7,849	
II	10	-7,816	
III	11	-7,425	
I	10		-2,963
Sig.		0,946	1

b			
N-Stufe	N	Untergruppe	
		1	2
IV	10	6,216	
II	10	6,241	
III	11	8,580	
I	10		12,326
Sig.		0,219	1

Tab. 7-11: Homogene Untergruppen bei 1 % Datengrundlage

		IR		
N-Stufe	n	Untergruppe		
		1	2	3
I	102	17,450		
III	105		21,784	
II	106			23,179
IV	106			23,220
Sig.		1	1	1

		L		
N-Stufe	n	Untergruppe		
		1	2	3
IV	106	16,807		
II	106		17,997	
III	105		18,437	
I	102			21,318
Sig.		1	0,52	1

		a		
N-Stufe	N	Untergruppe		
		1	2	3
IV	106	-8,348		
II	106	-7,707	-7,707	
III	105		-7,2361	
I	102			-3,078
Sig.		0,110	0,352	1

		b			
N-Stufe	N	Untergruppe			
		1	2	3	4
IV	106	6,143			
II	106		7,400		
III	105			8,260	
I	102				12,309
Sig.		1	1	1	1

Tab. 7-12: Homogene Untergruppen bei 10 % Datengrundlage

		IR			
N-Stufe	n	Untergruppe			
		1	2	3	
I	1029	17,389			
III	1053		21,766		
II	1053			23,050	
IV	1056			23,256	
Sig.		1	1	0,388	

		L			
N-Stufe	n	Untergruppe			
		1	2	3	4
IV	1056	16,930			
II	1053		17,922		
III	1053			18,533	
I	1029				21,123
Sig.		1	1	1	1

		a			
N-Stufe	N	Untergruppe			
		1	2	3	4
IV	1056	-8,270			
II	1053		-7,833		
III	1053			-7,152	
I	1029				-3,254
Sig.		1	1	1	1

		b			
N-Stufe	N	Untergruppe			
		1	2	3	4
IV	1056	6,291			
II	1053		7,049		
III	1053			8,424	
I	1029				12,292
Sig.		1	1	1	1

Tab. 7-13: Homogene Untergruppen bei 100 % Datengrundlage

		IR			
N-Stufe	n	Untergruppe			
		1	2	3	4
I	10290	17,377			
III	10530		21,843		
II	10530			23,008	
IV	10560				23,265
Sig.		1	1	1	1

		L			
N-Stufe	n	Untergruppe			
		1	2	3	4
IV	10560	16,943			
II	10530		17,973		
III	10530			18,494	
I	10290				21,134
Sig.		1	1	1	1

		a			
N-Stufe	N	Untergruppe			
		1	2	3	4
IV	10560	-8,266			
II	10530		-7,776		
III	10530			-7,198	
I	10290				-3,246
Sig.		1	1	1	1

		b			
N-Stufe	N	Untergruppe			
		1	2	3	4
IV	10560	6,271			
II	10530		7,144		
III	10530			8,351	
I	10290				12,256
Sig.		1	1	1	1

7.8 Regressionsmodelle zwischen den Reflexionswerten des a-Kanals und der Pflanzenbedeckung

Tab. 7-14: Geradengleichungen der Regressionsgeraden zwischen Pflanzenbedeckung und a-Kanal

BBCH	WG 2020	WG 2021	WW 2021
32	$y = -0,155x + 7,6$	$y = -0,138x + 4,1$	$y = -0,187x + 7,0$
39	$y = -0,146x + 3,6$	$y = -0,131x + 6,3$	$y = -0,179x + 9,2$
59	$y = -0,165x + 6,8$	$y = -0,149x + 6,6$	$y = -0,133x + 5,1$

7.9 Regressionsmodelle der Reflexionskanäle bezüglich des Frischmasse-Ertrags sowie der Pflanzenhöhe

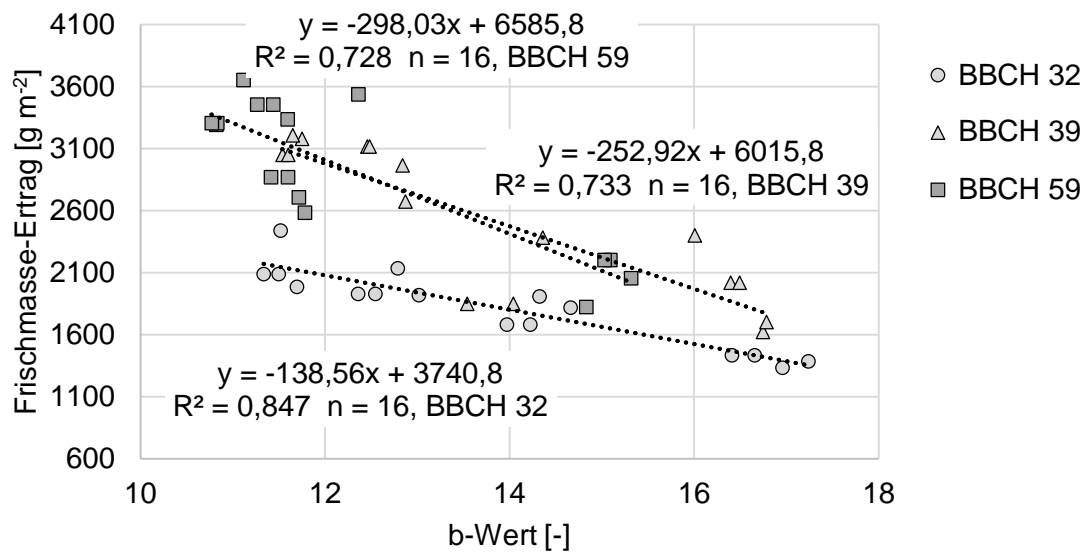


Abb. 7-4: Lineares Regressionsmodell des Frischmasse-Ertrags aus 2020 mittels Reflexionswerten der Mischfläche für den b-Kanal in den Entwicklungsstadien BBCH 32 ($p = 2.259E-20$), BBCH 39 ($p = 8.455E-15$), und BBCH 59 ($p = 1.322E-14$)

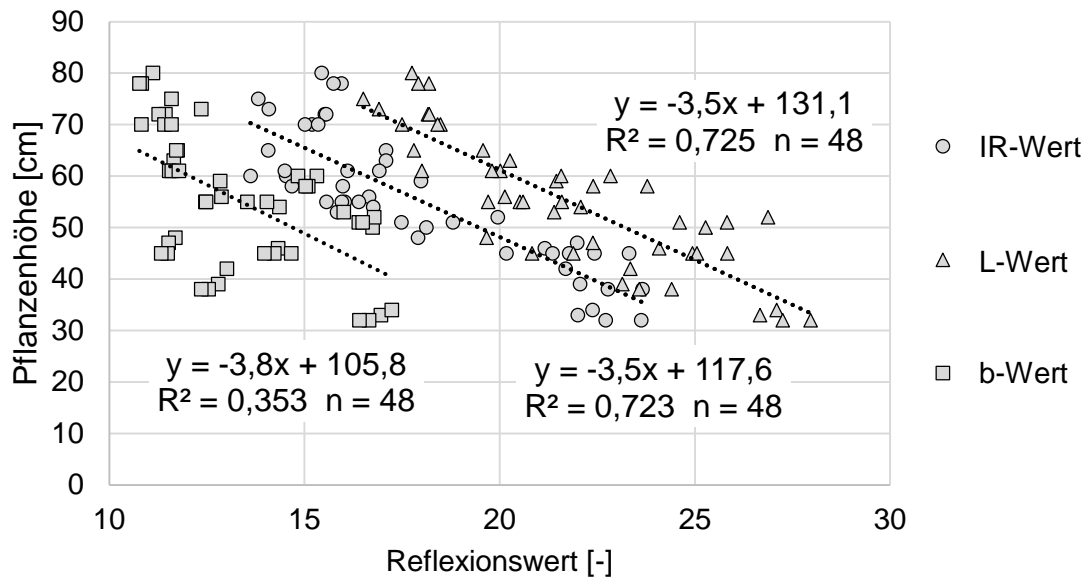


Abb. 7-5: Lineares Regressionsmodell der Pflanzenhöhe mit den Reflexionswerten des IR- ($p = 2,075E-14$), L- ($p = 1,740E-14$) und b-Kanals ($p=8,409E-06$) über die Entwicklungsstadien BBCH 32, 39, 59 in Wintergerste 2020

7.10 Ergebnisse der nasschemischen Analyse von Wintergerste 2020

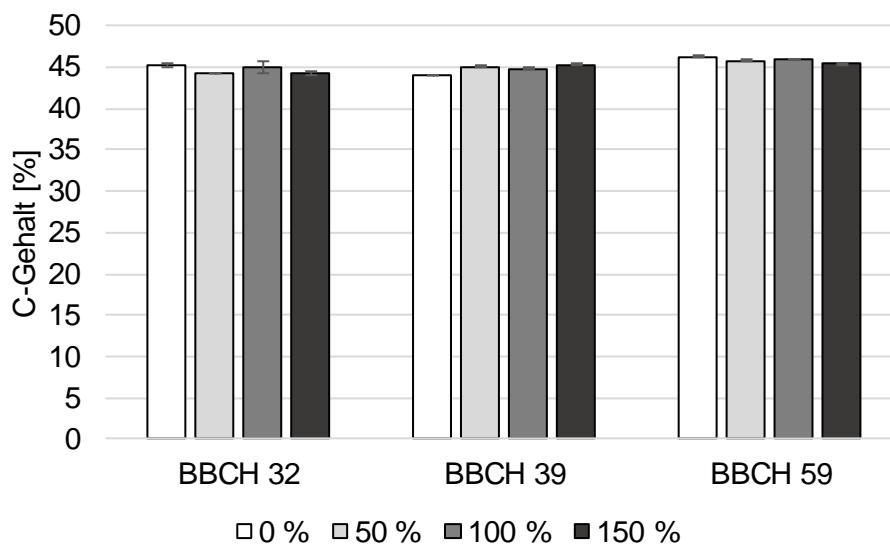


Abb. 7-6: Nasschemisch bestimmter C-Gehalt von Wintergerste 2020

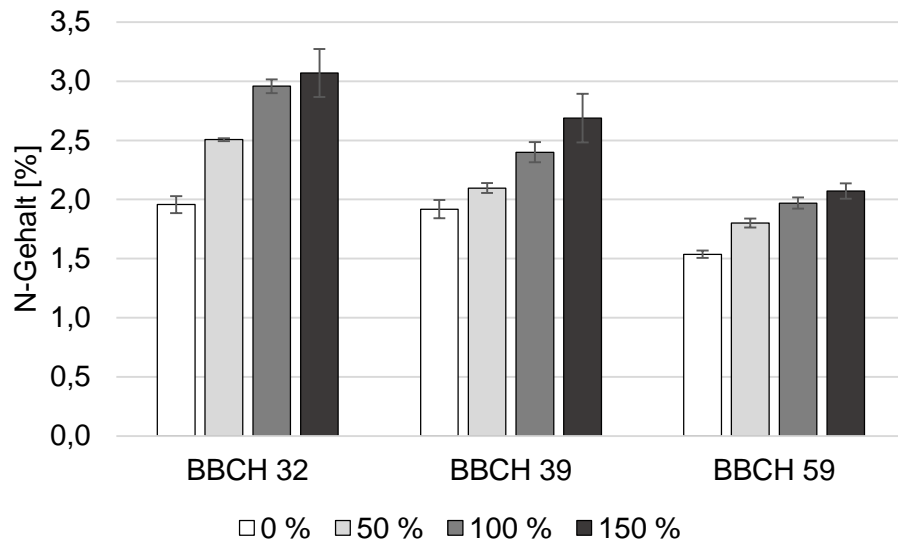


Abb. 7-7: Nasschemisch bestimmter N-Gehalt von Wintergerste 2020

8 Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

Ganz besonders möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers für die Ermöglichung der Promotion danken. Sowohl die fachlichen Diskussionen zu dieser Arbeit, als auch die interessanten Gespräche über diese Thematik hinaus, haben mich sehr geprägt und meine persönliche Entwicklung in vertrauensvoller Art vorangebracht.

Herrn Prof. Dr. Mathias Becker danke ich für die Übernahme des Korreferats. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Ralf Pude für die Unterstützung als fachnahes Mitglied, sowie Herrn Prof. Dr. Henning Hintzsche für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ebenfalls gilt mein Dank dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI), sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes.

Besonders bedanke ich mich bei Herrn Dr. Oliver Schmittmann für die langjährige, persönliche Betreuung während meiner Zeit am Institut. Neben dem fachlichen Austausch zu Themen der Promotion, sind es vor allem auch die durchgeführten Arbeiten im Rahmen anderer Projekte. Dadurch wurde mir ein weiter Einblick in unterschiedlichste Forschungsfelder ermöglicht, wodurch viele gemeinsame Versuchsaktivitäten und Dienstreisen entstanden.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Landtechnik für die entgegengebrachte Hilfsbereitschaft, sowie angenehme Arbeitsatmosphäre bedanken. Mein besonderer Dank gilt dem gesamten Werkstattteam für die gute und konstruktive Zusammenarbeit. Sowohl bei versuchstechnischen Fragestellungen im Rahmen der Promotionsarbeit, als auch insbesondere bei der konstruktiven Umsetzung des Bodenbearbeitungsgerätes zur Unterbodenmelioration zu Beginn meiner Tätigkeit am Institut. Meinem langjährigen Bürokollegen Prud Netsawang sage ich „ขอบคุณครับ (danke)“ für die gemeinsame Zeit innerhalb und außerhalb des Instituts.

Dem gesamten Team des Campus Klein-Altendorf unter der Leitung von Bernd Bünthen gilt ein besonderer Dank für die Unterstützung bei den Feldversuchsaktivitäten. Durch diese vertrauensvolle Zusammenarbeit war es während der unterschiedlichen Forschungstätigkeiten möglich, aufkommende Herausforderungen zu bewältigen und gemeinsam zügige Lösungen zu finden.

Meinen Eltern danke ich ganz besonders für Ihre Unterstützung während der gesamten Zeit meiner Ausbildung vom Studium bis zur Promotion, wodurch mir diese Gelegenheit erst ermöglicht wurde.

Ebenso geht ein ganz besonderer Dank an meine Partnerin Alessa für Ihre Unterstützung, verständnisvolle Art und motivierenden Worte während der Promotionszeit.