

Hochschule Anhalt

Fachbereich Landwirtschaft, Ökotropologie und Landschaftsentwicklung



Bachelorarbeit

„Vergleich der Wirkung unterschiedlicher Herbiziddosierungen auf den Chlorophyllgehalt von Winterweizen unter Verwendung verschiedener chlorophyllsensitiver Detektionsmethoden“

Name, Vorname: Petersen, Fynn Ole

██████████

██████████

██████████

██████████

Studiengang: Bachelor Landwirtschaft

1. Gutachter: Ole Christian Ludewig-Spickermann, M.Sc.

2. Gutachter: Dr. agr. Stefan Kübler

██████████, den 21. März 2025

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Bachelorarbeit sowie im Verlauf meines Studiums unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Ludewig-Spickermann von der Hochschule Anhalt, der mich während der Versuche und der Bearbeitungszeit fachlich betreut und mit wertvollen Anregungen unterstützt hat. Ebenso danke ich Herrn Dr. Kübler der Firma John Deere für die Möglichkeit meine Untersuchungen im Rahmen des Feldversuchs durchzuführen sowie für sein konstruktives Feedback.

Weiterhin danke ich den Labormitarbeitenden der Hochschule Anhalt für die Bereitstellung der Messinstrumente sowie die fachliche Begleitung der labortechnischen Untersuchungen.

Besonderen Dank spreche ich zudem meiner Partnerin und meiner Familie aus, die mich mit Motivation, Rückhalt und Geduld unterstützt haben.

Bibliographische Beschreibung

Name, Vorname: Petersen, Fynn Ole

Thema: Vergleich der Wirkung unterschiedlicher Herbiziddosierungen auf den Chlorophyllgehalt von Winterweizen unter Verwendung verschiedener chlorophyllsensitiver Detektionsmethoden

2025/ 67 Seiten/ 7 Tabellen/ 17 Abbildungen

Bernburg: Hochschule Anhalt

Fachbereich Landwirtschaft, Ökotropologie und

Landschaftsentwicklung

Abstract:

The targeted application of herbicides is a crucial component of modern agriculture to minimize yield losses caused by weed competition. At the same time, the precise analysis of plant physiological parameters, such as chlorophyll content, is gaining increasing importance in assessing the impact of different herbicide dosages on crop plants. This study investigates the effects of varying herbicide dosages on the chlorophyll content of winter wheat and evaluates the suitability of different chlorophyll-sensitive detection methods for assessing these effects.

To achieve this, field trials with different herbicide applications were conducted, and chlorophyll content was measured using four distinct detection methods. The analysis was performed through mean value calculations and the determination of the percentage deviation from the untreated control variant. The results indicate that both herbicide dosage and the choice of detection method significantly influence the recorded values. While some methods exhibited higher sensitivity to variations in chlorophyll concentration, others demonstrated lower variability.

These findings provide valuable insights into the optimization of methodological selection in agricultural research and highlight the importance of precise plant physiological analyses for the sustainable management of herbicide application strategies.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Bibliographische Beschreibung.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
2. Zielstellung.....	2
3. Literatur.....	3
3.1 Agronomische Ansprüche von Winterweizen.....	3
3.2 Wirkung von Herbizidmaßnahmen in der Pflanze	6
3.3 Analysemethoden zur Chlorophyllermittlung.....	10
3.4 Einsatz von Fernerkundung zur Chlorophyllbestimmung	15
4. Material und Methoden	17
4.1 Versuchsaufbau	17
4.2 Versuchsdurchführung	20
4.3 Datenerhebung- und Auswertung.....	23
5. Ergebnisse	24
5.1 N-Tester im Bestand.....	24
5.2 Chlorophyllanalyse im Labor.....	26
5.3 Indizes über Fernerkundung.....	29
5.4 Ertragsermittlung.....	33
5.5 Abweichungen des Chlorophyllgehaltes zur Nullparzelle	35
6. Diskussion	38
7. Schlussfolgerung	47

8. Literaturverzeichnis.....	48
Selbstständigkeitserklärung.....	52
Anlagen	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bestandesführung der Fläche	18
Tabelle 2: Anordnung der Parzellen im Versuch	19
Tabelle 3: Dosierung der Varianten zu den beiden Herbizidapplikationen H1 und H2.....	20
Tabelle 4: Ergebnisse der Varianzanalyse (ANOVA) und der paarweisen t-Test zur Untersuchung der Unterschiede im totalen Chlorophyllgehalt (tot. Chl mg/m ²) zwischen den Dosierungsstufen am 30. April.....	27
Tabelle 5: mittlere Ertragsparameter mit zugehöriger Standardabweichung und P-Werten der einfaktoriellen Varianzanalyse (n=5).....	34
Tabelle 6: Mittlere prozentuale Veränderung des Chlorophyllgehaltes gegenüber den Nullparzellen über alle Detektionsmethoden	37
Tabelle 7: Variantenvergleich der Detektionsmethoden anhand der ANOVA-Ergebnisse (p-Wert, F-Wert, Fehlervarianz)	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirkmechanismus von ACCase-Hemmern in den Chloroplasten (SCHLÜTER 2023).....	7
Abbildung 2: Veränderung der Herbizidwirkung bei Resistenzmechanismen (DLG 2018, S. 7, zitiert nach GEHRING 2017).....	9
Abbildung 3: Das elektromagnetische Spektrum (WIKIMEDIA COMMONS 2025, CC BY-SA 4.0).....	11
Abbildung 4: Anlageplan des gesamten Feldversuches	19
Abbildung 5: Wetterdaten der Versuchsfläche im April-Mai 2024 aus ISIP (2024).....	22
Abbildung 6: Veränderung des N-Tester-Wertes nach der ersten Herbizidapplikation in Abhängigkeit von der Dosierung (n=5)	24
Abbildung 7: Veränderung des N-Tester-Wertes nach der zweiten Herbizidapplikation in Abhängigkeit von der Dosierung (n=5)	25
Abbildung 8: Blatt-Chlorophyllgehalt (tot. Chl in mg/cm ²) unter Einfluss der ersten Herbizidapplikation und variierender Dosierung (n=5).....	26
Abbildung 9: Blatt-Chlorophyllgehalt (tot. Chl in mg/cm ²) unter Einfluss der zweiten Herbizidapplikation und variierender Dosierung (n=5).....	28

Abbildung 10: Normalized Difference Vegetation Index vor und nach der ersten Herbizidbehandlung bei unterschiedlicher Dosierung (n=5)	29
Abbildung 11: Normalized Difference Vegetation Index vor und nach der zweiten Herbizidbehandlung bei unterschiedlicher Dosierung (n=5)	30
Abbildung 12: Entwicklung des Green Chlorophyll Indexes nach der ersten Herbizidapplikation in Abhängigkeit von der Dosierung (n=5)	31
Abbildung 13: Entwicklung des Green Chlorophyll Indexes nach der zweiten Herbizidapplikation in Abhängigkeit von der Dosierung (n=5)	32
Abbildung 14: Kornertag und Ährentragende Halme in Abhängigkeit der Herbiziddosierung (n=5)	33
Abbildung 15: Prozentuale Abweichung der Chlorophyllwerte zur Nullparzelle nach der ersten Herbizidapplikation je Dosierungsstufe und Detektionsmethode (n=5)	35
Abbildung 16: Prozentuale Abweichung der Chlorophyllwerte zur Nullparzelle nach der zweiten Herbizidapplikation je Dosierungsstufe und Detektionsmethode (n=5).....	36
Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf der Maßnahmen zur Bestandesführung um den Messzeitraum (eigene Darstellung nach ISIP 2024)	41

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ACCCase-Hemmer	Acetyl-CoA-Carboxylase-Inhibitoren
Acetyl-CoA	Acetyl-Coenzym A
AHL	Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung
ALS-Hemmer	Acetolactat-Synthase-Inhibitoren
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie (Gemeinschaftsarbeit der Firmen: BASF, Bayer AG, Giba Geigy AG und Hoechst AG)
Chl	Chlorophyll
CIG	Green Chlorophyll Index
DEN-Herbizide	Phenylpyrazoline
DIM-Herbizide	Cyclohexandione
DMSO	Dimethylsulfoxid
FOP-Herbizide	Aryloxyphenoxypropionate
H1	Herbizidapplikation (hier Herbizidapplikation 1)
HRAC	Herbicide Resistance Action Committee
HST	Harnstoff
KAS	Kalkammonsalpeter
LWK Niedersachsen	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Malonyl-CoA	Malonyl-Coenzym A
MW	Mittelwert
N	Stickstoff (Symbol für das Element Nitrogenium)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nah-Infrarot
N _{min} -Wert	Mineralischer Stickstoffbodenvorrat
NPQ	Nicht-photochemisches Quenching
PS-II-Hemmer	Photosystem-II-Hemmer

PWM	Pulsweitenmodulation
qP	Photochemisches Quenching
SPAD	Soil Plant Analysis Development
tot. Chl	Totaler Chlorophyllgehalt (Summe aus Chl a und Chl b)
TSP	Triplesuperphosphat (45% P ₂ O ₅)

1. Einleitung

Im konventionellen Ackerbau spielt der chemische Pflanzenschutz eine zentrale Rolle. Er gilt als entscheidendes Instrument der Bestandesführung, indem er Pflanzenkrankheiten, Schädlinge und Unkräuter bekämpft. Somit trägt er zur Sicherung von Qualität und Quantität der Ernte bei. Angesichts zunehmender Resistenzen, strengerer gesetzlicher Regulierungen und steigender Kosten für Pflanzenschutzmittel gewinnt eine effiziente und präzise Anwendung jedoch zunehmend an Bedeutung. Jede Applikation muss optimal auf die Kultur und die Standortbedingungen abgestimmt werden, um unerwünschte Umweltwirkungen zu minimieren und die Wirtschaftlichkeit zu erhalten (DEHLER 2023).

Neben Mittelauswahl und Anwendungszeitpunkt ist auch die Ausbringtechnik für eine erfolgreiche Pflanzenschutzmaßnahme entscheidend. Moderne Feldspritzen sind häufig mit Section Control-Systemen ausgestattet, sodass Unter-/Überdosierungen am Vorgewende vermieden werden. Allerdings bietet die Gestängeführung der Feldspritze noch Verbesserungspotential. Dieses kann mit einer automatischen Gestängeführung konfiguriert werden, welches vor allem für eine Arbeitserleichterung der Bedienperson führt. Ein bisher wenig untersuchter Aspekt ist der Einfluss der Gestängeführung auf die tatsächlich applizierte Aufwandmenge. Besonders in Kurvenfahrten kommt es zu deutlichen Abweichungen. Während auf der Kurveninnenseite eine Überdosierung stattfindet, kommt es auf der Kurvenaußenseite zu einer Unterdosierung. Ein Effekt, der mit zunehmender Gestängebreite verstärkt wird. In gleicher Weise beeinträchtigen Unebenheiten in der Fahrspur die Applikationsgenauigkeit, da diese unkontrollierte Schwingungsbewegungen des Gestänges verursachen, was die gleichmäßige Verteilung des Pflanzenschutzmittels weiter erschwert (FEUERBORN 2022).

Um die Auswirkungen solcher Über- und Unterdosierungen auf den Pflanzenbestand zu analysieren, wird in dieser Bachelorarbeit ein Versuch mit unterschiedlichen Herbiziddosierungen im Winterweizen ausgewertet. Durch eine Verdopplung bzw. Vervierfachung der regulären Aufwandmenge werden die Bedingungen einer beeinträchtigten Herbizidapplikation simuliert. Ziel ist es, den Einfluss der Dosierung auf den Chlorophyllgehalt der Pflanzen sowie auf spektrale Vegetationsindizes zu quantifizieren. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die Präzision der Pflanzenschutzmittelapplikation zu verbessern und potenzielle negative Effekte auf den Pflanzenbestand zu reduzieren.

2. Zielstellung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss unterschiedlicher Herbiziddosierungen auf einen Winterweizenbestand untersucht. Der Fokus liegt dabei auf Veränderungen des Chlorophyllgehalts sowie der spektralen Vegetationsindizes als Indikatoren für die pflanzenphysiologische Reaktion auf die Applikationen.

Um diese Effekte zu analysieren, wurden im Rahmen eines Praxisversuchs unter realen Anbaubedingungen Parzellen mit unterschiedlichen Aufwandmengen behandelt. Neben einer unbehandelten Kontrollvariante wurden drei Dosierungsstufen untersucht: die reguläre Aufwandmenge, eine verdoppelte Dosierung und eine vervierfachte Dosierung. Zur Überprüfung der Auswirkungen dieser Herbiziddosierungen auf die Pflanzen wurden verschiedene Detektionsmethoden eingesetzt. Der Chlorophyllgehalt wurde sowohl mittels photometrischer Laboranalyse nach ARNON (1949) als auch durch tragbare optische Messgeräte erfasst. Zusätzlich wurden Fernerkundungsdaten zur Berechnung der Vegetationsindizes NDVI und CIG herangezogen.

Auf Grundlage dieses Versuchsdesigns werden folgende Hypothesen aufgestellt und mithilfe der ermittelten Ergebnisse überprüft:

- a. Eine stufenweise Erhöhung der Herbiziddosierung um das Zweifache, bzw. Vierfache der Aufwandmenge führt zu einem 7,5 %, bzw. 15 % geringeren Chlorophyllgehalt in den Blättern.
- b. Eine erhöhte Herbiziddosierung hat einen signifikant negativen Einfluss auf die Vegetationsindizes NDVI und GIG des behandelten Bestandes.

Die Messergebnisse wurden durch statistische Analysen ausgewertet, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Dosierungen quantitativ zu erfassen und die Sensitivität der einzelnen Methoden zu vergleichen.

3. Literatur

Im Kapitel Literatur werden die für diese Arbeit relevanten Themenbereiche unter Verwendung von Grund- und aktueller Fachliteratur aufgezeigt. Zunächst werden die agronomischen Eigenschaften des Winterweizens beschrieben. Anschließend wird die Wirkung von Herbizidmaßnahmen sowie die Reaktion der Pflanze auf diese behandelt. Des Weiteren werden die Analysemethoden zur Ermittlung des Chlorophyllgehaltes vorgestellt. Abschließend wird der Einsatz von Fernerkundung in der Landwirtschaft als ergänzendes Instrument zur Feldbonitur im landwirtschaftlichen Kontext beschrieben.

3.1 Agronomische Ansprüche von Winterweizen

Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) ist die wichtigste Getreidekultur im deutschen Ackerbau und nimmt eine zentrale Stellung in der pflanzenbaulichen Produktion ein. Im Jahr 2024 wurde die Kultur in Deutschland auf ca. 2,6 Millionen Hektar angebaut, wobei eine Gesamterntemenge von ca. 18,5 Millionen Tonnen erzielt wurde. Dies entspricht einem durchschnittlichen Kornertrag von 7,18 t/ha, wobei regionale Schwankungen infolge heterogener Boden- und Klimabedingungen sowie standortspezifischer Managementstrategien ertragsbedeutend sind (BMEL 2025). Die wirtschaftliche Bedeutung des Weizens resultiert aus den vielseitigen Nutzungsmöglichkeiten als Back-, Futter- oder Industriegetreide sowie aus der hohen Ertragsstabilität. Die agronomischen Eigenschaften des Winterweizens werden durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, darunter Standortbedingungen, Bodenbeschaffenheit, klimatische Faktoren und Bewirtschaftungsmaßnahmen. Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Parameter ist essenziell, um fundierte Anbauentscheidungen zu treffen und somit das Ertragspotenzial der Kultur nachhaltig zu maximieren (DIEPENBROCK et al. 2016, S.181 ff.).

An den Boden stellt der Winterweizen durch die lange Vegetationszeit, welche mit einem hohen Wasserverbrauch einher geht, im Vergleich zu anderen Getreidearten hohe Ansprüche. Durch den frühzeitigen Wurzeltiefgang mit einer starken Wurzelprägung gilt die Kultur auf tiefgründigen, nährstoffreichen und gut durchlüfteten Böden als ertragsstabil. Besonders auf den leichten Standorten mit geringer Niederschlagsmenge ist die Vorfrucht ein bedeutender Faktor. Winterraps, Körnerleguminosen oder Kartoffeln lockern den Boden mit ihren Wurzeln effektiv auf und hinterlassen somit eine ideale Bodengare für die nachfolgende Frucht (LWK NIEDERSACHSEN 2020, S. 111 ff.). Auch FISCHBECK et al. (1982) ordnen Winterweizen

als Kultur mit hervorragender Ausnutzung der Vorfruchtwirkungen ein, insbesondere auf guten Standorten. Ferner wird die Verträglichkeit mit Spätsaaten erwähnt, wodurch der Anbau auch nach späträumenden Kulturen wie Zuckerrüben oder Mais möglich ist.

Die Aussaat erfolgt nach DIEPENBROCK et al. (2016, S.185-187) üblicherweise zwischen Ende September und Anfang Oktober, wobei der optimale Zeitpunkt standort- und sortenspezifisch variiert. Eine frühe Aussaat kann eine starke Bestockung begünstigen, erhöht jedoch das Risiko von Auswinterung und Krankheitsanfälligkeit. Späte Aussaaten bis in den Dezember hingegen können durch unzureichende Bestockung das Ertragspotenzial begrenzen. Die empfohlene Saatstärke variiert zwischen 180 und 500 Körner/m², wobei diese in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit und der Saatzeit angepasst wird.

Im Verlauf ihrer Vegetationsperiode durchläuft die Pflanze mehrere charakteristische Entwicklungsstadien, die nach der BBCH-Skala klassifiziert werden. Die wichtigsten Phasen umfassen die Keimung, Bestockung, Schossen, Ährenschieben, Blüte, Kornfüllung und Abreife (MEIER 2018). Winterweizen zählt zu den Langtagspflanzen und weist eine obligate Vernalisation auf. Die Vernalisation ist eine entscheidende Voraussetzung für den Übergang in die generative Phase, wobei sich je nach Genotyp Unterschiede in der Dauer der Kälteexposition und der Reaktion auf unterschiedliche Photoperioden zeigen. Eine ausreichende Vernalisation in Kombination mit einer optimalen Tageslänge führt zu einer beschleunigten Entwicklung bis zum Ährenschieben, während ein Mangel an Kältereizen oder eine ungünstige Photoperioden die Entwicklungsdauer verlängern kann (SLAFER und RAWSON 1994).

Der Kornertrag von Winterweizen wird durch mehrere Ertragskomponenten beeinflusst, darunter die Bestandesdichte, Anzahl der Ährentragenden Halme, Kornzahl pro Ähre und das Tausendkorngewicht. Diese Parameter unterliegen besonders dem Einfluss durch die Nährstoffversorgung, das Wasserangebot und die Witterungsbedingungen während der Kornfüllungsphase (LOCHNER et al. 2018, S.22 ff.). Für die Ertragsbildung und Kornqualität spielt die Stickstoffdüngung eine entscheidende Rolle. Eine auf die Wachstumsphasen abgestimmte Stickstoffgabe fördert die Bestockung im Herbst, das Schossen im Frühjahr und die Proteineinlagerung während der Kornfüllung. In der Praxis wird eine Aufteilung der N-Düngung in drei Gaben empfohlen. Zu Vegetationsbeginn (BBCH 21) erfolgt eine Startgabe, welche den Bestandaufbau fördert. Die zweite N-Gabe erfolgt bei BBCH 31 zum Übergang

in die Schossphase und stärkt den Ertragsaufbau. Die Abschlussgabe dient der Ertrags- und Qualitätsbildung und kann bei Bedarf aufgeteilt werden zum Ährenscheiden (BBCH 41-45) und Ährenschieben (BBCH 51-55) (DIEPENBROCK et al. 2016, S.187). Neben Stickstoff sind auch die Nährstoffe Phosphor, Kalium und Schwefel für die Entwicklung der Weizenpflanze essenziell. Phosphor ist besonders für die Wurzelentwicklung und Energieübertragung von Bedeutung, während Kalium die Regulation des Wasserhaushalts unterstützt und die Stressresistenz gegenüber Trockenperioden erhöht (FISCHBECK et al. 1982).

Im Winterweizenanbau ist ein effektiver Pflanzenschutz einsetz essenziell, um Ertragsverluste durch pilzliche Erreger, Beikrautbesatz oder tierische Schaderreger zu minimieren und die Kultur langfristig gesund zu erhalten. Bereits zu Entwicklungsbeginn der Pflanzen wird durch den Einsatz von gebeiztem Saatgut eine erste Schutzmaßnahme getroffen, die das Infektionsrisiko durch pilzliche Erreger reduziert. Während der Vegetationsperiode erfolgt eine nach dem Schadschwellenprinzip gerichtete Bekämpfung von Wurzel-, Blatt- und Ährenkrankheiten, die je nach Entwicklungsstadium der Pflanze variieren. Frühe Infektionen werden häufig durch *Erysiphe graminis* (Echter Mehltau) verursacht, während mittlere Krankheitsverläufe insbesondere *Septoria tritici* betreffen. Späte Erreger wie *Septoria nodorum* treten überwiegend in den späteren Entwicklungsstadien auf und erfordern eine gezielte Bestandeskontrolle. Prognosemodelle und Warndienste, die auf Basis von Bestandes- und Witterungsdaten eine fundierte Entscheidung über den optimalen Behandlungszeitpunkt ermöglichen können, dienen als Unterstützung, den Pflanzenschutz so effizient und nachhaltig wie möglich zu gestalten (DIEPENBROCK et al. 2016, S.188). Zudem haben sämtliche Pflanzenschutzmaßnahmen nach dem deutschen Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz 2012, §3) nach den Grundsätzen der Guten fachlichen Praxis und dem integrierten Pflanzenschutz zu erfolgen. Dies bedeutet, dass chemische Pflanzenschutzmittel nur dann eingesetzt werden dürfen, wenn alternative Maßnahmen wie beispielsweise die Fruchtfolgegestaltung, Sortenwahl oder mechanische Verfahren nicht ausreichen, um die wirtschaftliche Schadschwelle zu unterschreiten.

3.2 Wirkung von Herbizidmaßnahmen in der Pflanze

Ein hoher Beikraut- und Ungrasbesatz im Bestand führt nicht nur zu Ertragseinbußen infolge von Konkurrenz um Nährstoffe, Wasser und Licht, sondern beeinträchtigt auch die Qualität und Lagerfähigkeit des Erntegutes. Neben der Erschwerung des Maschineneinsatzes dienen Unkräuter auch als Zwischenwirte für Pilze, Viren und Insekten (DIEPENBROCK et al. 2016, S. 108 ff.) Nach Ausschöpfung der in Kap. 3.1 beschriebenen Maßnahmen des integrierten Pflanzenschutzes, dienen Herbizide als wertvolle Bekämpfungsmaßnahme gegen Ungräser und Unkräuter.

Herbizide sind synthetisch hergestellte organische Verbindungen, welche Pflanzen über die Beeinflussung lebenswichtiger Stoffwechselprozesse abtöten können. Voraussetzung für die Anwendung im Pflanzenbau ist eine selektive Wirkung. Das bedeutet, die Wirkung zielt ausschließlich gegen unerwünschte Pflanzen, während die Kulturpflanze nur wenig oder gar keinen Schaden nimmt. Die verschiedenen Herbizide unterscheiden sich nach ihrer Aufnahme, Wirkung und dem Anwendungszeitpunkt (SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT o.D.). Nach SCHOPFER und BRENNICKE (2010, S. 652) wird in nicht selektive Voraufherbizide und selektive Nachaufherbizide unterschieden. Die Voraufherbizide dienen der Vernichtung aller auflaufenden Unkräuter, bevor die Kulturpflanze ihre Blätter entfaltet, während Nachaufherbizide gezielt gegen bestimmte Unkräuter während der Bestandesentwicklung eingesetzt werden können. Die Herbizide wurden anhand ihrer chemischen Struktur und ihres Wirkmechanismus nach HRAC- (Herbicide Resistance Action Committee) Klassifizierung eingeteilt.

Besonders zur Gräserbekämpfung hat der Wirkmechanismus der ACCase-Hemmer (Acetyl-CoA-Carboxylase) eine wichtige Funktion. Bei dieser Gruppe handelt es sich um hoch systemische Herbizide, welche sich nach der Aufnahme durch das Blattgewebe über die Leitbündel in der Pflanze sowohl akropetal als auch basipetal in der Pflanze verteilen. Die Abbildung 1 veranschaulicht die Wirkung der ACCase in der Pflanze. ACCase-Hemmer blockieren das Enzym Acetyl-CoA-Carboxylase, welches eine zentrale Rolle in der Fettsäuresynthese spielt. Fettsäuren sind essenziell für den Aufbau von Zellmembranen, Wachsschichten und Speicherlipiden. Das Enzym ACCase befindet sich hauptsächlich in den Chloroplasten und katalysiert dort die Umwandlung von Acetyl-CoA zu Malonyl-CoA, welches als Ausgangsstoff für die Synthese langkettiger Fettsäuren dient. Wird ACCase

gehemmt, kann die Pflanze keine neuen Fettsäuren mehr bilden, wodurch die Zellmembranen beschädigt werden und die betroffene Pflanze schließlich abstirbt. Zu den wichtigsten dieser Gruppe gehören die *FOP*, *DIM* und *DEN* Wirkstoffe (SCHLÜTER 2023). DEN-Herbizide (Phenylpyrazoline) wie beispielsweise das Pflanzenschutzmittel „Axial 50“ zeichnen sich durch eine hohe Wirksamkeit gegen schwer bekämpfbare Ungräser wie Windhalm und Acker-Fuchsschwanz aus, weshalb sie im Wintergetreideanbau verbreitet eingesetzt werden (SYNGENTA AGRO GMBH 2025).

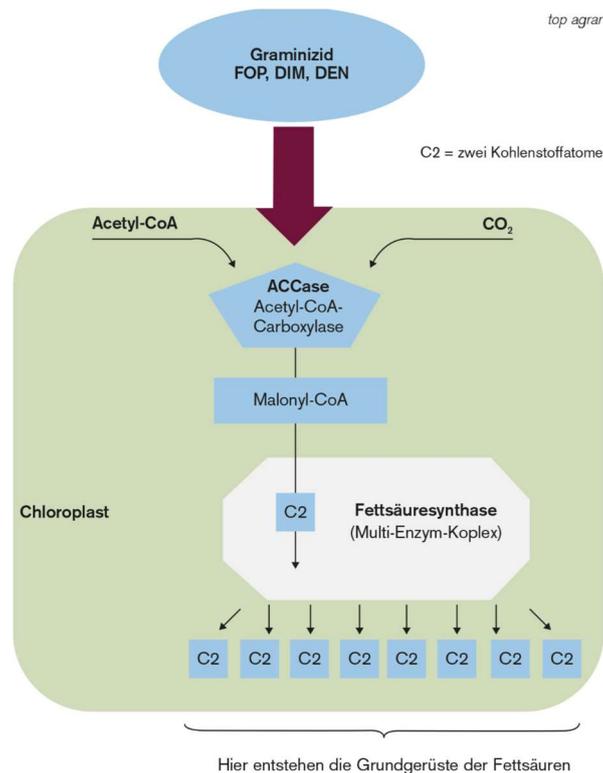


Abbildung 1: Wirkmechanismus von ACCase-Hemmern in den Chloroplasten (SCHLÜTER 2023)

In den letzten Jahrzehnten haben sich in vielen Regionen Resistenzen gegen ACCase-Hemmer entwickelt. In Deutschland und Ländern mit (winter-)getreidebetonten Fruchtfolgen ist vor allem die Resistenzausbildung des Acker-Fuchsschwanzes problematisch, daher auch die Einstufung dieser Wirkgruppe in HRAC-1, mit dem höchsten Resistenzrisiko. Ein Fortschritt stellt die Anpassung der Graminizide für den Einsatz im Getreidekulturen dar. Ursprünglich konnten ACCase-Hemmer nur in zweikeimblättrigen Kulturen wie Raps oder Zuckerrüben genutzt werden, da die Kulturpflanzen nicht empfindlich auf die Hemmstoffe reagierten. Um den Einsatz in einkeimblättrigen Kulturen zu ermöglichen, wurden sogenannte Safener entwickelt. Diese Stoffe fördern den Entgiftungsmechanismus in Getreidearten, sodass die

Kulturpflanze den Wirkstoff schneller abbauen kann, bevor er phytotoxisch wirkt. Dadurch bleibt der Weizen geschützt, während empfindliche Ungräser absterben (SCHLÜTER 2023, DLG 2018, S.10).

Nach DIEPENBROCK et al. (2016, S.20) werden ALS-Hemmer (HRAC-2) ebenfalls zu den mit hohem Resistenzrisiko eingestuften Wirkgruppen zugeordnet. ALS-Hemmer zählen zu den am häufigsten eingesetzten Wirkstoffgruppen. Sie zeichnen sich durch eine hohe Wirksamkeit bei niedrigen Aufwandmengen aus und gehen mit einer niedrigen Toxizität gegenüber Säugetieren einher. Durch die spezifische Hemmung der Acetolactat-Synthase wird die Biosynthese der Aminosäuren Valin, Leucin und Isoleucin unterbrochen, wodurch das Pflanzenwachstum gehemmt wird und die betroffenen Unkräuter schließlich absterben (DWEIKAT et al. 2023, S.2).

Diese zielgerichteten Wirkungsweisen führen jedoch zunehmend zu Resistenzen. Nach aktuellem Forschungsstand sind derzeit 176 Unkrautarten bekannt, die Wirkort-Resistenzen gegen ALS-Hemmer entwickelt haben, was diese Herbizidgruppe zur derjenigen mit den meisten dokumentierten Resistenzfällen macht. Gegen die Herbizide aus der Gruppe der ACCase-Hemmer sind aktuell 51 Wirkortresistenzen bekannt, allerdings ausschließlich bei Monokotylen Arten (INTERNATIONAL HERBICIDE-RESISTANT WEED DATABASE 2025). Ein im Wintergetreideanbau häufig eingesetztes Herbizid aus der Gruppe der ALS-Hemmer ist das Mittel „Atlantis Flex“. Es enthält die Wirkstoffe *Mesosulfuron-methyl* (45 g/kg) und *Propoxycarbazone* (67,5 g/kg) und wird gezielt zur Bekämpfung von Acker-Fuchsschwanz, Gemeinem Windhalm und Einjährigen zweikeimblättrigen Unkräutern eingesetzt (BAYER CROPSCIENCE DEUTSCHLAND GMBH 2025). Die Anwendung erfolgt im Frühjahr zu BBCH 21 bis 32 mit einer maximalen Aufwandmenge von 0,2 bis 0,33 kg/ha (BVL 2018, S. 11).

Trotz hoher Wirksamkeit sind strikte Resistenzmanagementstrategien erforderlich, da der fortgesetzte Einsatz das Selektionsrisiko für resistente Unkräuter erhöht. Herbizidresistenzen resultieren aus einem selektivem Anpassungsdruck, der durch die wiederholte Anwendung identischer Wirkstoffklassen begünstigt wird. Infolge natürlicher Selektion überleben resistente Individuen und vermehren sich, sodass sich betroffene Populationen langfristig etablieren können (BERGMANN 2022, S. 7-9).

Nach der Definition des HRAC lassen sich zwei Haupttypen von Resistenzmechanismen unterscheiden, die wirkortspezifische Resistenz (Wirkort-Resistenz) und die nicht-wirkortspezifische Resistenz (metabolische Resistenz), vgl. Abb. 2. Eine Wirkort-Resistenz entsteht durch Mutationen im Genom der Pflanze, wodurch das Herbizid nicht mehr an sein eigentliches Zielmolekül binden kann. Somit kann das Herbizid seine Wirkung nicht entfalten und die Pflanze überlebt trotz der Wirkstoffapplikation. Durch unterschiedliche Mutationspositionen innerhalb der pflanzlichen Gensequenz wird die Resistenzintensität beeinflusst, sodass die Wirksamkeit eines Herbizids je nach Mutation vollständig aufgehoben oder auch nur reduziert sein kann. Die metabolische Resistenz basiert im Gegensatz dazu auf biologischen Mechanismen, die verhindern, dass eine ausreichende Wirkstoffkonzentration am Zielort erreicht wird. Dies kann durch einen verstärkten Wirkstoffabbau, eine verminderte Aufnahme in die Pflanze oder einen reduzierten Wirkstofftransports innerhalb des Pflanzengewebes geschehen. Darüber hinaus kann eine Überproduktion des Zielenzyms dazu führen, dass die hemmende Wirkung des Herbizids kompensiert wird. Durch die geringe Spezifität der metabolischen Resistenz, kann diese sich auch auf neue, derzeit noch nicht zugelassene Wirkstoffe ausweiten, somit steigt auch das Risiko einer verminderten Wirksamkeit über mehrere Herbizidgruppen hinweg (DLG 2018, S.7 ff).

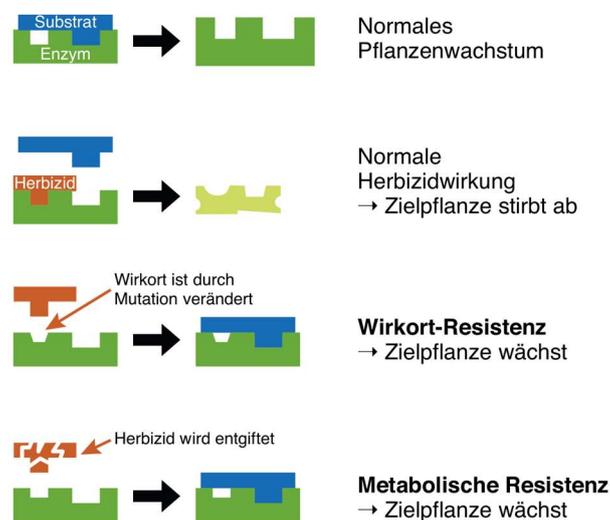


Abbildung 2: Veränderung der Herbizidwirkung bei Resistenzmechanismen (DLG 2018, S. 7, zitiert nach GEHRING 2017)

Zur Vermeidung von Resistenzen ist eine integrierte Pflanzenschutzstrategie erforderlich. Hohe Resistenzrisiken bestehen bei ACCase-, ALS- und PS-II-Hemmern (HRAC-Gruppen A, B, C), weshalb diese nicht dauerhaft als Solo-Wirkstoffe eingesetzt werden sollten. Stattdessen wird

ein regelmäßiger Wirkstoffwechsel sowohl innerhalb der Kultur als auch über die Fruchtfolge hinweg empfohlen. Zudem können Tankmischungen mit Herbiziden weniger gefährdeter Wirkmechanismen das Resistenzrisiko weiter reduzieren. Ein zielgerichteter Herbizideinsatz erfordert die Wahl einer ausreichenden Aufwandmenge sowie die Berücksichtigung günstiger Anwendungsbedingungen, um eine maximale Wirksamkeit zu gewährleisten. Gleichzeitig sollte die Häufigkeit der Herbizidanwendungen begrenzt werden, um den Selektionsdruck auf resistente Unkrautpopulationen zu reduzieren. Pflanzenbauliche Maßnahmen, wie eine vielgliedrige Fruchtfolge mit Wechsel von Sommerungen und Winterungen sowie zwischen Blatt- und Halmfrüchten oder die Integration mechanischer Unkrautbekämpfungsmaßnahmen spielen eine grundlegende Rolle im Resistenzmanagement (BERGMANN 2022, S. 25 f.).

Eine angepasste Fruchtfolgegestaltung wird ebenfalls in DLG (2018, S.7 ff.) als wichtigster Einflussfaktor im Rahmen des Resistenzmanagement beschrieben. Zusätzlich wird empfohlen, den Anbau von Kulturen zu reduzieren, die das Wachstum bestimmter Ungrasarten begünstigen, wie beispielsweise Acker-Fuchsschwanz im Wintergetreide.

3.3 Analysemethoden zur Chlorophyllermittlung

Chlorophyll ist ein essenzielles Pigment für die Photosynthese, das Pflanzen die Absorption von Lichtenergie zur Umwandlung in chemische Energie ermöglicht. Es kommt in den Chloroplasten fast aller Pflanzen vor und ist häufig mit Proteinen und Kohlenhydraten assoziiert. Die hohe Stabilität von Chlorophyll trägt zur konstanten Effizienz der Photosynthese bei, während Begleitpigmente wie Xanthophylle und Carotine zusätzlichen Schutz und Funktionalität bieten (HUMPHREY 1980, S.57 f.).

Die Autoren GOVINDJEE et al. (2024) geben einen Überblick über die historische Entwicklung der Chlorophyllforschung. Diese begann im Jahr 1818 mit den Apothekern Pelletier und Caventou, die das Pigment erstmals isolierten und seine chemischen Eigenschaften beschrieben. In ihren Untersuchungen stellten sie fest, dass Chlorophyll in verschiedenen Lösungsmitteln löslich ist und mit Metallsalzen reagiert. Im Jahr 1864 erkannte Stokes, dass es sich bei Chlorophyll um eine Mischung aus zwei verschiedenen Pigmenten handelt, was später zur Unterscheidung zwischen Chlorophyll a und b führte (vgl. STOKES 1864). Später entwickelte Richard Willstätter im Jahr 1913 Methoden zur Isolierung und

Reinigung beider Chlorophylltypen. Erst 1940 wurde die chemische Struktur durch Hans Fischer endgültig aufgeklärt (HUMPHREY 1980, S.59 f.).

Strukturell basieren Chlorophyll a und b auf einem Porphyrin-Ring mit einem zentralen Magnesiumion, der Unterschied liegt in einer einzelnen funktionellen Gruppe. Während Chlorophyll a eine Methylgruppe (-CH₃) beinhaltet, trägt Chlorophyll b an derselben Stelle eine Aldehydgruppe (-CHO). Aus diesem Unterschied resultieren die Absorptionseigenschaften der beiden Pigmente, so liegt das Absorptionsmaximum bei Chl a bei 662 nm Wellenlänge des Lichtes, während Chl b bei 642 nm das Maximum aufweist. In der Natur gibt es insgesamt 6 Chlorophyllarten, jedoch beschränkt sich das Auftreten in Pflanzen vor allem auf Chl a und b. Während Chl a überwiegend Licht aus dem violetten und orangen Spektralbereich aufnimmt, wird durch Chl b besonders das blaue und gelbe Licht absorbiert (vgl. Abb. 3). Zwar können beide Formen auch Licht anderer Wellenlängen verwerten, jedoch mit geringerer Effizienz. Grünes Licht hingegen wird kaum absorbiert, sondern größtenteils reflektiert, dadurch erscheint das Blatt für das menschliche Auge grün (MAX-PLANCK-INSTITUT 2015).

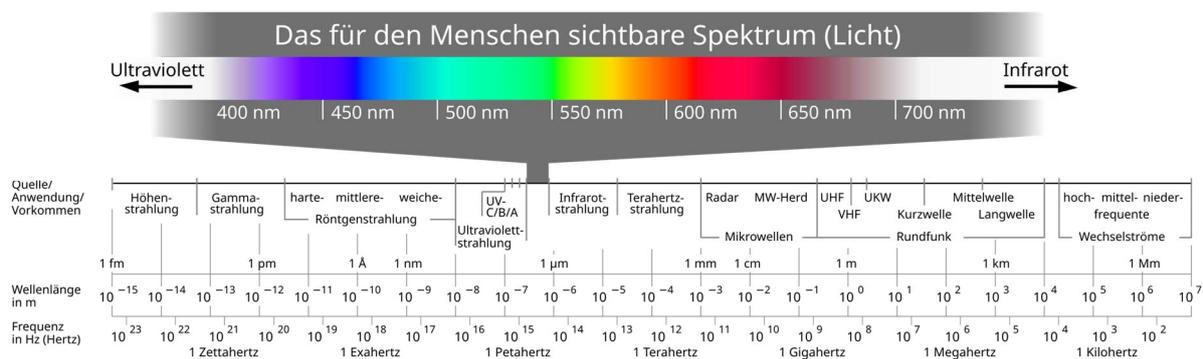


Abbildung 3: Das elektromagnetische Spektrum (WIKIMEDIA COMMONS 2025, CC BY-SA 4.0)

Der Chlorophyllgehalt einer Pflanze ist nach BRZEZOWSKI et al. (2019, S.2) ein zentraler Indikator für ihre physiologische Leistungsfähigkeit, da dieser direkt mit der Effizienz der Photosynthese und der Stickstoffversorgung zusammenhängt. Die Autoren verweisen auf eine enge Wechselwirkung zwischen der Chlorophyll-Biosynthese und den photosynthetischen Prozessen. Die Chlorophyllproduktion wird dabei durch die Dynamik des Elektronenflusses innerhalb der Photosynthese reguliert. Eine exakte Bestimmung des Chlorophyllgehalts ist daher sowohl in der Pflanzenphysiologie als auch in der Pflanzenforschung von großer Bedeutung. Die Ermittlung des Chlorophyllgehaltes kann auf verschiedene Arten erfolgen: chemisch, optisch oder über die Fernerkundung. Während chemische Analysen eine hohe

Präzision bieten, gewinnen nicht-destruktive optische und spektrale Methoden aufgrund ihrer Anwendungsfreundlichkeit in der modernen Landwirtschaft zunehmend an Bedeutung (CEROVIC et al. 2012, S.257).

Die klassische Methode zur quantitativen Chlorophyllbestimmung basiert auf spektralphotometrischen Verfahren, bei denen Chlorophyll a und b aus dem Blattgewebe der Pflanze extrahiert und deren Absorptionsspektrum analysiert wird. Eine der bekanntesten Methoden wurde von ARNON (1949) entwickelt und nutzt organische Lösungsmittel wie Aceton zur Extraktion. Die Chlorophyllkonzentration wird anschließend mittels Spektralphotometrie durch Messung der Lichtabsorption bei den Wellenlängen 645 nm und 663 nm bestimmt. Der Vorteil dieser Methode liegt in einer hohen Genauigkeit sowie der Möglichkeit einer exakten Differenzierung der Chlorophylltypen. Allerdings erfordert dieses Verfahren chemische Reagenzien, eine Laborauswertung und geht mit einer zerstörenden Probenahme einher, was für eine breite Anwendung in der praktischen Landwirtschaft ungeeignet ist (ARNON 1949, S.3).

Um den Chlorophyllgehalt in Echtzeit anhand der Pflanze im Feld erfassen zu können, wurden optische Methoden entwickelt, welche auf der Wechselwirkung zwischen Licht und den pflanzlichen Pigmenten basieren. Diese Verfahren ermöglichen eine schnelle und berührungslose Messung, daher eignen sie sich besonders für den landwirtschaftlichen Praxiseinsatz.

Bereits 1995 stellten MARKWELL et al. (1995) das SPAD-502-Meter als ein weitverbreitetes, tragbares Gerät zur Chlorophyllbestimmung dar. Dieses Gerät nutzt zwei Leuchtdioden mit Wellenlängen von 650 nm und 940 nm sowie einen Photodiodendetektor zur sequenziellen Transmissionsmessung von rotem und infrarotem Licht durch die Blätter. Der ermittelte Wert, genannt SPAD-Wert (Soil Plant Analysis Development) basiert auf dem Verhältnis zwischen dem transmittierten Licht bei 650 nm (Chlorophyll-Absorptionsmaximum) und 940 nm (Referenzwellenlänge.) Die Autoren betonen die Notwendigkeit einer Kalibration des Gerätes zur Erhaltung von exakten Messwerten aufgrund der Abhängigkeit von Einflussfaktoren wie der Blattdicke oder der Ansetzposition der Lichtquelle am Blatt (MARKWELL et al. 1995, S.470 f.). Neben dem SPAD-Meter wird in der landwirtschaftlichen Praxis zunehmend der YARA N-Tester zur nicht-destruktiven Chlorophyllermittlung eingesetzt. Dieses tragbare Messgerät basiert, analog zum SPAD-Meter, auf der Messung der Lichtabsorption durch das

Blattgewebe. Aus dem direkt an der Pflanze gemessenen Wert wird unter Berücksichtigung der Parameter: Sorte, Ertrags- und Qualitätsziel, bereits gedüngte N-Menge und N_{\min} -Gehalt im Boden der Stickstoffbedarf der Pflanze für die zweite und dritte Stickstoffgabe berechnet und ausgegeben (YARA 2025). Feldversuche am Standort Bernburg ergaben allerdings mittlere Abweichungen in Höhe von 30 kg N/ha zu den für den optimalen Ertrag benötigten N-Mengen. Es wurde jedoch betont, dass die Treffsicherheit der Düngungsempfehlungen durch eine stärkere Differenzierung nach Sorten und Ertragsziel verbessert werden kann (LLG 2008).

Die Fluoreszenzanalyse ist ein weiteres Verfahren zur Ermittlung des Chlorophyllgehaltes. Sie ermöglicht eine nicht-invasive und präzise Echtzeitmessung der Photosyntheseleistung, indem sie gezielt die Fluoreszenz des Photosystems II (PSII) detektiert. Die Methode basiert auf der Erkenntnis, dass ein angeregtes Chlorophyllmolekül überschüssige Energie auf vier Wegen abgeben kann: durch photochemische Reaktionen, Wärmeabgabe, Energieübertragung an benachbarte Pigmente oder Fluoreszenzemission. Da diese Prozesse in direkter Konkurrenz zueinanderstehen, lassen sich aus den Fluoreszenzsignalen wertvolle Rückschlüsse auf die Aktivität der Photosynthese und den Zustand des Elektronentransports ziehen (CAMPBELL et al. 1998, S.667) Besonders die PAM-Fluorometrie (Puls-Amplituden-Modulation) hat sich als präzise Methode zur Analyse etabliert. Bei dieser Methode erfolgt die Messung der Chlorophyllfluoreszenz über ein modulierte Lichtsignal, welches in hoher Frequenz ein- und ausgeschaltet wird. Der entscheidende Vorteil gegenüber konventionellen Messmethoden liegt in der selektiven Detektion der Fluoreszenz, die nur durch das modulierte Messlicht des Geräts angeregt wird. Dadurch wird die Störung durch Umgebungslicht minimiert und ausschließlich die relevante PSII-spezifische Fluoreszenz erfasst (MAXWELL und JOHNSON 2000).

Ein zentraler Aspekt der PAM-Fluorometrie ist das Fluoreszenzquenching, welches Rückschlüsse auf die Effizienz der Photosynthese sowie den Schutzmechanismus der Pflanze ermöglicht. Dabei wird zwischen photochemischer (qP) und nicht-photochemischer Löschung (NPQ) unterschieden. Die qP beschreibt die Reduktion der Fluoreszenz durch aktiven Elektronentransport im Photosystem II. Die Fluoreszenz bleibt niedrig, solange die Elektronenakzeptoren der Transportkette Elektronen aufnehmen. Sobald die Akzeptorkapazität erschöpft ist, sammeln sich vermehrt reduzierte Elektronenträger. Folglich schließen sich die PSII-Reaktionszentren, was zu einem Anstieg der Fluoreszenz führt. Die NPQ hingegen beschreibt Mechanismen, die überschüssige Lichtenergie verteilen, um Schäden durch Lichtübersättigung zu vermeiden. Einer der wichtigsten Mechanismen in diesem

Zusammenhang ist der Xanthophyll-Zyklus, bei dem das Pigment Violaxanthin unter hoher Lichtintensität in Zeaxanthin umgewandelt wird. Diese Umwandlung ermöglicht die Ableitung überschüssiger Energie in Form von Wärme und trägt wesentlich zur photoprotektiven Regulation der Lichtabsorption bei (CAMPBELL et al. 1998, S.671 ff.).

Die Fähigkeit zur Regulierung zwischen photochemischer und nicht-photochemischer Energieverwertung ist essenziell für die Anpassung an Umweltbedingungen, somit liefert die PAM-Fluorometrie wertvolle Erkenntnisse zur Photosyntheseeffizienz und Stressreaktionen von Pflanzen (CAMPBELL et al. 1998, S.673-675).

3.4 Einsatz von Fernerkundung zur Chlorophyllbestimmung

In der modernen Landwirtschaft und Agrarforschung hat sich die Fernerkundung als eine wertvolle Technologie zur nicht-invasiven Bestimmung des Chlorophyllgehalts etabliert, da diese eine flächendeckende Analyse des Pflanzenzustands ermöglicht. Insbesondere optische Sensoren wie Chlorophyllfluoreszenz- und hyperspektrale Messsysteme bieten eine präzise Möglichkeit, chlorophyllbedingte Veränderungen in Pflanzen zu detektieren, wodurch sich Rückschlüsse auf den Nährstoffversorgungszustand, Krankheiten und Herbizidwirkungen ziehen lassen (MAHLEIN et al. 2012, S. 198).

Von besonderer Bedeutung für die Chlorophyllbestimmung sind Vegetationsindizes, welche auf spektralen Reflexionsdaten basieren. Zu den wichtigsten in diesem Zusammenhang zählen der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) und der Green Chlorophyll Index (GCI). Der NDVI ist einer der am häufigsten eingesetzten spektralen Indizes zur Bewertung der Vegetationsdichte und Photosyntheseaktivität. Er basiert auf der Reflexionseigenschaft von Pflanzen in zwei spezifischen Wellenlängenbereichen. Berechnet wird er nach der folgenden Formel:

$$NDVI = \frac{(NIR - Rot)}{(NIR + Rot)}$$

Hierbei steht NIR (nahes Infrarot) für das stark reflektierte Licht gesunder Pflanzen, während Rot das sichtbare Licht ist, das durch Chlorophyll größtenteils absorbiert wird. Ein hoher NDVI-Wert deutet auf einen dichten Pflanzenbestand mit gesunder Vegetation mit einer hohen Photosyntheseaktivität hin, da Chlorophyll das rote Licht effizient absorbiert und gleichzeitig viel NIR-Strahlung reflektiert. Ein niedriger Wert hingegen weist auf gestresste oder geschädigte Pflanzen hin, beispielsweise durch Trockenstress, Nährstoffmangel oder Herbizideinfluss, da ein reduzierter Chlorophyllgehalt zu einer stärkeren Reflexion im roten Bereich führt (GISGEOGRAPHY 2025).

Während der NDVI hauptsächlich biomassebedingte Veränderungen detektiert, wurde der Green Chlorophyll Index (CIG) speziell zur genaueren Quantifizierung des Chlorophyllgehalts entwickelt. Seine Berechnungsformel lautet:

$$CIG = \frac{(NIR - Grün)}{1}$$

Anders als der NDVI ist der CIG direkt mit dem Chlorophyllgehalt und damit mit der Photosyntheseleistung der Pflanze korreliert. Da Chlorophyll das Licht im roten Bereich stark absorbiert, während die Reflexion im grünen Bereich geringer ausfällt, erlaubt dieser Index eine differenziertere Analyse des Blattzustandes (EOS DATA ANALYTICS 2022). Ein weiterer Vorteil des CIG liegt nach GITELSON et al. (2003, S.276, f.) in seiner geringeren Empfindlichkeit gegenüber strukturellen Unterschieden in der Blattmorphologie. Der CIG wird in der Literatur teils als GCI erwähnt, die Bedeutung und Berechnung sind identisch.

Neben den Anwendungsmöglichkeiten von Chlorophyllindizes in der praktischen Landwirtschaft zur Erkennung von Nährstoffdefiziten in Pflanzen oder als Grundlage für die Erstellung von Nährstoffapplikationskarten, wird in EOS DATA ANALYTICS (2022) auch auf weitere Einsatzgebiete, beispielsweise für Versicherungen zur Ertragsabschätzung der Erntemengen oder für Betriebsmittelhersteller zur Evaluierung der Wirksamkeit ihrer Produkte im Pflanzenbestand verwiesen.

4. Material und Methoden

Diese Arbeit befasst sich mit einem Feldversuch, welcher in der Saison 2023/2024 an der Kultur Winterweizen durchgeführt wurde. Betreut wurde der Versuch von der Hochschule Anhalt in Zusammenarbeit mit der Forschungsabteilung der Firma John Deere.

4.1 Versuchsaufbau

Der Versuch wurde innerhalb einer landwirtschaftlichen genutzten Fläche der DLG am Standort Bernburg (Saale) im Oktober 2023 angelegt. Angebaut wurde Winterweizen der Sorte „KWS Donovan“, die Vorfrucht war Silomais. Die Aussaat erfolgte am 17.10.2023 mit einer Saatstärke von 205 Körnern pro Quadratmeter. Zur Förderung der Jugendentwicklung wurde mit der Aussaat eine Unterfußdüngung mit 80 kg/ha TSP ausgebracht. Die weiteren Daten der Bestandesführung sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Für den Versuch wurde eine Fläche innerhalb des Schlages parzelliert. Die Versuchsanlage wurde unter ceteris-paribus-Bedingungen in der Bestandesführung umgesetzt, um die Herbizideffekte statistisch sicher quantifizieren zu können. Die zwei Herbizidmaßnahmen im Frühjahr, im Folgenden als H1 und H2 bezeichnet, erfolgten separat mit Parzellentechnik, der Zeitpunkt orientierte sich an den Spritzterminen des Gesamtschlages.

Tabelle 1: Bestandesführung der Fläche

Datum	Maßnahme	Menge	Bemerkung
17.10.2023	Bestellung	205 kö/m ² TSP 80 kg/ha	KWS Donovan
22.10.2023	Herbizid	Battle Delta 0,3 l/ha Beflex 0,3 l/ha	Herbstbehandlung
23.02.2024	Düngung	SSA 147 kg/ha	
06.04.2024	Pflanzenschutz	Bor 0,3 l/ha Mn-Nitrat 0,5 l/ha Tebucur 0,5 l/ha Sonis 0,21 l/ha Bolt 0,4 l/ha	
07.04.2024	Düngung	AHL 140 l/ha	
08.04.2024	Herbizid 1	Atlantis Flex (330/ 660/1320 g/ha)	nach Variante
30.04.2024	Herbizid 2	Biathlon 4D (70, 140, 280 g/ha)	nach Variante
03.05.2024	Düngung	KAS 107 kg/ha	
07.05.2024	Pflanzenschutz	Bor 0,25 l/ha Medax Top 0,31 l/ha Ballet 0,3 l/ha Elatus Era 0,84 l/ha	

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt, er bestand aus 13 Varianten (1 – 13) mit je fünf Wiederholungen (A-E). Der gesamte Versuch umfasste 65 Parzellen mit den Abmessungen 3 m x 15 m. Um den Einfluss der Bodenheterogenität auf das Ergebnis zu minimieren, wurden diese randomisiert angelegt.

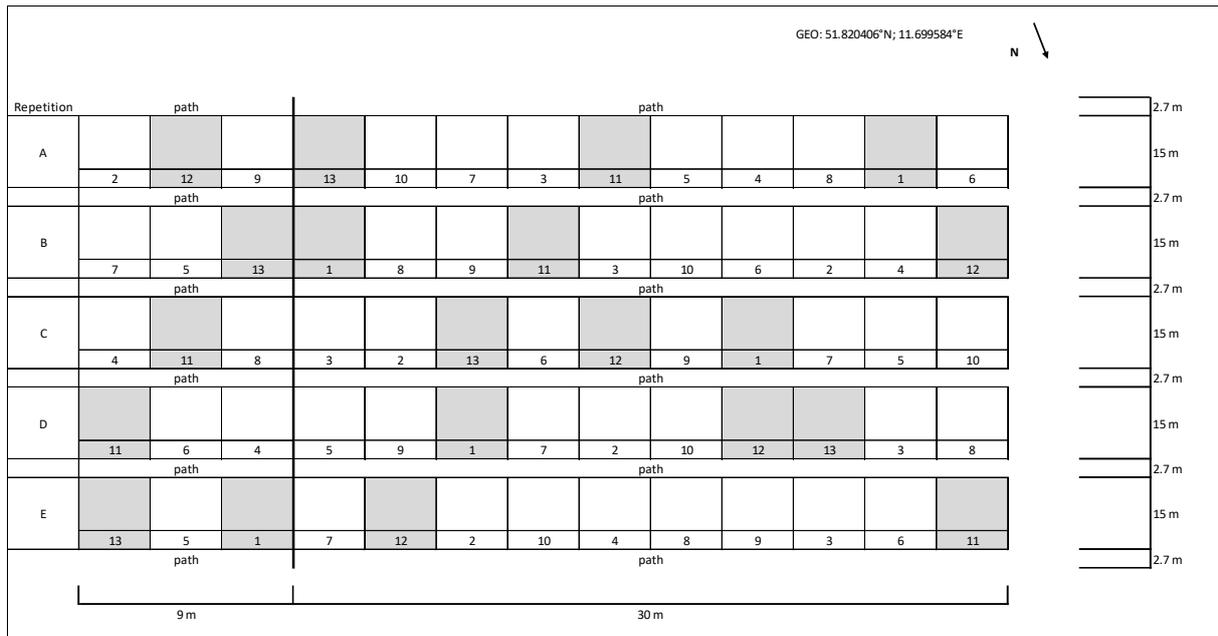


Abbildung 4: Anlageplan des gesamten Feldversuches

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind die Parzellen 1, 11, 12 und 13 relevant. In Tabelle 2 ist die Anordnung dieser Parzellen dargestellt.

Tabelle 2: Anordnung der Parzellen im Versuch

Wiederholung	Variante			
A	12	13	11	1
B	13	1	11	12
C	11	13	12	1
D	11	1	12	13
E	13	1	12	11

Die Varianten wurden mit unterschiedlicher Herbiziddosierung behandelt, diese sind in Tabelle 3 erläutert. Die Variante 1 sind die Nullparzellen, hier erfolgte die Unkrautbekämpfung ausschließlich mechanisch nach Bedarf und von Hand. Variante 11 stellt die reguläre Aufwandmenge des Produktes dar, während die Variante 12 die doppelte und die Variante 13 die vierfache Menge abbilden. Die erste Herbizidapplikation im Frühjahr wurde mit dem Mittel „Atlantis Flex“ (45 g/kg Mesosulfuron-methyl) am 08. April 2024 durchgeführt. Die zweite Herbizidmaßnahme erfolgte mit dem Mittel „Biathlon 4D“ (714 g/kg Tritosulfuron, 54 g/kg Florasulam) am 30. April 2024.

Tabella 3: Dosierung der Varianten zu den beiden Herbizidapplikationen H1 und H2

Variante	Mittel H1	Aufwandmenge /ha	Mittel H2	Aufwandmenge/ ha
1	Atlantis Flex	-	Biathlon 4D	-
11	Atlantis Flex	330 g	Biathlon 4D	70 g
12	Atlantis Flex	660 g	Biathlon 4D	140 g
13	Atlantis Flex	1320 g	Biathlon 4D	280 g

4.2 Versuchsdurchführung

Um die Wirkung der unterschiedlichen Dosierungen auf den Chlorophyllgehalt der Pflanze zu erfassen, wurden drei verschiedene Detektionsmethoden angewendet. Die Veränderung des Farbtons der Blätter wurde mittels N-Tester gemessen. Anhand von Luftbildaufnahmen einer Drohne mit Multispektralkamera wurden die Indizes NDVI und ClG errechnet. Der Chlorophyllgehalt wurde mittels Blattproben im Analytiklabor (AG Rhizon) der Hochschule Anhalt am Standort Bernburg-Strenzfeld bestimmt. Die Probenentnahme im Bestand sowie die Messungen erfolgten jeweils vor und nach den Herbizidmaßnahmen H1 und H2.

N-Tester

Die Chlorophyllkonzentration in den Getreideblättern wurde mit dem N-Tester der Firma YARA GmbH & Co. KG gemessen. Dabei wird das jüngste vollentwickelte Blatt der Pflanze mit Licht in zwei Wellenlängenbereichen durchleuchtet, welche unterschiedlich stark vom Chlorophyll absorbiert werden. Anhand des von der Silizium-Fotodiode aufgefangenen Restlichtes wird ein Messwert errechnet. Je Parzelle und Probendurchgang wurden je 30 frische Blätter beprobt und anschließend zur weiteren Untersuchung im Labor eingefroren. Aus den 30 Messwerten wurde anschließend vom Gerät ein einzelner Ausgabewert errechnet.

Chlorophyllextraktion im Labor

Im Labor wurde mittels photometrischer Bestimmung der Chlorophyllgehalt der zuvor aufgetauten Blattproben ermittelt. Eine Beeinflussung des Chlorophyllgehaltes durch das Einfrieren ist laut den Untersuchungen von LISIEWSKA et al. (2002) bei der im Versuch angewendeten Zeitdauer von ca. zwei Wochen nicht zu erwarten, dennoch wurde auf eine gleichmäßige Verweildauer im Gefrierschrank aller Proben geachtet. Pro Parzelle und Probendurchgang wurden mit einer Lochzange aus 8 Blättern eine Blattfläche von insgesamt 1,272 cm² ausgestanzt und anschließend für 24 Stunden in 10 ml DMSO (Dimethylsulfoxid,

organisches Lösungsmittel) unter Ausschluss von Licht leicht geschüttelt. Die Flüssigkeit wurde in Küvetten umgefüllt und anschließend mit dem Photometer analysiert. Gemessen wurde die Absorption bei 645 nm (A645) und 663 nm (A663). Das beschriebene Verfahren im Labor wurde als Doppelbestimmung durchgeführt, in die Auswertung fließt der Mittelwert beider Messungen ein. Berechnet wurde die totale Chlorophyllkonzentration des Extraktes nach der Gleichung von ARNON (1949, S.3):

$$tot\ Chl\ (g\ l^{-1}) = 0,0202\ A_{645} + 0,00802\ A_{663}$$

Die ermittelte Konzentration wird anschließend in den Blatt-Chlorophyllgehalt (mg Chl/cm² Blattfläche) umgerechnet. Anhand eines Beispiels wird im Folgenden gezeigt, wie die Berechnung des Blattchlorophyllgehaltes erfolgt. Bei dem zweiten Probendurchgang vom 17. April wurde in Parzelle A1 mittels photometrischer Analyse eine mittlere Extinktion von 0,152 bei 645 nm und 0,445 bei 663 nm gemessen. Eingesetzt in die oben aufgeführte Gleichung und anschließend mit dem Faktor 1000 multipliziert, ergibt sich die totale Chlorophyllkonzentration (mg/l).

$$tot\ Chl\ (g\ l^{-1}) = (0,0202 * 0,152) + (0,00802 * 0,445)$$

$$tot\ Chl\ (g\ l^{-1}) = 0,006635\ g/l = 6,635\ mg/l$$

Um den Blatt-Chlorophyllgehalt (mg Chl/ cm² Blattfläche) zu erhalten, erfolgt eine Umrechnung unter Berücksichtigung der in die Lösung gegebene Blattfläche. Bei acht Stanzproben mit je 4,5 mm Durchmesser ergibt sich eine Blattfläche von 1,272 cm² je Probe.

$$tot\ Chl\ (mg/cm^2) = \frac{6,635\ mg/l * 0,01l}{1,272\ cm^2} = 0,052$$

Drohnendaten

Die Luftbildaufnahmen wurden mit dem Drohnenmodell DJI Mavic 3M aufgenommen. Der verwendete Kamerasensor ist ein 1/2,8 CMOS-Sensor mit einer effektiven Auflösung von 5 Megapixeln. Die Multispektralkamera misst in den folgenden Wellenlängen: im grünen Bereich bei 560 nm, im roten bei 650 nm, im Red Edge Bereich bei 730 nm und im Nahen Infrarot bei 860 nm. Für die Erstellung der UAV-Bilder wurden zunächst Passpunkte mit einer Genauigkeit von etwa 2-3 cm mithilfe eines mobilen RTK-Vermessungssystems (Stonex S900T) ausgelegt

und vermessen. Der Flug erfolgte mit aktiver RTK-Positionierung in einer Höhe von 15 m bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s. Erstellt wurden die Orthomosaik durch Einsatz der Software „Agisoft Metashape Professional“ (Version 1.6.3), wobei eine Georeferenzierung über die Passpunkte und radiometrische Kalibrierung durch den internen Sonnenlichtsensor der DJI Mavic 3M erfolgte. Die Aufnahmen wurden mit einer voreingestellten Auflösung von 1 cm pro Pixel ausgegeben. Eine zweite Georeferenzierung mittels QGIS 3.6 ermöglicht eine nahezu deckungsgleiche Pixelanordnung mit einer Abweichung von etwa 3 cm zwischen den Luftbildern. Die Auswertung der Orthomosaik erfolgte mit miniGIS V2 (Version 2.11.1.0), welche die Planung der Parzellen, die Berechnung der Indizes und die Ausgabe der Daten je Parzelle umfasst. Berechnet wurde der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sowie der Green Chlorophyll Index (CI_G).

Wetterdiagramm

Die Wetteraufzeichnungen für den genauen Standort der Fläche stammen vom Beratungsträger Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion e.V. (isip). In Abbildung 5 sind die Niederschlagsmengen, Lufttemperaturen, sowie die Luftfeuchte der Fläche in den Monaten April und Mai dargestellt.

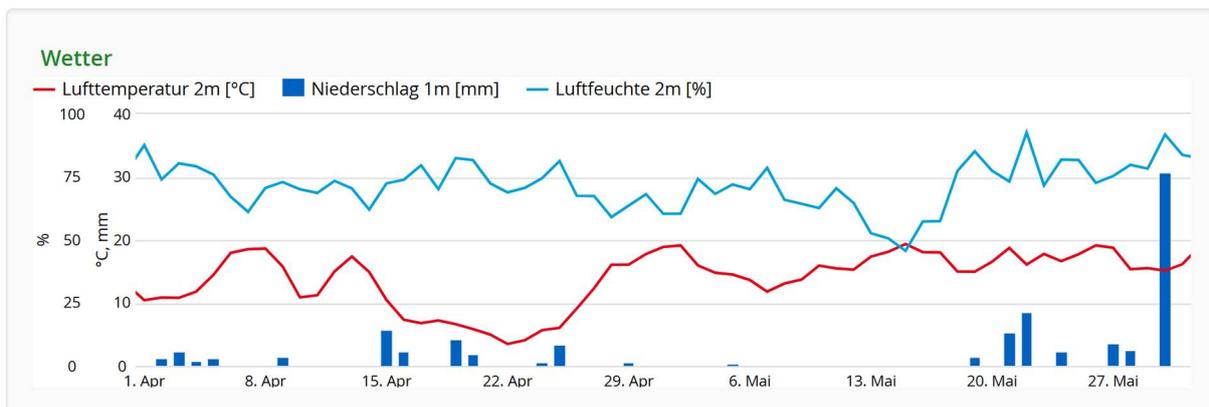


Abbildung 5: Wetterdaten der Versuchsfläche im April-Mai 2024 aus ISIP (2024)

Ertragserfassung:

Die Ernte der Parzellen erfolgte am 25.07.2024 unter Verwendung des Parzellendreschers „Wintersteiger Quantum Core“. Der Kornertrag wurde parzellenweise erfasst und fließt als Mittelwertberechnung der Wiederholungen A-E in die Auswertung ein. Zuvor, am 11. Juni, wurde bei BBCH 75 der Parameter Ährentragende Halme je Quadratmeter über manuelle Auszählung im Bestand erfasst. Dieser Wert dient als Ertragsprognose sowie zu Unterstützung der Aussagekraft des gemessenen Kornertrages.

4.3 Datenerhebung- und Auswertung

Die Feldversuche wurden von der Hochschule Anhalt auf einer Fläche der DLG im Auftrag der Firma John Deere angelegt und betreut. Die Aussaat, Bestandesführung, Herbizidapplikationen sowie die Ernte wurde von der DLG in Zusammenarbeit mit der Hochschule Anhalt durchgeführt. Die Messung der N-Tester-Werte erfolgte eigenständig, ebenso die Laboranalyse zur Chlorophyllbestimmung im Chemielabor der Hochschule Anhalt. Die Drohnenaufnahmen sowie die Aufbereitung der daraus resultierenden Daten (NDVI, CIG) wurden von der Hochschule Anhalt bereitgestellt. Die statistische Analyse und grafische Aufbereitung der Daten wurden im Rahmen dieser Arbeit eigenständig durchgeführt. Darüber hinaus übernahm der Verfasser einen Großteil der Überwachung und Bonitur der Versuchspartellen während der Vegetationsperiode. Die Hochschule Anhalt stand dabei beratend zur Verfügung, insbesondere hinsichtlich methodischer Vorgehensweise und der standardisierten Datenerfassung.

Im Rahmen der Datenauswertung für die vorliegende Arbeit wurden die Mittelwerte der fünf Wiederholungen (A-E) für jeden Messzeitpunkt separat berechnet, um die Entwicklung der gemessenen Werte in Abhängigkeit der Herbiziddosierung darzustellen. Zusätzlich wurde für jeden Messzeitpunkt der H1 eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt, um zu prüfen, ob sich die Mittelwerte der Dosierungsstufen signifikant voneinander unterscheiden. Diese Methode prüft, ob sich die Mittelwerte der Dosierungsstufen zu den einzelnen Messzeitpunkten statistisch signifikant unterscheiden, indem die Herbiziddosierung als alleiniger Einflussfaktor betrachtet wird.

5. Ergebnisse

Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zur Chlorophylldetektion anhand der Messungen im Bestand, der chemischen Laboranalyse sowie den Daten der Fernerkundung abgebildet.

5.1 N-Tester im Bestand

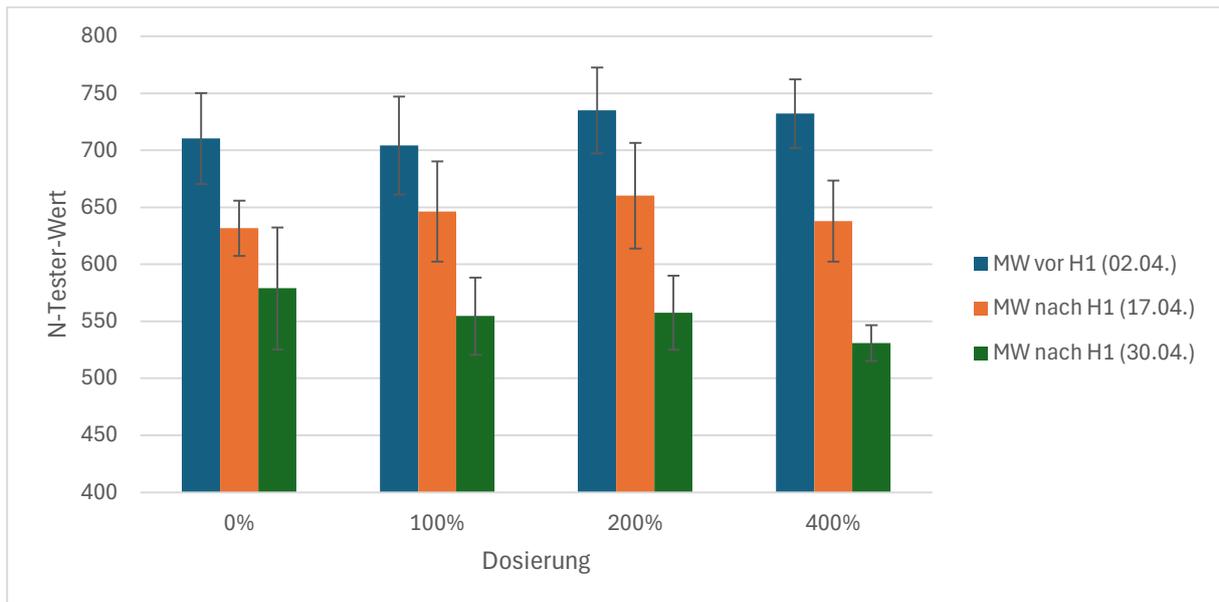


Abbildung 6: Veränderung des N-Tester-Wertes nach der ersten Herbizidapplikation in Abhängigkeit von der Dosierung ($n=5$)

In Abbildung 6 sind die Mittelwerte (MW) der N-Tester-Werte für die verschiedenen Dosierungsstufen an drei Messzeitpunkten um die erste Herbizidapplikation vom 08. April dargestellt. Zu Beginn der Messungen lagen die Mittelwerte über alle Varianten zwischen 704 und 735. Neun Tage nach der Applikation zeigten sich in allen Dosierungsstufen niedrigere Werte zwischen 632 bis 660. Am dritten Messdatum, 22 Tage nach der Herbizidmaßnahme wurden erneut geringere Werte zwischen 531 und 579 ermittelt. Die Streuung der Werte ist dargestellt durch die Standardabweichung und war insgesamt variabel. Vor der Applikation lag sie zwischen 30,2 und 42,9 während sie am zweiten Messzeitpunkt zwischen 24,2 bis 46,3 variierte. Zum letzten Termin zeigte sich eine Standardabweichung im Bereich von 15,6 bis 53,5.

Die einfaktorielle ANOVA für die N-Tester-Werte der ersten Herbizidmaßnahme zeigt zu keinem der untersuchten Messzeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den Dosierungsstufen. Der P-Wert beträgt am 2. April 0,498, am 17. April 0,677 und am 30. April 0,265. Da alle Werte über der Signifikanzgrenze von 0,05 liegen, ist kein statistisch nachweisbarer Einfluss der Herbiziddosierung auf die gemessenen Werte erkennbar.

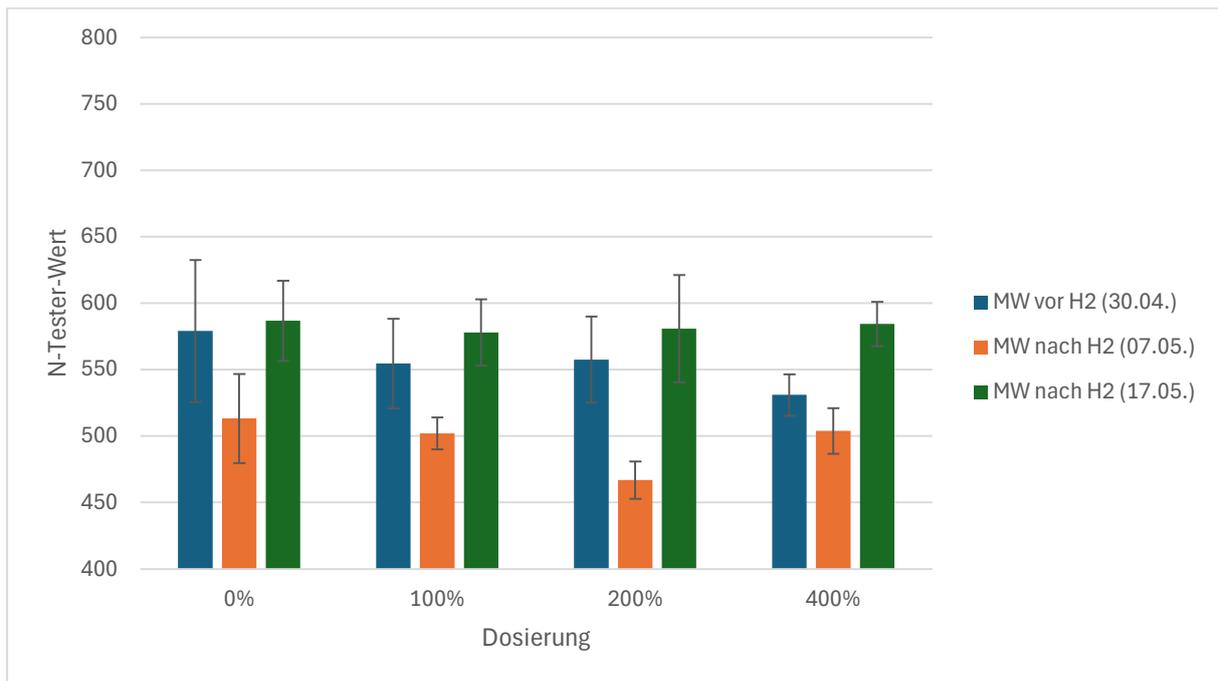


Abbildung 7: Veränderung des N-Tester-Wertes nach der zweiten Herbizidapplikation in Abhängigkeit von der Dosierung (n=5)

Die Mittelwerte der N-Tester-Werte wurden für die H2 zu drei Zeitpunkten erfasst, unmittelbar vor der zweiten Applikation vom 30. April, eine Woche danach und zehn Tage nach der zweiten Messung (Abb. 7). Vor der Herbizidanwendung lagen die Mittelwerte zwischen 531 und 579. Am ersten Messzeitpunkt nach der Applikation zeigte sich ein Rückgang der gemessenen Werte, die zwischen 467 und 513 variierten. Zur letzten Messung waren die Mittelwerte wieder angestiegen und erreichten Werte zwischen 578 und 586,8. Die Standardabweichungen der Messwerte veränderten sich im Zeitverlauf, vor der Applikation betragen sie zwischen 15,60 und 53,47. Eine Woche nach der Herbizidmaßnahme zeigten sich Werte im Bereich von 12 bis 34. Beim letzten Messzeitpunkt reichten die Standardabweichungen von 16,78 bis 40,36.

5.2 Chlorophyllanalyse im Labor

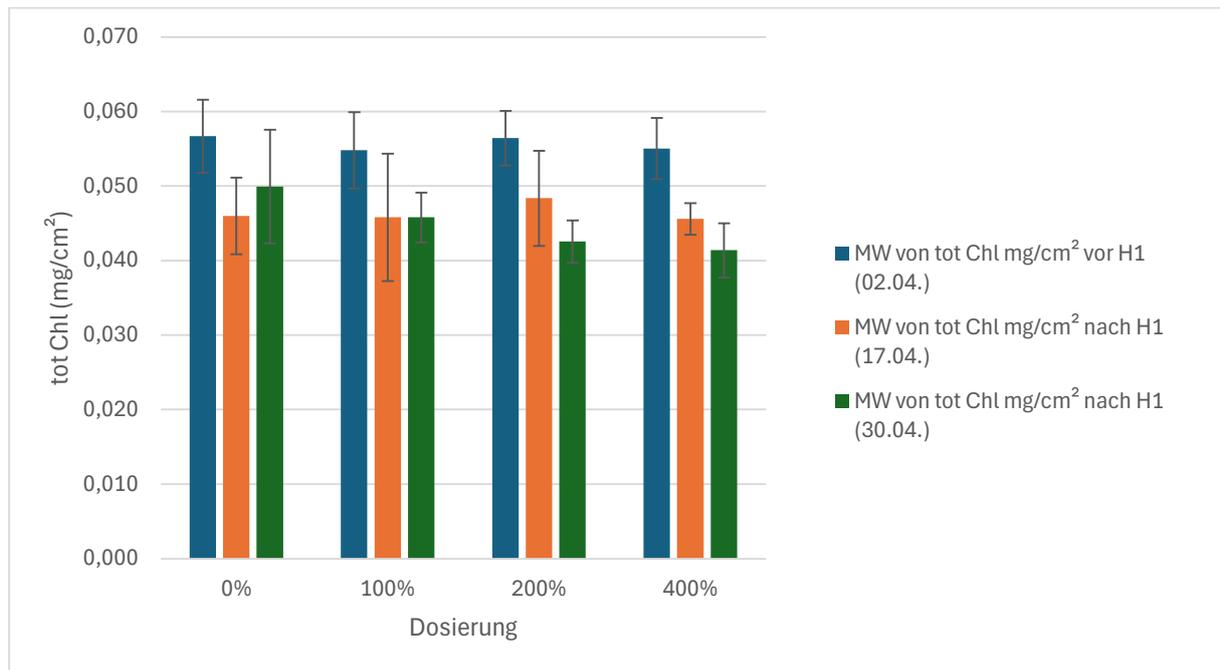


Abbildung 8: Blatt-Chlorophyllgehalt (tot. Chl in mg/cm²) unter Einfluss der ersten Herbizidapplikation und variierender Dosierung (n=5)

Wie der Abbildung 8 zu entnehmen ist, verlief die Entwicklung des Blattchlorophyllgehaltes (tot. Chl in mg/m²), abhängig von der Dosierung unterschiedlich. Vor der ersten Herbizidapplikation lagen die Mittelwerte der Varianten eng beieinander und variierten zwischen 0,055 und 0,057 mg/cm². Nach der ersten Anwendung sanken die Werte in allen Varianten, wobei die mit regulärer Aufwandmenge behandelten Parzellen auf einem ähnlichen Niveau bei 0,046 mg/cm² blieben wie die unbehandelten Parzellen. Die doppelte Dosierung erreichte mit 0,048 mg/cm² den höchsten Wert, während die vierfache Aufwandmenge mit 0,041 mg/cm² den niedrigsten Wert aufwies. Zum letzten Messzeitpunkt zeigte sich bei den unbehandelten Parzellen ein leichter Anstieg des Chlorophyllgehaltes von $\Delta = +0,004$, während die reguläre Dosis auf gleichem Niveau verweilte. Die höheren Dosierungen fielen mit einem Absinken der Werte von $\Delta = -0,005$ auf. Die Standardabweichungen blieben über die Zeitpunkte hinweg überwiegend gering und variierten zwischen 0,002 und 0,009 mg/cm².

Die einfaktorielle ANOVA für die Detektionsmethode Laboranalyse der ersten Herbizidbehandlung ergibt einen P-Wert am 2. April vom 0,877 und am 17. April von 0,874. Am 30. April liegt der P-Wert mit 0,049 knapp unter der Signifikanzgrenze von 0,05, was auf

einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Dosierungsstufen zu diesem Zeitpunkt hinweist.

Tabelle 4: Ergebnisse der Varianzanalyse (ANOVA) und der paarweisen t-Test zur Untersuchung der Unterschiede im totalen Chlorophyllgehalt (tot. Chl mg/m²) zwischen den Dosierungsstufen am 30. April

P-Wert ANOVA (30. April)	Vergleich Dosierungsstufe	t-Statistik	P-Wert t-Test (einseitig, 30. April)
0,0493	0% und 100%	1,1136	0,1489
	0% und 200%	2,0367	0,0380
	0% und 400%	2,2684	0,0265

Zur weiterführenden Untersuchung der bei den Messergebnissen des 30. Aprils in der ANOVA identifizierten signifikanten Unterschiede zwischen den Dosierungsstufen wird ein Zweistichproben-t-Test unter der Annahme gleicher Varianzen durchgeführt, wobei die Mittelwerte der Varianten paarweise mit den unbehandelten Kontrollparzellen verglichen werden (Tab. 4). Der Vergleich zwischen den unbehandelten Varianten und den Varianten mit der einfachen Aufwandmenge weist keinen signifikanten Unterschied auf. Die t-Statistik beträgt 1,1136 und liegt damit unter dem kritischen t-Wert von 1,8595. Der einseitige p-Wert beträgt 0,1489, überschreitet die Signifikanzgrenze von 0,05, sodass kein statistisch gesicherter Unterschied zwischen diesen Varianten vorliegt.

Im Gegensatz dazu zeigt der Vergleich zwischen den unbehandelten Varianten und der doppelten Aufwandmenge eine t-Statistik von 2,0367, welche über dem kritischen t-Wert liegt. Der einseitige p-Wert beträgt 0,0380 und unterschreitet somit die Signifikanzgrenze. Ebenso weist der Vergleich zwischen den unbehandelten Varianten und der vierfachen Aufwandmenge mit einer t-Statistik von 2,2684 und einem p-Wert von 0,0265 einen signifikanten Unterschied auf.

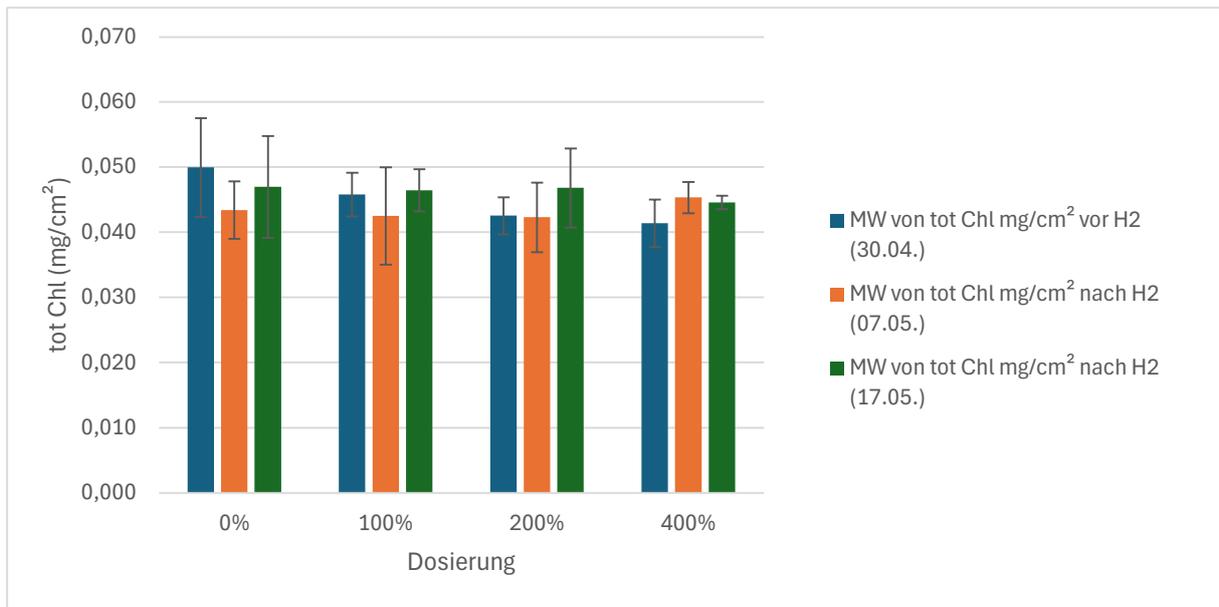


Abbildung 9: Blatt-Chlorophyllgehalt (tot. Chl in mg/cm²) unter Einfluss der zweiten Herbizidapplikation und variierender Dosierung (n=5)

Die Abbildung 9 zeigt die Unterschiede in der zeitlichen Entwicklung des Blatt-Chlorophyllgehalts unter Einfluss der zweiten Herbizidapplikation. Vor der Anwendung lagen die Werte zwischen 0,041 und 0,050 mg/cm², wobei die unbehandelten Varianten den höchsten und die vierfache Dosierung den niedrigsten Wert aufwies. Eine Woche nach der H2 zeigten die unbehandelten Parzellen mit einer Reduktion um $\Delta = -0,007$ die größten Veränderungen auf. Die reguläre Aufwandmenge blieb mit 0,043 mg/cm² unverändert im Vergleich zur doppelten Dosierung, die mit 0,042 mg/cm² leicht niedriger lag. Die vierfache Dosierung hingegen stieg als einzige Variante an auf 0,045 mg/cm² ($\Delta = +0,004$).

Zum letzten Messzeitpunkt stieg der Chlorophyllgehalt in den meisten Varianten wieder an. Die doppelte Dosierung zeigte mit 0,047 mg/cm² den stärksten Anstieg ($\Delta = +0,005$), während die vierfache Dosierung mit 0,046 mg/cm² gegenüber der vorherigen Messung als einzige sinkende Gehalte aufwies. Auffallend bei der Betrachtung der Standardabweichung sind die besonders geringen Streuungen im Bereich 0,001 bis 0,002 trotz einer entgegengesetzter Wertentwicklung bei der 400-prozentigen Aufwandmenge.

5.3 Indizes über Fernerkundung

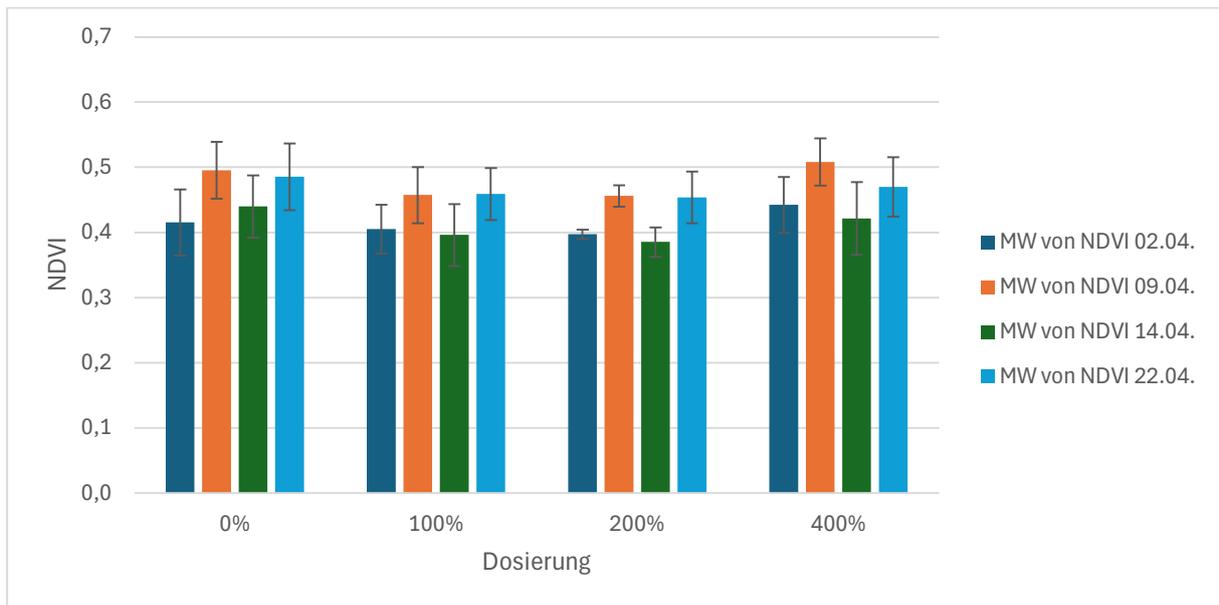


Abbildung 10: Normalized Difference Vegetation Index vor und nach der ersten Herbizidbehandlung bei unterschiedlicher Dosierung (n=5)

Die Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der NDVI-Mittelwerte über die verschiedenen Dosierungsstufen im zeitlichen Verlauf um die H1. Zum Messbeginn lagen die Mittelwerte der Varianten ohne Herbizidapplikation sowie mit der höchsten Dosierung auf dem höchsten Niveau zwischen 0,416 und 0,442, während die Varianten mit mittlerer Dosierung geringfügig niedrigere Werte aufzeigten. Zum zweiten Messtermin stiegen die NDVI-Werte bei allen Varianten an, die vierfachen Dosierungsstufe erreichte mit 0,508 den höchsten Wert.

Zum dritten Messzeitpunkt verringerten sich die NDVI-Werte bei sämtlichen Dosierungsstufen. Die Varianten mit der doppelten Aufwandmenge wiesen mit 0,385 den niedrigsten Wert auf, während die Nullparzellen mit 0,440 über den anderen Varianten lagen. Die größte Veränderung zum vorherigen Messtermin zeigte sich jedoch bei der 400-prozentigen Dosis mit $\Delta = -0,087$. Am letzten Messzeitpunkt ließ sich erneuter Anstieg der NDVI-Werte beobachten. Den höchsten Wert erzielten die Nullparzellen mit 0,486, jedoch ließ sich die größte Veränderung zur vorherigen Messung mit $\Delta = -0,068$ bei den Varianten mit doppelter Dosierung feststellen. Die Standardabweichungen der Messwerte variierten zwischen 0,007 und 0,056.

Die Analyse der NDVI-Werte nach der ersten Herbizidapplikation mittels einfaktorieller ANOVA zeigt, dass an keinem der untersuchten Messzeitpunkte ein signifikanter Unterschied zwischen den Dosierungsstufen festgestellt werden kann. Die P-Werte liegen bei dem ersten Messdurchgang vom 2. April bei 0,306, am 9. April bei 0,084, am 14. April bei 0,256 und am 22. April bei 0,688. Damit überschreiten alle Werte die Signifikanzschwelle von 0,05, sodass kein statistischer Effekt der Herbiziddosierung auf die NDVI-Werte nachweisbar ist.

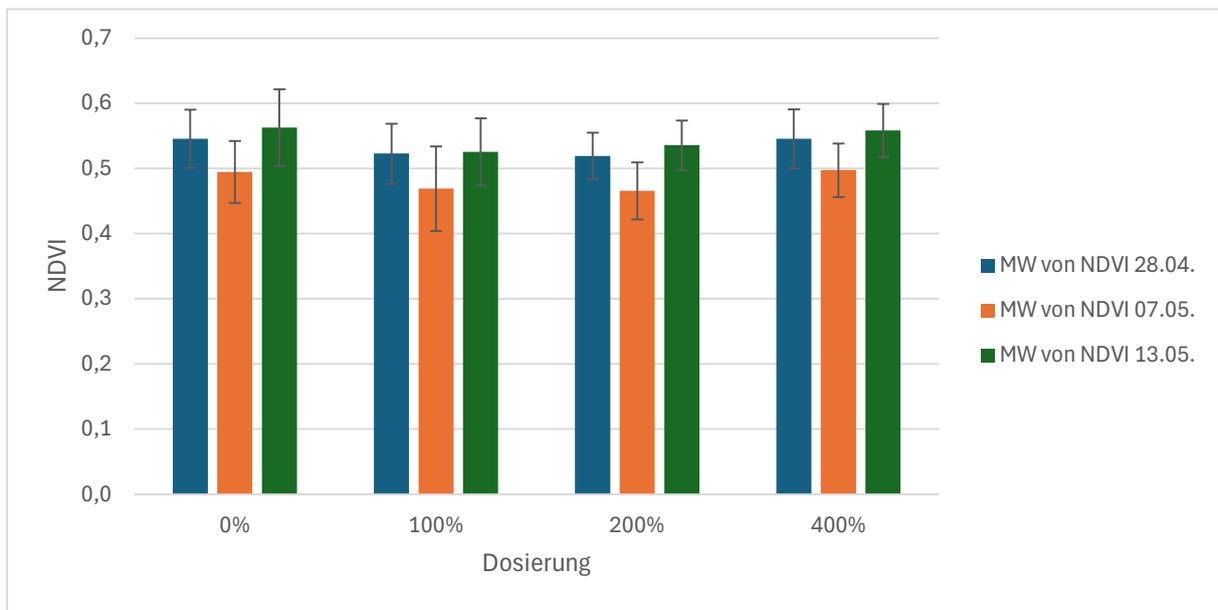


Abbildung 11: Normalized Difference Vegetation Index vor und nach der zweiten Herbizidbehandlung bei unterschiedlicher Dosierung (n=5)

Der Verlauf der NDVI-Mittelwerte um die zweite Frühjahrsherbizidapplikation vom 30. April ist der Abbildung 11 zu entnehmen. Kurz vor der Maßnahme wiesen die unbehandelten und vierfachdosierten Varianten mit 0,546 den höchsten NDVI auf. Eine Woche nach der Applikation zeigten sich in allen Varianten sinkende Werte, auch hier wurde in der unbehandelten und den mit höchster Dosierung die höchsten Werte gemessen. Am letzten Messzeitpunkt wurden in allen Varianten steigende NDVI-Werte festgestellt. Die Nullparzellen und die vierfache Dosis bewegten sich auf einem ähnlich hohen Niveau mit Werten zwischen 0,563 und 0,588. Die anderen zwei Varianten wiesen geringere Werte auf, jedoch zeigt sich auch hier eine ähnliche Tendenz zueinander. Die Standardabweichungen variierten im Bereich zwischen 0,036 und 0,065.

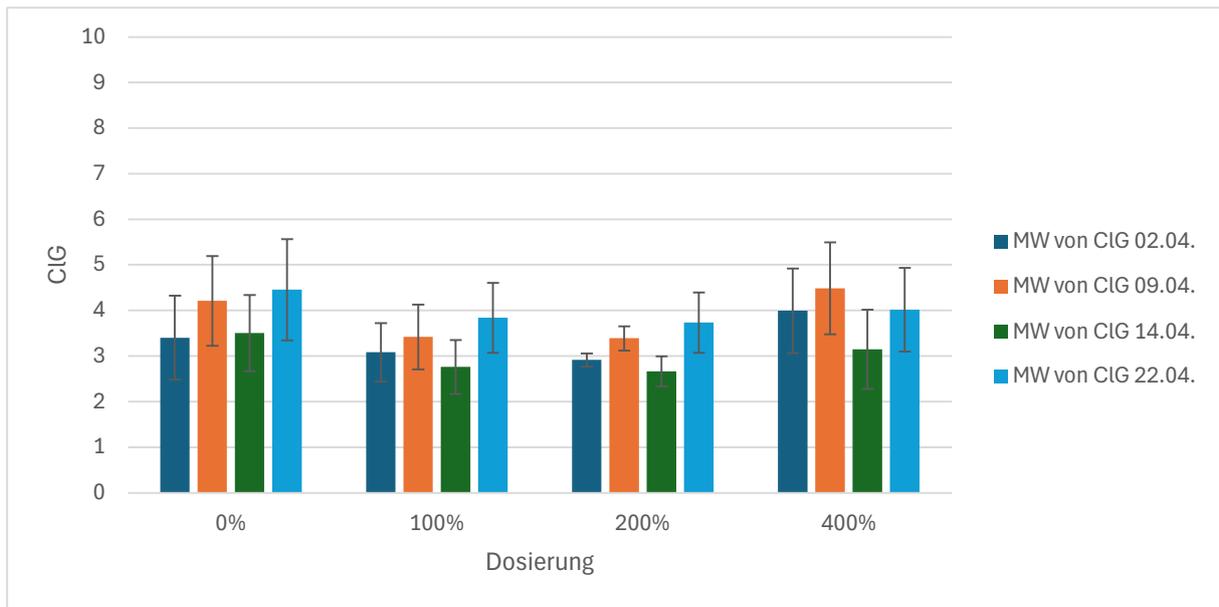


Abbildung 12: Entwicklung des Green Chlorophyll Indexes nach der ersten Herbizidapplikation in Abhängigkeit von der Dosierung (n=5)

Die Abbildung 12 zeigt den Entwicklungsverlauf des mittleren Green Chlorophyll Indexes über die erste Herbizidapplikation vom 08. April. Bei Messbeginn wurde bei den Varianten mit einer 200-prozentigen Dosis der niedrigste Wert mit 2,915 gemessen, den höchsten Wert von 3,993 wiesen die Varianten mit 400 Prozent auf. Eine Woche später stiegen in allen Dosierungsstufen die Werte an, wobei die vierfache Dosis mit 4,488 den höchsten Wert aufwies. Zum dritten Messzeitpunkt, eine Woche nach H1, sanken die Werte in allen Varianten. Die doppelte Aufwandmenge lag mit 2,667 weiterhin unter der regulären Dosierung mit 2,764. Die vierfache Dosierung zeigte mit 3,148 ebenfalls einen Rückgang, blieb aber über den anderen Varianten. Jedoch zeigte sich zwischen der zweiten und dritten Messung der größte Unterschied bei den 400-prozentigen Varianten von $\Delta = -1,340$. Am letzten Messzeitpunkt stiegen die Werte erneut an. Während die doppelte Dosierung mit 3,733 weiterhin den geringsten Wert erzielte, zeigte die vierfache Aufwandmenge mit 4,018 einen höheren Wert, erreichte aber nicht das Niveau der unbehandelten Varianten.

Die Werte des ClG wiesen unterschiedliche Streuungen der Standardabweichungen auf, die höchste ist mit 1,111 den unbehandelten Varianten zum letzten Messzeitpunkt zuzuordnen. Die doppelte Dosierung zeigte mit Werten zwischen 0,145 und 0,660 insgesamt die geringste Streuung, während bei der regulären Aufwandmenge mit 0,592 bis 0,767 moderate Abweichungen ermittelt wurden.

Die einfaktorielle ANOVA der ClG-Werte um die erste Herbizidapplikation zeigt zu keinem der Messzeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den Dosierungsstufen. Der P-Wert beträgt bei der Messung vom 2. April 0,140, am 9. April 0,103, am 14. April 0,244 und am 22. April 0,590. Da alle Werte oberhalb der Signifikanzgrenze von 0,05 liegen, lassen sich keine statistisch gesicherten Unterschiede in den ClG-Werten in Abhängigkeit von der Herbiziddosierung feststellen.

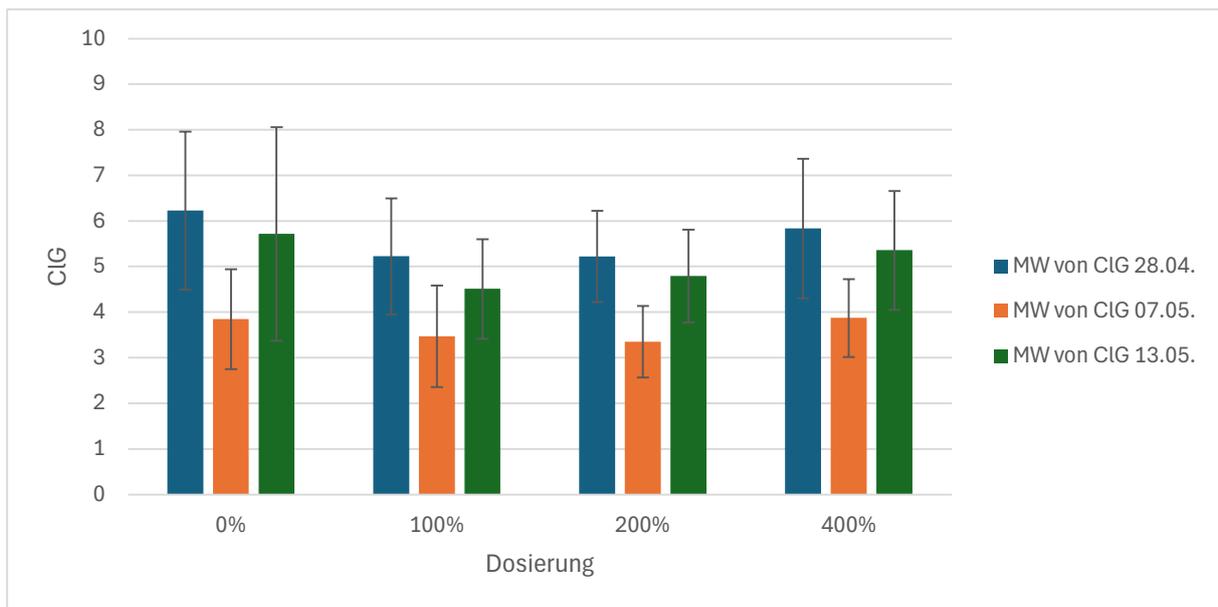


Abbildung 13: Entwicklung des Green Chlorophyll Indexes nach der zweiten Herbizidapplikation in Abhängigkeit von der Dosierung (n=5)

Aus der Abbildung 13 wird ersichtlich, dass die ClG-Werte im Zeitraum der zweiten Applikation in allen Varianten auf einem höheren Niveau lagen. Die unbehandelten Varianten erreichten mit 6,229 den höchsten Wert, während die vierfache Dosierungsstufe einen geringfügig niedrigeren Wert von 5,836 aufwies. Eine Woche nach der H2 zeigten sich in allen Varianten ein Rückgang der ClG-Werte. Die unbehandelten Varianten zeigten mit 3,847 den größten Rückgang $\Delta = -2,382$, während die reguläre Aufwandmenge mit 3,471 die geringste Differenz $\Delta = -1,752$ aufwies. Zum letzten Termin wurden in allen Varianten ansteigende Werte festgestellt, die Varianten ohne Herbizidbehandlung im Frühjahr erreichten mit 5,716 den höchsten Wert sowie die stärkste Veränderung $\Delta = 1,869$. Die Standardabweichung fiel mit Werten bis zu 2,243 bei den Nullparzellen auf, variierte ansonsten bei ClG-Werten zwischen 0,784 und 1,533.

5.4 Ertragsermittlung

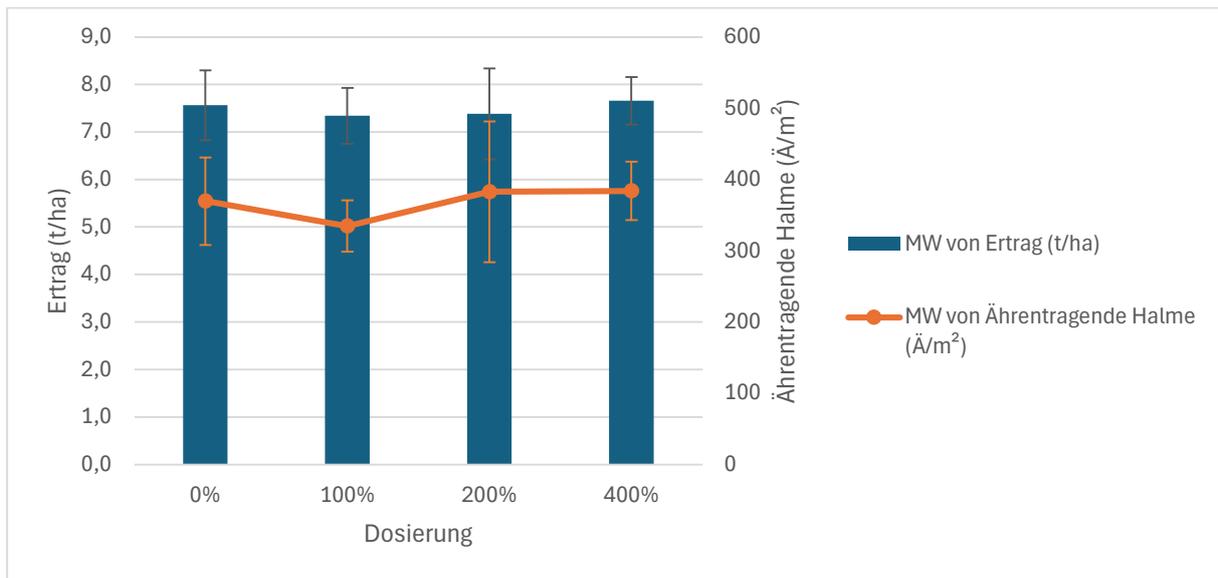


Abbildung 14: Korn- und Ährentrag in Abhängigkeit der Herbiziddosierung (n=5)

In Abbildung 14 sind über ein Balkendiagramm die mittleren Kornträge der verschiedenen Dosierungsvarianten in Tonnen pro Hektar dargestellt. Der höchste mittlere Ertrag von 7,66 t/ha wurde in den Varianten mit vierfacher Dosis ermittelt. Zudem zeigte dieser Wert auch die geringste Standardabweichung von 0,5 t/ha auf. Der niedrigste Ertrag wurde mit 7,34 t/ha bei der regulären Aufwandmenge festgestellt. Bei der Ertragsauswertung ist anzumerken, dass zwei Einzelwerte (Parzellen: B1, A13) über eine Wichtung der Ährentragenden Halme angepasst wurden, da diese Parzellen durch einen technischen Fehler mit erhöhter Aussaatstärke gedreht wurden.

Die orangefarbene Linie gibt den Mittelwert des zur Ertragsprognose genutzten Parameters Ährentragende Halme je Quadratmeter an (vgl. Kap. 4.2). Auch bei diesem Ertragsparameter erzielten die Varianten der vierfachen Dosierung mit im 384 Ä/m² den höchsten Wert. Den niedrigsten Wert erzielte ebenfalls die mit regulärer Aufwandmenge behandelten Varianten mit 334,8 Ä/m², bei der geringsten Standardabweichung von 36,16 Ä/m².

Auffallend ist, dass die doppelten Dosierungsstufen in beiden Ertragsparameter mit 0,96 t/ha und 98,92 Ä/m² jeweils die höchsten Standardabweichungen aufwiesen.

Tabelle 5: mittlere Ertragsparameter mit zugehöriger Standardabweichung und P-Werten der einfaktoriellen Varianzanalyse (n=5)

Parameter	0%	100%	200%	400%	P-Wert
Ährentragende Halme (Ä/m²)	369,6 ± 61,276	334,8 ± 36,162	382,8 ± 98,923	384,0 ± 40,970	0,602
Ertrag (t/ha)	7,56 ± 0,74	7,34 ± 0,59	7,38 ± 0,96	7,66 ± 0,50	0,883

In Tabelle 5 sind die Mittelwerte der ährentragenden Halme und des Kornertrages in Abhängigkeit von der Dosierungsstufe dargestellt. Die zugehörigen P-Werte der einfaktoriellen ANOVA deuten darauf hin, dass zwischen den Dosierungsstufen keine statistisch signifikanten Unterschiede bezüglich der beiden Ertragsparameter bestehen ($p > 0,05$).

5.5 Abweichungen des Chlorophyllgehaltes zur Nullparzelle

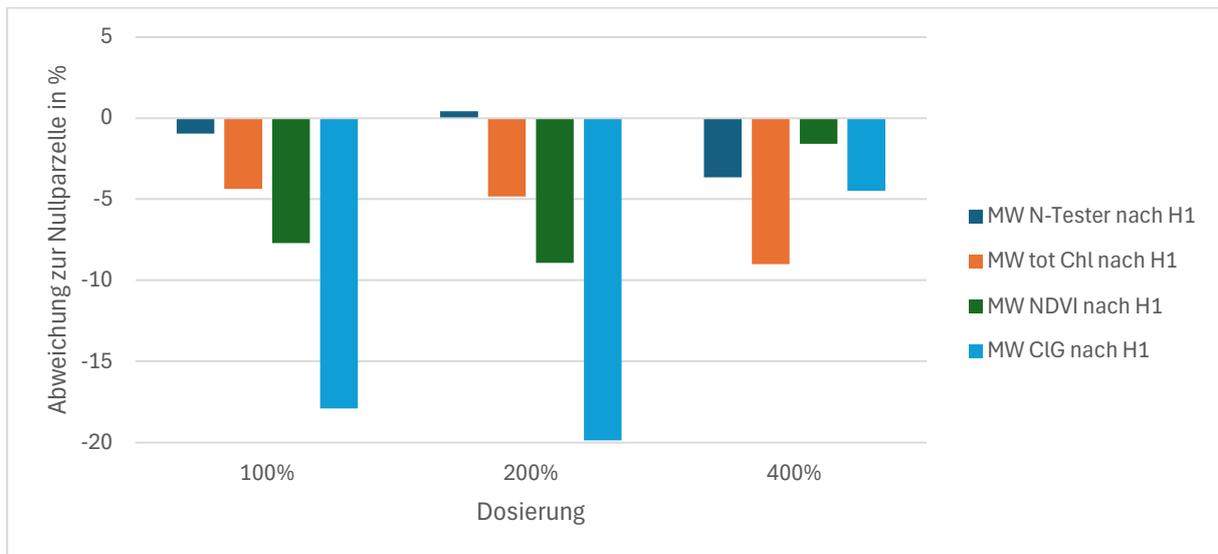


Abbildung 15: Prozentuale Abweichung der Chlorophyllwerte zur Nullparzelle nach der ersten Herbizidapplikation je Dosierungsstufe und Detektionsmethode (n=5)

Die Abbildung 15 zeigt eine Gegenüberstellung der mittleren prozentualen Abweichung zu den Nullparzellen nach der ersten Herbizidmaßnahme. Insgesamt sind starke negative Abweichungen erkennbar, die Intensität variiert jedoch nach Messmethode und Dosierungsstufe. Der ClG-Index weist die deutlichsten Abweichungen auf, insbesondere bei der einfachen und doppelten Dosierungsstufe mit Werten von bis zu -17,90 und -19,87 %. Auch bei den NDVI-Werten zeigen sich die höchsten Abweichungen bei diesen Dosierungsstufen, während die Abweichung bei der 400 % Variante nur -1,59 % beträgt.

Die Messergebnisse der Chlorophyllbestimmung im Labor (tot. Chl) zeigen einen abweichenden Trend. Während die Abweichungen bei der einfachen und doppelten Dosierung mit -4,36 % bzw. -4,84 % relativ ähnlich ausfallen, weist die vierfache Dosierung mit -9,01 % die deutlichste Reduktion auf. Die N-Tester Werte weisen hingegen nur leichte Schwankungen auf wobei die doppelte Dosierung mit 0,42 % als einzige positive Abweichung erkennbar ist.

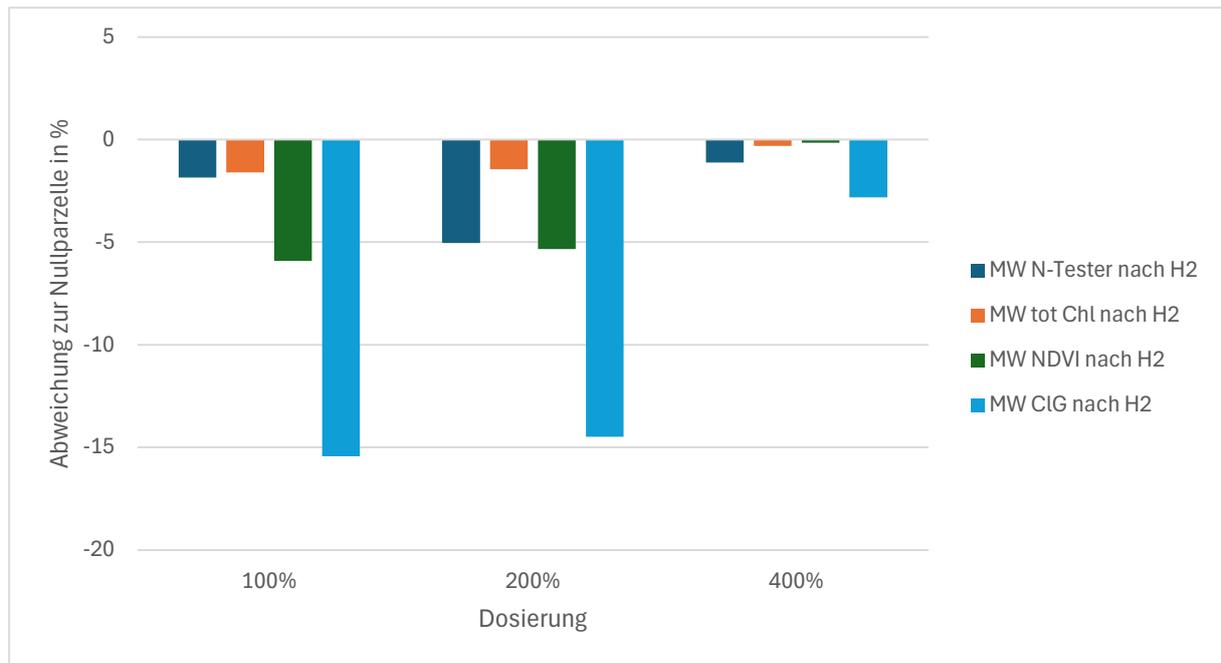


Abbildung 16: Prozentuale Abweichung der Chlorophyllwerte zur Nullparzelle nach der zweiten Herbizidapplikation je Dosierungsstufe und Detektionsmethode (n=5)

Die Abbildung 16 zeigt die prozentuale Abweichung der Chlorophyllwerte zu den Nullparzellen nach der zweiten Herbizidapplikation in Abhängigkeit von der Dosierungsstufe. Über alle Methoden hinweg sind negative Abweichungen erkennbar, jedoch unterscheiden sich die Werte je nach Messmethode und Herbiziddosierung. Die höchste Dosierungsstufe zeichnet sich über alle Detektionsmethoden hinweg mit der geringsten mittleren prozentualen Abweichung zu den Nullparzellen aus, insbesondere bei der Laboruntersuchung und der Bestimmung über den NDVI-Index mit einer Abweichung, die gegen 0 % tendiert.

Der ClG-Index zeigt erneut die deutlichsten Abweichungen, insbesondere bei der einfachen und doppelten Dosierung mit Werten von -15,42 % bzw. -14,47 %. Auch beim NDVI zeigen sich mit -5,91 % und -5,33 % ähnlich hohe Abweichungen. Bei der Bestimmung im Labor (tot. Chl) sind geringere Schwankungen zu beobachten, die höchste Abweichung tritt bei der einfachen Dosierungsstufe mit -1,60 % auf. Bei der Methode des N-Testers zeigt sich mit einem Wert von -5,04 % bei der doppelten Dosierungsstufe die höchste Abweichung zu den Nullparzellen.

Tabelle 6: Mittlere prozentuale Veränderung des Chlorophyllgehaltes gegenüber den Nullparzellen über alle Detektionsmethoden

Dosierung	nach H1	nach H2	Mittelwert H1, H2
100%	-7,73	-6,20	-6,96
200%	-8,31	-6,58	-7,44
400%	-4,68	-1,10	-2,89

Die Tabelle 6 gibt einen Gesamtüberblick über die prozentuale Veränderung des Chlorophyllgehaltes in Abhängigkeit der Dosierungsstufe in Relation zu den Nullparzellen. Die Messergebnisse aller, in dieser Arbeit angewandter Chlorophylldetektionsmethoden, wurden ohne Einberechnung von Faktoren zu einem Mittelwert zusammengetragen. Der Einfluss der Herbiziddosierung ist für jede Maßnahme einzeln (nach H1, nach H2) und als Mittelwert aus beiden Applikationen dargestellt.

Aus den Messergebnissen geht hervor, dass die erste Herbizidmaßnahme im Frühjahr mit einer stärkeren prozentualen Veränderung des Chlorophyllgehaltes in Relation zu den Nullparzellen einhergeht als die zweite Herbizidbehandlung. Im Vergleich zwischen den Dosierungsstufen zeigt sich die geringste Veränderung jeweils bei den Varianten mit der höchsten Aufwandmenge.

6. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss unterschiedlicher Herbiziddosierungen auf den Chlorophyllgehalt von Winterweizen analysiert. Die Auswertung erfolgte anhand von vier etablierten chlorophyllsensitiven Detektionsmethoden: dem N-Tester, der photometrischen Laboranalyse des totalen Chlorophyllgehalts (tot. Chl), dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sowie dem Green Chlorophyll Index (ClG) (vgl. Kap. 4.2). Die Ergebnisse belegen eine messbare, allerdings nicht durchgängig statistisch signifikante Veränderung des Chlorophyllgehaltes infolge der Herbizidapplikationen, wobei sich die Intensität und Richtung der Veränderungen methodenabhängig manifestierte. Die Hypothesenprüfung zeigt, dass eine Reduktion des Chlorophyllgehaltes zwar nachweisbar ist, jedoch nicht proportional zur Aufwandmenge verläuft. Darüber hinaus ergab die Ertragsanalyse keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dosierungsstufen, daraus lässt sich schließen, dass die beobachteten Chlorophyllveränderungen keine messbaren Ertragseinbußen zur Folge hatten.

Der Vergleich der Detektionsmethoden verdeutlicht, dass insbesondere die Laboranalyse in der Lage war, signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten zu erfassen, während spektrale Methoden wie NDVI und ClG trotz einer gewissen Tendenz keine statistisch gesicherten Ergebnisse lieferten. Diese Beobachtung bestätigt frühere Studien zur Sensitivität photometrischer Verfahren gegenüber spektralen Methoden (vgl. RICHARDSON et al. 2002, S. 185-186). Bei einem Vergleich über alle Detektionsmethoden hinsichtlich eines möglichen erkennbaren Trends der Chlorophyllverluste fielen die Varianten mit der regulären Dosierung und der doppelten Dosierung mit einer stärkeren Abweichung zu den unbehandelten Kontrollparzellen auf. Dieser Befund wirft Fragen hinsichtlich möglicher kompensatorischer pflanzenphysiologischer Mechanismen oder methodischer Limitationen auf, die in den folgenden Abschnitten näher diskutiert werden.

Die Ergebnisse der Chlorophyllanalyse im Labor, basierend auf chemischer Extraktion und spektralphotometrischer Messung nach ARNON (1949, S. 3), zeigten eine Reduktion des Chlorophyllgehalts nach der ersten Herbizidapplikation. Bei dem Parameter „tot. Chl mg/m²“ waren 22 Tage nach der Maßnahme statistisch signifikante Unterschiede ($p = 0,049$ am 30. April) zwischen den Dosierungsstufen nachweisbar. Dieser zeitverzögerte Effekt scheint charakteristisch für die Wirkungsweise von ALS-Hemmern, wie sie in dem für die erste Herbizidmaßnahme angewandten Mittel „Atlantis Flex“ enthalten sind (BVL 2018). Dieser

Zeitraum deckt sich mit den Untersuchungen von DWEIKAT et al. (2023, S.2), welche die sichtbaren Symptome 21 Tage nach der Behandlung mit ALS-hemmenden Herbiziden bewerten. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass nicht nur die Dosierung, sondern auch die zeitliche Dynamik der Herbizidwirkung eine Rolle für die Chlorophyllveränderung spielt.

Im Rahmen der Ergebnisauswertung konnte dieser Messwert als einziger Befund statistisch signifikant abgesichert werden ($p = 0,049$ am 30. April), daher wurde nach der einfaktoriellen Varianzanalyse zur weiterführenden Evaluierung der Mittelwertsunterschiede zwischen den Dosierungsstufen ein Zweistichproben-t-Test unter der Annahme gleicher Varianzen durchgeführt. Ziel dieser zusätzlichen statistischen Untersuchung war es, die in der ANOVA identifizierte signifikante Differenz genauer zu quantifizieren und festzustellen, ob spezifische Dosierungsstufen eine besonders starke Abweichung zur unbehandelten Kontrolle aufwiesen (vgl. Kap. 5.2.). Über die paarweisen t-Test konnte die festgestellte Signifikanz den Dosierungsstufen mit doppelter ($p = 0,0380$) und vierfachen Aufwandmenge ($p = 0,0265$) zugeordnet werden. In diesem Fall zeigte sich, dass vor allem die 200 %- und 400 %-Varianten signifikante Abweichungen zur Nullparzelle aufwiesen, was die Annahme einer messbaren Reduktion des Chlorophyllgehalts bei höheren Herbiziddosierungen unterstützt. Bemerkenswert ist jedoch, dass die Reduktion des Chlorophyllgehalts bei der 200 %-Dosierung stärker ausgeprägt war als bei den 400 %-Varianten, was auf nicht-lineare pflanzenphysiologische Stressreaktionen hindeuten kann.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Betrachtung von Herbiziddosierungen liegt im Resistenzmanagement. Wie von BERGMANN (2022, S. 9) beschrieben, wird das Entstehen von Herbizidresistenzen unter anderem durch die Intensität des Herbizideinsatzes beeinflusst. Die richtige Wahl der Dosierung bestimmt maßgeblich den Wirkungsgrad der Maßnahme. Unzureichende Aufwandmengen entstehen sowohl durch bewusste Managemententscheidungen wie die Mengenreduktion zur Kosteneinsparung, als auch durch technisch bedingte Minderdosierungen, beispielsweise in Kurvenfahrten oder durch ungleichmäßige Applikation der Spritzbrühe entstehen. Solche subletalen Wirkstoffmengen führen dazu, dass einzelne, weniger empfindliche Individuen die Behandlung überleben und sich im Bestand etablieren können. Über natürliche Selektionsprozesse kann sich dadurch langfristig der Anteil resistenter Biotypen in der Population erhöhen. (DLG 2018)

Von der Versuchsplanung bis zur endgültigen Auswertung können verschiedene Faktoren die Messergebnisse dieser Arbeit beeinflusst haben. Ein entscheidender Aspekt ist der Standort. Die Versuchsanlage wurde auf einer landwirtschaftlichen Fläche am Standort Bernburg-Strenzfeld durchgeführt, wodurch die erzielten Ergebnisse zunächst standortspezifisch sind und nicht gleichermaßen auf andere Standorte mit abweichenden Boden- und Klimabedingungen übertragen werden können. Bedingt durch die Ernterückstände der Vorfrucht Mais herrschten zum Zeitpunkt der Aussaat heterogene Saatbettbedingungen, die das Wachstum und die Entwicklung des Winterweizens unmittelbar beeinflussen konnten. Nach DIEPENBROCK et al. (2016, S.47-50) wird die Nachfrucht insbesondere durch die Stickstoffnachlieferung dieser Koppelprodukte beeinflusst. Maisstroh enthält nach BÄUMLER (1952), zitiert in DIEPENROCK et al. (2016, S.50) zwischen 50 bis 80 kg N/ha, was sich indirekt auf den Chlorophyllgehalt auswirken kann.

Stickstoff ist ein zentraler Bestandteil des Chlorophyllmoleküls, weshalb Pflanzen sensibel auf Schwankungen in der Stickstoffverfügbarkeit reagieren. Eine erhöhte Nachlieferung von mineralisiertem Stickstoff aus den Maisrückständen kann die Chlorophyllsynthese fördern und somit den Chlorophyllgehalt der Blätter steigern. Gleichzeitig kann eine ungleichmäßige Zersetzung der Ernterückstände zu variierender Stickstoffverfügbarkeit führen, womit sich die höhere Variabilität der Chlorophyllwerte in den Parzellen erklären lassen könnte. Ein Stickstoffüberschuss kann eine verstärkte Blattmasseproduktion induzieren, wodurch der Blattflächenindex steigt, und die Lichtabsorption verändert wird, was einen indirekten Einfluss auf die Chlorophyllmessungen beinhalten kann. Gleichzeitig kann eine ungleichmäßige Stickstoffverteilung innerhalb der Parzellen dazu führen, dass sich Bereiche mit Stickstoffüberschuss oder Mangel ausbilden, was wiederum die Homogenität der Bestände erklärt (SCHUBERT 2011).

Neben den untersuchten Herbizidmaßnahmen H1 und H2 erfolgten in kurzen zeitlichen Abständen weitere pflanzenbauliche Maßnahmen der Bestandesführung, diese sind in Abbildung 17 dargestellt. Im Vorfeld der H1 wurde eine Fungizid-Mischung sowie eine Stickstoffdüngung über AHL (Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung) ausgebracht. AHL kann unter bestimmten Bedingungen nicht nur die Nährstoffversorgung der Pflanze beeinflussen, sondern auch zu phytotoxischen Effekten wie Blattverätzungen oder strukturellen Schäden führen (VEVERKA et al. 2007). Trotz Referenz zu den Nullparzellen lassen sich die gemessenen Effekte nicht ausschließlich auf die Herbizidmaßnahmen zurückführen.

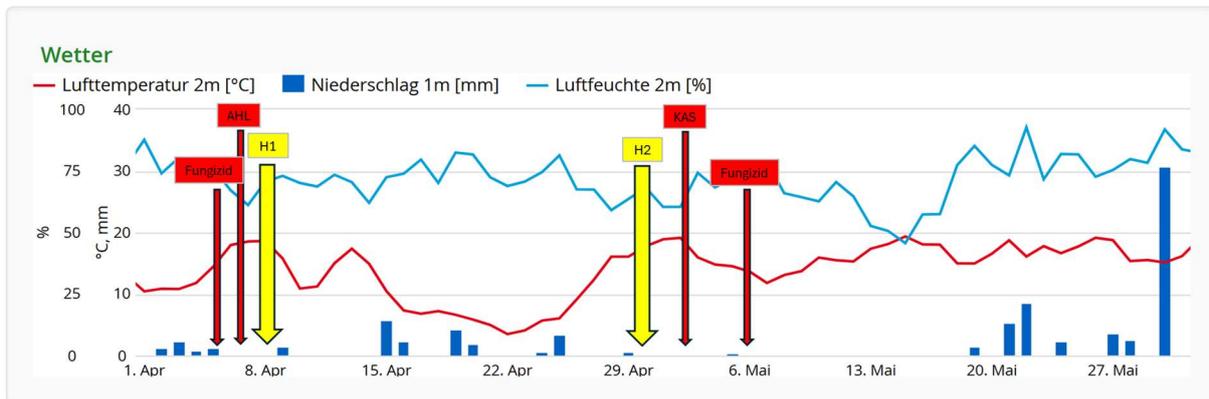


Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf der Maßnahmen zur Bestandesführung um den Messzeitraum (eigene Darstellung nach ISIP 2024)

Die Witterungsbedingungen während der Versuchsdurchführung im Frühjahr 2024 waren wechselhaft und könnten sowohl die Wirkstoffaufnahme als auch die Chlorophyllbildung beeinflusst haben (vgl. Abb. 17). Besonders Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchtigkeit spielen nach GANAL (2024) eine entscheidende Rolle für die Effizienz von Herbiziden. Zum Zeitpunkt der ersten Herbizidapplikation betrug die Lufttemperatur 18,6 °C bei einer Luftfeuchte von 70,6 % (ISIP 2024), daher ist von einer schwach ausgeprägten Wachsschicht auf den Blättern der Pflanzen auszugehen. Die Witterungsdaten zur H1 bieten gute Anwendungsbedingungen, gehen jedoch auch mit empfindlichen Weizenpflanzen einher.

Obwohl in den behandelten Varianten teilweise reduzierte Chlorophyllgehalte festgestellt wurden, ließen sich daraus keine signifikanten Unterschiede in den Ertragsparametern ableiten. Die Ertragsauswertung (vgl. Abb. 14) deutet darauf hin, dass die Bestände moderate Veränderungen im Chlorophyllgehalt möglicherweise kompensieren konnten, etwa durch eine verlängerte Assimilationsdauer oder eine gesteigerte Blattflächenentwicklung. Alternativ könnten standortspezifische Einflüsse oder agronomische Faktoren, wie die diskutierte Stickstoffnachlieferung das Ergebnis beeinflusst haben. Für eine belastbare Bewertung des Zusammenhangs wären weiterführende Untersuchungen erforderlich, die zusätzliche pflanzenphysiologische Parameter wie den Blattflächenindex oder die Netto-Photosyntheserate berücksichtigen.

Ein Kernelement der Ergebnisauswertung der vorliegenden Arbeit ist der Bezug zu den unbehandelten Kontrollvarianten. In der Versuchsanlage fungierten die Nullparzellen als Referenzflächen, um Veränderungen des Chlorophyllgehalts unabhängig der Herbiziddosierung zu erfassen und eine Vergleichsbasis für die behandelten Varianten zu

generieren. Die Analyse der Standardabweichungen zeigt jedoch teils deutliche Streuungen der Chlorophyllwerte auf, besonders bei den optischen Detektionsverfahren. Dieses Ergebnis ist ein weiterer Indikator für die zusätzlichen möglichen Einflussfaktoren wie die Vorfruchtwirkung oder Düngung. Daher kann die Eignung der Nullparzellen zur Quantifizierung der Herbizidwirkung nicht uneingeschränkt bestätigt werden, auch in ähnlichen pflanzenbaulichen Versuchen wird von der Nutzung der Nullparzellen als einzige Referenz abgeraten (AUERSWALD und SCHNYDER 2019, S. 57-59). In nachfolgenden Studien sollte bezüglich der Methodik die reguläre Dosierung als Referenz gewählt werden, denn jene ist die Variante der landwirtschaftlichen Praxis, von der durch z.B. technische Einwirkungen (z.B. eine normabweichende oder unzureichende Gestängeführung) abgewichen wird.

Tabelle 7: Variantenvergleich der Detektionsmethoden anhand der ANOVA-Ergebnisse (p-Wert, F-Wert, Fehlervarianz)

Parameter (Methode u. Datum)	P-Wert	F-Wert	Fehlervarianz (MSE)
N-Tester (17.04.)	0,677	0,516	1,485 x 10 ³
N-Tester (30.04.)	0,265	1,454	1,327 x 10 ³
tot. Chl mg/cm ² (17.04.)	0,874	0,230	0,000
tot. Chl mg/cm ² (30.04.)	0,049	3,255	0,000
NDVI (09.04.)	0,084	2,646	0,001
NDVI (14.04.)	0,256	1,487	0,002
NDVI (22.04.)	0,688	0,500	0,002
CIG (09.04.)	0,103	2,429	0,638
CIG (14.04.)	0,244	1,537	0,478
CIG (22.04.)	0,590	0,657	0,774

Der Variantenvergleich der angewandten Detektionsmethoden, ermittelt durch die Ergebnisse der ANOVA, hebt die deutlichen Unterschiede in der Sensitivität und Stabilität der Messergebnisse (Tab. 7) hervor. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, konnten signifikante Unterschiede zwischen den Dosierungsstufen nur bei der photometrischen Bestimmung des totalen Chlorophyllgehalts am 30. April ($p = 0,049$) nachgewiesen werden. Diese Methode weist zudem eine sehr geringe Fehlervarianz auf, was auf eine hohe Stabilität und Präzision der Messwerte hindeutet. Die Beobachtungen stehen im Einklang mit der Literatur, welche die spektrophotometrische Messung des Chlorophylls durch die genaue Angabe für Chl a und Chl b sowie dem Gesamtchlorophyllgehalt als verlässlichste Methode zur direkten Quantifizierung des Chlorophyllgehaltes beschreibt (RICHARDSON et al. 2002, S. 185-186). Allerdings ist

dieses Verfahren mit einem höheren Zeitaufwand und destruktiver Probennahme verbunden (ARNON 1949, S.2 f.), welches bei den anderen Verfahren nicht der Fall ist.

Die spektralen Methoden NDVI und CIG zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dosierungsstufen, obwohl der NDVI am 09.04. mit einem p-Wert von 0,084 einen tendenziellen Effekt erkennen ließ. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von GITELSON et al. (2003, S. 279), die betonen, dass spektrale Indizes wie der NDVI auch durch Blattstruktur, Wassergehalt und andere Umweltfaktoren beeinflusst werden. Auch MAHLEIN et al. (2012, S. 203-205) heben zwar die Möglichkeit zur großflächigen Überwachung der Pflanzengesundheit als bedeutenden Vorteil dieser Methode hervor, verweisen allerdings ebenfalls auf die schwierige Unterscheidung zwischen biotischen und abiotischen Stressfaktoren. Doch auch zwischen den beiden spektralen Indizes gibt es Unterschiede, die sich mit den verschiedenen Fehlervarianzen belegen lassen, so gilt der Green Chlorophyll Index (CIG) durch seine hohe Sensitivität als präziserer Index zur Schätzung des Blattchlorophyllgehaltes (HIPHEN o.D.), was durch die Betrachtung der Standardabweichungen weiter untermauert wird. Dies könnte darauf hindeuten, dass der CIG-Index zwar empfindlicher auf Chlorophyllveränderungen reagiert, jedoch gleichzeitig anfälliger für Umweltfaktoren ist.

Während die Fernerkundungsmethoden trotz erhöhter Variabilität gewisse Tendenzen zur Differenzierung der Varianten aufzeigten, erwies sich der N-Tester als die unpräziseste Methode im Vergleich der Detektionsverfahren. Die hohe Fehlervarianz deutet darauf hin, dass unter diesen Versuchsbedingungen keine verlässliche Differenzierung zwischen den Dosierungsstufen möglich war. Hierbei ergibt sich eine Übereinstimmung mit der in der Literatur oft kritisierten Beeinflussung dieser Geräte durch Blattalter, Stickstoffversorgung und physiologischen Anpassungen der Pflanze (vgl. MARKWELL et al. 1995, S470 f.). Die Autoren CEROVIC et al. (2012, S. 257 f.) unterstreichen ebenfalls die Notwendigkeit einer Kalibrierung und schlagen als Lösung eine Umrechnungsgleichung in absolute Chlorophyllgehalte in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ vor, da unterschiedliche SPAD-Geräte teilweise signifikant voneinander abweichen. An dieser Stelle gilt zu betonen, dass in dieser Arbeit nicht mit dem originalen SPAD-502 Modell gemessen wurde, sondern mit dem N-Tester der Firma YARA (vgl. Kap. 4.2). Bei diesen handgetragenen Messegeräten lässt sich zudem ein Einfluss des Anwenders nicht ausschließen. Trotz Messung von 30 einzelnen Blättern, bevor der zusammengesetzte Wert ausgegeben wird, findet bei der Blattauswahl eine gewisse

Selektierung der Blätter zur Probe statt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde diesem Effekt entgegengewirkt, indem dieselben Blätter im Labor analysiert wurden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit erlauben eine differenzierte Bewertung der aufgestellten Hypothesen. Die Annahme, dass eine stufenweise Erhöhung der Herbiziddosierung zu einer proportionalen Reduktion des Chlorophyllgehaltes führt, konnte nur teilweise bestätigt werden. Zwar zeigte sich ein Trend einer messbaren Abnahme des Chlorophyllgehalts, jedoch verlief diese nicht linear in Abhängigkeit von der Aufwandmenge. Besonders auffällig war die stärkere Reduktion in den 200 %-Varianten im Vergleich zu den 400 %-Varianten. Dies deutet auf nicht-lineare pflanzenphysiologische Reaktionen hin, die weiter untersucht werden sollten. Bei den Varianten mit doppelter Dosierung wurde über beide Herbizidmaßnahmen eine mittlere prozentuale Veränderung des Chlorophyllgehaltes gegenüber den Nullparzellen von -7,44 % ermittelt. Dieser erkennbare Trend deckt sich nahezu mit der in den Hypothesen aufgestellten Reduktion von -7,5 %, lässt sich jedoch nicht statistisch absichern. Die vierfachdosierten Varianten wiesen einen allgemeinen Trend von -2,89 % auf, ebenfalls nicht statistisch gesichert. Jedoch lässt sich die Hypothese einer Chlorophyllreduktion von 15 % ablehnen (vgl. Kap. 5.5).

Hinsichtlich der zweiten Hypothese, wonach eine erhöhte Herbiziddosierung signifikant negative Effekte auf die Vegetationsindizes NDVI und CIG hat, zeigen die Ergebnisse keine statistisch gesicherten Unterschiede zwischen den Varianten. Während sich beim NDVI am 09. April ein tendenzieller Effekt abzeichnete ($p = 0,084$), blieb dieser unterhalb des Signifikanzniveaus. Die Ergebnisse dieser Arbeit untermauern die These, dass optische Indizes möglicherweise nicht sensitiv genug sind, um genaue Veränderungen im Chlorophyllgehalt infolge der Herbizidmaßnahmen präzise zu erfassen. Insgesamt verdeutlicht die Hypothesenüberprüfung, dass Chlorophyllverluste nach der Herbizidapplikation nachweisbar sind, deren Intensität jedoch nicht ausschließlich von der Aufwandmenge abhängt. Zudem bestätigt sich, dass Laboranalysen eine höhere Sensitivität für solche Veränderungen aufweisen als spektrale Methoden, die unter Praxisbedingungen durch Umweltfaktoren beeinflusst werden können.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern wertvolle Erkenntnisse für das Herbizidmanagement in der landwirtschaftlichen Praxis. Die nachgewiesene nicht-lineare Reaktion des Chlorophyllgehalts auf die Herbiziddosierung zeigt, dass eine pauschale Erhöhung der Aufwandmenge nicht

zwangsläufig eine verstärkte Wirkung erzielt. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Herbizide gezielt und angepasst an die physiologische Reaktion der Pflanzen einzusetzen, um unnötige Belastungen der Kultur zu vermeiden. Über den Herbizideinsatz hinausgehend ist ein effizienter Pflanzenschutzmitteleinsatz essenziell, um den Ressourceneinsatz zu optimieren. Im konventionellen Winterweizenanbau lassen sich die Pflanzenschutzkosten bei mittlerer Intensität mit ca. 192 €/ha kalkulieren (STMELF 2025). Diese Kosten sind von verschiedenen variierenden Faktoren beeinflusst, verdeutlichen allerdings die wirtschaftliche Relevanz einer präzisen Applikation. Darüber hinaus zielen politische Vorgaben wie die Farm-to-Fork-Strategie darauf ab, den Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln bis 2030 deutlich zu reduzieren (EUROPEAN COMMISSION 2020). Daraus resultiert die Anforderung einer höchstmöglichen Effizienz der verbleibenden Pflanzenschutzmaßnahmen, wofür eine präzise Applikationstechnik entscheidend ist.

Die Landtechnikbranche stellt verschiedenen Technologielösungen zur Verfügung. Eine präzise Gestängeführung ist dabei essenziell, da sie durch elektronische Abstandssensoren eine exakte Höhenführung über der Zielfläche ermöglicht und so Abdrift sowie ungleichmäßige Applikationen reduziert (LFL 2024, S. 36). Neben dieser automatischen Gestängeführung bietet sich die Pulsweitenmodulation (PWM) als weitere Optimierungsstrategie an. Diese Technologie erlaubt eine flexible Anpassung der Ausbringmenge, ohne den Spritzdruck zu verändern, wodurch das Tropfenspektrum konstant bleibt. Dadurch wird eine Applikation bei gleichbleibender Menge, insbesondere in Kurvenfahrten oder beim Gieren des Spritzgestänges ermöglicht (WEGENER 2019, S. 2). In Kombination mit GPS-gestützten Teilbreitenschaltungen (Section-Control) lässt sich so eine noch genauere und ressourcenschonendere Applikation realisieren, die nicht nur ökonomische Vorteile bietet, sondern auch den Anforderungen des Gewässerschutzes gerecht wird (LFL 2024, S. 38).

Zukünftige Untersuchungen sollten mit einem erweiterten Stichprobenumfang und über mehrere Anbaujahre hinweg durchgeführt werden, um die Ergebnisse zu validieren und standortübergreifende Aussagen zu ermöglichen. Für belastbare Resultate ist eine umfassende Erfassung relevanter Umweltfaktoren erforderlich, um Störgrößen auszuschließen. Um gezielt die Chlorophyllveränderungen innerhalb der Pflanze zu analysieren, könnten ergänzende Gewächshausversuche durchgeführt werden. Zukünftige Analysen könnten durch den Einsatz der PAM-Fluorometrie ergänzt werden, um Herbizideffekte auf die photosynthetische Effizienz detaillierter zu erfassen. Basierend auf den vorliegenden Erkenntnissen erweist sich hierfür die

photometrische Chlorophyllbestimmung im Labor weiterhin als verlässliche Detektionsmethode. Optische Verfahren können zur ergänzenden Interpretation unterstützend herangezogen werden

7. Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit untersuchte den Einfluss unterschiedlicher Herbiziddosierungen auf den Chlorophyllgehalt von Winterweizen. Die Ergebnisse wiesen eine messbare Reduktion des Chlorophyllgehaltes in Abhängigkeit der Dosierungsstufe auf, jedoch nicht im linearen Verlauf. Interessanterweise führte die doppelte Dosierung zu stärkeren Abweichungen von den unbehandelten Kontrollen als die vierfache. Die Unterschiede zeigten sich methodenabhängig. Während die optischen Fernerkundungsmethoden lediglich Trends aufzeigen konnten, ließen sich über die photometrische Laboranalyse statistisch signifikante Differenzen aufzeigen.

Die Ertragsanalyse ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dosierungsstufen. Auffällig war jedoch, dass die 400 %-Variante tendenziell den höchsten Ertrag aufwies, während die reguläre Aufwandmenge den niedrigsten Wert erzielte. Die Interpretation der Daten erlaubt die Annahme, dass eine erhöhte Herbiziddosierung nicht zwangsläufig zu Ertragseinbußen führt und der Chlorophyllverlust nicht direkt mit der Ertragsbildung korreliert. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer gezielten Herbizidstrategie und belegen, dass eine pauschale Erhöhung der Aufwandmenge nicht zwangsläufig eine verstärkte Wirkung erzielt.

Auf Basis der ermittelten Ergebnisse lassen sich folgende Schlussfolgerungen aufstellen:

- Eine erhöhte Herbiziddosierung beeinflusst den Chlorophyllgehalt von Winterweizen messbar, jedoch nicht proportional zur Aufwandmenge
- Eine höhere Dosierung führt nicht zwingend zu einer stärkeren Reduktion des Chlorophyllgehalts
- Die Wahl der Detektionsmethode ist entscheidend für die Erfassung von Herbizideffekten, wobei chemische Laboranalysen die präzisesten Ergebnisse liefern
- Optische Fernerkundungsverfahren wie NDVI und ClG sind für die präzise Erfassung chlorophyllbezogener Veränderungen nur bedingt geeignet
- Trotz messbarer Chlorophyllverluste konnte durch die H1 keine signifikante Beeinflussung des Ertrages festgestellt werden
- Für zukünftige Untersuchungen empfiehlt sich eine Erweiterung des Stichprobenumfangs sowie die Berücksichtigung weiterer Umweltfaktoren zur präziseren Bewertung der Einflüsse auf den Chlorophyllgehalt

8. Literaturverzeichnis

Arnon DI. (1949): Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology* 24, S. 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>

Auerswald, K., und Schnyder, H. (2019): Ungedüngte Parzellen in Grünlanddauerversuchen sind ungeeignet als statistische Nullparzelle, führen zu falschen Signifikanzen und falschen Schlussfolgerungen. In Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau 2019 (S. 57–60). Technische Universität München.

Bayer CropScience Deutschland GmbH 2025: Atlantis Flex – Produktinformation. <https://agrar.bayer.de/Pflanzenschutz/Pflanzenschutzmittel/Atlantis%20Flex>, 05.03.2025

Bergmann, E. (2022): Entwicklung von Herbizidresistenzen bei Ungräsern – Ursachen und Antiresistenzmanagement. Fachseminar Pflanzenschutz im Ackerbau 2022, Dezernat Integrierter Pflanzenschutz. https://llg.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LLFG/Dokumente/04_themen/pflanzenschutz/vortrag_veroeffentlichung/Fachseminar_Bergmann_2022.pdf, 04.03.2025

BMEL: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2025: Getreide. <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/bodennutzung-und-pflanzliche-erzeugung/getreide>, 13.02.2025

Brzezowski, P., Ksas, B., Havaux, M., Grimm, B., Chazaux, M., Peltier, G., Johnson, X., und Alric, J. (2019): The function of protoporphyrinogen IX oxidase in chlorophyll biosynthesis requires oxidised plastoquinone in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Communications Biology*, 2, 159. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0395-5>

BVL: Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit 2018: Zulassungsbescheid Atlantis Flex (008188-00). https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/01_zulassungsberichte/008188-00-00.html, 05.04.2025

Campbell, D., Hurry, V., Clarke, A. K., Gustafsson, P., und Öquist, G. (1998): Chlorophyll fluorescence analysis of cyanobacterial photosynthesis and acclimation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 62(3), 667–683. <https://doi.org/10.1128/mmbr.62.3.667-683.1998>

Cerovic, Z.G., Masdoumier, G., Ghazlen, N.B. und Latouche, G. (2012): A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia Plantarum*, 146: 251-260. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x>

Dehler, M. (2023): Maßnahmen zur Reduzierung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes - Anpassungsoptionen, Kosten und Möglichkeiten zur umweltpolitischen Steuerung. Thünnen Report 104. DOI:10.3220/REP1678173967000

Diepenbrock, W., Ellmer, F. und Leon, J. (2016): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (4. überarbeitete Auflage). Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.

- DLG e.V.: Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (2018):** DLG-Merkblatt 432 Resistenzmanagement im Ackerbau (1. Auflage). https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/Merkblaetter/dlg-merkblatt_432.pdf, 17.02.2025
- Dweikat, I. M., Gelli, M., Bernards, M., Martin, A., und Jhala, A. (2023):** Mutations in the acetolactate synthase (ALS) enzyme affect shattercane (*Sorghum bicolor*) response to ALS-inhibiting herbicides. *Hereditas*, 160(28), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s41065-023-00291-y>
- EOS Data Analytics, Inc. (2022):** Chlorophyll Index In Agriculture. <https://eos.com/make-an-analysis/chlorophyll-index/>, 16.02.2025
- European Commission: Directorate-General for Health and Food Safety (2020):** From farm to fork : our food, our health, our planet, our future : the European Green Deal. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2875/653604>
- Feuerborn (2022):** Für Komfort und Genauigkeit – Moderne Technik macht den Pflanzenschutz komfortabler und sicherer für den Anwender und genauer in der Ausbringung der Mittel. *Agrarheute UX Pflanzenschutz*, Sonderdruck September 2022.
- Fischbeck et al. (1982):** Spezieller Pflanzenbau. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH.
- Ganal, M. (2024):** Herbizide einsetzen: Darauf müssen Landwirte jetzt unbedingt achten. <https://www.wochenblatt-dlv.de/feld-stall/pflanzenbau/herbizide-einsetzen-darauf-muessen-landwirte-unbedingt-achten-575921>, 06.03.2025
- Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz - PflSchG) (2012):** https://www.gesetze-im-internet.de/pflschg_2012/__3.html, 17.02.2025
- GISGeography (2025):** What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)?. <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>, 16.02.2025
- Gitelson, A. A., Gritz, Y., und Merzlyak, M. N. (2003):** Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160(3), 271–282. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>, 17.02.2025
- Govindjee, G., Stirbet, A., Lindsey, J. S., und Scheer, H. (2024):** On the Pelletier and Caventou (1817, 1818) papers on chlorophyll and beyond. *Photosynthesis Research*, 160, 55–60. <https://doi.org/10.1007/s11120-024-01081-x>
- Hiphen (o.D.):** Vegetationsindizes für Chlorophyll (CI – MTCI – NDRE – ND705 – ND550 – mNDblue). <https://www.hiphen-plant.com/vegetation-indices-chlorophyll/>, 07.03.2025
- Humphrey, A.M. (1980):** Chlorophyll. *Food Chemistry*, 5, 57-67. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(80\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0308-8146(80)90064-3)
- International Herbicide-Resistant Weed Database (2025):** Herbicide-Resistant Weeds by Site of Action. <https://www.weedscience.org/Pages/SOASummary.aspx>, 05.03.2025

Isip.de: Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion e.V. (2024):

<https://www.isip.de/isip/servlet/isipde/entscheidungshilfen/getreide/winterweizen/bestandeseentwicklung>, 18.08.2024

LfL: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2024): Leitfaden für Grund- und Oberflächenwasserschutz.

https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/grund-und-oberflaechengewaesserschutz_lfl-information.pdf, 20.03.2025

Lisiewska et al. (21. 11 2002): Contents of chlorophylls and carotenoids in frozen dill. *Food Chemistry* 84, S. 511-518.

LLG: Landesanstalt für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (2008): N-Düngung des Winterweizens noch besser an den Bedarf anpassen. https://llg.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LLFG/apb_n-duengung-des-winterweizens.pdf, 13.02.2025

Lochner et al. (2018): Fachstufe Landwirt (10. überarbeitete Auflage, Neuausgabe Ausg.). BLV Buchverlag GmbH & Co. KG.

LWK Niedersachsen (2020): Empfehlungen 2020 Pflanzenbau und Pflanzenschutz. (S. Geschäftsbereich Landwirtschaft 3.7 Pflanzenschutzamt und 3.8 Pflanzenbau, Hrsg.) Landwirtschaftskammer Niedersachsen.

Mahlein, A. K., Oerke, E. C., Steiner, U., und Dehne, H. W. (2012): Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology*, 133, 197–209. DOI: 10.1007/s10658-011-9878-z

Markwell, J., Osterman, J. C., und Mitchell, J. L. (1995): Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, 46, 467–472. DOI: 10.1007/BF00032301

Maxwell, K., und Johnson, G. N. (2000): Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668. DOI: 10.1093/jexbot/51.345.659

Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie (2015): Die wahre Farbe von Chlorophyll. <https://www.mpsd.mpg.de/42776/2015-04-chlorophyll-rubio>, 05.03.2025

Meier, U. (2018): Entwicklungsstadien mono- und dikotiler Pflanzen: BBCH Monografie. Julius Kühn-Institut. DOI: 10.5073/20180906-075119

Richardson, A. D., Duigan, S. P., und Berlyn, G. P. (2002): An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist*, 153(1), 185–194. <https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00289.x>

Schlüter, K. (2023): Fachwissen Pflanzenbau Pflanzenschutzmittel: So wirken Herbizide wirklich. top agrar. <https://www.topagrar.com/acker/news/kleine-hemmung-grosse-wirkung-13441975.html>, 17.02.2025

Schopfer, P. und Brennicke, A. (2010): Pflanzenphysiologie (7. Auflage). Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg

Schubert (2011): Pflanzenernährung (2. Auflage).Verlag Eugen Ulmer Stuttgart

Slafer, G. A., und Rawson, H. M. (1994): Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. Australian Journal of Plant Physiology, 21(4), 393–426. DOI: 10.1071/PP9940393

Spektrum der Wissenschaft (o.D.): Herbizide.

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/herbizide/31406>, 16.03.2025

StMELF: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus (2025): LfL-Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten – Winterweizen.

<https://www.stmelf.bayern.de/idb/winterweizen.html>, 20.03.2025

Stokes, G. G. (1864): On the supposed identity of biliverdin with chlorophyll, with remarks on the constitution of chlorophyll. Proceedings of the Royal Society of London, 13, 144–145. <https://doi.org/10.1098/rspl.1863.0035>

Syngenta Agro GmbH (2025): Axial 50. <https://www.syngenta.de/produkte/getreide-axial-50>, 16.03.2025

Veverka, K., Stolcova, J. und Ruzek, P. (2007): Sensitivity of Fungi to Urea, Ammonium Nitrate and their Equimolar Solution UAN. Plant Protection Science, 43(4), 157-164. DOI:10.17221/2239-PPS

Wegener, J. K. (2020): Gezielter und flexibler – Trends in der Pflanzenschutztechnik. In L. Frerichs & Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) (eds.), Jahrbuch Agrartechnik 2019 (Vol. 31, 2019). Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge. <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202001201531-0>

Wikimedia Commons (2025): File:Electromagnetic spectrum -de c.svg.

https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Electromagnetic_spectrum_-de_c.svg&oldid=1006516136, 20.03.2025

YARA: YARA GmbH und Co. KG (2025): N-Tester.

<https://pre.yara.de/pflanzenernaehrung/tools-und-services/n-tester/>, 13.02.2025

Selbstständigkeitserklärung

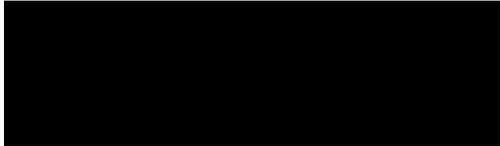
Durch meine Unterschrift erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel:

„Vergleich der Wirkung unterschiedlicher Herbiziddosierungen auf den Chlorophyllgehalt von Winterweizen unter Verwendung verschiedener chlorophyllsensitiver Detektionsmethoden“

selbstständig verfasst und in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt habe. Ich habe alle von mir genutzten Hilfsmittel und Quellen, einschließlich generativer Modelle/KI angegeben und die den verwendeten Quellen und Hilfsmitteln wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen in Form von Zitaten kenntlich gemacht. Darüber hinaus habe ich keine Hilfsmittel verwendet.

, den

21. März 2025



Fynn Ole Petersen

Anlagen

1. Messergebnisse N-Tester-Werte	54
2. Auswertung der Fernerkundungsdaten – NDVI.....	54
3. Auswertung der Fernerkundungsdaten – CIG.....	55
4. Ergebnisse der Chlorophyllanalyse im Labor	56
5. Ertragsparameter	58

1. Messergebnisse N-Tester-Werte

Wiederholung	Variante	Dosierung	vor H1 (02.04.)	nach H1 (17.04.)	nach H1 (30.04.)	vor H2 (30.04.)	nach H2 (07.05.)	nach H2 (17.05.)
A	1	0%	750	651	666	666	556	640
B	1		646	594	519	519	508	568
C	1		702	645	573	573	463	579
D	1		729	648	571	571	524	578
E	1		725	621	566	566	516	569
A	11	100%	636	606	519	519	504	555
B	11		706	609	534	534	521	585
C	11		703	639	546	546	503	562
D	11		723	712	606	606	492	570
E	11		753	666	568	568	490	618
A	12	200%	712	678	552	552	458	560
B	12		762	694	597	597	448	610
C	12		695	588	519	519	483	540
D	12		720	642	536	536	476	558
E	12		786	700	584	584	469	636
A	13	400%	712	609	537	537	480	601
B	13		769	698	548	548	503	587
C	13		693	633	541	541	502	573
D	13		750	636	516	516	528	562
E	13		737	614	513	513	508	599

2. Auswertung der Fernerkundungsdaten – NDVI

Wiederholung	Variante	Dosierung	NDVI 02.04.	NDVI 09.04.	NDVI 14.04.	NDVI 22.04.	NDVI 28.04.	NDVI 07.05.	NDVI 13.05.
A	1	0%	0,461	0,545	0,487	0,560	0,613	0,573	0,665
B	1		0,478	0,541	0,498	0,512	0,566	0,507	0,554
C	1		0,376	0,469	0,404	0,471	0,526	0,475	0,548
D	1		0,367	0,464	0,405	0,445	0,500	0,460	0,524
E	1		0,396	0,459	0,406	0,438	0,525	0,460	0,523
A	11	100%	0,351	0,385	0,318	0,400	0,447	0,373	0,441
B	11		0,436	0,465	0,415	0,487	0,531	0,453	0,535
C	11		0,404	0,457	0,388	0,436	0,519	0,463	0,518
D	11		0,445	0,495	0,444	0,477	0,554	0,535	0,559
E	11		0,390	0,485	0,415	0,495	0,564	0,524	0,574
A	12	200%	0,409	0,452	0,388	0,423	0,534	0,474	0,530
B	12		0,390	0,450	0,401	0,507	0,535	0,508	0,583
C	12		0,395	0,435	0,355	0,410	0,460	0,400	0,478
D	12		0,396	0,470	0,372	0,452	0,514	0,448	0,540
E	12		0,397	0,475	0,411	0,479	0,553	0,500	0,548
A	13	400%	0,513	0,572	0,513	0,546	0,615	0,551	0,628
B	13		0,453	0,503	0,434	0,478	0,568	0,515	0,558
C	13		0,423	0,488	0,381	0,440	0,520	0,446	0,526
D	13		0,411	0,486	0,379	0,451	0,506	0,468	0,538
E	13		0,411	0,493	0,400	0,435	0,519	0,507	0,540

3. Auswertung der Fernerkundungsdaten – CIG

Wiederholung	Variante	Dosierung	CIG 02.04.	CIG 09.04.	CIG 14.04.	CIG 22.04.	CIG 28.04.	CIG 07.05.	CIG 13.05.
A	1	0%	4,111	5,147	4,447	6,217	9,185	5,700	9,842
B	1		4,659	5,409	4,381	4,834	6,355	3,970	5,169
C	1		2,712	3,558	2,921	4,091	5,373	3,360	4,981
D	1		2,662	3,375	2,728	3,592	4,950	3,003	4,438
E	1		2,871	3,559	3,046	3,552	5,284	3,201	4,150
A	11	100%	2,315	2,261	1,791	2,760	3,252	1,987	2,936
B	11		3,600	3,602	2,846	4,302	5,117	2,853	4,333
C	11		2,813	3,466	2,800	3,368	5,066	3,399	4,197
D	11		3,883	4,210	3,391	4,112	6,152	4,599	5,439
E	11		2,804	3,560	2,994	4,662	6,536	4,516	5,653
A	12	200%	3,115	3,407	2,680	3,243	5,372	3,490	4,527
B	12		2,750	3,252	2,784	4,555	5,946	4,181	6,155
C	12		2,895	3,027	2,171	2,925	3,595	2,187	3,329
D	12		2,997	3,557	2,618	3,795	5,077	3,021	4,920
E	12		2,817	3,705	3,082	4,148	6,125	3,884	5,044
A	13	400%	5,532	6,221	4,597	5,545	8,159	5,006	7,486
B	13		4,194	4,519	3,309	4,163	6,643	4,264	5,678
C	13		3,555	3,970	2,622	3,494	4,877	2,910	4,262
D	13		3,356	3,866	2,506	3,617	4,558	3,148	4,565
E	13		3,329	3,862	2,707	3,269	4,942	4,034	4,792

4. Ergebnisse der Chlorophyllanalyse im Labor

Wiederholung	Variante	Dosierung	02.04.				17.04.			
			MW A 645	MW A 663	tot Chl mg/l	tot Chl mg/cm ²	MW A 645	MW A 663	tot Chl mg/l	tot Chl mg/cm ²
A	1	0%	0,332	0,975	14,522	0,061	0,152	0,445	6,635	0,052
B	1		0,260	0,788	11,568	0,049	0,117	0,325	4,970	0,039
C	1		0,314	0,964	14,060	0,059	0,150	0,415	6,348	0,050
D	1		0,322	0,947	14,099	0,059	0,135	0,369	5,686	0,045
E	1		0,305	0,896	13,343	0,056	0,135	0,362	5,616	0,044
A	11	100%	0,257	0,772	11,383	0,048	0,094	0,254	3,936	0,031
B	11		0,300	0,870	13,027	0,055	0,141	0,400	6,052	0,048
C	11		0,281	0,858	12,557	0,053	0,141	0,396	6,024	0,047
D	11		0,314	0,929	13,783	0,058	0,155	0,429	6,557	0,052
E	11		0,333	0,984	14,608	0,061	0,153	0,434	6,561	0,052
A	12	200%	0,289	0,861	12,733	0,053	0,166	0,475	7,149	0,056
B	12		0,315	0,981	14,231	0,060	0,155	0,456	6,778	0,053
C	12		0,286	0,823	12,374	0,052	0,115	0,349	5,108	0,040
D	12		0,315	0,907	13,627	0,057	0,137	0,390	5,881	0,046
E	12		0,321	0,978	14,328	0,060	0,135	0,390	5,841	0,046
A	13	400%	0,262	0,771	11,466	0,048	0,132	0,361	5,552	0,044
B	13		0,311	0,942	13,833	0,058	0,137	0,389	5,877	0,046
C	13		0,304	0,868	13,102	0,055	0,143	0,393	6,030	0,047
D	13		0,311	0,943	13,845	0,058	0,141	0,401	6,060	0,048
E	13		0,310	0,888	13,374	0,056	0,129	0,359	5,475	0,043

Wiederholung	Variante	Dosierung	30.04.				07.05.			
			MW A 645	MW A 663	tot Chl mg/l	tot Chl mg/cm ²	MW A 645	MW A 663	tot Chl mg/l	tot Chl mg/cm ²
A	1	0%	0,119	0,679	7,849	0,062	0,127	0,418	5,918	0,047
B	1		0,119	0,380	5,437	0,043	0,118	0,300	4,790	0,038
C	1		0,119	0,546	6,769	0,053	0,121	0,346	5,209	0,041
D	1		0,125	0,416	5,857	0,046	0,129	0,359	5,485	0,043
E	1		0,118	0,434	5,850	0,046	0,145	0,410	6,207	0,049
A	11	100%	0,103	0,392	5,220	0,041	0,099	0,215	3,724	0,029
B	11		0,124	0,379	5,544	0,044	0,127	0,392	5,699	0,045
C	11		0,109	0,494	6,164	0,048	0,128	0,399	5,786	0,045
D	11		0,108	0,480	6,017	0,047	0,128	0,397	5,759	0,045
E	11		0,123	0,463	6,184	0,049	0,142	0,400	6,066	0,048
A	12	200%	0,104	0,347	4,884	0,038	0,121	0,326	5,059	0,040
B	12		0,120	0,419	5,774	0,045	0,151	0,395	6,218	0,049
C	12		0,122	0,342	5,207	0,041	0,126	0,362	5,438	0,043
D	12		0,106	0,431	5,584	0,044	0,103	0,295	4,436	0,035
E	12		0,112	0,419	5,609	0,044	0,131	0,388	5,758	0,045
A	13	400%	0,101	0,380	5,074	0,040	0,148	0,357	5,853	0,046
B	13		0,126	0,439	6,056	0,048	0,141	0,345	5,605	0,044
C	13		0,101	0,351	4,851	0,038	0,135	0,335	5,404	0,042
D	13		0,102	0,383	5,118	0,040	0,130	0,391	5,752	0,045
E	13		0,108	0,379	5,221	0,041	0,143	0,416	6,225	0,049

			17.05.			
Wiederholung	Variante	Dosierung	MW A 645	MW A 663	tot Chl mg/l	tot Chl mg/cm ²
A	1	0%	0,169	0,514	7,522	0,059
B	1		0,134	0,427	6,131	0,048
C	1		0,135	0,413	6,025	0,047
D	1		0,110	0,355	5,065	0,040
E	1		0,117	0,346	5,138	0,040
A	11	100%	0,121	0,395	5,612	0,044
B	11		0,135	0,416	6,053	0,048
C	11		0,119	0,381	5,455	0,043
D	11		0,130	0,411	5,912	0,046
E	11		0,146	0,446	6,512	0,051
A	12	200%	0,129	0,392	5,736	0,045
B	12		0,145	0,451	6,532	0,051
C	12		0,125	0,383	5,593	0,044
D	12		0,109	0,348	4,989	0,039
E	12		0,154	0,476	6,924	0,054
A	13	400%	0,120	0,386	5,506	0,043
B	13		0,124	0,398	5,687	0,045
C	13		0,128	0,391	5,721	0,045
D	13		0,125	0,383	5,593	0,044
E	13		0,132	0,399	5,852	0,046

5. Ertragsparameter

			BBCH 75, 11.06.2024	
Wiederholung	Variante	Dosierung	Ährentragende Halme (Ä/m ²)	Ertrag (t/ha)
A	1	0%	423	8,18
B	1		441	6,47
C	1		363	7,32
D	1		315	7,54
E	1		306	8,31
A	11	100%	330	6,70
B	11		336	6,77
C	11		336	7,44
D	11		387	8,02
E	11		285	7,78
A	12	200%	312	7,58
B	12		378	7,14
C	12		267	6,00
D	12		444	7,52
E	12		513	8,67
A	13	400%	399	7,88
B	13		444	7,71
C	13		360	6,78
D	13		336	7,94
E	13		381	7,98

Anmerkung zur Spalte Ertrag (t/ha):

Die blauen Werte (B1 und A13) wurden über eine Wichtung der Ähren je m² angepasst, da diese Parzellen mit erhöhter Aussaatstärke ausgedrillt wurden. Die Roten Werte (C12 und C13) wurden über den Interquartilsabstand (IQR) als Ausreißer identifiziert.