

Institut für Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft

Professur für Landwirtschaftliche Produktionsökonomik

der Justus-Liebig-Universität Gießen

Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung bei Winterweizen im kleinstrukturierten Ackerbau

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. agr.)

im Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement

der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

M.Sc. Johannes Monath

aus Groß-Umstadt

Gießen, 2024

Mit Genehmigung des Fachbereichs Agrarwissenschaften,
Ökotoxikologie und Umweltmanagement der
Justus-Liebig-Universität Gießen

Prüfungskommission:

- 1. Gutachter: Prof. Dr. Joachim Aurbacher
- 2. Gutachter: Prof. Dr. Rainer Kühl
- Prüfer: Prof. Dr. Martin Petrick
- Prüfer: Prof. Dr. Michael Frei
- Vorsitzender: Prof. Dr. Gunter P. Eckert

Tag der Disputation: 7. März 2024

Danksagung

Diese Arbeit widme ich meiner Familie in Dankbarkeit für die Unterstützung und Geduld.

Bedanken möchte ich mich bei Prof. Aurbacher für die Betreuung meiner Promotion und die Möglichkeit äußerst frei und ohne Einschränkungen meine Versuche durchführen und die Arbeit verfassen zu können. An den richtigen Stellen konnte er mit Rat und Tat unterstützen und so wichtigen Input und Hilfestellung bieten. Prof. Kühl danke ich für die Bereitschaft der Zweitbetreuung und einen anderen Blickwinkel auf die Thematik. Ohne meinen Kollegen Johannes Kruse, wäre ich jedoch nie so weit gekommen, daher gebührt der größte Dank ihm. Er war zu jeder Zeit Motivator, Vertrauensperson, Diskussionspartner und vor allem Freund.

Zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben wesentlich die Landwirte Günther Monath, mein Vater, Frank Reith und Paul-Dirk Heil, deren Flächen Teil des Feldversuchs waren. Über einen Zeitraum von über drei Jahren war das gegenseitige Vertrauen, die Zusammenarbeit und die Motivation zur Durchführung des Versuchs ungebrochen hoch und das Interesse an der Thematik jederzeit gegeben. Dank gebührt ebenfalls Christoph Puschner vom ZVG Dieburg, und den Mitarbeiter der AGGL für die Übernahme und Betreuung der Bodenuntersuchungen und für die Unterstützung bei der Durchführung der Umfrage.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	X
Formelverzeichnis	XVI
Abkürzungsverzeichnis	XVIII
1. Einführung	1
1.1 Erarbeitung der Forschungsfragen	2
1.2 Empirischer Ansatz	4
1.3 Aufbau der Arbeit.....	5
2. Stickstoffdüngung im Winterweizen	7
2.1 Physiologische Grundlagen und praktische Umsetzung	7
2.2 Verfügbarkeit von Stickstoff aus dem Boden	11
2.3 Rolle des Bodens im Pflanzenbausystem.....	13
2.4 Negative Auswirkungen der N-Düngung durch Auswaschung	15
2.5 Produktionsfunktionen und Unsicherheit.....	17
3. Teilflächenspezifische Bewirtschaftung	20
3.1 Definition	20
3.2 Voraussetzungen zur Umsetzung von Precision Farming.....	22
3.2.1 Datenverarbeitung und Datenaustausch	22
3.2.2 Technische und persönliche Voraussetzungen.....	25
3.3 Datengrundlage	26
3.3.1 Beschreibende Information	30
3.3.2 Erklärende Information	41
4. Entscheidungstheoretische Grundlagen	48
4.1 Risiko in Entscheidungssituationen	48
4.1.1 Risikoarten in der Landwirtschaft	49
4.1.2 Risikopräferenz von Landwirten	52
4.1.3 Risikomanagement	55
4.2 Rationalität in Entscheidungssituationen	57
4.2.1 Rationale Entscheidungen und Begrenzte Rationalität	58
4.2.2 Heuristische Entscheidungsverfahren	60
4.2.3 Ökologische Rationalität	62
4.2.4 Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge	63

4.3	Einordnung in den Kontext der Arbeit.....	64
5.	Expertenbefragung I – Umfrage.....	67
5.1	Theoretischer Kontext.....	67
5.2	Formulierung der Hypothesen.....	68
5.3	Datenerhebung und Methodik.....	75
5.4	Ergebnisse der Umfrage.....	77
5.4.1	Deskriptive Statistik.....	78
5.4.2	Überprüfung der Hypothesen.....	87
5.5	Diskussion der Ergebnisse.....	97
6.	Expertenbefragung II - Landwirte als Informationsquelle.....	99
6.1	Methodische Vorgehensweise.....	100
6.2	Standorte und Betriebe.....	103
6.3	Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Bravais-Pearson.....	104
6.4	Diskussion der Ergebnisse.....	106
7.	Wirtschaftlichkeit von teilflächenspezifischer Bewirtschaftung.....	108
7.1	Methodik – Untersuchte Verfahren und Datengrundlage.....	110
7.2	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	117
7.3	Diskussion der Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	119
8.	Feldversuch zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung.....	121
8.1	Betriebe, Standorte und Klimatische Bedingungen.....	122
8.1.1	Betrieb 1 auf Standort A.....	123
8.1.2	Betrieb 2 auf Standort C.....	126
8.1.3	Betrieb 3 auf Standort B.....	129
8.1.4	Klimatische Bedingungen.....	131
8.2	Methodik.....	134
8.2.1	Untersuchte Verfahren.....	137
8.2.2	Versuchsdurchführung und zeitlicher Ablauf.....	140
8.2.3	Ökologische Kennzahlen.....	141
8.2.4	Produktionsfunktionen und ökonomische Kennzahlen.....	144
8.2.5	Ex-ante-Produktionsfunktionen und Nutzen.....	147
8.2.6	Kalibrierung der Produktionsfunktion.....	151
8.3	Beobachtungen und begleitende Untersuchungen.....	159
8.3.1	Beobachtungen während der Vegetationsperiode.....	159
8.3.2	Bodenuntersuchungen.....	161
8.3.3	Pflanzenuntersuchungen.....	165
8.4	Ergebnisse des Feldversuchs.....	167

8.4.1	N-Düngung, Erträge und Kornqualitäten und Kennzahlen	167
8.4.2	Einfluss der Verfahren und Teilflächen auf die Ergebnisse des Feldversuchs – Varianzanalyse	181
8.4.3	Optimale spezielle Intensität der N-Düngung	190
8.4.4	Ex-Ante-Produktionsfunktionen und Vergleich der statisch-naiven mit der risikobehafteten Betrachtungsweise	196
8.5	Diskussion der Ergebnisse und des Versuchs	205
9.	Fazit	208
9.1	Beantwortung der Forschungsfragen	208
9.2	Diskussion und Schlussfolgerung	211
	Zusammenfassung	214
	Summary	215
	Literaturverzeichnis	216
	Anhang der Dissertation	227

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Exemplarischer Verlauf des Gehalts des mineralisierten Stickstoffs im Boden in 0-90 cm Tiefe im Verlauf des Jahres 1991 für den Standort Nienwohlde (eigene Darstellung der Daten nach Kersebaum (1995, S. 150)).....	9
Abbildung 2: Luftbildauszug aus Google Earth vom 17.06.2015 (links) und 07.05.2016 (rechts) (Auszug aus Google Earth)	31
Abbildung 3: links: farblich aufbereitete Aufnahme des NDVI auf dem Schlag "Kleeplatz" vom 15.05.2019 mit der Kultur Winterweizen, hell = niedriger NDVI, dunkel = hoher NDVI; rechts: langjährige Biomassekarte des Schlags "Kleeplatz" aus den Jahren 2016-2020, jeweils vom 01.03.-01.09., relationale Darstellung der Biomasse über den Farbverlauf rot (schwach, 80%) – gelb (durchschnittlich, 100%) – grün (stark, 120%) (Claas 2021).....	36
Abbildung 4: Schematische Darstellung einer volumetrischen Ertragserfassung im Mähdrescher (Borchardt et al. 2018, S. 135).....	38
Abbildung 5; Messdaten einer Bodenleitfähigkeitsmessung des Schlags "Kleeplatz" mit dem VERIS 3000 der Hochschule Triesdorf, farblich dargestellt als Punktdaten (links) und IDW-interpoliert (rechts) (eigene Darstellung mit QGIS, rot = niedrige EC, blau = hohe EC in spektralem Farbverlauf).....	41
Abbildung 6: Farbliche Darstellung der Bodenart (oben) sowie der Ackerzahl (unten) eines Kartenausschnitts der Gemarkung Langstadt, der u.a. die Schläge "Kleeplatz" und "Hammchesberg" umfasst (Auszug aus dem Bodenviewer Hessen (Weinberger et al. 2017)).....	43
Abbildung 7: Risikoarten eines landwirtschaftlichen Betriebs (eigene angepasste und ergänzte Darstellung nach Hirschhauer und Mußhoff 2012, S. 9)	50
Abbildung 8: Indifferenzkurven für verschiedene Risikoeinstellungen (Hirschhauer und Mußhoff 2012, S. 64)	53
Abbildung 9: Umfragegebiet, unterteilt in drei Standortzonen, die sich an den Naturräumen orientieren (eigene Darstellung mit QGIS)	76
Abbildung 10: Häufigkeit der Antworten zur Frage nach der wahrgenommenen Heterogenität zwischen (links) und innerhalb (rechts) Schläge der Befragten mit n = 50 (Auszug aus SPSS)	82
Abbildung 11: Häufigkeit der Antworten zur Frage, ob die Befragten Ihre Bewirtschaftung an die Unterschiede zwischen (links) und innerhalb (rechts) ihrer Schläge anpassen mit n = 50 (Auszug aus SPSS).....	82
Abbildung 12: Antwortverhalten der befragten Landwirte bezüglich zur Anwendung von neuen Technologien (a) – e)), sowie zum Nutzen von digitalen Anwendungen für PF (f) mit n = 50 (Auszug aus SPSS)	84
Abbildung 13: Antwortverhalten der befragten Landwirte bezüglich der Sinnhaftigkeit der Berücksichtigung vorhandener Unterschiede aus ackerbaulichen (links) und ökonomischen (rechts) Gründen mit n = 50 (Auszug aus SPSS).....	85
Abbildung 14: Beispielhafte Eingangsdaten für die Zusammensetzung der Daten mit Spatial-Join und Zuordnung zu den in Spalte 1 aufgezeigten Voronoi-Polygonen (eigene Darstellung mit QGIS).....	102

Abbildung 15: Übersichtskarte der untersuchten Schläge in der Expertenbefragung mit den von den Landwirten eingezeichneten (und bewerteten) Teilflächen (eigene Darstellung mit QGIS unter Verwendung der Übersichtskarte von OpenStreetMap).....	104
Abbildung 16: Methodisches Vorgehen der Wirtschaftlichkeitsberechnung verschiedener Technologien der teilflächenspezifischen Düngung (eigene Darstellung).....	113
Abbildung 17: Luftbild des Schlags Kleeplatz vom 10.5.2019 (Auszug aus DroneDeploy)	125
Abbildung 18: Schlaggrenzen mit Teilflächen des Schlags Kleeplatz (Auszug aus QGIS)..	125
Abbildung 19: Luftbild des Schlags Hammchesberg vom 14.5.2020 (Auszug aus DroneDeploy).....	125
Abbildung 20: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags Hammchesberg (Auszug aus QGIS).....	125
Abbildung 21: Luftbild des Schlags An der Siedlung vom 4.5.2019 (Auszug aus DroneDeploy).....	127
Abbildung 22: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags An der Siedlung (Auszug aus QGIS).....	127
Abbildung 23: Luftbild des Schlags Hinterm Hof vom 1.7.2020 (Auszug aus DroneDeploy).....	128
Abbildung 24: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags Hinterm Hof (Auszug aus QGIS).....	128
Abbildung 25: Luftbild des Schlags Winkelfeld vom 14.5.2021 (Auszug aus DroneDeploy).....	129
Abbildung 26: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags Winkelfeld (Auszug aus QGIS).....	129
Abbildung 27: Luftbild des Schlags Waldacker vom 30.5.2019 (Auszug aus DroneDeploy).....	130
Abbildung 28 Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags Waldacker (Auszug aus QGIS)	130
Abbildung 29: Luftbild des Schlags 24-Morgen vom 2.4.2020 (Auszug aus DroneDeploy)	131
Abbildung 30: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags 24-Morgen (Auszug aus QGIS).....	131
Abbildung 31: Monatliche Durchschnittstemperatur und Niederschlagssumme des Jahres 2019 gemessen an der Wetterstation Schaaflheim-Schlierbach (eigene Darstellung der Daten von Meteostat (2022)).....	133
Abbildung 32: Monatliche Durchschnittstemperatur und Niederschlagssumme des Jahres 2020 gemessen an der Wetterstation Schaaflheim-Schlierbach (eigene Darstellung der Daten von Meteostat (2022)).....	133
Abbildung 33: Monatliche Durchschnittstemperatur und Niederschlagssumme des Jahres 2021 gemessen an der Wetterstation Schaaflheim-Schlierbach (eigene Darstellung der Daten von Meteostat (2022)).....	134
Abbildung 34: Versuchsparzellen der Jahre 2019 und 2021 auf dem Schlag Kleeplatz (eigene Darstellung mit QGIS).....	136
Abbildung 35: Falschfarbenbild (VARI-Index) des Schlages Kleeplatz vom 25.5.2021, erstellt aus einer Drohnenaufnahme mit dem Farbverlauf rot-gelb-grün und aufsteigender Biomasse (Auszug aus DroneDeploy).....	138

Abbildung 36: Applikationskarte aus CropView auf Grundlage einer Biomassekarte (NDVI, satellitengestützt) vom 25.5.2021 zur Durchführung von N3 auf dem Schlag Kleeplatz. Die Legende bezieht sich auf die Höhe der N-Düngung mit kg N/ha (Auszug aus CropView, dargestellt mit QGIS).....	139
Abbildung 37: Grafischer Verlauf der Proteinfunktion für den Standort Nieder-Weisel im Jahr 2019 als lineares (blau) und logarithmisches (schwarz) Modell (eigene Darstellung und Berechnungen mit MS-Excel von in SPSS geschätzten Funktionen unter Verwendung der Daten des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH))	152
Abbildung 38: Grafischer Verlauf der Ertragsfunktionen Y(N) der N-Steigerungsversuche in Nieder-Weisel (2019 und 2021) sowie Leeheim (2019) (eigene Darstellung und Berechnungen mit MS-Excel von in SPSS geschätzten Funktionen unter Verwendung der Daten des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH)).....	152
Abbildung 39: Grafischer Verlauf der ex-ante-Ertragsfunktionen der drei Versuchsstandorte (eigene Darstellung und Berechnungen).....	159
Abbildung 40: Grafischer Verlauf der ex-ante-Funktion der N-kostenfreien-Leistung der drei Versuchsstandorte unter Berücksichtigung einer stufenweisen Preisbildung und statisch-naiven Betrachtungsweise (eigene Darstellung und Berechnungen).....	159
Abbildung 41: Aufnahmen des festgestellten Hagelschadens auf dem Schlag Winkelfeld zum Zeitpunkt der Ernte am 22.7.2021 (eigene Aufnahmen).....	161
Abbildung 42: Illustration des Nitracheck-Schnelltests zur Feststellung der Nitratkonzentration im Saftstrom der Weizenpflanze (eigene Darstellung und Aufnahmen).....	166
Abbildung 43: Darstellung der Nitracheck-Ergebnisse als Boxplot für das Jahr 2021 auf den Versuchsschlägen Kleeplatz und Waldacker getrennt nach Teilflächen (eigene Darstellung selbst erhobener Daten).....	167
Abbildung 44: Nkfl und N-Bilanzen der untersuchten PF-Verfahren, getrennt nach Teilflächen und des Gesamtschlags Kleeplatz im Jahr 2021 (eigene Darstellung und Berechnungen).....	179
Abbildung 45: Geschätzte Randmittel für die Faktorstufen Teilfläche und Variante für den Ertrag in Tonnen (t) als abhängige Variable auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2021 (bearbeiteter Auszug aus SPSS)	183
Abbildung 46: Grafischer Verlauf der ex-post-Ertragsfunktionen der Teilflächen auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2021 in Abhängigkeit der N-Düngung (eigene Darstellung und Berechnungen).....	194
Abbildung 47: Grafischer Verlauf der ex-post Funktionen der N-kostenfreien-Leistung der Teilflächen auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2021 mit linearem Verlauf des Weizenpreises (eigene Darstellung und Berechnungen).....	194
Abbildung 48: Grafischer Verlauf der ex-ante-Ertragsfunktionen auf Standort 1, differenziert nach Ertragsfähigkeit, und ertragsmaximale N-Düngung bei statisch-naiver Betrachtungsweise (eigene Darstellung und Berechnungen)	201
Abbildung 49: Grafischer Verlauf der ex-ante-Funktionen der N-kostenfreien-Leistung auf Standort 1, differenziert nach Ertragsfähigkeit, und optimale spezielle Intensität der N-Düngung bei statisch-naiver Betrachtungsweise (eigene Darstellung und Berechnungen).....	202

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodeneigenschaften und Ertragspotenzial ausgewählter Bodentypen/ -arten bei mittlerer Lagerungsdichte (1,45 g/cm ³) (Hinck et al. 2016, S. 15 nach Bodenkundlicher Kartierung 2005).....	15
Tabelle 2: Gegenüberstellung der angepassten N-Düngung auf Basis der Erfahrung des Bewirtschafters mit dem Map-Overlay-Verfahren im entscheidungstheoretischen Kontext (eigene Angaben auf Basis des erarbeiteten Wissens)	66
Tabelle 3: Deskriptive Statistik zur soziodemografischen und betriebsspezifischen Charakterisierung mit n = 50 (eigene Erhebung)	78
Tabelle 4: Deskriptive Statistik zum Berufsabschluss der befragten Landwirte mit n = 50 (eigene Erhebung).....	79
Tabelle 5: Deskriptive Statistik zur soziodemografischen und betriebsspezifischen Charakterisierung mit n = 50, Teil II (eigene Erhebung)	79
Tabelle 6: Überwiegende Ausrichtung der befragten Landwirte hinsichtlich des Pflanzenbaus in ihrem Betrieb mit n = 50 (eigene Erhebung)	80
Tabelle 7: Deskriptive Statistik der Antworten auf die Frage, durch wen welche Arbeitsgänge überwiegend durchgeführt werden mit n = 50 (eigene Erhebung).....	81
Tabelle 8: Auswahl der Begründungen der befragten Landwirte, weshalb die Durchführung der Arbeiten im Pflanzenbau entsprechend erfolgt (eigene Erhebung).....	81
Tabelle 9: Deskriptive Statistik und Kommentare zu Anpassungsformen der Bewirtschaftung unter den befragten Landwirten mit n = 50 (eigene Darstellung und Erhebung)	83
Tabelle 10: Voraussetzungen für die befragten Landwirte zur Implementierung bzw. Erweiterung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung in ihrem Betrieb mit n = 50 (eigene Erhebung).....	86
Tabelle 11: Hindernisgründe für die befragten Landwirte bei der Implementierung von Techniken und Methoden des PF auf ihrem Betrieb mit n = 50 (eigene Darstellung und Erhebung)	87
Tabelle 12: Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen mit dem Kruskal-Wallis-Test (H-Test) und Bestimmung der Signifikanzniveaus (errechnet mit SPSS) Teil 1.....	89
Tabelle 13: Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen mit dem Kruskal-Wallis-Test (H-Test) und Bestimmung der Signifikanzniveaus (errechnet mit SPSS) Teil 2.....	90
Tabelle 14: Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen mit dem Kruskal-Wallis-Test (H-Test) und Bestimmung der Signifikanzniveaus (errechnet mit SPSS) Teil 3.....	91
Tabelle 15: Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen zur Technologieaffinität in Abhängigkeit der Erwerbsform (3c), der Rolle des Ackerbaus im Betrieb (4c), des Alters des Befragten (9c) sowie dessen Ausbildungsgrad (10c) mit dem Kruskal-Wallis-Test (H-Test) und Bestimmung des Signifikanzniveaus (errechnet mit SPSS)	92
Tabelle 16: Rangfolge der Faktorstufen und deren mittlere Ränge für die signifikant getesteten Hypothesen (eigene Erhebung mit SPSS)	93
Tabelle 17: Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8a unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit n = 50 (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)	96

Tabelle 18: Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8b unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit $n = 50$ (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)	96
Tabelle 19: Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8c unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit $n = 50$ (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)	96
Tabelle 20 Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8d unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit $n = 50$ (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)	96
Tabelle 21 Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8e unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit $n = 50$ (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)	96
Tabelle 22: Charakterisierung der an der Expertenbefragung teilnehmenden Betriebe zur Identifikation von schlagspezifischem Wissen der Landwirte (eigene Darstellung, Betriebsdaten mit Stand Sommer 2019).....	103
Tabelle 23: Auszug aus der Attributtabelle des Schlages Hamchesberg zur Veranschaulichung der in der Korrelationsanalyse verwendeten Datensätze (erstellt mit einem Spatial-Join in QGIS).....	104
Tabelle 24: Pearson-Korrelationskoeffizient r , Signifikanzniveau p und Stichprobengröße N der Korrelation zwischen den untersuchten Variablen Landwirt, ECa und NDVI unter Angabe des Standorts (Betrieb) auf den untersuchten Schlägen; die in Abbildung 15 dargestellten Schläge sind blau unterlegt (berechnet mit SPSS).....	105
Tabelle 25: Qualitative Beschreibungen der Teilflächen durch die Landwirte (eigene Erhebung)	106
Tabelle 26: Kosten und mögliche Vorteile von Precision Farming mit Bezug zur N-Düngung (Gandorfer und Meyer-Aurich 2017)	109
Tabelle 27: Notwendige technische Komponenten und weitere Investitionen zur angepassten N-Düngung und Geo-Positionierung zur Umsetzung der beschriebenen Verfahren 1-5, inklusive Investitionskosten und jährlich anfallende Gesamtkosten (darin enthalten auch Variable Kosten) (Kosten der Komponenten und Systeme entstammen den unten genannten Quellen)	112
Tabelle 28: Kennzahlen zur Ertrags- und Qualitätsentwicklung durch teilflächenspezifische Düngung (eigene Darstellung und Berechnung auf Basis von Daten des BMEL, Breunig et al. (2022), Karatay und Meyer-Aurich (2020) sowie Kühl et al (2021))	115
Tabelle 29: Annahmen über die Reduktion der N-Düngung in kg N/ha der untersuchten Verfahren für drei Reduktionsniveaus.....	116
Tabelle 30: Durchschnittliche Größen der Schläge und Teilflächen, sowie auszubildende Fachkräfte für PF bei den zu untersuchenden Betriebsgrößen (eigene Annahmen)	117
Tabelle 31: Technologiekosten von Precision Farming in Abhängigkeit der eingesetzten Komponenten und der Betriebsgröße in €/ha (eigene Berechnungen).....	117
Tabelle 32: Der betriebswirtschaftliche Wert der untersuchten Verfahren zur teilflächenspezifischen N-Düngung gegliedert nach Betriebsgröße und N-Reduktionsniveau (1,2 und 3) in €/ha (eigene Berechnungen)	118
Tabelle 33: Betriebsspiegel von Betrieb 1 im Jahr 2019 (Monath 2019)	124

Tabelle 34: Steckbrief des Schlages Kleeplatz mit Daten der Versuchsjahre 2019 und 2021 (eigene Erhebung).....	124
Tabelle 35: Steckbrief des Schlages Hammchesberg mit Daten des Versuchsjahrs 2020 (eigene Erhebung).....	125
Tabelle 36: Betriebsspiegel von Betrieb 2 im Jahr 2019 (Monath 2019)	126
Tabelle 37: Steckbrief des Schlages Siedlung mit Daten des Versuchsjahrs 2019 (eigene Erhebung)	127
Tabelle 38: Steckbrief des Schlages Hinterm Hof mit Daten des Versuchsjahrs 2020 (eigene Erhebung).....	127
Tabelle 39: Steckbrief des Schlages Winkelfeld mit Daten des Versuchsjahrs 2021 (eigene Erhebung)	128
Tabelle 40: Betriebsspiegel von Betrieb 3 im Jahr 2019 (Monath 2019)	129
Tabelle 41: Steckbrief des Schlages Waldacker mit Daten der Versuchsjahre 2019 und 2021 (eigene Erhebung).....	130
Tabelle 42: Steckbrief des Schlages 24-Morgen mit Daten des Versuchsjahrs 2020 (eigene Erhebung)	130
Tabelle 43: Niederschlagssumme und Durchschnittstemperatur der Jahre 2016-2021 für Gesamtjahr und Vegetationsperiode des Weizens (März-Juli) der Wetterstation Schaaheim-Schlierbach (eigene Darstellung der Daten von Meteostat (2022))	132
Tabelle 44: Ausgangsfunktionen der Versuchsjahre 2019-2021 für die Kalibrierung auf die Versuchsstandorte und Bestimmtheitsmaß der Regressionen (eigene Schätzung mit SPSS unter Verwendung der Daten des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) 2022).....	153
Tabelle 45: Kalibrierte Ertrags- und Proteinfunktionen des Jahres 2019 (mit Excel kalibrierte Funktionsparameter auf Basis der Daten des (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) 2022)).....	156
Tabelle 46: Kalibrierte Ertrags- und Proteinfunktionen des Jahres 2020 (mit Excel kalibrierte Funktionsparameter auf Basis der Daten des (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) 2022)).....	157
Tabelle 47: Kalibrierte Ertrags- und Proteinfunktionen des Jahres 2021 (mit Excel kalibrierte Funktionsparameter auf Basis der Daten des (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) 2022)).....	157
Tabelle 48: ex-ante-Ertrags- und Proteinfunktionen der drei Versuchsstandorte (eigene Berechnung).....	158
Tabelle 49: Nmin-Werte in kg N/ha für das Jahr 2019, gemessen vor Vegetationsbeginn, differenziert nach Messtiefe (Untersuchungsergebnisse des Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL)).....	162
Tabelle 50: Nmin-Werte in kg N/ha für das Jahr 2020, gemessen vor Vegetationsbeginn, differenziert nach Messtiefe, sowie Nmin-Gehalte unmittelbar nach der Ernte (Untersuchungsergebnisse des Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL)).....	163
Tabelle 51: Nmin-Werte in kg N/ha für das Jahr 2021, gemessen vor Vegetationsbeginn, differenziert nach Messtiefe, sowie Nmin-Gehalte unmittelbar nach der Ernte (Untersuchungsergebnisse des Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL)).....	163

Tabelle 52: Teilflächenspezifische Grundnährstoffgehalte und Versorgungsstufen der Böden auf fünf Versuchsschlägen; schlageinheitliche Werte für die Schläge Winkelfeld und Waldacker (Untersuchungsergebnisse des Landesbetriebs Hessisches Landeslabor (LHL))	164
Tabelle 53: Teilflächenspezifische Ergebnisse der Pflanzenuntersuchung der Versuchsschläge des Jahres 2021 (Labordaten)	165
Tabelle 54: Ergebnisse der Nitracheck-Untersuchung im Jahr 2021, getrennt nach Teilflächen und PF-Verfahren. Werte stellen die Nitratkonzentration in ppm dar (eigene Erhebung)	166
Tabelle 55: Durchschnittliche N-Düngung auf den Versuchsschlägen im Jahr 2019 (eigene Erhebung)	168
Tabelle 56: Durchschnittliche N-Düngung auf den Versuchsschlägen im Jahr 2020 (eigene Erhebung)	168
Tabelle 57: Durchschnittliche N-Düngung auf den Versuchsschlägen im Jahr 2021 (eigene Erhebung)	168
Tabelle 58: Versuchsergebnisse und errechnete Kennzahlen auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2019 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen).....	170
Tabelle 59: Versuchsergebnisse und errechnete Kennzahlen auf dem Schlag Siedlung im Jahr 2019 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen).....	171
Tabelle 60: Versuchsergebnisse und errechnete Kennzahlen auf dem Schlag Waldacker im Jahr 2019 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen).....	172
Tabelle 61: Versuchsergebnisse und errechnete Kennzahlen auf dem Schlag Hammchesberg im Jahr 2020 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen).....	173
Tabelle 62: Versuchsergebnisse und errechnete Kennzahlen auf dem Schlag Hinterm Hof im Jahr 2020 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)	174
Tabelle 63: Versuchsergebnisse und errechnete Kennzahlen auf dem Schlag 24-Morgen im Jahr 2020 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen).....	175
Tabelle 64: Versuchsergebnisse und errechnete Kennzahlen auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2021 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen).....	176
Tabelle 65: Versuchsergebnisse und errechnete Kennzahlen auf dem Schlag Winkelfeld im Jahr 2021 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen).....	177
Tabelle 66: Versuchsergebnisse und errechnete Kennzahlen auf dem Schlag Waldacker im Jahr 2021 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen).....	178
Tabelle 67: Berechnete aNMR für die Teilflächen der Versuchsschläge im Jahr 2020 (eigene Berechnungen).....	180

Tabelle 68: Berechnete aNMR für die Teilflächen der Versuchsschläge im Jahr 2021 (eigene Berechnungen).....	180
Tabelle 69: Ergebnisse der ANOVA des Gesamtversuchs und deskriptive Statistik des Faktors Variante mit n = 3.789 (eigene Darstellung der Analyseergebnisse aus SPSS)..	184
Tabelle 70: Ergebnisse der ANOVA des Feldversuchs im Jahr 2019 und deskriptive Statistik des Faktors Variante mit n = 450 (eigene Darstellung der Analyseergebnisse aus SPSS).....	185
Tabelle 71: Ergebnisse der ANOVA des Feldversuchs im Jahr 2020 und deskriptive Statistik des Faktors Variante mit n = 1.655 (eigene Darstellung der Analyseergebnisse aus SPSS).....	186
Tabelle 72: Ergebnisse der ANOVA des Feldversuchs im Jahr 2021 und deskriptive Statistik des Faktors Variante mit n = 1.682 (eigene Darstellung der Analyseergebnisse aus SPSS).....	187
Tabelle 73: Vergleich zwischen der optimalen speziellen Intensität der N-Düngung, dem Ertragsoptimum und den Versuchsergebnissen für das Jahr 2019 sowie die Differenz zwischen Ertragsoptimum und optimaler speziellen Intensität (eigene Erhebungen und Berechnungen).....	191
Tabelle 74: Vergleich zwischen der optimalen speziellen Intensität der N-Düngung, dem Ertragsoptimum und den Versuchsergebnissen für das Jahr 2020 sowie die Differenz zwischen Ertragsoptimum und optimaler speziellen Intensität (eigene Erhebungen und Berechnungen).....	192
Tabelle 75: Vergleich zwischen der optimalen speziellen Intensität der N-Düngung, dem Ertragsoptimum und den Versuchsergebnissen für das Jahr 2021 sowie die Differenz zwischen Ertragsoptimum und optimaler speziellen Intensität (eigene Erhebungen und Berechnungen).....	193
Tabelle 76: Erwartungswerte und Standardabweichungen der Zufallsvariablen (eigene Erhebungen und Berechnungen)	196
Tabelle 77: Ergebnisse der Optimierung unter Risiko für Standort 1 unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten).....	198
Tabelle 78: Ergebnisse der Optimierung unter Risiko für Standort 2 unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten).....	198
Tabelle 79: Ergebnisse der Optimierung unter Risiko für Standort 3 unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten).....	198
Tabelle 80: ex-ante-Ertrags- und Proteinfunktionen für Teilflächen mit hoher und niedriger Ertragsfähigkeit im Vergleich zu den standorteinheitlichen Funktionen (eigene Berechnungen).....	201
Tabelle 81: Erwartungswerte und Standardabweichungen der Zufallsvariablen für die teilflächenspezifische ex-ante-Betrachtung (eigene Berechnungen).....	202

Tabelle 82: Ergebnisse der Optimierung unter Risiko für die Teilflächen mit hohem Ertragspotenzial unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten).....	203
Tabelle 83: Ergebnisse der Optimierung unter Risiko für die Teilflächen mit niedrigem Ertragspotenzial unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten).....	203

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der optimalen N-Menge, die durch Düngung bereitgestellt werden soll (Christen 2009, S. 117)	7
Formel 2: Berechnung der Stickstoffmineralisation anhand eines Zweikomponenten-Modells mit N_{fast} und N_{slow} (Beisecker et al. 2015; Nordmayer und Richter 1985).....	12
Formel 3: Berechnung des NDVI unter Berücksichtigung der im nahinfraroten (NIR) und roten Wellenlängenbereich erfassten Lichtreflexion (nach Rouse et al. (1973))	35
Formel 4: Berechnung des VARI unter Berücksichtigung der im sichtbaren Wellenlängenbereich erfassten Lichtreflexion (nach Gittelsohn et al. (2002)).....	36
Formel 5: Berechnung des N-Gehalts im geernteten Weizenkorn mit kg N/dt abhängig vom Eiweißgehalt des Ernteguts und dem N-Gehalt im Rohprotein (eigene Darstellung nach Beisecker et al. (2015, S 20)).....	142
Formel 6: Berechnung des N-Entzugs mit kg N/ha für Winterweizen abhängig vom N-Gehalt des Haupternteerzeugnisses, ergänzt durch den N-Entzug des Nebenernteerzeugnisses (eigene Darstellung nach Beisecker et al. (2015, S. 20))	142
Formel 7: Berechnung der N-Bilanz unter Berücksichtigung der gesamten gedüngten N-Menge, des gemessenen N_{min} -Werts sowie des N-Entzugs (eigene Darstellung nach (Beisecker et al. 2015)).....	143
Formel 8: Berechnung der aNMR (eigene Darstellung nach Beisecker et al. (2015))	143
Formel 9: Mathematische Vorlage einer quadratischen Ertragsfunktion in Abhängigkeit des Stickstoffeinsatzes N in kg N/ha mit $Y =$ Ertrag in dt/ha (eigene Herleitung)	145
Formel 10: Mathematische Vorlage einer linearen Proteinfunktion in Abhängigkeit des Stickstoffeinsatzes N und der Ertragsfunktion $Y(N)$ aus Formel 9 mit $P =$ Proteingehalt in Prozentpunkten % (eigene Herleitung)	145
Formel 11: Mathematische Vorlage einer logarithmischen Proteinfunktion in Abhängigkeit des Stickstoffeinsatzes N in kg N/ha und der Ertragsfunktion $Y(N)$ aus Formel 9 mit $P =$ Proteingehalt in Prozentpunkten % und unter Verwendung des Logarithmus naturalis \ln (eigene Herleitung).....	146
Formel 12: Berechnung der N-kostenfreien-Leistung (N_{kfl}) in €/ha unter Berücksichtigung der Ertragsfunktion, der applizierten N-Düngung, den Preisen für Weizen (in €/dt) und Stickstoff (in €/kg) sowie den vom Proteingehalt abhängigen Preiszuschlägen für höhere Qualitätsstufen (eigene Herleitung)	146
Formel 13: Mathematische Vorlage einer (ex-ante-)Ertragsfunktion $Y(N)$ in Abhängigkeit von N unter Berücksichtigung eines normalverteilten additiven Zufallsfaktors (eigene Herleitung).....	149
Formel 14: Mathematische Vorlage einer (ex-ante-)Proteinfunktion $P(N)$ in Abhängigkeit von N und der Ertragsfunktion aus Formel 13 unter Berücksichtigung eines normalverteilten additiven Zufallsfaktors (eigene Herleitung)	149
Formel 15: Mathematische Vorlage einer Risikonutzenfunktion mit konstanter absoluter Risikoaversion (CARA) in Abhängigkeit der N-kostenfreien-Leistung (N_{kfl}) (eigene Herleitung).....	150

Formel 16: Mathematische Vorlage der kalibrierten Ertragsfunktion in Abhängigkeit der N-Düngung unter Berücksichtigung der Kalibrierfaktoren K (eigene Herleitung).....	154
Formel 17: Mathematische Vorlage der kalibrierten Proteinfunktion in Abhängigkeit der N-Düngung unter Berücksichtigung der Kalibrierfaktoren K und der kalibrierten Ertragsfunktion $Y'(N)$ (eigene Herleitung).....	154
Formel 18: Skizziertes Vorgehen der OLS-Methode für die Schätzung der Kalibrierfaktoren (eigene Herleitung)	154
Formel 19: Mathematische Vorlage der zweiten Kalibrierung der Ertragsfunktion in Abhängigkeit der N-Düngung unter Berücksichtigung der Kalibrierfaktoren K' (eigene Herleitung).....	155
Formel 20: Mathematische Vorlage der zweiten Kalibrierung der Proteinfunktion in Abhängigkeit der N-Düngung unter Berücksichtigung der Kalibrierfaktoren K' und der zweifach-kalibrierten Ertragsfunktion $Y''(N)$ (eigene Herleitung).....	155
Formel 21: Nebenbedingungen für die Funktionsparameter b' und c' der kalibrierten Ertragsfunktion unter Berücksichtigung des Verhältnisses von b und c zueinander und der durchschnittlichen N-Düngung des Ausgangsversuchs und betrachteten Schlags (eigene Herleitung).....	155
Formel 22: Beispielrechnung der Nkfl zweier Düngeniveaus für eine Teilfläche mit niedrigem Ertragspotenzial auf Standort A in der ex-ante-Perspektive (eigene Herleitung).....	204

Abkürzungsverzeichnis

AEK:	Arbeitserledigungskosten
AGGL:	Arbeitsgemeinschaft Grundwasserschutz und Landwirtschaft
AHL:	Ammonium-Harnstoff-Lösung
aNMR:	apparente Nettomineralisationsrate
ANOVA:	Varianzanalyse
AV:	abhängige Variable
BBCH:	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie
BP:	Bodenpunkte
C:	Kohlenstoff (chemisches Zeichen)
CARA:	konstante Risikoaversion
DAEKfL:	Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung
DüV:	Düngeverordnung
dt:	Dezitonne (100 kg)
EC:	elektrische Leitfähigkeit (des Bodens)
ECa:	scheinbare elektrische Leitfähigkeit (des Bodens)
GIS:	Geoinformationssystem
GNSS:	Globales Navigationssatellitensystem
GV:	Großvieheinheiten
H:	Wasserstoff (chemisches Zeichen)
ha:	Hektar
HEP:	Haupternteprodukt
IDW:	inverse Distanzgewichtung
K:	Kalium
KAS:	Kalkammonsalpeter
KM:	Körnermais
LAI:	Leaf area index = Blattflächenindex
LF:	landwirtschaftliche Fläche
LfL:	Landesanstalt für Landwirtschaft
LHL:	Landesbetrieb hessisches Landeslabor

LLH:	Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen
Mg:	Magnesium (chemisches Zeichen)
mS:	Milisiemens
N:	Stickstoff
NDVI:	Normalized Difference Vegetation Index
NEP:	Nebenernteprodukt
nFK:	nutzbare Feldkapazität
NIR:	Nahinfrarot
NkFL:	Stickstoffkostenfreie Leistung
Nmin:	mineralisierter Stickstoff (zu Beginn der Vegetationsperiode)
Nmin _{NE} :	mineralisierter Stickstoff nach der Ernte
NV:	Normalverteilung
O:	Sauerstoff (chemisches Zeichen)
OLS:	ordinary least squares = Methode der kleinsten Quadrate
P:	Phosphor
PF:	Precision Farming/ teilflächenspezifische Bewirtschaftung
ppm:	parts per million
TWI:	topografischer Feuchteindex
U:	Nutzen
UV:	unabhängige Variable
VARI:	Visible Atmospherically Resistance Index
WG:	Wintergerste
WR:	Winterraps
WW:	Winterweizen
ZR:	Zuckerrüben
ZVG:	Zweckverband Gruppenwasserwerk

1. Einführung

Mit der Veröffentlichung des Green Deal durch die EU-Kommission wurden wachsende gesellschaftliche Anforderungen an die landwirtschaftliche Produktion in einen politischen Rahmen gebracht und Ziele definiert. Während vor allem der Klimaschutz und die Förderung und Bewahrung der Biodiversität im Zentrum der Anstrengungen stehen, wirkt sich dies durch verschiedene Initiativen auf die Landwirtschaft, insbesondere den Pflanzenbau aus. Neben einer beabsichtigten, aber nicht näher definierten (Stand März 2023), Reduktion des Pflanzenschutzsinsatzes um 50 % adressiert die im Green Deal enthaltene Farm2Fork-Strategie (engl.: in etwa „vom Hof auf den Tisch“) auch eine Reduktion des Einsatzes von Düngemitteln um 20 %, insbesondere von Stickstoff (N). Für die Landwirtschaft erwächst daraus die Herausforderung die nachhaltige Ernährungssicherung neben einer ökonomischen zunehmend als ökologische Aufgabe zu begreifen und umzusetzen. Zusammengefasst stellt sich für die Agrarwirtschaft die Frage, wie Produktivität und Wirtschaftlichkeit unter strengen Rahmenbedingungen erhalten werden können. Angesprochen wird dabei auch eine Effizienzsteigerung und damit die Reduktion negativer Effekte durch eine ineffiziente N-Düngung. Dies ist sowohl aus ökologischen als auch ökonomischen Gründen für die Betriebe von Bedeutung. Ineffiziente Entscheidungen über bspw. den Betriebsmitteleinsatz wirken sich auf die Umwelt, die Wirtschaftlichkeit des Pflanzenbaus und den Betrieb insgesamt aus. Somit sollten unnötige Kosten vermieden und Ertragspotenziale ausgeschöpft werden. In der wissenschaftlichen Diskussion wird dazu u.a. auf Precision Farming (PF) (nachfolgend auch synonym für Smart-Farming, teilflächenspezifische Bewirtschaftung, angepasste Bewirtschaftung etc.) verwiesen. In der Literatur wird mit PF meistens die variierte Applikation von Betriebsmitteln, meist N-Dünger assoziiert. Ziel von PF ist eine orts- bzw. standortgenaue Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Nutzflächen und angepasster Einsatz von Betriebsmitteln (N-Düngern). Unterschiede des Bodens hinsichtlich seiner Eigenschaften und Ertragsfähigkeit werden explizit bei den ackerbaulichen Maßnahmen berücksichtigt (Hinck et al. 2016, S. 5). Dadurch sollen räumlich variable Ertragssituationen in die Entscheidung über bspw. die N-Düngung integriert werden. Daneben spielt die Unsicherheit über die genaue Ausprägung von Witterungsereignissen (insbesondere Niederschlag und dessen Verteilung entlang der Vegetationsperiode) eine zentrale Rolle bezüglich einer ineffizienten N-Düngung (Sieling et al. 2011, S. 170).

1.1 Erarbeitung der Forschungsfragen

Während Wettervorhersagen im kurzfristigen Zeithorizont an Genauigkeit gewinnen, den Verlauf über die gesamte Vegetationsperiode aber auch in absehbarer Zeit nicht exakt bestimmen werden, ist dies bei PF anders. Hierzu wurde in den vergangenen 30 Jahren intensiv geforscht, weshalb inzwischen eine Vielzahl von Systemen verschiedener Hersteller am Markt verfügbar ist. Dennoch wird PF insbesondere in kleineren Betrieben nur in geringem Umfang genutzt (Paustian und Theuvsen 2016). Im Hinblick auf die Ziele des Green Deal stellt sich die Frage, ob PF auch für kleinere Betriebe ein sinnvolles Instrument sein kann und welche Voraussetzungen zur Implementierung gegeben sein müssen. Umgekehrt gilt es zu ermitteln, weshalb eine Implementierung bisher nur unzureichend erfolgt. Dabei müssen ökonomische und pflanzenbauliche bzw. agronomische Aspekte berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich die erste Forschungsfrage, der in dieser Arbeit nachgegangen wird:

- 1) Wieso setzen vor allem kleine Betriebe teilflächenspezifische Bewirtschaftung bzw. Düngung nur in geringem Maße ein?

Als Ursache könnte eine geringe Wirtschaftlichkeit der Verfahren, insbesondere für kleine Betriebe ausschlaggebend sein. Gandorfer und Meyer-Aurich (2017) merken hierzu an, dass die Kosten von PF-Verfahren klar definiert werden können, deren Nutzen jedoch ungleich schwieriger zu quantifizieren ist. Daneben könnte Unwissenheit über die Potenziale von PF unter den Landwirten verbreitet sein (siehe hierzu Breunig et al. (2022)) oder aber Hürden bei der Implementierung bestehen. Eine alternative Begründung könnte zudem sein, dass PF sehr wohl umgesetzt wird, jedoch nicht mit der Unterstützung technischer Systeme. Solche heuristischen Systeme können ebenso effiziente Möglichkeiten sein, um Entscheidungsproblemen zu begegnen, wozu es eine Vielzahl an verhaltensökonomischen Arbeiten gibt. Hieraus ergeben sich weitere Fragestellungen, die auf der ersten Forschungsfrage aufbauen.

- a) Welche ökonomischen, ökologischen und pflanzenbaulichen Potenziale bieten unterschiedliche Verfahren der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung?
- b) Was wissen die Betriebsleiter über entsprechende Verfahren bzw. was glauben sie zu wissen?
- c) Was hindert sie an der Umsetzung von teilflächenspezifischer Bewirtschaftung in ihrem Betrieb?
- d) Setzen kleinstrukturierte und kleine Betriebe teilflächenspezifische Bewirtschaftung mit Hilfe von Heuristiken oder anderen vereinfachten Methoden um?

Es gibt eine Vielzahl von Verfahren, die sich hinsichtlich ihrer Umsetzung, Potenziale und Implementierungskosten unterscheiden. Möglicherweise unterliegen die Landwirte Fehlannahmen über diese Verfahren, weshalb eine Nutzung nicht erfolgt. Außerdem könnten kleinere Strukturen dazu führen, dass aufgrund geringerer Schlaggrößen die Heterogenität eines Standorts durch die Feldgrenzen hinreichend gut abgetrennt wird, was zu einer Art strukturbedingtem PF führt. Demnach würde eine Anpassung der Bewirtschaftung zwischen den Schlägen eine Berücksichtigung von Heterogenität ermöglichen.

Erhoffte Potenziale zur Effizienzsteigerung in der praktischen Anwendung könnten unerfüllt bleiben. Borchardt et al. (2018) sowie Wendland et al. (2010) konnten kaum positive Effekte durch die Nutzung von PF ermitteln. Das wirft die Frage auf, ob PF überhaupt dazu in der Lage ist einen Beitrag zu einer optimalen und an die räumliche Ertragssituation angepassten N-Düngung zu leisten und somit den Zielen des Green Deal sowie einer verbesserten Wirtschaftlichkeit des Pflanzenbaus zu entsprechen. Hieraus ergibt sich die zweite Forschungsfrage:

- 2) Welchen Beitrag leistet die Berücksichtigung von Heterogenität im Hinblick auf eine möglichst optimale N-Düngung aus ökonomischer und pflanzenbaulicher Sicht?

Damit wird die Frage 1a) aufgegriffen, die einen Vergleich anstrebt. Da pflanzenbauliche Entscheidungen aufgrund der Unsicherheit über die Entwicklung der Witterung grundsätzlich risikobehaftet sind, werden Werkzeuge gesucht, die diese Unsicherheit reduzieren. Hierzu soll PF einen Beitrag bei der Berücksichtigung von räumlich variablen Umweltfaktoren leisten. Eine Aussage über eine optimale Entscheidung kann jedoch erst ex-post getroffen werden. Ex-ante geht es darum, sich maximal an die ex-post-Optimalität anzunähern. Um dies zu überprüfen, eignen sich Produktionsfunktionen, die ex-post alle eingetretenen Umweltfaktoren enthalten und den Zusammenhang zwischen einem Inputfaktor (in diesem Fall Stickstoff) und dem Output (Kornertrag) erklären. Wird die konkrete Marktsituation (Preise für Stickstoff und bspw. Weizen) berücksichtigt, kann die optimale spezielle Intensität errechnet werden. Daran sollte sich der Landwirt für eine ökonomische Optimierung orientieren. Wagner (1995, 1999) stellt fest, dass sich Produktionsfunktionen und somit auch die optimale spezielle Intensität der N-Düngung auf einem Schlag im Hinblick auf das Ertragspotenzial unterscheiden. Bezieht man neben der räumlichen Verteilung von Umweltfaktoren auch zeitlich variable Faktoren, nämlich die Witterungs- und somit Ertragsbedingungen, mit ein, wird die Unsicherheit über deren Ausprägung im

Entscheidungsprozess berücksichtigt. Aus einer statischen und naiven Optimierung kann somit eine Optimierung unter Risiko entwickelt werden.

- a) Unterscheidet sich die optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung auf einem Schlag in Abhängigkeit der Teilflächen?
- b) Welche Rolle spielt die Existenz von Risiko bei der Entscheidung über die optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung?

Hierbei muss zwischen einer ex-ante- und einer ex-post-Betrachtung unterschieden werden. Für die ex-ante-Betrachtung und daraus abzuleitenden Entscheidungen spielen exklusives und subjektives Wissen des Landwirts und Kenntnisse über die Entwicklung in den Vorjahren eine wesentliche Rolle. Heijting et al. (2011), Fleming et al. (2000) sowie Lorenz und Münchhoff (2015) stellen daher den Landwirt als Entscheidungs- und Wissensträger heraus. Sie betonen die Notwendigkeit den Landwirt in den Entscheidungsprozess zu integrieren, weshalb dieser auch im Zentrum dieser Arbeit stehen soll.

1.2 Empirischer Ansatz

Die Grundlagen zur Beantwortung der Forschungsfragen bilden ein dreijähriger Feldversuch auf drei Betrieben im Landkreis Darmstadt-Dieburg sowie eine zweigeteilte Expertenbefragung unter südhessischen Landwirten. Während die Expertenbefragung nicht spezifisch für eine Kultur durchgeführt wurde, sondern den Gesamtbetrieb betreffen, beschränkt sich der Feldversuch auf den Anbau von Winterweizen. Mit einem Anbauumfang von 2,89 Mio. Hektar und somit einem Viertel des Ackerlands im Jahr 2022, ist Winterweizen die bedeutendste Ackerkultur in Deutschland. Dies gilt mit geringen Abweichungen des Anbauumfangs auch für die Versuchsjahre 2019-2021 (Bodennutzungshaupterhebung, Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022). Insbesondere die späte N-Düngung (N3), mit dem Ziel der Qualitätssicherung durch eine Erhöhung des Proteingehalts, kann bei unangepasster bzw. ineffizienter Höhe zu einem N-Verlust und negativen Effekten wie bspw. einer Auswaschung in das Grundwasser führen. Aus diesem Grund liegt das Augenmerk dieser Arbeit vor allem auf dem Weizenanbau.

Mit einer Umfrage unter 50 Landwirten wurde deren Einstellung zum Einsatz von PF und Einschätzungen bezüglich des Nutzens von PF speziell für ihren Betrieb ermittelt. Die Besonderheit Stichprobengruppe besteht darin, dass sich alle Landwirte an einer Grundwasserschutzkooperation mit den örtlichen Wasserversorgern beteiligen. Diese wird u.a. vom Zweckverband Gruppenwasserwerk Dieburg (ZVG) betreut und beinhaltet eine

grundwasserschutzorientierte Pflanzenbauberatung. Im Fokus steht eine Vermeidung erhöhter Nitratauswaschungen ins Grundwasser. Die Kooperation adressiert damit indirekt auch die Ziele des Green Deal. Als darauf aufbauende Expertenbefragung wurden fünf Landwirte in der Region zu Teilflächen auf ausgewählten Schlägen ihres Betriebs befragt. Sie sollten die Teilflächen nur nach ihren Erfahrungen bestimmen und bewerten. Besonders wertvoll sind hierzu auch qualitative Beschreibungen der Teilflächen und der Ursache für vorhandene Standorteigenschaften. Dies stellen Lorenz und Münchhoff (2015) heraus. Die so bestimmten Teilflächen (von Fleming et al. (2000) als *farmer defined management zones* bezeichnet) wurden mit durch technische Hilfsmittel erfassten Standorteigenschaften verglichen. Dadurch konnte bewertet werden, wie gut sich das Wissen des Landwirts zur Bestimmung von Teilflächen eignet und die Erkenntnisse von Heijting et al. (2011) sowie Fleming et al. (2000) zutreffen.

Inhalt des dreijährigen Feldversuchs (2019-2021) war ein Verfahrensvergleich zwischen mehreren PF-Systemen. Die drei Betriebe, auf deren Flächen der Versuch durchgeführt wurde, waren auch Teil der Expertenbefragung, sodass die dort bestimmten Teilflächen auch für den Versuch herangezogen werden konnten. Übergeordnetes Ziel des Versuchs war eine möglichst praxisnahe Anlage, Umsetzung und Datenerhebung, um die untersuchten Verfahren in der praktischen Anwendung durch den Landwirt untersuchen und die Düngung sowie die Ernte mit betriebsüblicher Technik durchführen zu können. In der Auswertung wurden neben ökologischen Kennzahlen Deckungsbeiträge in Form der N-kostenfreien-Leistung (Nkfl) untersucht. Sie bildet sowohl die Grundlage des ökonomischen Verfahrensvergleichs als auch die Zielgröße der ökonomischen Optimierung mit Hilfe geschätzter Produktionsfunktionen. Angelehnt an Wagner (1995, 1999) wurden die Kennzahlen für jeden Schlag und für jede Teilfläche ex-post ermittelt und anhand aktueller Preise die optimale spezielle Intensität der N-Düngung teilflächenspezifisch errechnet. Um die Unsicherheit im Entscheidungsprozess abzubilden, wurden ex-ante-Funktionen geschätzt, die sich als Mittel der Versuchsjahre ergeben und durch eine Normalverteilung der Zufallsvariablen ergänzt wird. Somit ist es möglich neben einem nachträglich ermittelten Optimum auch ein Optimum zu errechnen, an dem sich der Landwirt bei seiner Entscheidung über die Höhe der N-Düngung orientieren sollte.

1.3 Aufbau der Arbeit

Entscheidungen in der Landwirtschaft unterliegen meistens komplexen biologischen Zusammenhängen und Zufallsvariablen. Exemplarisch ist dafür zu Anfang die N-Düngung im

Weizen beschrieben. Neben kulturspezifischen Besonderheiten wird auch auf den Boden als Grundlage für heterogene Ertragsbedingungen eingegangen. Diese werden u.a. vom Wasserhaltevermögen und der Nährstoffdynamik des Bodens beeinflusst. Im Fall von Stickstoff wird sie von unkontrollierbaren externen Faktoren (Witterung) und den Entscheidungen des Landwirts über Düngung, Bodenbearbeitung und Fruchtfolge beeinflusst. Somit ergeben sich unterschiedliche Wachstumsvoraussetzungen, die bei der N-Düngung des Weizens bedacht werden müssen. Als Hilfestellung dafür wurden eine Vielzahl an Systemen entwickelt, die auf unterschiedliche Art und Weise die Heterogenität des Standorts erfassen sollen. Darauf aufbauend kann die Düngung angepasst werden. Die Systeme der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung werden hinsichtlich ihres Ansatzes und Informationsgehalts kategorisiert. In diesem Zusammenhang stellt der Landwirt als Entscheider eine wesentliche Informationsquelle dar. Daher werden zum Abschluss des theoretischen Teils entscheidungstheoretische Grundlagen diskutiert, um Entscheidungen des Landwirts im Hinblick auf die Umsetzung seines Wissens zu verstehen. Neben dem Thema Rationalität bzw. begrenzte Rationalität und Heuristiken wird Risiko bzw. Unsicherheit allgemein als entscheidungsrelevanter Faktor beachtet.

Der Aufbau des empirischen Teils ist in vier Kapitel unterteilt. Sie bauen aufeinander auf, sind jedoch methodisch getrennt und jedes Kapitel stellt für sich eine separate Problemstellung und Datenerhebung dar. Aus diesem Grund werden zum besseren Verständnis die Beschreibung des methodischen Vorgehens und die Ergebnisse und deren Diskussion getrennt behandelt. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Diskussion aller empirischen Ergebnisse im Schlussteil dieser Arbeit. Zu Anfang werden die Ergebnisse der beiden Expertenbefragungen I und II präsentiert und diskutiert. Die Ergebnisse der Umfrage bieten einen guten Überblick über das Verhalten und die Einschätzungen der Landwirte im Hinblick auf PF. Gestützt werden die Ergebnisse durch die Expertenbefragung II, die das Verständnis und das Wissen der Landwirte über ihre Schläge untersucht. Im Übergang zum Verfahrensvergleich und zum Praxisversuch schätzt eine annahmen-basierte Wirtschaftlichkeitsabschätzung das Potenzial verschiedener PF-Verfahren für unterschiedliche Betriebsgrößen und Einsparpotenziale ab. Auch hier steht der Landwirt als Entscheidungsträger im Fokus, insbesondere vor dem Hintergrund einer geringen Umsetzung von PF auf kleinen Betrieben. Die getroffenen Annahmen und Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsschätzung zu überprüfen, ist eine Teilaufgabe des Feldversuchs. Dieser schließt den empirischen Teil ab und stellt das zentrale Kapitel dieser Arbeit dar. Im Anschluss an die Vorstellung der beteiligten Betriebe und Schläge wird das methodische Vorgehen dargelegt. Dabei wird auch die Ermittlung der Produktionsfunktionen erklärt, die als

Werkzeug zur Auswertung von zentraler Bedeutung ist. Die Ergebnisse des Versuchs und deren Diskussion schließen das Kapitel und die Arbeit insgesamt ab.

2. Stickstoffdüngung im Winterweizen

Als Makronährstoff wird Stickstoff (N) in der Pflanze u.a. zur Synthese von Aminosäuren gebraucht. Für die landwirtschaftliche Produktion stellt Stickstoff einen zentralen Produktionsfaktor dar, der über verschiedene Düngemittel dem Boden und der Pflanze zugeführt wird. Stickstoff gehört zu den assimilierten¹ Nährstoffen. Es bedarf einer vorherigen Reduktion (Ammoniak NH_3 bzw. Ammonium NH_4^+) oder Oxidation (Nitrat NO_3^-), um Stickstoff für die Pflanze nutzbar zu machen. Das atmosphärische N_2 -Molekül ist in seiner Form für die Pflanze nicht nutzbar (Schubert 2011, 23ff). Der Fokus der N-Versorgung der Pflanze über den Boden liegt auf die N-Formen Ammonium oder Nitrat. Diese Verbindungen werden entweder durch die natürliche Mineralisation von im Boden gebundenem N oder durch Düngung bereitgestellt. Während die N-Mineralisation unkontrollierbaren Umweltfaktoren und der langfristig zugeführten N-Menge durch Düngung unterliegt, entscheidet der Bewirtschafter über die Höhe N-Düngung. Diese orientiert sich an Umweltzuständen (erwartete Witterung, Bodenqualität), ökonomischen Erwartungen, sowie dem Ertragspotenzial und den physiologischen Anforderungen der Kulturpflanze. Hierbei treten aufgrund der unsicheren Umweltfaktoren und wirtschaftlichen Erwartungen N-Verluste, die neben höheren Kosten und geringeren Erlösen auch negative ökologische Effekte bewirken.

2.1 Physiologische Grundlagen und praktische Umsetzung

Die optimale N-Düngung der Weizenpflanze wird von äußeren Faktoren und den Eigenschaften der jeweiligen Sorte bzw. Qualitätseinstufung beeinflusst. Näherungsweise kann die Entscheidung über die optimale N-Menge durch folgende Formel beschrieben werden:

Formel 1: Berechnung der durch Düngung bereitgestellten, optimalen N-Menge (Christen 2009, S. 117)

$$N_{\text{opt}} = N\text{-Bedarf} - N_{\text{min}} \text{ +/- Nettomineralisation} + N_{\text{min}} \text{ nach Ernte} + N\text{-Verluste}$$

Wie auch der Witterungsverlauf haben apparente Nettomineralisationsrate (aNMR) sowie N-Verluste erheblichen Einfluss auf die Höhe der N-Düngung, um den Pflanzenbedarf zu decken.

¹ „Assimilation ist der Einbau eines Nährstoffs in organische Substanz unter Einsatz von Enzymen. Mit der Assimilation ist eine Oxidation oder Reduktion verbunden.“ (Schubert 2011, S. 23.)

Aus der N-Düngung resultieren in unterschiedlicher Form N-Verluste, für eine physiologisch optimale N-Düngung müssten diese explizit berücksichtigt werden. Neben der jeweiligen Bewirtschaftungsweise werden sie vor allem durch die Witterung beeinflusst. Ex-ante ist es aufgrund der Unsicherheit über die Zufallsvariablen in Formel 1 nicht oder nur begrenzt möglich, eine optimale Höhe der N-Düngung zu ermitteln (Christen 2009). Eine Anpassungsmöglichkeit, die auch in der Praxis Anwendung findet, ist die Aufteilung der N-Düngung auf mehrere Gaben und eine möglichst kontinuierliche begleitende Abschätzung des jeweiligen N-Bedarfs entlang der Vegetationsperiode. Variierende Standortverhältnisse mit unterschiedlichen Ertragsersparungen sowie unterschiedlich stark ausgeprägter N-Mineralisation erschweren diese Entscheidung. In der Praxis haben sich daher verschiedene Nähungsverfahren herausgebildet, die dem Landwirt als Entscheidungshilfen dienen. Davon ist insbesondere das Nmin-Verfahren etabliert und auch in der Düngerverordnung (DüV)² vorgegeben. Hierbei wird der zu Vegetationsbeginn im durchwurzelbaren Bodenraum vorhandene mineralische Stickstoff erfasst und vom Sollwert der kulturspezifischen N-Menge abgezogen. Bei Winterweizen ist es üblich, die anschließend gedüngte N-Menge auf mehrere Gaben aufzuteilen. Dies hat einerseits physiologische Gründe, auf die nachfolgend eingegangen wird. Andererseits sollen dadurch N-Verluste durch Auswaschung verringert werden. Die bereitgestellte N-Menge orientiert sich am Verlauf des N-Bedarfs der Weizenpflanze entlang der Vegetationsperiode. Nicht inkludiert ist hingegen die zeitliche Variation der N-Mineralisation, die abhängig vom Witterungsverlauf Stickstoff aus dem Bodenvorrat pflanzenverfügbar (und somit auch auswaschungsgefährdet) macht. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Verfügbarkeit von Stickstoff für einen Weizenbestand im Jahr 1991 entlang der Vegetationsperiode. Hierbei wird neben der gedüngten die im Boden verfügbare N-Menge berücksichtigt.

² Die Ermittlung des Stickstoffbedarfs wird mit §4, Abs.1 DüV mit Verweis auf Anlage 4, Tabellen 1-7 DüV geregelt (Bundesministerium für Justiz 2017).

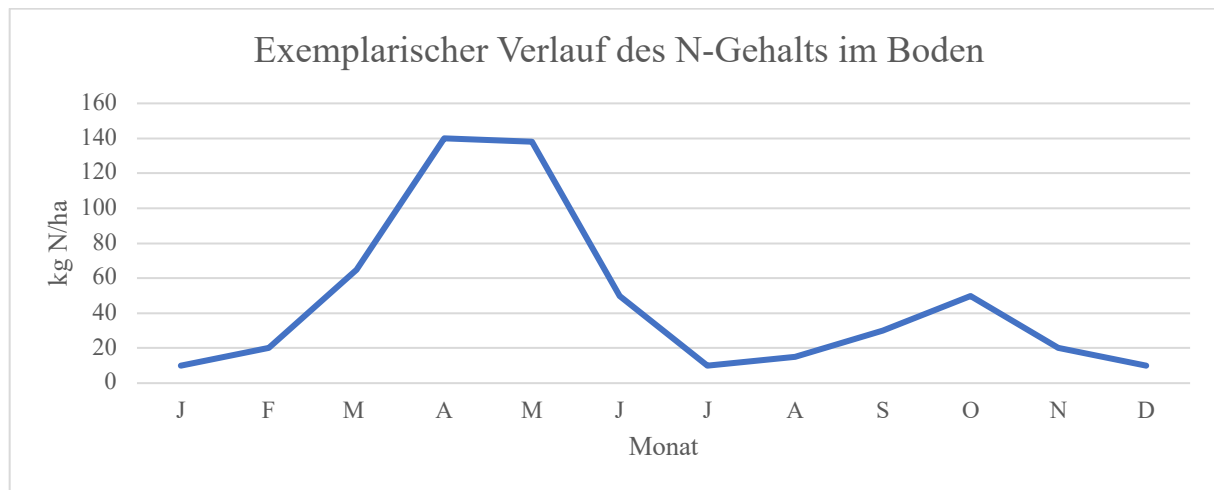


Abbildung 1: Exemplarischer Verlauf des Gehalts des mineralisierten Stickstoffs im Boden in 0-90 cm Tiefe im Verlauf des Jahres 1991 für den Standort Nienwohlde (eigene Darstellung der Daten nach Kersebaum (1995, S. 150))

Es zeigt sich, dass Boden und Pflanze als System betrachtet werden können, in dem eine N-Dynamik zu erkennen ist. Die Freisetzung von Stickstoff über Mineralisation fällt zeitlich zusammen mit der Vegetationsperiode der meisten Kulturpflanzen. Empirische Daten zeigen, dass der Großteil der jährlichen N-Mineralisation während der Wachstumsperiode freigesetzt wird (Beisecker et al. 2015). Insbesondere moderne und leistungsfähige Sorten und Anbausysteme können (meistens) nicht ausreichend mit mineralischem Stickstoff über den Boden versorgt werden. Daher gilt es zu bestimmten Zeitpunkten eine zuvor bestimmte N-Menge zu düngen. Diese orientiert sich am Wachstumsstadium der Weizenpflanze, welches zur optimalen Terminierung der Düngungsgaben detailliert durch die sog. BBCH-Skala³ beschrieben ist und als Hilfsmittel zur Abschätzung von Wachstumsstadien dient (Christen 2009, S. 54). Eine schematische Darstellung der BBCH-Skala entlang des Wachstums einer Weizenpflanze ist im Anhang dargestellt. Die erste N-Düngung (N1) im Weizen erfolgt üblicherweise zum Zeitpunkt des Bestockens (BBCH 21-29, Schematischer Verlauf der Entwicklungsstadien in Anhang 1). Damit soll die Versorgung der sich zu diesem Zeitpunkt bildenden Seitentriebe, deren Ausgangspunkt der Bestockungsknoten im unteren Bereich des Haupttriebes ist, sichergestellt werden. Zu diesem Zeitpunkt wird durch die Bildung von Sekundärwurzeln die Grundlage für die Wasserversorgung der Weizenpflanze gelegt (Christen 2009, S. 51). Gleichzeitig kommt es während der Bestockungsphase zu einem Wechsel zwischen vegetativem und generativem Wachstum. Hier werden die Blütenanlagen der Haupt-

³ Die BBCH-Skala (**B**iologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, **B**undessortenamt und **C**hemische Industrie) beschreibt die Entwicklungsstadien von (Kultur-)Pflanzen. Diese sind im Getreide in 10 Makrostadien unterteilt, welche von der Keimung (0) bis zum Absterben (9) reichen. Für die N-Düngung maßgeblich sind das Stadium der Bestockung (2), das des Schossens (3) sowie das Ährenschnellen (4) bzw. Ährenschieben (5). Die Makrostadien werden darüber hinaus jeweils in Mikro-stadien unterteilt, an denen der Verlauf innerhalb des Makrostadiums definiert kann (bspw. Erscheinen des 3. Bestockungstriebes = BBCH 23) (Meier 2018).

und Seitentriebe gelegt und die Ausbildung der Ähre gestartet (S. 56). Der Bedarf an Nährstoffen steigt zum Zeitpunkt des Schossens (BBCH 30-39) an. Die vegetative Entwicklung der Pflanze schreitet durch die Streckung der Internodien voran. Zu Beginn dieser Phase wird üblicherweise die 2. N-Düngung (N2) appliziert. Das Produktionsziel (Qualitäts-, Back- oder Futterweizen) bestimmt den Zeitpunkt und die Höhe der abschließenden Düngemaßnahme (N3). Bei Qualitätsweizen ist nach gegenwärtigen Einheitsbedingungen des Getreidehandels ein höherer Proteingehalt im Weizenkorn anzustreben, der durch eine Düngung zum Stadium des Ährenschiebens erzielt werden kann (Schubert 2011, S. 72). Dabei ist der erwartete Kornertrag bei der Wahl der N-Menge zu berücksichtigen (Baumgärtel und Scharpf 2002, S. 18). Nach Christen (2009, S. 133f) „besteht eine negative Beziehung zwischen der Höhe des Kornertrags und der Proteinkonzentration im Weizenkorn. Dieser allgemein als ‚Verdünnungseffekt‘ bezeichnete Sachverhalt kann zwar durch eine hohe N-Spättdüngung vermindert, jedoch nicht generell aufgehoben werden.“ Karatay und Meyer-Aurich (2020) greifen diesen Gedanken auf mit dem Ziel durch teilflächenspezifische Düngung den von Christen beschriebenen Verdünnungseffekt zu kompensieren. Eine Ertragsabschätzung zum Zeitpunkt von N3 ist teilweise möglich. Die Witterung während der Kornfüllung ist entscheidend hinsichtlich des tatsächlichen Ertrags und der Aufnahme des gedüngten Stickstoffs. Dies kann unter Umständen zu einer ineffizienten N-Düngung führen, wenn bspw. trockene Bedingungen oder andere Schadereignisse eine Aufnahme der gedüngten Nährstoffe verhindert (Sieling et al. 2011). Ineffizient gedüngter Stickstoff kann einerseits den N-Pool des Bodens anreichern. Andererseits ist in Nitratform vorliegender Stickstoff von Auswaschung gefährdet. Neben Ammoniakemissionen und Denitrifikation ist dies die Hauptursache von N-Verlusten im Ackerbau (Schubert 2011). Daraus können negative Externalitäten durch einen höheren Nährstoffgehalt in Oberflächengewässern (kann u.U. das Wachstum von Algen begünstigen und in extremer Konzentration die Lebensbedingungen von Wasserorganismen negativ beeinflussen) oder ein Überschreiten des Grenzwerts für Nitrat im aus Grundwasser gewonnenen Trinkwasser entstehen. Letztere stehen im Fokus bei Wasserschutzkooperationen zwischen Versorgungsunternehmen und Landwirten (Techen 2018). Daher haben sich aus der gesellschaftlich-politischen Diskussion heraus Anforderungen an die Landnutzung ergeben, um durch eine höhere N-Effizienz eine Reduktion dieser Effekte zu erreichen. Zur Reduktion der N-Auswaschung gilt es daher, die Höhe der N-Düngung an den jeweiligen Versorgungszustand der Pflanze und dem erwartbaren Nachlieferungspotenzial des Bodens anzupassen. Letzteres schwankt teilweise erheblich, weshalb nachfolgend ein Überblick über die Einflussgrößen auf die N-Mineralisation gegeben wird.

2.2 Verfügbarkeit von Stickstoff aus dem Boden

Die Verfügbarkeit von Stickstoff aus dem Bodenvorrat wird von äußeren unkontrollierbaren Faktoren beeinflusst. Er liegt zu einem großen Teil organisch gebunden vor und wird abhängig vom zeitlichen Verlauf der Witterung (Niederschlag, Temperatur) zu Ammonium und Nitrat mineralisiert (Beisecker et al. 2015, S. 7). Darüber hinaus ist die Höhe des mineralisierten Stickstoffs durch den jeweiligen Standort und den vorhandenen Boden beeinflusst. Dies erschwert es dem Bewirtschafter, die Höhe der durch Mineralisation verfügbaren N-Menge aus dem Bodenvorrat abzuschätzen und in seinen Entscheidungsprozess bezüglich der Düngermenge zu integrieren. Auch durch technische Unterstützung lassen sich Witterungsverläufe und die Auswirkungen auf die N-Dynamik des Bodens nur kurzfristig abschätzen.

Organisch gebundener Stickstoff kann in eine stabile und eine labile Fraktion unterteilt werden. Der labile Teil findet sich vor allem in organischer Substanz (Erntereste, Zwischenfrüchte) und kann durch mikrobielle Abbauprozesse mineralisiert werden. Der mineralisierte Stickstoff aus dieser Quelle (N_{fast}) entspricht der Poolgröße aus schnell abbaubaren N-Fractionen. Der überwiegende Teil ist stabil in Humus⁴ (genauer Huminstoffen) gebunden und so vor Abbauprozessen weitgehend geschützt (Schubert 2011, S. 110 f). Abhängig von Bodenart und langjähriger Bewirtschaftung schwankt dieser N-Gesamtvorrat zwischen 2.000 und 16.000 kg N/ha, wobei der Großteil der Werte in deutschen Böden bei 3.500 – 9.000 kg N/ha liegt (Gebauer et al. 2019, S. 59). Ausschlaggebend für die Höhe ist der Humusgehalt des Bodens (Beisecker et al. 2015, S. 7). Nach Gebauer et al. liegt dieser überwiegend zwischen 2 – 4 % und ist positiv mit dem Tongehalt des Bodens korreliert. Durch N-Mineralisation kann ein kleiner Teil des N-Vorrats pflanzenverfügbar werden. Hierbei wird von 1 – 3 % des gesamten Bodenvorrats ausgegangen (Baumgärtel und Scharpf 2002). In absoluten Zahlen können diese Nachlieferungen demnach bei 35 – 300 kg N/ha⁵ liegen. Jener Teil wird als N_{slow} bezeichnet und entspricht der Poolgröße aus langsam abbaubaren N-Fractionen. Auf Grundlage von Inkubationsversuchen ermittelten Nordmayer und Richter (1985) eine N-Mineralisationsgleichung zur Quantifizierung der zu erwartenden N-Mineralisation. Dieser

⁴ Humus wird nach Amelung et al. (2018, S. 64ff) als „die Gesamtheit der toten organischen Substanz des Bodens“ beschrieben, die sich als Humuskörper vermischt im Mineralboden befindet. Zwar können Pflanzen lediglich mineralisch vorliegende Nährstoffe aufnehmen, jedoch können im Humus gespeicherte Nährstoffe durch biologische Prozesse pflanzenverfügbar gemacht werden. Darüber hinaus werden bspw. auf Sandböden vorliegende Grobporen durch Mittelporen ersetzt, wodurch Humus zu einer höheren Feldkapazität beiträgt (Schubert 2011, S. 153ff)

⁵ In der Düngeverordnung ist bei einem Humusgehalt von 4 % ein Abschlag von 20 kg N/ha bei der Düngebedarfsermittlung vorgesehen (Anhang 4, Tabelle 6 DüV, Bundesministerium für Justiz 2017).

Ansatz wird von Heumann et al. (Heumann et al. 2011b, 2011a) auch für die Abschätzung der N-Mineralisation in Feldversuchen herangezogen. Formel 2 enthält die anhand des N-Gesamtvorrats geschätzten N_{slow} -Poolgröße, die N_{fast} -Poolgröße aus dem N-Gehalt der Erntereste, sowie die äußeren Bedingungen in Form von Temperatur und Bodenfeuchte. Außerdem wurden Mineralisationskoeffizienten errechnet, die die Reaktivität der Mineralisation darstellt.

Formel 2: Berechnung der Stickstoffmineralisation anhand eines Zweikomponenten-Modells mit N_{fast} und N_{slow} (Beisecker et al. 2015; Nordmayer und Richter 1985)

$$\text{MIN}_N(t) = N_{\text{slow}} (1 - e^{-k_{\text{slow}}(T, \theta) \cdot t}) + N_{\text{fast}} (1 - e^{-k_{\text{fast}}(T, \theta) \cdot t})$$

mit k_{slow} , k_{fast} : Reaktionskoeffizienten der Mineralisation aus den jeweiligen N-Pools

T: Temperatur

θ : Bodenfeuchte

t: Tage

Während Temperatur T und Bodenfeuchte θ aktuelle Messdaten darstellen (zum Zeitpunkt der Berechnung), bilden die Reaktionskoeffizienten kontinuierlich gemessene Daten ab. Durch diese Datenerfassung wird der funktionale Zusammenhang zwischen der Mineralisation und den unabhängigen Variablen dargestellt. N_{fast} und N_{slow} sind langfristig durch Temperatur und Bodenfeuchte beeinflusst und unterliegen bewirtschaftungsbedingten Veränderungen. Aus diesem Grund wird in dem dargestellten Modell mit Faustzahlen für N_{fast} und N_{slow} gerechnet. Der Zusammenhang zwischen äußeren witterungsbedingten Einflussfaktoren wird in Abbildung 1 nach Kersebaum (1995) skizziert und veranschaulicht, dass warme und feuchte Witterung, die vor allem in den späteren Frühjahrsmonaten auftritt, die Verfügbarkeit von Stickstoff im Boden begünstigt. Somit wird sie von Faktoren bestimmt, die der Landwirt vorab nicht kennt und nicht oder nur begrenzt steuern kann. Für eine effiziente Düngung stehen dem Landwirt somit lediglich Erfahrungswerte über den voraussichtlichen Witterungsverlauf zur Verfügung. Darüber hinaus kann die Teilung der N-Düngung (N1, N2, N3 oder mehr) zu einer Anpassung der N-Versorgung abhängig vom Vegetationsverlauf beitragen. Es zeigt sich, dass die absolute mineralisierte N-Menge abhängig von der Bodenart bzw. vom Humus ist. Aus diesem Grund lohnt es sich, den Boden als Produktionsgrundlage näher zu betrachten.

2.3 Rolle des Bodens im Pflanzenbausystem

Der Boden als Standort für den Weizenanbau hat neben den äußeren Bedingungen wesentlichen Einfluss auf den Ertrag. Diepenbrock et al. (2016, S. 13) zählen den Boden „zu den wichtigsten Existenzgrundlagen der Menschheit.“ Die Autoren stellen fest, dass er räumlich gegliedert ist. „Besonders markant und für den Ackerbau maßgebend ist die Vielgestaltigkeit von Böden. Dies resultiert aus unterschiedlichen Gesteins- und Relief- sowie Klima- und Vegetationsverhältnissen.“ (S. 13f) Auch Hinck et al. (2016, S. 5ff) beschreiben die Bedeutung des Bodens für die ackerbauliche Nutzung. Sie sehen in der räumlichen Heterogenität des Bodens eine zentrale Herausforderung eines an Standortbedingungen angepassten Pflanzenbaus. Daran ausgerichtet ermitteln sie ein wichtiges Argument für die Nutzung von PF, um durch entsprechende Systeme die räumliche Heterogenität in den Produktionsprozess zu integrieren bzw. diese zu berücksichtigen. Wie in Kapitel 2.2 dargelegt, ist das Nachlieferungsvermögen von Stickstoff aus dem Bodenvorrat abhängig von der vorliegenden Bodenart. Die Verfügbarkeit von Stickstoff unterliegt somit bei wechselndem Boden ebenfalls räumlichen Schwankungen. Hink et al. (2016, S. 6ff) und Diepenbrock et al. (2016, S. 15ff) gehen u.a. auch auf den Korngrößenanteil als wesentliche Eigenschaft des Bodens für die Möglichkeiten der ackerbaulichen Nutzung und die Ursache für die schwankende Verfügbarkeit von Wasser ein. Die Korngröße (Ton und Lehm klein, Sand groß) und die sich daraus ergebende Porengröße des Bodens beeinflussen dessen Wasserhaltefähigkeit bzw. dessen osmotisches Potenzial⁶. Durch ackerbauliche Nutzung sind diese Faktoren begrenzt variabel, lediglich die Möglichkeit des Humusaufbaus kann den Feinerdeanteil des Bodens limitiert erhöhen. „Je kleiner der Porendurchmesser ist, umso höher ist die Saugspannung, mit der das Wasser in den Kapillaren gehalten wird.“ (Diepenbrock et al., 2016, S. 17) Die Saugspannung wird mit dem sog. pF-Wert⁷ gemessen. Demnach unterscheiden sich verschiedene Bodenarten auch hinsichtlich ihres pflanzenverfügbaren Bodenwassers, was als nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet wird. In Tonböden kann aufgrund des sehr kleinen Porendurchmessers und der daraus resultierend hohen Saugspannung sog. Totwasser vorliegen, das für die Pflanze nicht nutzbar ist. Wie Schubert (2011) beschreibt, spielt Wasser die zentrale Rolle für die Möglichkeit der Pflanze zur Nährstoffaneignung. Umso mehr Wasser im Boden gespeichert und verfügbar gehalten werden kann, desto länger kann die Pflanze Nährstoffe ohne

⁶ Das osmotische Potenzial ist ein Begriff der Pflanzenphysiologie, zur Beschreibung der Wasserverfügbarkeit eines Systems. Ionen im Boden tragen zur Bindung von Wassermolekülen und beeinflussen so dessen osmotisches Potenzial (Schubert 2011, S. 84).

⁷ „Der pF-Wert (log cm Wassersäule) ist das Maß für die Wasserbindung im Boden. Für einen spezifischen Boden steht somit jedem pF-Wert eine bestimmte Wassermenge gegenüber, die bei dieser Saugspannung gehalten werden kann.“ (Diepenbrock et al. 2016, S. 17)

weitere Wasserzufuhr aufnehmen. Für die mikrobielle N-Mineralisation ist die Bodenfeuchte ebenfalls entscheidend. Eine höhere Bodenfeuchte führt bei gleicher Temperatur *ceteris paribus* zu einer höheren N-Mineralisation. Schubert (2011, S. 79f) beschreibt weiterhin die Funktionen des Wassers und unterscheidet zwischen physikalischen Funktionen (bspw. als Transportmittel für Nährstoffe) sowie biochemischen Funktionen (bspw. als Reaktionspartner bei der Photosynthese). Bei geringer Bodenfeuchte kann die physikalische Funktion des Wassers als Transportmittel für Nährstoffe eingeschränkt sein. „Dies ist sowohl auf die geringe Diffusivität⁸ von Nährstoffen in einem ausgetrockneten Boden als auch auf geringe Transpiration und damit reduzierten Massefluss⁹ von Nährstoffen zur Wurzel zurückzuführen.“ (Schubert 2011, S. 82) Insbesondere die Stickstoffdüngung ist laut Schubert daher an eine geringere Wasserverfügbarkeit anzupassen. Demnach kann ein durch unangepasste N-Düngung hervorgerufener hoher (Evo-) Transpirationskoeffizient¹⁰ zu einem reduzierten Ertrag führen. Als Ursache wird angeführt, dass der aufgebrauchte Wasservorrat durch erhöhte Transpiration zur Notreife (die Pflanze reift aufgrund von Trockenstress schneller ab) während der vegetativen Phase führen kann. Ein Übergang zur generativen Phase und somit die Ausbildung der Körner würde damit erschwert oder in extremen Fällen verhindert. Die Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs kann in diesem Fall nur durch Bewässerung sichergestellt werden. Ist diese nicht möglich, kann es zu Auswaschungen von Nitrat-Stickstoff kommen.

Da Pflanzen nicht nur in der Ackerkrume wurzeln, ist es aus ackerbaulicher Sicht notwendig, auch die tieferen Bodenhorizonte des jeweiligen Standorts zu kennen. „Dies betrifft die Durchwurzelbarkeit des Bodenraums ebenso wie die Wasserableitung in tiefere Bodenschichten sowie den kapillaren Wasseraufstieg von dort.“ (Diepenbrock et al. 2016, S. 17) Das bedeutet, dass neben den oberflächlich sichtbaren Eigenschaften eines Bodens vor allem auch tiefere Bodenschichten das Wasserhaltevermögen und das Ertragspotenzial des Bodens beeinflussen. Die dort vorliegenden Bodenarten und Bodentypen beschreiben, wie gut die Pflanze den Boden durchwurzeln kann und wie groß der Vorratsraum für Wasser und

⁸ Die Diffusivität eines Stoffes, beschrieben durch den Diffusionskoeffizienten, beschreibt, wie gut ein Stoff durch Diffusion an die Wurzeloberfläche transportiert wird. Diffusion ist ein physikalischer Prozess, bei der die Bodenlösung einen Konzentrationsausgleich durch Bewegung von Ionen anstrebt (Schubert 2011, S. 46f).

⁹ „Der Massefluss errechnet sich aus dem Produkt der zur Wurzel transportierten Wassermenge und der in diesem Wasser vorliegenden Nährstoffkonzentration. Daraus ergibt sich, dass Nährstoffe, die in hoher Konzentration in der Bodenlösung vorliegen, mit hoher Rate zur Wurzeloberfläche transportiert werden.“ (Schubert 2011, S. 45)

¹⁰ „Der Evotranspirationskoeffizient der Pflanze gibt den Wasserbedarf in Liter Wasser je Kilogramm erzeugter Trockenmasse an und setzt sich aus der Evaporation und der Transpiration zusammen. Die Evaporation beschreibt die unproduktive Verdunstung von Oberflächen (insbesondere Bodenoberflächen). Die Transpiration beschreibt die produktive Verdunstung über die Pflanze.“ (Hinck et al. 2016, S. 10)

Nährstoffe im Boden für die Pflanze ist. In Tabelle 1 ist aufgeführt, welchen Einfluss Bodenart und -typ z.B. auf die nFK und das Ertragspotenzial haben.

Tabelle 1: Bodeneigenschaften und Ertragspotenzial ausgewählter Bodentypen/ -arten bei mittlerer Lagerungsdichte (1,45 g/cm³) (Hinck et al. 2016, S. 15 nach Bodenurkundlicher Kartierung 2005)

Bodentyp	Bodenart	We (cm)	nFK We (l/m ²)	KAK We	Ertragspotenzial
Podsol	Sand	40	30	Sehr gering	Sehr gering
Braunerde	Sand	60	40	Sehr gering	Sehr gering
Braunerde	Sandiger Lehm	80	130	Hoch	Mittel bis hoch
Parabraunerde (Geschiebelehm)	Sandiger Lehm	100	160	Hoch	Hoch
Parabraunerde (aus Löß)	Toniger Schluff	120	310	Hoch	(sehr) hoch
Tschernosem (Schwarzerde)	Schluffiger Ton	110	140	Sehr hoch	Sehr hoch
Pararendzina	Schluffiger Ton	900	65	Hoch	Mittel

We = effektive Durchwurzelungstiefe

nFK We = nutzbare Feldkapazität in der effektiven Durchwurzelungstiefe

KAK We = Kationen-Austausch-Kapazität¹¹ in der effektiven Durchwurzelungstiefe

Es zeigt sich, dass sich das Ertragspotenzial der Böden erheblich unterscheidet. Daraus entsteht die Notwendigkeit einer standortbezogenen Betrachtungsweise durch den Bewirtschafter, um Bewirtschaftungsfehler, wie eine unangepasste N-Düngung (Schubert 2011, S. 82), zu vermeiden. Außerdem wird deutlich, dass eine flächendeckende Erfassung tiefliegender Bodenhorizonte, die einen großen Einfluss auf die Ertragsfähigkeit haben, schwierig ist. Das macht es notwendig, geeignete Kartierungsmethoden zu definieren, die dazu in der Lage sind, vorhandene Unterschiede des Bodens schlagspezifisch abzubilden.

2.4 Negative Auswirkungen der N-Düngung durch Auswaschung

Die Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser wird öffentlich kontrovers diskutiert. Daher sind inzwischen gesetzliche Restriktionen erlassen worden, die die N-Düngung im Ackerbau reglementieren (siehe DüV). Die Herausforderung für den Pflanzenbau besteht darin, eine fachgerechte N-Versorgung der Kulturpflanzen sicherzustellen und gleichzeitig die negativen Umweltwirkungen daraus zu reduzieren. Neben der Auswaschung von Nitrat sind außerdem Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) als negative Folgeerscheinung der N-Düngung zu nennen. Einerseits können Ammoniak- und Lachgasemissionen in direkten und indirekten

¹¹ Amelung et al. (2018, S. 174) beschreiben die KAK folgendermaßen: „Die gesamte Ladungsmenge an Kationen (positiv geladenes Ion, Anm. d. Verf.), die ein Boden in austauschbarer Form adsorbieren kann, entspricht der effektiven Kationenaustauschkapazität.“ Sie ist ausschlaggebend für die Wasserverfügbarkeit, das Bodengefüge sowie die biologische Aktivität des Bodens.

Zusammenhang mit der N-Düngung gebracht werden. Gleichzeitig entstehen durch die energieintensive Produktion von Mineraldüngern THG-Emissionen, die durch die politische Zielsetzung des Green Deal in der gesellschaftlichen Diskussion an Bedeutung gewinnen (Karatay et al. 2019a).

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, stellt die Auswaschung ins Grund- und Oberflächenwasser ein wesentliches Verlustrisiko für Stickstoff dar. Daraus entstehen unter ungünstigen Bedingungen Gefahren für die Trinkwasserqualität und Wasserqualität in Oberflächengewässern. Während letztere Lebensräume für Wasserorganismen gefährden können, wirken sich erhöhte Nitratgehalte im Trinkwasser auf die menschliche Gesundheit aus. Hiervon sind besonders Kleinkinder und Säuglinge betroffen, weshalb in diesen Fällen aufwendige Maßnahmen getroffen werden müssen, um den Nitratgehalt im Trinkwasser zu senken. Wasserversorger setzen in kritischen Regionen auf vorbeugende Maßnahmen wie die grundwasserschutzorientierte Beratung von Landwirten, die auf die Umsetzung zweckgebundener Bewirtschaftungsmaßnahmen abzielt. Dies sind neben einer ertragsangepassten N-Düngung (Bischoff et al. (2017) identifizieren einen hohen N-Verlust durch unrealistische Ertragserwartungen der Landwirte) vor allem der Anbau von Zwischenfrüchten und reduzierte Bodenbearbeitung. Techen (2018, S. 151) quantifiziert die Wirkung der Beratung auf die Verbesserung der N-Bilanzen auf 5 kg N/ha pro Jahr bei intensiver Grundwasserschutzberatung. Grundsätzlich gilt, dass Stickstoff nur dann ausgewaschen werden kann, wenn dieser in mineralisierter pflanzenverfügbaren Form als Nitrat vorliegt (Schwarz und Bischoff 2009). Die wichtigsten Quellen von Nitrat sind die Mineralisation aus dem Bodenpool und die N-Düngung. Beisecker et al. (2015) stellen fest, dass insbesondere während der Vegetationsphase günstige Bedingungen für eine Mineralisation von Stickstoff gegeben ist. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse der Autoren auch, dass während der Nacherntephase ebenfalls wesentliche N-Mengen freigesetzt werden. Dies ergibt auch aus Formel 2, die die Mineralisation von Stickstoff in Zusammenhang mit den äußeren Witterungsbedingungen bringt. Abbildung 1 zeigt dies auch exemplarisch für einen Standort. Ergänzt durch die mineralische und organische N-Düngung steht bei günstigen Bedingungen somit eine bestimmte Menge Stickstoff zur Verfügung, die pflanzenverfügbar ist. Wird dieser Stickstoff nicht aufgenommen, unterliegt er der potenziellen Gefahr der Auswaschung. Abhängig vom vorliegenden Boden und der zuvor angebauten Kultur liegt die mittlere jährliche Auswaschung bei ca. 32 kg N/ha (Schwarz und Bischoff 2009). Dies gilt aufgrund ihrer guten Filtrationseigenschaften insbesondere für Sandböden. Gleichzeitig bedingen N-reiche Ernterückstände (Heumann et al. 2011a) eine höhere N-Mineralisation. Maßnahmen zur

Reduktion der Auswaschung sind somit von zentraler Bedeutung für den Grundwasserschutz. Schwarz und Bischoff nennen hier bspw. den Anbau von Zwischenfrüchten, um überschüssigen Stickstoff nach der Ernte zu binden, oder reduzierte Bodenbearbeitung mit dem Ziel, weniger Stickstoff aus dem N-Pool des Bodens zu mineralisieren. Ineffiziente N-Düngung führt dazu, dass sich langfristig ein größerer N-Pool aufbaut, welcher höhere N-Mineralisationen erwarten lässt. Kurzfristig unterliegt eine größere N-Menge der Gefahr der Auswaschung. Die Autoren plädieren deshalb dafür, neben der Umsetzung von Maßnahmen überschüssigen Stickstoff im Boden-Pflanzen-System zu halten auch für eine Anpassung der N-Düngung während der Vegetationsphase. Die Zielsetzung ist es demnach, eine maximale Höhe von 40 kg N/ha für den Herbst- N_{\min} -Wert zu erreichen. Dadurch könnten die N-Überschüsse in kritischen Gebieten (bspw. unter Sandböden oder bei hohen N-Gehalten im Boden) weiter reduziert und der Grenzwert von 50 mg Nitrat/l Grundwasser langfristig eingehalten werden.

2.5 Produktionsfunktionen und Unsicherheit

Die Ertragswirkung von Stickstoff im Weizenanbau kann man mathematisch durch N-Produktionsfunktionen bzw. Ertragsfunktionen darstellen. Nach Wagner (1995, S. 306) bilden sie die Basis „zu Überlegungen bezüglich der speziellen Intensität der Landbewirtschaftung und zur Ableitung des ökonomischen Optimums.“ *Liebigs Gesetz des Minimums*¹², welches mit einer linear-limitationalen Plateau-Funktion dargestellt werden kann, wurde zum neoklassischen Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachses weiterentwickelt. Zwar werden auch weiterhin Plateau-Funktionen hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen N-Düngung und Weizenertrag untersucht (Henke et al. 2007), in dieser Arbeit soll der Fokus jedoch ausschließlich auf neoklassischen Ertragsfunktionen liegen. Diese werden anhand empirischer Daten ex-post geschätzt (Heyn 2010; Meyer-Aurich und Karatay 2019). Durch die Berücksichtigung langfristiger Daten sollen Handlungsempfehlungen für eine physiologisch und ökonomisch optimale N-Düngung abgeleitet werden. Neben der Wirkung der N-Düngung auf den Ertrag kann auch der Zusammenhang zwischen der N-Düngung und dem Proteingehalt des Weizens mit Hilfe einer mathematischen Funktion, einer Proteinfunktion, abgebildet werden. Der Proteingehalt des Weizens ist entscheidend für den Auszahlungspreis, den der Landwirt erhält. Neben weiteren Eigenschaften ist er das zentrale Qualitätskriterium. Über eine gezielte N-Düngung zum Zeitpunkt der Blüte kann der Landwirt den Proteingehalt des Weizens beeinflussen, jedoch besteht auch ein Zusammenhang mit der gesamten N-Düngung über den

¹² Minimumgesetz

Ertrag. Wie Christen (2009, S. 133) und auch Sieling et al. (2011) erklären, kann es durch einen höheren Weizenertrag zu einem Verdünnungseffekt kommen, dem der Landwirt durch eine höhere N-Düngung entgegenzutreten kann. Karatay und Meyer-Aurich (2020) nehmen für den Zusammenhang zwischen N-Düngung und Proteingehalt einen linearen Verlauf an. Sie vernachlässigen jedoch den Zusammenhang zwischen Ertrag und Proteingehalt, der nach Sieling et al. und Christen besteht. Demnach müsste der Kornertrag als weitere Variable in der Proteinfunktion berücksichtigt werden. Da Christen (2009, S. 134) zudem anmerkt, dass der Verdünnungseffekt durch eine höhere N-Düngung nicht gänzlich aufgehoben werden kann, würde auch eine logarithmische Proteinfunktion nach Vorbild einer Cobb-Douglas-Funktion für den Proteingehalt in Betracht kommen. Hierauf wird im empirischen Teil eingegangen. Sowohl Ertrags- als auch Proteinfunktionen erklären den Zusammenhang zwischen N-Düngung und Ertrag bzw. Proteingehalt jedoch nur auf dem betrachteten Standort im jeweiligen Jahr, weshalb sie nicht den Anspruch der Allgemeingültigkeit haben können.

Unter Berücksichtigung aktueller Marktpreise für N-Dünger und Weizen (abhängig von dessen Qualität) kann mithilfe der Ertragsfunktion die optimale spezielle Intensität der N-Düngung ermittelt werden. Sie stellt den ökonomisch optimalen Einsatz von N-Dünger dar und ist nicht mit dem physiologischen Ertragsmaximum gleichzusetzen, wobei die ökonomisch optimale N-Düngung (optimale spezielle Intensität) immer höchstens gleich der ertragsmaximalen N-Düngung sein kann. Beisecker et al. (2015) errechnen nach den Daten von Heyn (2010) eine Differenz von 27-28 kg N/ha zwischen physiologischem und ökonomischem Optimum. Die Autoren geben an, dass Landwirte sich an der ertragsmaximalen N-Düngung orientieren und aufgrund dessen ineffiziente Düngermengen appliziert würden. Eine teilweise noch höhere Diskrepanz zwischen Ertrags- und Gewinnoptimum geht aus der Arbeit von Meyer-Aurich und Karatay (2019) hervor. Die Ertragsfunktionen auf Basis empirischer Daten ergaben bei durchschnittlichen Preisen für Weizen und N-Dünger standortabhängig eine Differenz von 16-115 kg N/ha. Es zeigt sich also eine große Diskrepanz zwischen den ermittelten Differenzen, die auf die Standorte und die beobachteten Jahre zurückgeführt werden könnten.

Der Landwirt kann sich an langfristigen Handlungsempfehlungen orientieren. Die Entscheidung über die Höhe der N-Düngung trifft er jedoch ex-ante, also bevor das Ertragsniveau und der tatsächliche Zusammenhang zwischen N-Düngung und Ertrag bzw. Proteingehalt sicher abgeschätzt werden kann. Dies führt nach Sieling et al. (2011) zu einer ineffizienten oder zufällig effizienten N-Düngung, denn wie die Autoren feststellen, variiert die Höhe der optimalen N-Düngung sowohl in Höhe als auch Verteilung von Jahr zu Jahr teilweise erheblich. Damit widersprechen die Autoren indirekt Beisecker et al. (2015), die die

Hintergründe der beobachteten Ineffizienz in der fehlerhaften Zielgröße des Landwirts vermuten. Jedoch gibt es auch hierfür gute Argumente. Das Kernproblem ist demnach nach Wagner (1995), dass der Landwirt in „guten Jahren“ bei einer zu geringen Düngermenge das Ertragspotenzial nicht ausnutzen würde. Der optimal mögliche Deckungsbeitrag würde hier nicht erreicht und dem Landwirt entgingen Einkommenschancen. Im umgekehrten Fall eines „schlechten Jahres“ ist der Einkommensverlust durch eine unangepasste N-Düngung jedoch nach Wagner geringer als der mögliche Gewinn bei hohem Ertragspotenzial. Monjardino et al. (2015) begründen dies mit der Risikoaversion des Landwirts: *„Farmers typically respond to this situation by making risk-averse decisions that are neither yield- nor profit-maximising.“* Dies bedeutet, dass Landwirte aufgrund der Unsicherheit über Preise und Umweltzustände systematisch ineffiziente Entscheidungen über die Düngung treffen. Sie haben aufgrund relativ flacher N-Produktionsfunktionen und unsicheren Umweltzuständen einen geringen Anreiz nach ökonomischer Optimierung zu streben (Pannell 2006, 2017). Dies würde jedoch im Umkehrschluss auch bedeuten, dass eine Unterdüngung auch nur einen geringen Effekt auf den Ertrag hätte. Aufgrund der Kurvenkrümmung wiegen jedoch Verluste stärker als mögliche Ertragssteigerungen. Kuhlmann und Neumann (2011) beschreiben die höhere Düngung als eine Art „Versicherung“ mit der der Landwirt sich gegen entgangenes Einkommen absichert. Die Kosten dieser Absicherung können mit den Opportunitätskosten des entgangenen Gewinns bei günstigen Ertragsbedingungen bewertet werden (Meyer-Aurich und Karatay 2019, S. 137). Trotz flacher Ertragskurven nach Pannell begünstigt Unsicherheit somit eine höhere N-Düngung. Nach Henke et al. (2007) führt dieses Verhalten jedoch zu höheren N-Bilanzen und N-Überschüssen sowie zu Erträgen mit ökonomisch ineffizientem Faktoreinsatz. Ex-ante ist eine höhere N-Düngung als sie ex-post betrachtet optimal gewesen wäre auf Unsicherheit zurückzuführen (Heyn 2010, Henke et al. 2007, Meyer-Aurich und Karatay 2019). Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben, bedingt eine ineffiziente N-Düngung häufig negative externe Effekte der Landnutzung durch bspw. N-Auswaschung aufgrund höherer N-Bilanzen. Insbesondere in Wasserschutzgebieten stellt dies langfristig ein wesentliches Problem für die Trinkwasserqualität dar. Es ist demnach für die ökonomische und ökologische Optimierung wichtig, die erwartete Ausprägung unsicherer Umweltfaktoren, wie den Witterungsverlauf und wechselnde Bodenverhältnisse, in die Entscheidung mit einzubeziehen und so die Informationslücke der Düngeentscheidung zu verkleinern.

Wie in den Kapiteln 2.2 und 2.3 erklärt, unterliegen die Eigenschaften des Bodens und der Mineralisationsraten räumlicher Variabilität. Darüber hinaus schwanken die Witterung und damit u.a. auch die N-Mineralisation zeitlich. Dies führt, ergänzt durch Schwankungen des

Weizen- und Düngerpreises, zur unsicheren Entscheidungssituation, der der Landwirt bei seiner Entscheidung über die ökonomisch optimale Düngermenge ex-ante unterliegt. Daher ist es notwendig, die Ausprägungen der Umweltfaktoren und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten zumindest vereinfacht durch Erinnerungswerte zu berücksichtigen. Zur Berücksichtigung der räumlichen Variabilität können Verfahren des Precision Farming herangezogen werden (Karatay und Meyer-Aurich 2020). Diesem Ansatz muss insbesondere bei zunehmend variierender N-Bereitstellung aus dem N-Pool des Bodens eine zentrale Bedeutung bei der Reduktion von negativen Externalitäten durch eine Steigerung der N-Effizienz zukommen (Karatay und Meyer-Aurich 2019). Demnach würden dem Zusammenhang von N-Düngung und physiologischem Ertrag abhängig von den Bodeneigenschaften unterschiedliche Produktionsfunktionen zugrunde liegen (Wagner 1999, Kuhlmann und Neumann 2011, (Karatay und Meyer-Aurich 2020). Hieraus ergeben sich für die ökonomische Optimierung unterschiedlich hohe N-Mengen verteilt über den Gesamtschlag. Die Erfassung dieser unterschiedlichen Teilflächen soll PF gewährleisten. Aus diesem Grund lohnt es sich, einen Überblick über mögliche Methoden der Datenerfassung und Anwendungen aus dem Bereich der PF zu gewinnen. Dabei wird klar, dass dem Landwirt als Entscheider auch hier eine wichtige Rolle bei der wirtschaftlichen Nutzung der entsprechenden Systeme zukommt.

3. Teilflächenspezifische Bewirtschaftung

3.1 Definition

Vor dem Hintergrund nachhaltiger Ressourcennutzung und umweltschonender Bewirtschaftung der Flächen werden zunehmend Technologien und Anbausysteme benötigt, die diesen Herausforderungen gerecht werden (Steinberger et al. 2008). Die Reduktion von Stickstoffverlusten aus Pflanzenbausystemen und eine Effizienzsteigerung der N-Düngung sind hierfür essenziell. Darüber hinaus können diese Verfahren der nötigen Berücksichtigung räumlicher Variabilität zur Entscheidungsoptimierung beitragen. Dies erfordert eine Anpassung der pflanzenbaulichen Maßnahmen an die beschriebenen Herausforderungen sowohl hinsichtlich konstanter Standortbedingungen als auch dem Pflanzenbedarf. Diese sind durch Bodenunterschiede, topografische Eigenschaften sowie die Bewirtschaftung und Versorgung mit Nährstoffen beschrieben. Wie vorab festgestellt, definieren Diepenbrock et al. (2016) die ackerbauliche Bodennutzung als „stets ortsgebunden“ und abhängig von „den jeweiligen natürlichen Standortverhältnissen.“ Sind nun auf einem Feld wechselnde Standortverhältnisse zu finden, erfordert dies unter Berücksichtigung der Definition des Ackerbaus nach

Diepenbrock et al. auch eine Anpassung der jeweiligen Bewirtschaftungsmaßnahmen, um die wechselnden Standortbedingungen zu berücksichtigen. Ackerbausysteme, in denen die Bewirtschaftung an die wechselnden Standortbedingungen angepasst werden, können unter dem Begriff *Teilflächenspezifische Bewirtschaftung* bzw. *Precision Farming* (PF) zusammengefasst werden. Hinck et al. (2016) definieren PF als „die ortsgenaue Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen. Ziel ist es u.a. die Unterschiede des Bodens und der Ertragsfähigkeit innerhalb eines Schlags zu berücksichtigen. Das heißt, der Schlag wird nicht mehr als eine Fläche mit gleichen Eigenschaften betrachtet, sondern in kleinräumige Flächen unterteilt.“ Lorenz und Münchhoff (2015, S. 24) beschreiben Teilflächen als „anhand wesentlicher Standorteigenschaften voneinander“ abgegrenzten Bereiche eines Schlags. Diese sollten unterschiedliche Ertragsbedingungen so gut wie möglich erfassen und somit im Umkehrschluss in sich möglichst homogen sein. Oetzel (2008) beschreibt die Problematik der wachsenden Komplexität von Entscheidungsprozessen, die mit Einführung von PF einhergeht. Die Berücksichtigung von Standortheterogenität eignet sich hierfür als Begründung, da neben einer Differenzierung zwischen verschiedenen Schlägen auch eine Differenzierung innerhalb eines Schlages nötig wird. Gleichzeitig soll die Entscheidungsqualität des Landwirts durch PF verbessert werden. Die Grundlage hierfür bilden Daten aus verschiedenen Quellen (Michels et al. 2020, S. 80).

Eine mögliche Vorgehensweise zum Aufbau von PF, die sich vor allem auf die Gewinnung der nötigen Daten und deren Verarbeitung bzw. Nutzung bezieht, beschreibt Ostheim (2000, S. 10f), indem er drei notwendige Bereiche nennt:

- a) Bestimmung von Ertragspotenzialen auf der Ebene von Teilschlägen und damit Erfassung von vorhandener räumlicher Heterogenität
- b) Betriebliche Implementierung von Komponenten zur Datengewinnung und Umsetzung einer teilflächenspezifischen Bewirtschaftung
- c) Untersuchung ökonomischer und ökologischer Vorzüglichkeit von PF im Vergleich zu einer homogenen Bewirtschaftung

Während c) auf die Bewertung des Verfahrens abzielt, legen a) und b) den Fokus auf die Datenerhebung und -nutzung.

3.2 Voraussetzungen zur Umsetzung von Precision Farming

Wie aus der Begriffsdefinition von PF in Kapitel 3.1 hervorgeht, beschreibt Oetzel (2008, S. 380) die Komplexität von Entscheidungsprozessen zu PF. Diese seien, ohne ein konkretes Managementsystem, nur unzureichend abzubilden. Das legt die Vermutung nahe, dass die beschriebene steigende Komplexität der Entscheidungsprozesse ein Grund dafür sei, „dass der Begriff der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung zwar seit mehr als zehn Jahren [im Jahr 2008, Anm. d. Verf.] bekannt ist, die Verbreitung in der Praxis aber immer noch vergleichsweise gering ist.“ Verschiedene Studien gehen von einer zunehmenden Digitalisierung in der Landwirtschaft und stärkeren Verbreitung von PF-Technologie aus. Jedoch bezieht sich diese Annahme nach Auswertung verschiedener Umfragen und Marktdaten vor allem auf die Datenverarbeitung und GPS-Systeme (Bitkom e.V. 2016; Bovensiepen et al. 2016; Aulbur et al. 2019). PF scheint somit auch 15 Jahre nach der Feststellung von Oetzel weiterhin unterrepräsentiert zu sein (Paustian und Theuvsen 2016, 2017; Schimmelpfennig und Loewenberg-DeBoer 2021). Pößneck (2011) geht von ca. 5 % der Ackerfläche aus, die unterstützt mit einem N-Sensor der Firma *Yara* gedüngt wird. Unter Berücksichtigung von Mitbewerbern und weiteren Systemen kann nach Kühl et al. (2021) aktuell (2020/21) von insgesamt gut 10 % der deutschen Ackerfläche ausgegangen werden, auf der mit technisch optimierten PF-Systemen Stickstoff gedüngt wird. Darunter verstehen die Autoren den Einsatz von verschiedenen Sensorsystemen, die Verwendung von Satellitenaufnahmen oder Hofbodenkarten zur Optimierung der räumlich verteilten N-Düngung. Vereinfachte Systeme und eine manuelle Anpassung sind darin nicht enthalten. An der Einschätzung von Oetzel (2008), dass es gewisse Hindernisse bei der Implementierung von PF gibt, scheint sich nichts geändert zu haben. Gleichwohl sind nach den Erkenntnissen der Bitkom (2016), von Bovensiepen et al. (2016) sowie Aulbur et al. (2019) inzwischen die technischen Voraussetzungen für die verbreitete Nutzung von PF als Bewirtschaftungssystem auf den Betrieben gegeben. So werden zunehmend digitale Ackerschlagkarteien eingesetzt und bei Neuanschaffungen digitale Bedienterminals gewählt. Eine Vorrüstung eines GNSS-Systems gehört auf den meisten neuen Traktoren zur Standardausrüstung.

3.2.1 Datenverarbeitung und Datenaustausch

Wie Baghdadi et al. (2018) feststellen, ist Landwirtschaft ein Sektor, der sich mit der Verarbeitung räumlicher Daten beschäftigt. Unter anderem werden Verfahrensvergleiche oder Wirtschaftlichkeitsberechnungen auf eine räumliche Einheit (meistens Hektar)

heruntergebrochen. Die Berücksichtigung und Darstellung räumlich variabler Produktionsgrundlagen erfordern daher umso mehr geeignete Systeme zur räumlichen Datenverarbeitung. Hierzu eignen sich Geoinformationssysteme (GIS). Das klassische Anwendungsgebiet in der landwirtschaftlichen Praxis, das vielen Landwirten bekannt ist, ist die digitale Antragstellung für die jährlichen Betriebs- und Agrarumweltprämien. Inzwischen sind außerdem auch viele digitale Ackerschlagkarteien mit einem einfachen GIS ergänzt, das eine Darstellung und Bearbeitung der Schlaggrenzen ermöglicht. Grundsätzlich funktionieren alle GIS nach demselben Prinzip der Überlagerung und Georeferenzierung von Informationen. Die Darstellung erfolgt durch den Layer-Charakter der Information, die so „schichtweise“ übereinandergelegt wird. Punktuelle Geoinformationen können so flächig vorliegenden Informationen zugeordnet werden. Hierzu werden verschiedene Rechenoperationen, wie z.B. spatial joins, (Jacox und Samet 2007) verwendet, die mit Hilfe des GIS durchgeführt werden können. Unterschieden werden die Informationen u.a. in Raster- und Vektordaten (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 16–17). Vektordaten beschreiben Objekte im Raum und sind entweder als Punkte (bspw. Ertragsdaten), Linien (bspw. Fahrspuren) oder Flächen bzw. Polygone (bspw. Schläge) dargestellt (DeLange 2020, S. 127). Sie haben gemeinsam, dass ihnen eine relationale Datenbank¹³ zugrunde liegt, in der die Daten über Attribute beschrieben werden. Sie liegen häufig entweder als Shape-Datei oder im XML-Format vor (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 17). So ist z.B. einem Ertragsmesspunkt ein Datensatz zugeordnet, in dem verschiedene Informationen als Attribute abgespeichert sind. Neben dem gemessenen Ertrag kann der jeweilige Standort (über zugeordnete Koordinaten), der Zeitpunkt der Messung, die Maschinenleistung, die Kornfeuchte und viele weitere Parameter einem Datensatz und somit einem Geopunkt zugeordnet werden. Geodaten ohne relationalen Charakter werden als Rasterdaten bezeichnet und liegen als Bilddatei u.a. im georeferenzierten jpg-Format oder als geotiff-Datei vor. Unter einem Raster versteht man in diesem Fall die Darstellung der Datei durch ein gleichmäßiges (Pixel-) Gitter. Den Pixeln bzw. Quadraten des Gitters sind eindeutige Informationen über bspw. den NDVI oder den gemessenen Farbkanal zugeordnet (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 16). Durch verschiedene Verarbeitungsmöglichkeiten können Vektor- und Rasterdaten modifiziert und für die praktische Nutzung im PF vorbereitet werden. Somit sind GIS ein Werkzeug für die Erfassung, Verarbeitung und Nutzung räumlicher Daten in der Landwirtschaft. Dieses Werkzeug kann von der einfachen Darstellung in systemintegrierten

¹³ In einer relationalen Datenbank sind die hinterlegten Informationen in tabellarischer Form hinterlegt und können durch Bezug auf die jeweiligen Attribute (Spalten) der Tabelle mit anderen Tabellen kombiniert oder verrechnet werden. So kann ein Datensatz (Zeile) in Abhängigkeit eines sog. Schlüssel(-attributs) neu angelegt, verarbeitet oder ergänzt werden (Saake et al. 2013, S. 27ff).

GIS aus Ackerschlagkarteien bis zu komplexen Verarbeitungsmöglichkeiten über umfassende Programme wie bspw. *QGIS* oder *Esri ArcGIS* (Baghdadi et al. 2018) reichen.

Um den resultierenden Datenaustausch zu gewährleisten, sind neben einem einheitlichen Datenformat (agroXML, isoXML, Shape, geotiff) auch die Verfügbarkeit von geeigneter Netzwerktechnologie, -infrastruktur und -konnektivität von Bedeutung (Martini et al. 2008). Der Landwirt fungiert bei PF, oder in der „informationsgeleiteten Landwirtschaft“, wie Martini et al. (2008) sie beschreiben, als Schaltzentrale bei der Vernetzung der unterschiedlichen Akteure in der Wertschöpfungskette. Vor diesem Hintergrund müssen durch alle beteiligten Akteure Lösungen gefunden werden, die eine automatisierte Informationsgewinnung und -verarbeitung für den Pflanzenbau ermöglichen (Oetzel 2008). Der Prozess der Informationsgewinnung über kleinräumige Bodenunterschiede und die Pflanzenversorgung sollte möglichst standardisiert in einem System abgebildet werden, das wiederum die Weiterverarbeitung und Nutzung in der Durchführung ackerbaulicher Bewirtschaftungsmaßnahmen ermöglicht. Oetzel (2008, S. 381) spricht daher der „Standardisierung und Durchgängigkeit der zu konzipierenden Austauschformate und -mechanismen“ eine „zentrale Bedeutung“ zu. Weiter schreibt er: „Der Nutzen solcher [standardisierter, Anm. d. Verf.] Softwaresysteme für den Landwirt als Entscheidungsgrundlage für die ökonomische und pflanzenbauliche Optimierung seines Betriebes ist heute weitestgehend akzeptiert. (...) Bedingt durch dezentrale Datenhaltungsstrukturen und heterogene Softwaresysteme auf den landwirtschaftlichen Betrieben zieht die Forderung nach betriebsübergreifender Vernetzung von Informationen gleichzeitig die Notwendigkeit standardisierter Datenaustauschszszenarien, sowie standardisierter Datenformate nach sich.“ (S. 381) Betrachtet man die notwendige Technisierung ackerbaulicher Maßnahmen konnte durch die ISOBUS-Norm (ISO11783)¹⁴ ein internationaler Standard gesetzt und mit Beteiligung verschiedener Hersteller von landtechnischen Maschinen die breite Akzeptanz dieser Technologie zur standardisierten Kommunikation gesichert werden. Die ISOBUS-Schnittstelle spielt dabei lediglich für landwirtschaftliche Arbeiten eine Rolle, da sie für den Datenaustausch von Maschinen gedacht ist (Steinberger et al. 2008). In Verbindung mit einer geografischen Positionsbestimmung (GNSS¹⁵) sind die Vorteile einer standardisierten Kommunikation von Maschinen für die

¹⁴ Name eines Datenbusses für landwirtschaftliche Anwendungen

¹⁵ GNSS = Globale Navigationssatellitensysteme sollen eine weltweite Positionsbestimmung über die Kommunikation des Empfängers mit mehreren Satelliten gewährleisten. Die wichtigsten Vertreter von GNSS weltweit sind GPS (USA) GLONASS (Russland) und Galileo (Europa) (Dodel und Häupler 2010).

Umsetzung von PF essenziell, da sie der Komplexität von Entscheidungsprozessen durch PF nach Oetzel gerecht wird und die Applikation von Betriebsmitteln im Sinne von PF erleichtert.

3.2.2 Technische und persönliche Voraussetzungen

Die Erfassung und Nutzung raum-zeit-bezogener Daten (Ostheim 2000) wird durch die Positionsbestimmung bspw. über die ISOBUS-Schnittstelle gewährleistet und mit Information über bspw. die Ausbringmenge verbunden. So werden relevante Informationen auf Betriebsebene in verschiedenen Arbeitsgängen sowohl erfasst (Ertragskartierung, Biomasseerfassung über Sensor) als auch genutzt (teilflächenspezifische Aussaat, Düngung etc.). Trotz aller technischen Voraussetzungen steht der Landwirt als Entscheider im Zentrum des Systems. Er entscheidet über die technische Ausprägung eines PF-Systems auf seinem Betrieb und beeinflusst die Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Technik und Verfahren. Gleichzeitig erfordert die zunehmende Menge der vorhandenen Daten auch eine digitale Verarbeitung durch (integrierte) GIS und anderer Systemlösungen. Wie Lorenz und Münchhoff (2015) beschreiben, ist die Entwicklung eines PF-Systems für den jeweiligen Betrieb ein Prozess, der immer mit der Erfahrung des Bewirtschafters und (häufig kostenloser) Information über die eigenen Flächen beginnt.

Zusammenfassend sind nachfolgend die erarbeiteten Voraussetzungen aufgeführt, die eine Umsetzung von PF in landwirtschaftlichen Betrieben bedingen:

- Bereitschaft des Bewirtschafters zur Umsetzung (Lorenz und Münchhoff 2015)
- Verfügbarkeit von Managementsystemen zur erleichterten Datenverarbeitung und Dokumentation der Maßnahmen
- Grundkenntnisse über diese Systeme sowie die Möglichkeit und Bereitschaft sich weiterzubilden
- Software und Technik bzw. Aktoren (für die jeweilige Bewirtschaftungsmaßnahme), die eine Erfassung von Informationen und die Variation der Ausbringmenge auf Basis georeferenzierter Daten ermöglicht (Lorenz und Münchhoff 2015)
- Möglichkeiten zur erweiterten Informationsgewinnung (Satellitendaten, Bodenkarten etc.)

Nach den Studien der Bitkom (2016), von Bovensiepen et al. (2016) und Aulbur et al. (2019) sind diese Voraussetzungen auf vielen Betrieben bereits erfüllt. Dies beantwortet jedoch nicht die Frage nach einem rentablen Einsatz dieser Systeme. Vielmehr scheinen hier erhebliche Unterschiede hinsichtlich der jeweiligen Betriebsgröße bzw. Einsatzfläche zu bestehen. Dies

lässt sich aus der Arbeit von Paustian und Theuvsen (2016; 2017) ableiten. Es stellt sich die Frage, ob Einsparungen bei Direktkosten und Erlössteigerungen höhere Arbeitserledigungskosten ausgleichen können. Gleichzeitig verlangen gesellschaftliche und politische Nachhaltigkeitsziele (im Sinne des Green Deal), zukünftig indirekte Leistungen und Kosten (Reichardt und Jürgens 2008), bspw. bei der Reduktion von negativen externen Effekten, zu quantifizieren und diese in der Bewertung zu berücksichtigen. Vor allem zur Erreichung von Zielen des Umwelt- und Klimaschutzes könnte PF somit eine zentrale Rolle zukommen (Kühl et al. 2021).

Neben den technischen und betrieblichen Voraussetzungen spielen erfasste Informationen über die vorliegende Standortheterogenität eine wichtige Rolle für die Umsetzung von PF. Die so erfassten Daten entscheiden häufig schon vorab, ob PF für den jeweiligen Betrieb von Relevanz sein kann (Lorenz und Münchhoff 2015).

3.3 Datengrundlage

In Kapitel 3.2 wurde herausgearbeitet, welche Bedeutung große Datenmengen und Information für PF haben. Die eigentliche Datengrundlage bildet der Standort bzw. Schlag, auf dem PF umgesetzt werden soll. Werhan et al. (2008, S. 65) beschreiben daher die „Analyse und Charakterisierung räumlicher Bodenheterogenität als Grundlage für eine standortangepasste umweltschonende Pflanzenproduktion.“ Die Autoren schreiben weiterhin: „Grundlegender Bestandteil der informationsgeleiteten Pflanzenproduktion ist die standortgerechte Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Teilflächen unter der Prämisse, das natürliche Potential unterschiedlicher Standorte umweltschonend, aber produktiv zu nutzen. Unter dem Begriff ‚Standort‘ wird hier aus Sicht der Pflanzenproduktion eine Fläche gleicher Wachstumsbedingungen verstanden. Voraussetzung dafür ist eine flächenhafte quantitative Charakterisierung von pflanzenbaulich relevanten Standorteigenschaften.“ (S. 68) Nach Diepenbrock et al. (2016, S. 12f) sind Pflanzenbau und Boden unmittelbar miteinander verbunden. Demnach ist die Erfassung von Standorteigenschaften für den Pflanzenbau geprägt durch die Erfassung von Bodeneigenschaften. Hinck et al. (2016) widmen sich in ihrer Arbeit diesem Thema. Sie beschreiben die Bedeutung der Bodeneigenschaften für den Pflanzenbau und schließen daraus auf die Bedeutung für PF. Lorenz und Münchhoff (2015) erweitern diese Herangehensweise mit der Begutachtung von Luftbildern und langjährigen Biomassekarten. Auffällig ist, dass sowohl Hinck et al. (2016, S. 5), als auch Lorenz und Münchhoff (2015, S. 65) die Erfahrung des Bewirtschafters als erklärende Variable beschreiben.

Während die Bodeneigenschaften über einen Schlag räumlich stark variieren können, unterliegt bspw. die Witterung auf einem Schlag keiner räumlichen Variabilität. Für PF haben Kuhlmann und Neumann (2011) die Berücksichtigung der zeitlichen Variabilität von Niederschlagsereignissen für Entscheidungsprozesse definiert. Die Effektivität von bestimmten Bewirtschaftungsmaßnahmen – und damit die ökonomische Optimierung – hängt demnach vom jeweiligen Zeitpunkt der Maßnahme entlang der Vegetationsperiode und des Witterungsverlaufs ab. Somit erhält PF neben der Erfassung und Nutzung von Informationen über räumliche Variabilität eine raum-zeit-bezogene Komponente wie sie von Ostheim (2000) beschrieben wird. Diese beinhaltet neben der zeitlichen Variation von Witterungsereignissen auch die mehrjährig erfasste Information von räumlicher Variabilität. Die so erhaltenen Daten können dazu verwendet werden, den pflanzenbaulichen Produktionsprozess zu dokumentieren und ex-post zu bewerten. Daraus ergibt sich die Chance, auf Veränderungen während der Wachstumsphase zu reagieren und die Bewirtschaftung räumlich anzupassen (Ostheim 2000, 104ff). Informationen über die räumliche Variabilität können Ertragsfunktionen nicht abbilden. Diese orientieren sich lediglich an Input-Output-Beziehungen. Diese Beziehungen können über einen Schlag aufgrund der heterogenen Standortverhältnisse teilweise erheblich schwanken (Wagner 1999). Die Ursache dieser Heterogenität ist wichtig, um die Bewirtschaftung entsprechend der Gegebenheiten anzupassen. Lorenz und Münchhoff (2015) nennen dies „erklärende Information“ über heterogene Standortverhältnisse. Ist erfasste Heterogenität auf standortabhängige Besonderheiten des Bodens zurückzuführen? Haben andere Umweltfaktoren einen konstanten Einfluss auf die vorliegenden Unterschiede (Waldschatten, jährliche Überschwemmung etc.)? Sind kurzfristige Faktoren für die Heterogenität verantwortlich (Wildschaden, Rübenmiete, Schadverdichtungen)? Eine langjährige Betrachtung digitaler Information und das Wissen des Landwirts sind daher unbedingt zu berücksichtigen. Die so erhaltene Information über die heterogenen Standortverhältnisse kann als **Standortheterogenität** beschrieben werden. Für die Bewertung und Nutzung der Information für die Bewirtschaftung sind die Ursachen dieser heterogenen Bedingungen notwendig, um die Entscheidungsqualität zu verbessern. Die Erfassung von Standortheterogenität bildet die Grundlage für die Ermittlung von Teilflächen. Wie in den vorangehenden Kapiteln beschrieben, ist die Standortheterogenität vor allem durch Variationen des Bodens gekennzeichnet. Die Notwendigkeit geeigneter Kartierungsmethoden entsteht aus der aufwendigen Erfassung tieferliegender Bodenschichten, die einen großen Einfluss auf die Ertragsfähigkeit eines Standorts haben. Durch die Erfassung der vorhandenen Standortheterogenität ist eine Abschätzung des zu erwartenden Ertragsniveaus (hoch, mittel oder niedrig) möglich, eine

absolute, kulturartenspezifische Ertragsprognose jedoch nicht. Auch ergibt sich aus der Kartierung von Heterogenität kein Hinweis auf eine rentable Nutzung von PF für den Betrieb. Die Landwirte werden durch die zusätzliche Information über ihre Flächen in die Lage versetzt, Managemententscheidungen zu optimieren. Leroux und Tisseyre (2019) stellen hierzu fest, dass Standortheterogenität relativ einfach über die Kartierung relevanter Information bestimmt werden kann. Allerdings muss die erfasste Information entsprechend quantifiziert und interpretiert werden. Die Autoren beschreiben darüber hinaus Indizes, die eine Entscheidungsgrundlage für eine rentable Nutzung vorhandener Heterogenität in der praktischen Bewirtschaftung bieten. Es zeigt sich, dass die Anwendung der Daten erheblich von deren Erhebung beeinflusst ist (Leroux und Tisseyre 2019).

Neben den Standortbedingungen bezieht PF auch die Entwicklung des Pflanzenbestands in Entscheidungsprozesse mit ein. Die optischen Unterschiede eines Pflanzenbestands können zusammengefasst als **Bestandsheterogenität** beschrieben werden. Diese ist durch die räumlich heterogene Versorgung eines Pflanzenbestands mit Nährstoffen (häufig Stickstoff), Stressfaktoren wie bspw. Staunässe oder Pilzinfektionen oder andere äußere Einflussfaktoren (Schadverdichtungen etc.) beeinflusst. Gleichzeitig wird ein Bestand im Boden-Pflanzen-System auch durch die Standorteigenschaften beeinflusst, da die jeweilige Wasser- und Nährstoffsituation neben äußerem Einfluss (Düngung, Witterung, Bewässerung) durch den Boden bedingt ist. Aus diesem Grund kann Bestandsheterogenität eine Art Zeiger für Standortheterogenität sein, sofern diese dadurch begründet ist. Insbesondere bei der teilflächenspezifischen N-Düngung spielt die Erfassung der Bestandsheterogenität eine wichtige Rolle. Der Versorgungszustand mit Stickstoff kann bspw. über die Blattfarbe festgestellt werden. Sind Teilbereiche eines Pflanzenbestands heller als andere, kann der Mangel an Chlorophyll¹⁶ u.a. auf eine schlechtere N-Versorgung hindeuten. Insbesondere Sensor- oder Remote-Sensing-basierte Systeme zur Erfassung des N-Bedarfs arbeiten darüber hinaus mit der Erfassung von Lichtreflektion im nahinfraroten Wellenbereich. Für die Abschätzung einer ertragsorientierten N-Düngung wird außerdem die oberirdische Biomasse des Bestands erfasst und so einen Rückschluss auf den erwartbaren Ertrag gezogen. Drücker (2016) stellt hierzu fest: „Der pflanzentypische Bedarf an Stickstoff ist abhängig vom Ertrags- und Qualitätsniveau sowie vom jeweiligen Stickstoffvorrat im Boden und der

¹⁶ Durch eine Verbindung mit Magnesium als Zentralatom ist Stickstoff neben Mg wichtig für die Synthese von Chlorophyll. Die Chlorophylle absorbieren als Farbpigmente auf der Blattoberfläche Lichtenergie und sind somit zentraler Bestandteil der Photosynthese bzw. des Kohlenstoffkreislaufs der Pflanze. Ein Mangel an N (und auch ein Mangel an Mg) äußert sich in einer aufgehellten Blattoberfläche, da die Chlorophyllbildung als Farbpigment beeinträchtigt ist (Schubert 2011, 37, 100).

Stickstoffnachlieferung.“ Dies bedeutet, dass neben der zu erwartenden N-Mineralisation aus dem Bodenvorrat (Standortheterogenität) auch der jeweilige kleinräumliche Pflanzenbestand (Bestandsheterogenität) die notwendige N-Düngung beeinflussen. Henke et al. (2007), Karatay et al. (2018), sowie Karatay und Meyer-Aurich (2020) sehen unter den aktuellen Qualitätsanforderungen für Backweizen in einer möglichen qualitativen Verbesserung des Weizens ein wichtiges Argument für die Berücksichtigung von Standort- und Bestandsheterogenität. Die Autoren begründen dies damit, dass ein höherer physiologischer Ertrag eine höhere Versorgung mit Stickstoff benötigt, um die qualitativen Anforderungen zu erfüllen. Sylvester-Bradley und Kindred (2009) bestätigen den positiven Zusammenhang zwischen Ertrag und N-Bedarf auf der Ebene britischer Betriebe und auch Christen (2009, S. 133) und Sieling et al. (2011) beschreiben den Verdünnungseffekt bei unangepasster Qualitätsdüngung mit Stickstoff. Als Resultat bestimmen die Autoren einen niedrigeren Auszahlungspreis aufgrund geringerer Proteingehalte. Die Berücksichtigung von Standortheterogenität stellt somit die langfristige Informationsquelle für Bestandsheterogenität bzw. im Ergebnis die Begründung für Ertragsheterogenität dar. Die Erfassung von Bestandsheterogenität bietet dem Landwirt die kurzfristige Möglichkeit seine Entscheidungen an veränderte Ertragsbedingungen anzupassen.

Zur Erfassung der Informationen stehen in der Forschung und Praxis verschiedene Möglichkeiten der Datenerhebung zur Verfügung. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihres Erhebungszeitpunkts, der Informationsqualität und der zugrundeliegenden Heterogenität (Bestand oder Standort). Schneider und Wagner (2008, S. 405) unterscheiden hinsichtlich des Erhebungszeitpunkts zwischen *off-season* (Erfassung der Heterogenität vorab) und *in-season* (Erfassung während der Vegetationszeit). In-Season-Verfahren differenziert Drücker (2016, S. 10f) in offline- (bspw. Satellitenbilder des Bestands) und online-Verfahren (Nutzung eines Pflanzensensors bei gleichzeitiger Düngung) (siehe auch Kuhlmann und Neumann 2011). Es liegt in der Natur der Sache, dass off-season-Verfahren keine Aussage über die Heterogenität des Pflanzenbestands treffen können. Sie dienen ausschließlich dazu, den Standort zu charakterisieren und räumlich einzuordnen. Verfahren, die in-season durchgeführt werden, adressieren vor allem die Heterogenität des Bestands, können darüber hinaus aber auch den Standort an sich beschreiben. Die Informationsqualität differenzieren Lorenz und Münchhoff (2015, S. 27) in **beschreibende** und **erklärende Information**. Diese Unterscheidung ist nachfolgend maßgeblich dafür, ob eine Informationsquelle zur Nutzung erst interpretiert werden muss, oder ob sie einen konkreten Gewinn an Hintergrundinformationen bietet, die wiederum Bewirtschaftungsentscheidungen beeinflussen. Erklärende Informationen sind

tendenziell wertvollere Informationen, da sie in der Regel besser instrumentalisiert werden können. Sie enthalten Informationen zum Kausalzusammenhang verschiedener beschreibender Informationen. Diese sind demgegenüber leichter zu beschaffen. Es kann allerdings für die Optimierung von PF auf dem Betrieb von Vorteil sein, wenn man die Ursachen von Heterogenität kennt. Insbesondere, wenn Managemententscheidungen auf der Grundlage von Bestandsheterogenität optimiert werden sollen, ist dies relevant.

Die Nutzung der jeweiligen Daten unterscheiden Schneider und Wagner (2008, S. 413) weiterhin in die Bereiche Karte, Sensor und der Kombination beider Verfahren, welche von den Autoren als Netz-Verfahren bezeichnet wird. Drücker (2016, S. 11) nutzt den Begriff des *Map-Overlays*, der auch in dieser Arbeit synonym für eine Kombination von Information über die Standortheterogenität mit der Heterogenität des Pflanzenbestands verwendet wird. Nachfolgend werden verschiedene Erhebungsmethoden von Boden- bzw. Standortheterogenität und Bestandsheterogenität beschrieben. Dabei dient die Erfassung der Bestandsheterogenität der kurzfristigen Anpassung von Bewirtschaftungsentscheidungen, während die Erfassung von Standortheterogenität langfristige Teilflächen ermittelt.

3.3.1 Beschreibende Information

Die Unterscheidung zwischen beschreibender und erklärender Information nach Lorenz und Münchhoff (2015, S. 27) differenziert die Informationsqualität für PF. Beschreibende Information zeigt Heterogenität auf einem Standort oder in einem Pflanzenbestand an. Sie orientiert sich an gemessenen Daten oder subjektiv wahrgenommenen Unterschieden. Häufig arbeiten Anwendungen des PF mit dieser Information, ohne diese entsprechend zu interpretieren. Das spart zwar Erfassungsaufwand, kann aber zu Fehlinterpretationen von gemessenen Daten führen.

3.3.1.1 Remote Sensing

Die Verwendung von Luft- und Satellitenbildern kann unter dem Begriff Remote Sensing (deutsch: Fernerkundung) zusammengefasst werden. In den Anfängen der Fernerkundung wurden vor allem Luftbilder zur Erfassung räumlicher Heterogenität verwendet. Durch die zunehmende Verbreitung von Satelliten und der verbesserten Bildauflösung ist die Wirtschaftlichkeit und Handhabung von Satellitenbildern inzwischen den Aufnahmen durch bspw. Flugzeuge überlegen. Aus diesem Grund wird bei der empirischen Untersuchung in dieser Arbeit – neben Drohnenaufnahmen – auf Satellitenbilder zugegriffen. Ein erster Ansatz zur Nutzung von Remote Sensing im Ackerbau kann die Analyse vorhandener und frei

zugängiger Satellitenaufnahmen sein. Im Programm *Google Earth*, welches Lorenz und Münchhoff (2015, S. 7) explizit nennen und das mehrjährige Satellitenaufnahmen beinhaltet, können kostenlose Aufnahmen eingesehen werden. Dies ist jedoch nur ein erster Ansatz, denn die Bilder sind nur begrenzt aussagekräftig. Hier spielt der Zeitpunkt der Aufnahme eine wesentliche Rolle bei der Interpretation von Standortheterogenität durch Fernerkundung. Lorenz und Münchhoff (2015, S. 28) nennen abgetrocknete Flächen ohne Bewuchs oder bewachsene Flächen zum Zeitpunkt der Abreife als ideale Zeitpunkte der Datenerfassung. So können bspw. Teilflächen mit besserer oder schlechterer Wasserführung identifiziert werden. In Abbildung 2 sind zwei Beispiele für Luftbilder gezeigt, die eine erste Ermittlung von Teilflächen (links) ermöglichen bzw. (rechts) weitere Informationen über den jeweiligen Schlag erforderlich machen. Der Vergleich der gezeigten Aufnahmen verdeutlicht, dass einfache Satellitenbilder nicht immer eine geeignete Datenquelle darstellen, insbesondere wenn die Heterogenität nicht durch die Wasserführung bedingt wird.



Abbildung 2: Luftbildauszug aus Google Earth vom 17.06.2015 (links) und 07.05.2016 (rechts) (Auszug aus Google Earth)

Um die geeigneten Zeitpunkte einer Aufnahme zu gewährleisten, eignen sich daher frei zugängliche Aufnahmen nur begrenzt. Eine zeitlich genauere Erfassung kann jedoch durch die Verwendung von Bildern von Forschungssatelliten (Sentinel, LandSat) gewährleistet werden. Letztere werden auf bestimmten Plattformen (bspw. Sentinel-Hub) veröffentlicht, oder sind in PF-Anwendungen von kommerziellen Anbietern integriert (bspw. *Claas CropView*). Häufig eignen sich einfache RGB¹⁷-Aufnahmen bereits zur Identifikation von Bestandsheterogenität (Putra und Soni 2019). In bestimmten Fällen ist die Variabilität des Pflanzenbestands jedoch

¹⁷ RGB = Rot-Grün-Blau; bei der Fotoaufnahme wird die Lichtreflektion gemessen. Standardmäßig erfassen die meisten digitalen Kameras diese drei Farben des Lichtspektrums, sowie die Mischungen dieser Farben.

durch die RGB-Reflexion nicht zu erkennen. Hier können Falschfarbenbilder herangezogen werden, um mit dem bloßen Auge nicht erkennbare Unterschiede deutlich zu machen. Dazu werden Sensoren bzw. Kameras verwendet, die im Multi- bzw. Hyperspektralen¹⁸ Wellenlängenbereich Lichtreflektion erfassen. Insbesondere Aufnahmen während der Vegetationszeit (in-season) bieten zunächst nur einen Überblick über Bestandsheterogenität. Erst mehrjährige Satellitenbilder ermöglichen die Nutzung der erfassten Information bei der Ermittlung von Teilflächen. Aus den Aufnahmen lassen sich nur in Ausnahmefällen (bspw., wenn Zuckerrübenmietenplätze zufällig zu erkennen sind) erklärende Informationen ableiten und erfordern daher u.a. die Interpretation durch den Bewirtschafter (Identifikation eines ehemaligen Zuckerrübenmietenplatzes, einer defekten Drainage, Schadverdichtungen o.ä.) oder Verwendung weiterer Informationsquellen (z.B. Bodenschätzung). In manchen Fällen können mehrjährige Aufnahmen einen Erkenntnisgewinn über die Ursachen von beobachteter Heterogenität bieten. Diese raum-zeit-bezogenen Daten liegen jedoch meist nicht vollständig vor, weshalb erklärende Information entweder rein zufällig entsteht oder aber Interpretationsspielraum lässt.

Ein System, welches dem Prinzip der klassischen Fernerkundung grundsätzlich gleichkommt, ist der Einsatz von Drohnen. Hierbei werden durch Multikopter bestimmte Schläge oder auch nur Teilbereiche eines Schlags befliegen. Die Flüge können teilautomatisch durchgeführt werden, wofür in speziellen Programmen zuvor Flugrouten errechnet werden. Krienke et al. (2017) sehen in der Nutzung von Drohnen eine Möglichkeit, den aktuellen Zustand des Pflanzenbestands häufiger mit geringerem Aufwand zu erfassen. Dabei spielen Faktoren wie bspw. die Wolkenbedeckung, die eine Satellitenaufnahme erschweren würde, nur eine untergeordnete Rolle. Grenzdörffer (2022) weist dennoch darauf hin, dass ein Wechseln der Wolkenbedeckung während des Drohnenflugs bzw. der Luftaufnahmen die Aufnahmen bzw. farblichen Reflektionen verfälschen könnten. Gleichzeitig ermöglicht der Drohneneinsatz dem Landwirt Flexibilität bezüglich der Einsatzzeit und eine höhere Auflösung des Bildmaterials (Michels et al. 2020, S. 80). Drohnen können sowohl mit einfachen RGB-Kameras als auch Multispektral- oder Thermal-Kameras ausgestattet werden. Sie können mit entsprechender Software zur Bildverarbeitung verbunden werden, die die Aufbereitung und Nutzung des Bildmaterials für PF erleichtern. Abhängig von der eingesetzten Kamera können, wie auch

¹⁸ Mit Multi- und Hyperspektralkameras erfasste Lichtreflektion von Oberflächen stellt bspw. auch den durch das menschliche Auge nicht sichtbaren infraroten Wellenlängenbereich dar, der für die Berechnung des NDVI notwendig ist.

durch Satellitenaufnahmen, Biomassekarten auf der Basis verschiedener Vegetationsindizes zur Veranschaulichung in Falschfarbenbildern erstellt werden.

Remote Sensing ermöglicht Entscheidungshilfen für den Landwirt hinsichtlich einer angepassten N-Düngung. Auf Basis von Biomassekarten, die in Kapitel 3.3.1.3 beschrieben werden, lassen sich Applikationskarten erstellen. Diese basieren auf dem anhand des oberirdischen Aufwuchses des Pflanzenbestands geschätzten Ertragspotenzials und dem davon abgeleiteten N-Bedarf. Auf einem ähnlichen Prinzip beruht auch die Nutzung aktiver Systeme wie optische Sensoren, die neben der Erfassung von Bestandsheterogenität in Kombination mit entsprechender Datenverarbeitung konkrete Entscheidungshilfen für den Landwirt bieten.

3.3.1.2 Sensorsysteme

Während die Erfassung räumlicher Heterogenität durch den Einsatz von Drohnen neben der separaten Datenverarbeitung einen zusätzlichen Arbeitsgang notwendig macht, integriert der Einsatz von optischen Sensoren die Bilderfassung in bestehende Arbeitsgänge. Hinck et al. (2016) stellen fest, dass die aktuell für die angepasste N-Düngung auf dem Markt verfügbaren Sensorsysteme den N-Bedarf der Pflanzen anhand ihrer Reflexion, äquivalent zu Remote Sensing auch im nahinfraroten Bereich, ermitteln. In Online-Verfahren (Kuhlmann und Neumann 2011) kann das „Grundprinzip der sensorgesteuerten Applikation“, welches aus den Arbeitsschritten „Messen“, „Berechnen“ und „Ausbringen“ besteht, angewendet werden und simultan mit der anzupassenden N-Düngung erfolgen (Lilienthal 2014). Die beschreibende Information über Bestandsheterogenität wird zeitgleich für den Entscheidungsprozess über die N-Düngung herangezogen. Je nach Kalibrierung wird der errechneten Spektralindex in N-Sollwerte umgerechnet, die um einen voreingestellten Mittelwert schwanken. Der Offline-Ansatz der zeitlich getrennten Erfassung mit dem Sensor und anschließender Verarbeitung und Nutzung der Daten ist im Weizenanbau unüblich (Hinck et al. 2016, S. 11). Eine Erweiterung des Online-Ansatzes stellt das Map-Overlay-Verfahren dar. Dabei werden die Sensorinformationen mit beschreibenden oder erklärenden Informationen über den bearbeiteten Schlag überlagert (Reckleben 2014). Daraus entsteht ein kombinierter Ansatz, der die mit dem Sensor erfasste Bestandsheterogenität mit der zugrundeliegenden Standortheterogenität verschneidet. Dies ermöglicht es, standortabhängige Informationen über das Ertragspotenzial abzuschätzen und in den Entscheidungsprozess über die auszubringende N-Menge einfließen zu lassen (Hinck et al. 2016, S. 11). Die Kalibrierung des optischen Sensors ist entscheidend für die Qualität der angepassten N-Düngung, da die Farbe des Bestands u.a. sortenabhängig

schwankt. Sie obliegt zunächst dem Landwirt als Entscheider. Er legt sowohl den Referenzwert für die N-Menge als auch die Höhe der Amplitude bzw. den Maximal- und den Minimal-Wert fest. Zur Unterstützung dieser Entscheidung kann bspw. ein N-Tester herangezogen werden, mit dem punktuell der N-Bedarf des Pflanzenbestands ermittelt werden kann. Die Information daraus kommt der Entscheidungsqualität des Systems zugute, da so eine erklärende Komponente integriert wird. Diese hängt jedoch auch vom jeweiligen Messpunkt ab, den der Landwirt wählt (Reckleben 2014, S. 44). Neben dem N-Tester existieren weitere Schnelltests wie bspw. der Nitratecheck, der den Nitratgehalt im Saftstrom der Pflanze bestimmt. Die individuelle Überprüfung der sensorgesteuerten Düngung muss nach Borchardt et al. (2018, S. 148) unbedingt gewährleistet sein, um das Arbeitsergebnis langfristig zu optimieren. Hier sehen die Autoren einen wesentlichen Grund für einen erhöhten Managementaufwand sensorgestützter Düngung, der sich über eine höhere Einsatzfläche rentieren muss. Dies bestätigt Reckleben (2014), der aus seinen Ergebnissen eine Mindesteinsatzfläche pro Jahr von 300 bis 400 ha empfiehlt. Diese Auslastungsschwelle ergibt sich, wenn bei 100 ha Getreidefläche alle positiven Effekte (Mehrertrag, N-Einsparung, Steigerung der Druschleistung und des Proteingehalts) durch den Sensoreinsatz erreicht werden können.

Weitergehende (erklärende) Informationen über die Standortheterogenität können den Entscheidungsprozess im zugrundeliegenden System verbessern (Map-Overlay-Verfahren). Der Landwirt nutzt die sensorgestützte Düngung als Entscheidungsunterstützungssystem für die Anpassung an Bestands- und Standortheterogenität. Gleichzeitig ist er für die richtige Kalibrierung der Sensoren verantwortlich und somit für die Ausnutzung ökonomischer und ökologischer Potenziale. Im Vergleich zu Satelliten- und Drohnenaufnahmen fällt zusätzlicher Verarbeitungsaufwand weg, jedoch unterliegen die applizierten N-Mengen der Notwendigkeit zur Gegenkontrolle. Die Darstellung und Verrechnung der erfassten Daten erfolgen beim Einsatz optischer Sensoren nach dem gleichen Prinzip wie bei zu Falschfarbenbildern verarbeiteten Remote-Sensing-Daten.

3.3.1.3 Biomassekarten

Die Kartierung des Bodens hat langfristige Gültigkeit, die konkreten Wachstumsbedingungen hängen aber von weiteren Standortfaktoren ab. Daher bietet es sich an, die Pflanzenbestände auf den zu untersuchenden Standorten in der Vegetationsphase (in-season) zu erfassen. Lorenz und Münchhoff (2015, S. 33) unterscheiden zwischen drei unterschiedlichen Informationsquellen für Biomassekarten: solche, die auf dem Betrieb entstehen (bspw. durch

Drohnenbilder oder optische Sensoren), aus Satellitendaten oder mehrjährige Biomassekarten, errechnet aus einer Vielzahl von Satellitendaten. Letztere entsprechen den Anforderungen der raum-zeit-Beziehung nach Ostheim und spielen daher für die Erfassung von Standortheterogenität die zentrale Rolle. Biomassekarten bilden den Blattflächenindex (LAI = Leaf Area Index) ab, der zum Zeitpunkt der Aufnahme auf dem entsprechenden Feld vorhanden ist. Dieser berechnet sich aus dem Verhältnis der Blattoberfläche zur Bodenoberfläche (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 33). Abhängig von den vorliegenden Standortbedingungen und der untersuchten Kulturpflanze schwankt der LAI. In einigen Fällen kann bspw. ein besserer Feldaufgang zu Beginn der Vegetation auf schwachen Teilflächen einen höheren LAI bewirken, was sich im Laufe der Vegetationszeit umkehrt. Wie in Kapitel 3.3.1.1 beschrieben, ermöglichen Daten der RGB-Reflektion des Lichts häufig keine genaue Interpretation der Bestandsentwicklung. Da Pflanzen insbesondere Nahinfrarotlicht reflektieren, werden zur Erstellung von Biomassekarten meistens Multispektralkameras verwendet, die nahinfrarotes Licht erfassen können (Yuzugullu et al. 2020). Kräftige Pflanzen mit hoher biologischer Aktivität reflektieren mehr nahinfrarotes Licht, als schwache bzw. gestresste Pflanzen und erscheinen dadurch dunkler (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 30). Zur Darstellung dieser Heterogenität werden verschiedene Indizes verwendet, z.B. NDVI, SAVI¹⁹, EVI²⁰ oder VARI. Die verschiedenen Indizes verrechnen die reflektierte Strahlungsintensität, um so eine Aussage über den Zustand der Vegetation zu erhalten. Der bedeutendste Index der aufgeführten ist der NDVI, *Normalised Difference Vegetation Index*, der auf Untersuchungen von Rouse et al. (1973) zurückgeht. Der NDVI zeichnet sich durch seine hohe Korrelation mit der vorliegenden Biomasse und dem Chlorophyll-Gehalt der Pflanzenmasse aus. Die Werte schwanken zwischen -1 und 1. Während negative Werte Wasserflächen beschreiben, beschreibt das Intervall zwischen 0 und 1 die Unterschiede zwischen blankem Boden und dichter, gesunder Vegetation (Yuzugullu et al. 2020). Die Formel der Berechnung ist wie folgt:

Formel 3: Berechnung des NDVI unter Berücksichtigung der im nahinfraroten (NIR) und roten Wellenlängenbereich erfassten Lichtreflexion (nach Rouse et al. (1973))

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{rot}}{\text{NIR} + \text{rot}}$$

In der Vegetation sind Pflanzen in Bereichen mit geringem NDVI häufig Stresssituationen ausgesetzt, die dadurch erfasst werden. So ermittelten Zovko et al. (2019) einen schwachen

¹⁹ Soil Adjusted Vegetation Index, bereinigt den NDVI durch einen empirischen Korrekturfaktor (Huete 1988).

²⁰ Enhanced Vegetation Index, sensitiver als der NDVI und gibt auch bei stark bewachsenen Flächen (Urwald) noch einen erklärenden Wert von Vegetationsheterogenität aus (Jiang et al. 2008).

NDVI als Indikator für Trockenstress im Weinbau. Dies ist insofern für den Ackerbau von Relevanz, als dass Wein als Dauerkultur nach Zovko et al. meistens in immer gleichen Bereichen eines Weinbergs von schlechter Wasserversorgung betroffen ist. In Abbildung 3 ist eine fünfjährige Biomassekarte abgebildet, die langfristige Bestandsunterschiede veranschaulicht. Außerdem ist eine Aufnahme des NDVI abgebildet, die an einem wolkenfreien Tag aufgenommen wurde.

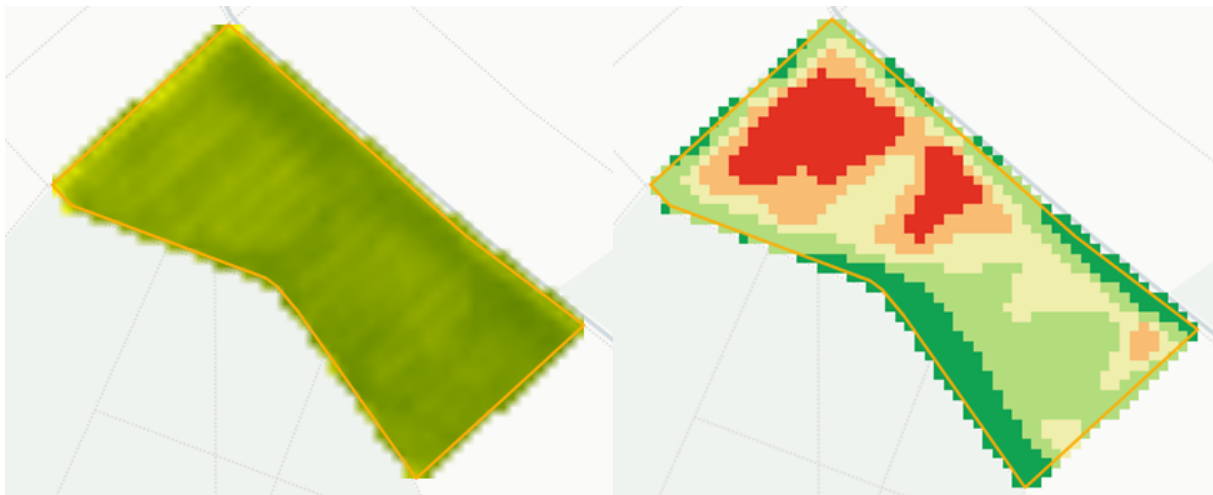


Abbildung 3: links: farblich aufbereitete Aufnahme des NDVI auf dem Schlag "Kleeplatz" vom 15.05.2019 mit der Kultur Winterweizen, hell = niedriger NDVI, dunkel = hoher NDVI; rechts: langjährige Biomassekarte des Schlags "Kleeplatz" aus den Jahren 2016-2020, jeweils vom 01.03.-01.09., relationale Darstellung der Biomasse über den Farbverlauf rot (schwach, 80%) – gelb (durchschnittlich, 100%) – grün (stark, 120%) (Claas 2021)

Yuzugullu et al. (2020, S. 6) stellen fest, dass der NDVI entlang der Vegetationszeit veränderlich ist, da Biomasse in dieser Zeit neu gebildet wird. Hier wird deutlich, dass gestresste Bestände einen im Verlauf niedrigeren NDVI aufweisen, da deren Wachstum im Vergleich zu gesunden Pflanzen eine gehemmte Bildung neuer Biomasse haben. Ein niedriger NDVI kann daher ein Indikator für Pflanzenkrankheiten oder andere kurzfristig auftretende Stressfaktoren sein. Ein Vegetationsindex, der ohne multi- oder hyperspektrale Lichtreflektion auskommt, ist der VARI-Index, *Visible Atmospherically Resistant Index*, dessen Berechnung in Formel 4 angegeben ist (Gittelsohn et al. 2002). Er rechnet nur mit der sichtbaren RGB-Reflektion, wodurch er mit kostengünstigeren Sensoren bzw. Kameras erfasste Aufnahmen verwenden kann. Durch Berechnung des Index kann ein Falschfarbenbild im grün-roten Farbspektrum erstellt werden, das die Vegetation illustriert.

Formel 4: Berechnung des VARI unter Berücksichtigung der im sichtbaren Wellenlängenbereich erfassten Lichtreflexion (nach Gittelsohn et al. (2002))

$$\text{VARI} = \frac{\text{grün} - \text{rot}}{\text{grün} + \text{rot} - \text{blau}}$$

Da Biomassekarten keine Hintergründe von Bestandsunterschieden erklären sind sie der beschreibenden Information zuzuordnen. Zwar ist bekannt, dass verschiedene Pflanzenkrankheiten Licht in bestimmten Wellenlänge reflektieren (Kuckenberget al. 2009; Bohnenkamp et al. 2019), praxistauglich für die Erstellung von langfristigen Biomassekarten ist dieses Wissen jedoch noch nicht (Stand Februar 2023). Es zeigt sich jedoch, dass abhängig von den angebauten Kulturen unterschiedliche Bestandsentwicklungen zu erkennen sind. Dies macht neben der Erfassung multispektraler Reflektion auch die Pflanzenmorphologie zu einer wichtigen Informationsquelle. Die morphologischen Kulturunterschiede erschweren eine konkrete Ertragsprognose durch Biomassekarten. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, kann sogar ein negativer Zusammenhang zwischen Biomasse und Ertrag bestehen (Schubert 2011, S. 82). Daher ist es nötig, neben der Entwicklung der Biomasse auch das Ertragsergebnis zu dokumentieren.

3.3.1.4 Ertragskarten

Die Erfassung und Kartierung von Ernteerträgen dient der Evaluation der Bewirtschaftung und langfristig der Informationsbeschaffung über räumliche Variabilität (Pedersen und Lind 2017). Bei Druschfrüchten können durch die Erntemaschine georeferenzierte Erträge ermittelt werden. Eine Möglichkeit ist die volumetrische Ertragserfassung (wird u.a. in Mähreschern der Fa. *Claas* verbaut), bei der eine Lichtschranke die Schütthöhe auf jedem Elevatorpaddel erfasst (Abbildung 4). Ertragsdaten liegen zunächst als Punktdaten (Vektordaten, GIS) vor und werden zum Beispiel durch Interpolation (IDW²¹-Interpolation oder andere Verfahren) räumlich geschätzt und dargestellt. Da der gemessene Ertrag neben dem Volumen durch das jeweilige Hektolitergewicht sowie aus der Kornfeuchte errechnet wird, sind diese beiden Variablen (auch wenn sie im Mährescher erfasst werden) separat zu bestimmen und die Ertragskartierung zu kalibrieren. Veränderte Bedingungen (Standort, Getreideart, Kornfeuchte) erfordern weitere Kalibrierungen (Borchardt et al. 2018).

²¹ Inverse Distance Weighted = Inverse Distanzgewichtung; Interpolationsmethode der Geostatistik, bei der die Annahme getroffen wird, dass die Ähnlichkeit von Daten mit größer Entfernung zueinander abnimmt. Die Methode dient der einfachen Schätzung räumlicher Abhängigkeit von georeferenzierten Daten (Shepard 1968).

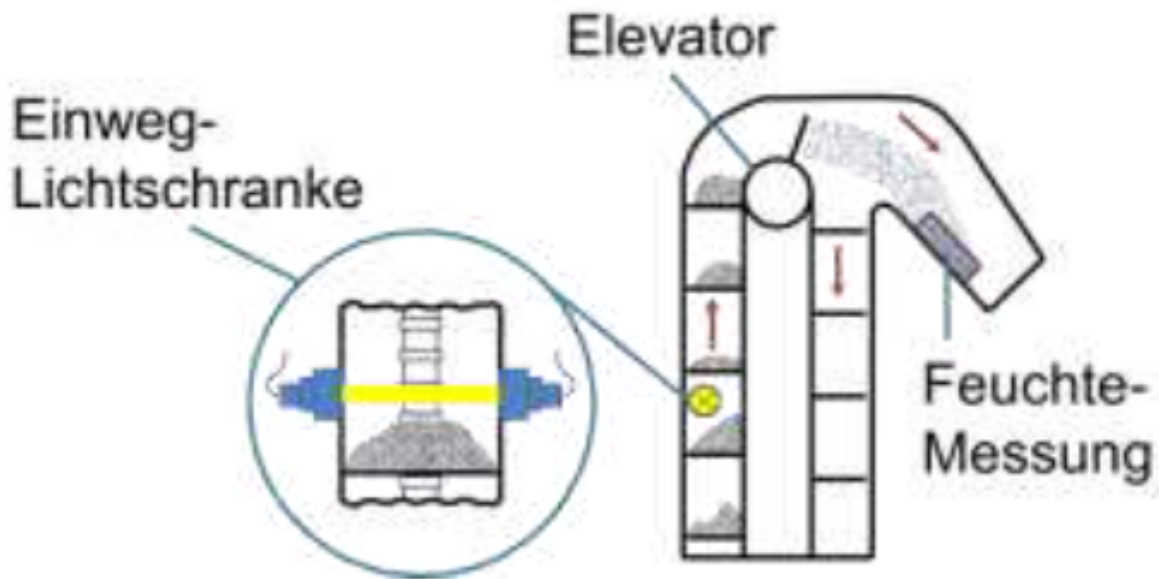


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer volumetrischen Ertragsmessung im Mähdrücker (Borchardt et al. 2018, S. 135)

Die Ertragskartierung bietet die Möglichkeit, relevante Bestandsheterogenität mit einem ohnehin notwendigen Arbeitsgang zu verbinden. Ostheim (2000) beschreibt diesen Vorteil als „detaillierte raumbezogene Informationsbeschaffung (...), die im Rahmen eines notwendigen Arbeitsganges (der Ernte) nahezu ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand und mit überschaubaren Mehrkosten realisiert werden kann.“ (S. 45) Danach sind Ertragsdaten Messwerte, die während des Mähdrüchs kontinuierlich auf der Erntemaschine erhoben und über GNSS räumlich zugeordnet werden (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 39). Die erfassten Rohdaten müssen anschließend noch auf einem PC mit entsprechender Software aufbereitet und dargestellt werden. Da die Daten zudem in Punktform vorliegen, ist eine Interpolation nötig, um eine flächige Darstellung zu erreichen. Die meisten Anbieter von Mähdrüchern mit Ertragskartierung bieten ihren Kunden die Datenaufbereitung in eigenen Systemen an, was die Nutzung und Auswertung der Informationen benutzerfreundlich gestaltet. Die Aussage von Ostheim, dass die Ertragskartierung nicht mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist, trifft dennoch nur auf die Feldarbeit zu. Äquivalent zu mehrjährigen Biomassekarten ist die Ertragskartierung zur Erfassung von Standortheterogenität unbedingt mehrjährig durchzuführen. Ziel ist es zu verhindern, dass mögliche Ausreißer aus „besonderen Jahren“ das Ergebnis verfälschen könnten (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 41). Die Autoren geben zu bedenken, dass durch Standortheterogenität verursachte signifikante Ertragsunterschiede vor allem in Jahren mit Wasserknappheit auftreten. Ertragsunterschiede in Jahren mit guten Bedingungen können durch fehlerhafte Bewirtschaftung (bspw. fehlerhafte Unkraut- oder Krankheitsbekämpfung) oder konkrete Schadereignisse ausgelöst werden (bspw.

Lagergetreide, Wildschaden, Hagelschaden). Die Bereinigung mehrjähriger Ertragskarten um Ausreißer ist daher notwendig (S. 39f). Die Möglichkeit solche Ausreißer auszuschließen, beschreiben Filippi et al. (2019) als „*leave-one-year-out cross-validation*“. Dazu ist es notwendig, weitere Daten, bspw. zur Witterung, in den Entscheidungsprozess zu integrieren, um solche „besonderen Jahre“ identifizieren zu können. Eine weitere Herausforderung besteht bezüglich der einzuhaltenden Fruchtfolge auf einem Schlag. Während Druschfrüchte (Getreide, Raps, Leguminosen, Körnermais etc.) mit einer georeferenzierten Ertragserfassung geerntet werden können, ist dies bei Hackfrüchten (z.B. Zuckerrüben und Kartoffeln) technisch noch nicht möglich (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 41). Als weitere Nutzungsmöglichkeit der Ertragskartierung bringt Ostheim (2000, S. 46) die Überprüfung von PF ins Spiel. Pedersen und Lind (2017) schreiben hierzu: „(...) *yield mapping enables the farmer to monitor the actual outcome from varying inputs.*“ Ein Beispiel hierfür ist die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung.

3.3.1.5 Bodenleitfähigkeitsmessung

Wie Schubert (2011, S. 44ff) beschreibt, ist Diffusion eine Möglichkeit der Nährstoffaneignung der Pflanze über die Wurzel. Hierbei handelt es sich zusammengefasst um einen Austausch elektrischer Ladung, da die meisten für die Pflanze notwendigen Nährstoffe als Ionen im Boden vorliegen. Dabei beschreibt er, dass der Diffusionskoeffizient (wie stark ein Stoff in einem Medium, bspw. im Boden, diffundiert) von der vorliegenden Bodenart und der Bodenfeuchte abhängig ist. In trockenem Boden, bzw. Boden mit geringerer Fähigkeit Wasser zu halten (Sandboden), ist die Nährstoffaneignung über die elektrische Ladung des jeweiligen Stoffes demnach geringer als in Böden mit höherer Feuchtigkeit (Lehm und Ton). Laut Lorenz und Münchhoff (2015, S. 42) macht man es sich bei der Messung der elektrischen Leitfähigkeit (EC = electrical conductivity) zunutze, „dass im Boden austauschbare, elektrisch geladene Teilchen (Ionen) vorhanden sind. Diese können den Strom leiten. Die Teilchen befinden sich zum überwiegenden Teil in der Tonfraktion (...) und sind zu einem kleinen Teil am Humus gebunden.“ Aus diesem kausalen Zusammenhang lassen sich Rückschlüsse auf den Ton- bzw. Humusgehalt des Bodens ziehen. Boenecke et al. (2018) sehen die Messung der EC daher als „*particularly useful as a proxy for the physical properties of soil with stable field patterns when used for PA (precision agriculture, Anm. d. Verf.)*.“ Dabei legen die Autoren ihren Fokus vor allem auf die Eigenschaften des Unterbodens, dessen EC durch Messungen von 0-90 cm (*VERIS*) oder tiefer (*Geophylus*) erfasst werden kann. Werhan et al. (2008, S. 73) geben zu bedenken, dass die Ergebnisse einer EC-Messung durch weitere Faktoren als die vorliegende

Bodenfeuchte und dem Ton- und Humusgehalt beeinflusst werden kann. So könnten die Werte durch den Salzgehalt des Bodens oder die Kationenaustauschkapazität verfälscht werden. Den Autoren zufolge gilt es zu beachten, dass neben der Kalibrierung des Messinstruments auch aktuelle Witterungs- und Bodenbedingungen Einfluss auf das Ergebnis haben (S. 69). Bei der Durchführung und Bewertung der Messungen sollten diese Problemfaktoren entweder vorab ausgeschlossen (Durchführung der Messungen bei ähnlichen Bedingungen) oder im Nachhinein herausgerechnet werden. Dies ist besonders bei größeren Schlägen wichtig, um zumindest auf dem gleichen Feld verlässliche und vergleichbare Messwerte hinsichtlich der Standorteigenschaften zu erhalten (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 49-51). Es ist daher sinnvoll, die Messdaten als relative Werte auf einem Schlag aufzufassen. Unter Berücksichtigung der beschriebenen Fehlerquellen ist daher bei der erfassten Information auch von der *scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens* (EC_a = apparent (soil) electrical conductivity) die Rede (Werhan et al. 2008, S. 65; Boenecke et al. 2018, S. 752).

In der Praxis werden verschiedene Gerätschaften zur Messung der EC_a verwendet. Die gängigsten Modelle sind der *EM38* der Firma *Geonics*, welcher einen Durchschnitt über die gesamte Messtiefe ermittelt, und verschiedene Modelle des *VERIS*, der Messwerte aus zwei unterschiedlichen Tiefen (0-30 cm und 0-90 cm) erfasst. Während der *EM38* ein elektromagnetisches Feld erzeugt, sendet und empfängt der *VERIS* elektrischen Strom. Damit der Strom geleitet werden kann, muss der Oberboden etwas feucht sein. Bei beiden Verfahren werden die Daten als Punktdaten ermittelt. Von geringerer Bedeutung ist der *Geophylus electricus*, dessen Funktionsweise der des *VERIS* entspricht. Zusätzlich werden hier Gamma-Strahlen des Bodens erfasst, die sich bei verschiedenen geologischen Eigenschaften unterscheiden (Lorenz und Münchhoff 2015). In Abbildung 5 ist eine grafisch aufbereitete Darstellung der Messwerte eines *VERIS 3000* abgebildet. Zusätzlich ist eine IDW-Interpolation der Daten dargestellt, die die Werte in der Fläche schätzt.

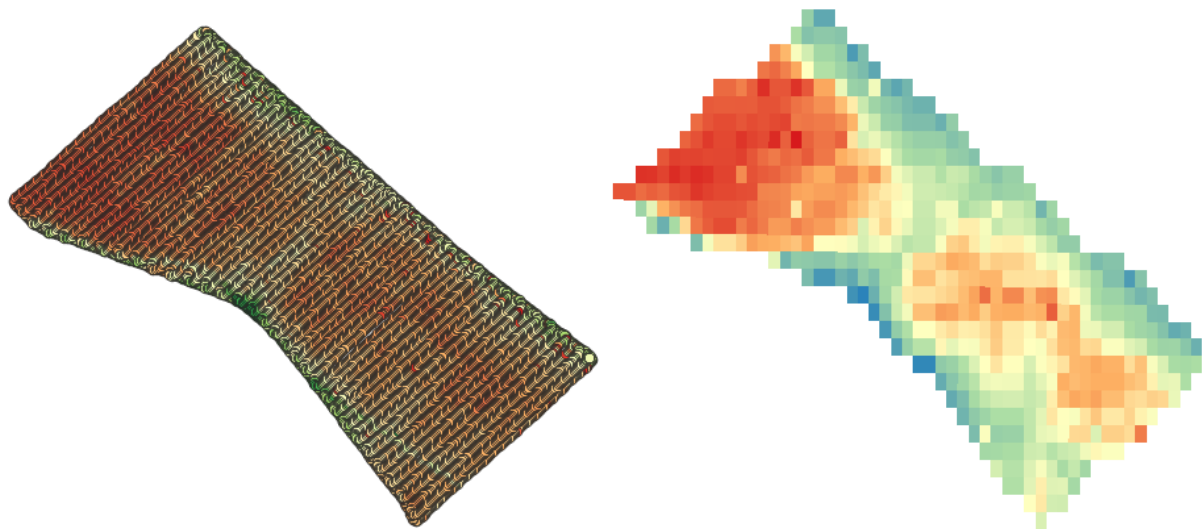


Abbildung 5; Messdaten einer Bodenleitfähigkeitsmessung des Schlags "Kleeplatz" mit dem VERIS 3000 der Hochschule Triesdorf, farblich dargestellt als Punktdaten (links) und IDW-interpoliert (rechts) (eigene Darstellung mit QGIS, rot = niedrige EC, blau = hohe EC in spektralem Farbverlauf)

In der Regel kann aus den Messwerten der EC_a auf Standortheterogenität geschlossen werden, nicht aber auf die Ursache dieser Heterogenität. Daher wird sie von Lorenz und Münchhoff (2015) der beschreibenden Information zugeordnet. Ähnlich wie durch Luft- und Satellitenbilder können Bereiche von guten und schlechten Standortbedingungen durch die EC_a ermittelt werden. Mit der EC-Messung können (langfristige) Bodenunterschiede sichtbar gemacht werden, während bewirtschaftungsbedingte Unterschiede nicht erfasst werden (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 42). Aus diesem Grund eignen sich Messungen der EC_a für die Nutzung über einen langfristigen Zeitraum, da bodenbedingte Standortbedingungen kaum Veränderungen unterliegen.

3.3.2 Erklärende Information

Während beschreibende Informationen interpretiert werden müssen, können erklärende Informationen besser instrumentalisiert werden, da sie einen Kausalzusammenhang zwischen beschreibender Information und deren Ursachen herstellt. Demgegenüber ist der Erfassungsaufwand für erklärende Information deutlich größer. Beschreibender Information liegen Erhebungen durch Remote Sensing oder andere räumliche Messmethoden zugrunde. Einen Sonderfall stellt die Erfahrung des Bewirtschafters dar. Zwar hat der Landwirt aufgrund langjähriger Bewirtschaftung eines Schlags spezifische Kenntnisse von in der Fläche vorliegenden Unterschieden. Darüber hinaus kennt er unter Umständen auch die Ursachen vorliegender Heterogenität (Drainage defekt, alter Bachlauf etc.).

3.3.2.1 Bodenkarten (Bodenschätzung und Geologische Karten)

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, dient der Boden als Grundlage für den Ackerbau. Daher bestimmt die Bodenheterogenität auch die teilflächenspezifische Bewirtschaftung. Diepenbrock et al. (2016), Hinck et al. (2016) und Schubert (2011) beschreiben die Eigenschaften des Bodens, die für den Ackerbau und PF von Relevanz sind. Daher ist eine georeferenzierte Erfassung von Bodenunterschieden von großem Wert für den Landwirt, wenn er PF umsetzen will. Ein Beispiel für eine Bodenkartierung bietet die ab 1934 durchgeführte sog. *Reichsbodenschätzung*. Diese wurde im Zuge der Verabschiedung des Bodenschätzungsgesetz (Gesetz über die Schätzung des Kulturbodens in Deutschland) im gesamten damaligen Reichsgebiet durchgeführt. In §1 Abs. 1 BodSchätzG (1934) wird der Zweck wie folgt beschrieben: „Zweck der Bodenschätzung ist es, für die Besteuerung der landwirtschaftlich nutzbaren Flächen des Bundesgebiets einheitliche Bewertungsgrundlagen zu schaffen. Die Bodenschätzung dient auch nichtsteuerlichen Zwecken, insbesondere der Agrarordnung, dem Bodenschutz und Bodeninformationssystemen.“ Die Bewertungsgrundlage liegt insbesondere auf der „Beschreibung des Bodens und der sonstigen natürlichen Ertragsfaktoren.“ (Bayerisches Landesamt für Steuern 2009, siehe Anhang 2) Nach Lorenz und Münchhoff (2015, S. 54ff) wird diese Beschreibung des Bodens in einem Meter Tiefe durch die Borstockmethode in einem 50x50 Meter Raster durchgeführt. Damit wird neben dem Klassenzeichen ein Bodenprofil (auch Grablochbescrieb genannt) erstellt. Mit der Erfassung des Klassenzeichens wird neben der Hauptbodenart²² auch die Entstehungsart²³ des Bodens erfasst. Darüber hinaus werden sieben sog. Zustandsstufen unterschieden, die den Übergang zwischen den Bodenhorizonten und somit die Durchwurzelbarkeit des Bodens bewerten. Aus dem Klassenzeichen ergibt sich eine Punktebewertung (0 – 100), die Bodenzahl, welche durch standortabhängige Zu- und Abschläge zur Ackerzahl²⁴ (allg. Bodenklimazahl) erweitert werden kann. Nachdem Flächen im beschriebenen Raster erfasst wurden, können sich ähnelnde Bereiche zu sog. Klassenzeichenflächen zusammengefasst werden, in denen wiederum ein Bodenprofil ausgehoben wird. Dieses Bodenprofil des Klassenzeichens trifft anders als das Klassenzeichen konkrete Aussagen über die Bodenart (Lorenz und Münchhoff 2015). Die beschriebene Vorgehensweise kann anhand der im Anhang vorliegenden Bewertungstabelle der

²² Unterscheidung von Ackerboden in S = Sand, Sl = schwach lehmiger Sand, IS = lehmiger Sand, SL = stark lehmiger Sand, sL = sandiger Lehm, L = Lehm, LT = schwerer Lehm oder toniger Lehm, T = Ton, Mo = Moor

²³ geologische Herkunft des vorliegenden Ackerbodens unterschieden zwischen D = Diluvium (eiszeitlich angeschwemmter Boden), Lö = Löß (angewehter zwischeneiszeitlicher Boden), Al = Alluvium (junge Schwemmböden), V = Verwitterungsboden (verwittertes Gebirgsgestein), Vg = gesteinshaltiger Verwitterungsboden (siehe V, grobes Material in der Krume) (Bayerisches Landesamt für Steuern 2009)

²⁴ auf Grünland äquivalent dazu „Grünlandzahl“

Reichsbodenschätzung nachvollzogen werden. Abbildung 6 stellt farblich markiert eine Bodenschätzung dar.

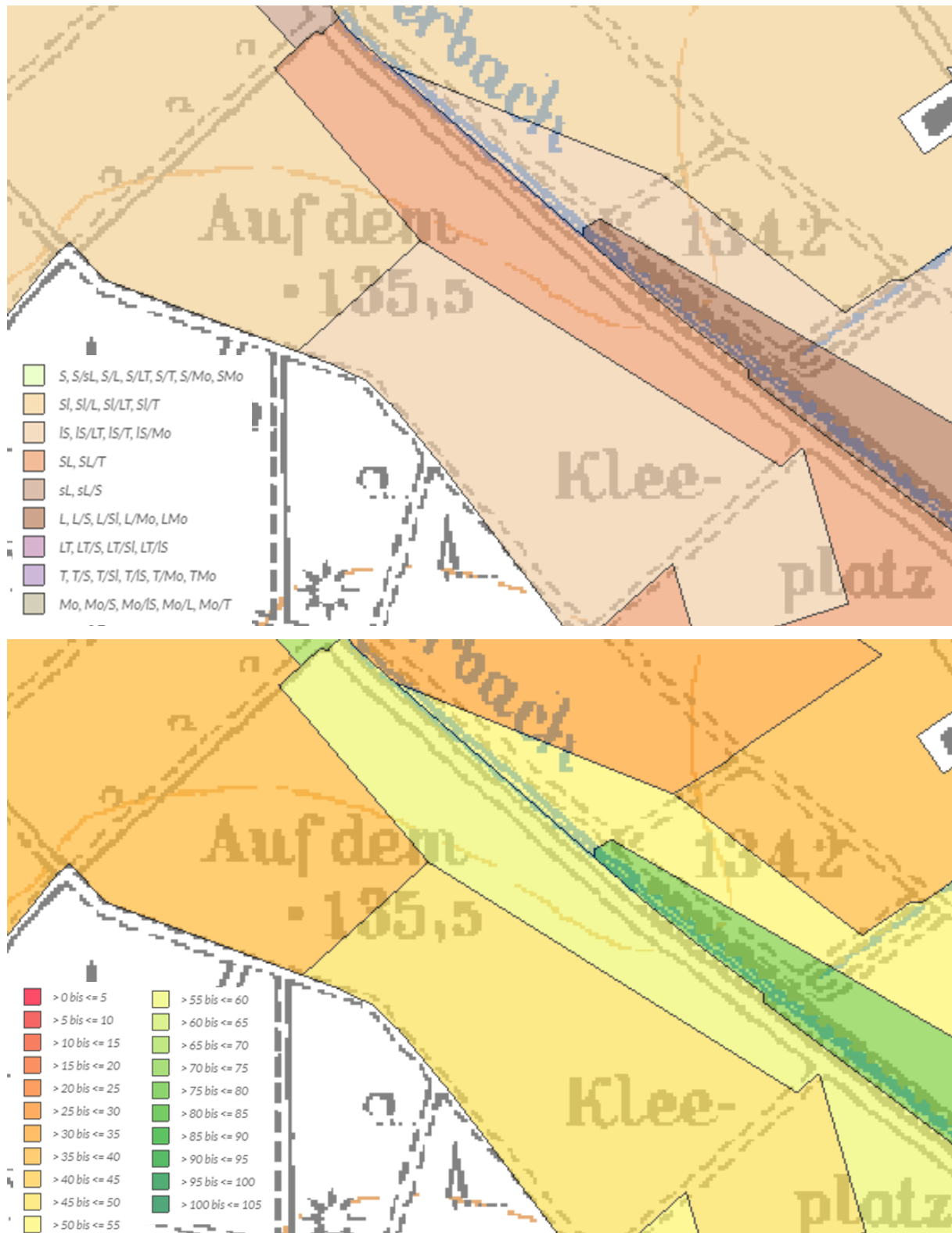


Abbildung 6: Farbliche Darstellung der Bodenart (oben) sowie der Ackerzahl (unten) eines Kartenausschnitts der Gemarkung Langstadt, der u.a. die Schläge "Kleeplatz" und "Hammchesberg" umfasst (Auszug aus dem Bodenviewer Hessen (Weinberger et al. 2017))

Anders als bspw. Daten der EC_a , welche Bodenheterogenität als solche darstellen, liefert die Bodenschätzung konkrete erklärende Informationen über den Boden. Die übliche Vorgehensweise und vorhandene Schätzungen bietet auch Fehlerquellen, da sie dem Bodenschätzer einen großen Spielraum für Interpretationen lässt. Auch kann nicht sicher gesagt werden, dass in zusammengefassten Klassenzeichenflächen auch tatsächlich vergleichbare Wachstums- und Ertragsbedingungen vorliegen. Jedoch könnte die Bodenschätzung auf der Grundlage zuvor erfasster Standortheterogenität die Genauigkeit von Bodenkarten verbessern und so die räumliche Genauigkeit von erklärender Information erhöhen.

3.3.2.2 Digitale Geländemodelle und Topografischer Feuchteindex

Georeferenzierte Höhendaten eignen sich dazu, das Relief eines Schlags darzustellen. Daraus können weitere Informationen z.B. über den Wasserzufluss errechnet werden. Hierzu wird in einer Betrachtung unabhängig vom jeweiligen Schlag das Einzugsgebiet des Wassers mit den vorliegenden topographischen Eigenschaften verrechnet. Eine Möglichkeit dies darzustellen ist der Topographische Feuchteindex (TWI = topographic wetness index) (Beven und Kirkby 1979). Das Julius-Kühn-Institut (2022) definiert den TWI wie folgt: „Der TWI beschreibt das reliefbedingte Abflussverhalten und gilt als Maß für die reliefbedingte Bodenfeuchte. Er ist eine Funktion der Neigung und des Wassereinzugsgebietes.“ Die Bodenfeuchte ist für das Wachstumsverhalten der Pflanzen und deren Ertrag entscheidend. In Kapitel 2.3 wird hierzu die nFK als Kennzahl für das Wasserhaltevermögen von Böden angegeben und beschreibt, wie viel Wasser den Pflanzen über den Boden bereitgestellt werden kann. Diese ist nur bedingt durch den TWI erklärbar, da dieser das topographisch bedingte Abflussverhalten des Wassers im Gelände erklärt, nicht aber wie gut der Boden an dieser Stelle das Wasser halten kann. Dennoch wird der TWI dazu verwendet, Bodenfeuchte zu erklären (Kopecky et al. 2021). Dies liegt vor allem daran, dass auf Teilflächen mit einem hohen Wasserzufluss tendenziell auch mehr Wasser vorhanden ist, welches nicht durch den Niederschlag an dieser Stelle erklärt werden kann. Die topographischen Verhältnisse können somit ursächlich für die potenzielle Bodenfeuchte auf einer Teilfläche sein, ohne dass diese durch Unterschiede hinsichtlich des vorliegenden Bodens zu erklären wären. In topographisch besonders markantem Gelände ist jedoch oftmals erosionsbedingt der Boden an sich heterogen, weshalb die Variabilität der Bodenfeuchte häufig auch die Variabilität der Bodeneigenschaften erklärt (Lorenz und Münchhoff 2015, S. 53). Ein beispielhafter Ausschnitt des TWI ist für die drei Versuchsstandorte aus Kapitel 8 im Anhang dargestellt.

3.3.2.3 Georeferenzierte Bodenuntersuchung

Vergleichbar mit einer georeferenzierten Bodenschätzung liefern teilflächenbezogene bzw. georeferenzierte Bodenuntersuchungen erklärende Informationen über beobachtete Heterogenität. Nach Yuzugullu et al. (2020) ist es entscheidend für den Erfolg von PF-Anwendungen, dass Informationen über die Bestandsheterogenität bzw. beschreibende Informationen zur Optimierung ertragsrelevanter Faktoren der Teilflächen verwendet werden. Die Autoren schreiben dazu: *„It is essential to emphasize the link between crop performance and the properties of the underlying soil to be able to investigate the changes in the field.“* (S. 2) Nach zuvor bestimmten Teilflächen erfolgt die Beprobung auf festgelegten Routen durch mehrere Einstiche innerhalb dieser Fläche. Dieses Vorgehen wird u.a. von Lorenz und Münchhoff (2015, S. 76) erklärt. Die georeferenzierte Bodenuntersuchung unterscheidet sich nicht wesentlich von klassischen Bodenproben. Auch hier sollen bezogen auf eine zuvor definierte Bewirtschaftungseinheit Informationen über die für das Pflanzenwachstum relevante Nährstoffversorgung und Bodeneigenschaften gewonnen werden. Die Darstellung der Ergebnisse kann vereinfacht über eine entsprechende Farbgebung für Versorgungsklassen mit GIS-Anwendungen erfolgen und dem Landwirt so zur Verfügung gestellt werden. Der Fokus auf Versorgungsklassen ist entscheidend, da abhängig von der vorliegenden Bodenart andere Werte für die Makronährstoffe und den pH-Wert anzustreben sind. So ist bspw. ein pH-Wert von 5,5 für einen Sandboden ideal, während für Lössböden ein pH-Wert von 7,0 anzustreben ist. Schwanken die Böden auf einem Schlag, so variiert auch der anzustrebende pH-Wert und Gehalt an Makronährstoffen (Amelung et al. 2018, S. 199). Aus diesem Grund ist es entscheidend, dass neben der Nährstoffversorgung auch die Bodenart auf den jeweiligen Teilflächen erfasst wird. Ein neben den Makronährstoffen und dem pH-Wert für die Ertragsbildung kritischer Bodenparameter ist u.a. der Anteil organischer Masse (SOM²⁵, siehe hierzu Gebauer et al. (2019) und Amelung et al. (2018, S. 95) in Kapitel 2.2²⁶).

²⁵ SOM = Soil organic matter

²⁶ Gebauer et al. (2019) beschreiben den Humusanteil, der abhängig von der Bodenart in landwirtschaftlich genutzten Böden zu finden ist. Die Umsetzungsraten von organischem Material und Humus sind abhängig vom Boden sehr unterschiedlich. Aus diesem Grund ist zur Optimierung des Kohlenstoffgleichgewichts im Boden jeweils eine andere Bewirtschaftung erforderlich (Amelung et al. 2018, S. 95ff). Yuzugullu et al. (2020) erklären daher die Relevanz der jeweiligen Bodeneigenschaften auf die Ertragsoptimierung: *„Understanding the chemical, biological and physical properties of soils, such as pH, SOM and texture, is crucial for optimizing field management.“* (S. 2)

3.3.2.4 Erfahrung des Bewirtschafters

Die Bewirtschaftung im Ackerbau unterliegt der Entscheidung des Landwirts im Rahmen rechtlicher und fachlicher Anforderungen. Er kann entlang der Entscheidungsprozesse durch digitale Datenerfassung auch im Rahmen von PF unterstützt werden (Ostheim 2000, S. 104ff). Somit kann das Wissen des Bewirtschafters durch weitere Informationen ergänzt werden, um Managemententscheidungen zu optimieren. Hinck et al. (2016, S. 5) stellen hierzu den Zusammenhang zwischen erfasster Standortheterogenität und der Entscheidungskompetenz²⁷ des Bewirtschafters her: „Idealerweise kann der Landwirt seine langjährige Erfahrung mit den erfassten Standortinformationen kombinieren und so z.B. auf witterungsbedingte Besonderheiten reagieren.“ Gleichzeitig stellen die Autoren fest, dass die eigene Beobachtung einer Fläche „die einfachste und kostengünstigste Möglichkeit [ist] Unterschiede zu erfassen.“ (S. 16) Hierzu wird von Heijting et al. (2011) untersucht, ob dieser Ansatz ein geeigneter Startpunkt für die Umsetzung von PF auf einem Betrieb ist. Auch von Lorenz und Münchhoff (2015, S. 65) wird der Bewirtschafters bezüglich der Erfassung von Standortheterogenität der erklärenden Information zugeordnet, der bspw. Wissen über die Schlaghistorie hat. Heijting et al. (2011) beschreiben, dass die Bewirtschafters vorhandene Standortheterogenität (und Bestandsheterogenität) beobachten. Hierzu wurden auf vier Ackerbaubetrieben in den Niederlanden bewirtschaftete Schläge hinsichtlich ihrer Standortheterogenität charakterisiert. Bezüglich der Unterschiede des Bodens stellen die Autoren fest, dass insbesondere bei der Bodenbearbeitung Unterschiede durch den Landwirt bemerkt werden. Neben den so beobachteten bodenphysikalischen Eigenschaften (bspw. durch Widerstand bei der Bearbeitung, Textur, Abtrocknung) konnten die Landwirte mit ihrem Wissen über die historische Landnutzung Bereiche mit hoher Fruchtbarkeit identifizieren. Die qualitative Beschreibung der so angelegten Teilflächen („*management zones*“) konnte weitgehend durch die anschließende Bodenanalyse bestätigt werden. Die so entstandene „mentale Karte“ („*mental map*“) (Heijting et al. 2011) ist ein Ergebnis aus der bei der jahrelangen Bewirtschaftung erfassten und in die Entscheidungsprozesse integrierten Information durch den Landwirt. Es konnte gezeigt werden, dass die Landwirte raumbezogenes Wissen haben, wenn es darum geht Teilflächen zu erstellen. Außerdem stellte sich heraus, dass die Landwirte im Rahmen ihrer technischen und organisatorischen Möglichkeiten dieses Wissen bei Entscheidungsprozessen nutzen und bereits eine vereinfachte Form von PF umsetzen. Fleming et al. (2000) gehen einen

²⁷ Es ist das raumbezogene Wissen über Standortheterogenität von der Entscheidungskompetenz des Landwirts bezüglich Düngermenge und der Nutzung von Information zu unterscheiden. Während Informationen über die Standortheterogenität rein deskriptiv sind, unterliegen konkrete Bewirtschaftungsentscheidungen auch dem Risikobewusstsein des Entscheiders und Annahmen über Konsequenzen dieser Entscheidung.

Schritt weiter und evaluieren die von Landwirten identifizierten Teilflächen bei der teilflächenspezifischen Düngung. Sie stellen fest, dass die Bewirtschafter qualitatives Wissen darüber haben, welche Bereiche eines Feldes höhere und welche niedrigere Ertragsfähigkeit aufweisen (S. 203). Den Landwirten wurden zur qualitativen Einordnung drei ordinalskalierte Werte vorgegeben. Es zeigt sich, dass vom Bewirtschafter angelegte Teilflächen sich dafür eignen, Standortheterogenität zumindest zu beschreibend und qualitativ zugeordnet werden können. Für die Ermittlung der nötigen Düngermenge sind Bodenproben weiterhin unverzichtbar, können jedoch in den zuvor definierten Teilflächen durchgeführt werden (S. 213). Zwar bemängeln einige Wissenschaftler die agronomische Relevanz dieser teilweise sehr detaillierten Informationen (Shaner et al. 2008). Heijting et al. (2011, S. 504) kommen jedoch zum genau gegensätzlichen Schluss. Die Autoren sehen es als problematisch an, dass die wachsende Fokussierung auf technische Datenerfassung und wachsende Betriebsgrößen für PF wertvolles Wissen des Bewirtschafters vernachlässigt.

Hier könnte ein wesentliches Hindernis für die Implementierung von PF in landwirtschaftlichen Betrieben liegen. Der Fokus der Forschung und weiterer Stakeholder innerhalb des landwirtschaftlichen Entwicklungsprozesses ist nach Lindblom et al. (2017) auf die technische Optimierung fokussiert (*technology fix*). Die Autoren bemängeln, dass die mangelhafte systemische Ausrichtung auf den Anwender (*user-centered design*) von Systemen der Entscheidungsunterstützung (*agricultural decision support systems*) eine Weiterentwicklung hin zu einer nachhaltigeren Landnutzung verhindert oder zumindest bestehendes Potenzial und Wissen ungenutzt lässt. Dieses liegt demnach zu einem nicht unerheblichen Teil beim Landwirt als zentralen Entscheider. Die mangelhafte Berücksichtigung betriebs- und personenspezifischer Eigenschaften und Entscheidungssituationen (*less participatory fix*) in Entscheidungsunterstützungssystemen führt zu einem Implementierungsproblem. Dies zeigt sich in einer Diskrepanz zwischen Forschungs- bzw. Entwicklungsstand einerseits und praktischer Umsetzung und Verbreitung andererseits („*gap of relevance*“) (Lindblom et al. 2017, S. 311). Diese Überlegungen decken sich mit den Erkenntnissen von Paustian und Theuvsen (2016, 2017) und Schimmelpfennig und Lowenberg-Deboer (2020). Auch Mohr und Köhl (2021) stellen fest, dass die relevanten Stakeholder, insbesondere die Landwirte als Anwender, bei der Entwicklung neuer Technologien (im konkreten Fall der Studie bei der Entwicklung selbstlernender Systeme) berücksichtigt werden sollten. Mit Verweis auf weitere Studien plädieren Lindblom et al. dafür, nicht zwischen *technology fix* und *participation fix* zu unterscheiden, sondern die beiden Ansätze miteinander zu verbinden. Zielsetzung sollte es demnach sein, PF durch die Implementierung von an betriebsindividuelle

Entscheidungsprozesse und lokales Wissen angepassten Entscheidungsunterstützungssystemen zu verbreiten und deren Nutzen hinsichtlich Ressourceneffizienz und nachhaltiger Landnutzung zu generieren.

Es zeigt sich, dass spezifisches Wissen des Landwirts einen wertvollen Beitrag bei der Implementierung von PF leistet (Yuzugullu et al. 2020). Auch ist er die Schlüsselfigur für die Investitionen in entsprechende Technik auf seinem Betrieb, die ihm weitere Informationen zur Entscheidungsfindung liefern könnten. Um Entscheidungssituationen des Landwirts theoretisch nachvollziehen zu können, lohnt ein Blick in die Grundlagen der Entscheidungstheorie.

4. Entscheidungstheoretische Grundlagen

4.1 Risiko in Entscheidungssituationen

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Risiko mit dem Eintreten eines konkreten Schadensereignisses erklärt. Das können im landwirtschaftlichen Kontext bspw. Hagelschäden oder Dürren sein. Diese „erste Definition“ (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 2) des Risikobegriffs unterstellt nur zwei Umweltzustände: Eintritt oder Nicht-Eintritt des Schadensereignisses. Diese Sichtweise beschreibt Risiken jedoch unzureichend. Hirschauer und Mußhoff (2012, S. 3) nennen den Begriff der Dürre als ein Beispiel, welches aufgrund mehr oder weniger hohen Niederschlägen nicht als binärer Umweltzustand beschrieben werden kann. In einer allgemeineren Definition beschreiben die Autoren Risiko als die Unwissenheit darüber, „welche Zustände (Werte) eine bestimmte Zielgröße in der Zukunft einnehmen wird.“ (S. 3) Karatay und Meyer-Aurich (2020; nach Berg und Starp 2006, S. 451) fassen es zusammen: „*Risk can be defined as the uncertainty of outcomes.*“ In dieser Beschreibung findet sich die ungenaue Differenzierung zwischen Risiko (*risk*) und Unsicherheit (*uncertainty*). Die Abschätzung von Risiken ist ein Ansatz über die Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeiten dem Problem von Unsicherheit über die zukünftigen Ausprägungen von Zufallsvariablen in Entscheidungssituationen zu begegnen. In Risikosituationen sind die Wahrscheinlichkeiten über den Eintritt von Ereignissen bekannt oder aufgrund vorliegender Daten berechnet worden, während bei Unsicherheit keinerlei Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeit vorliegen (Frambach 2019, S. 221). Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der Landwirt dem Eintreten von Umweltbedingungen und Marktsituationen bei seinen Entscheidungen immer eine Eintrittswahrscheinlichkeit beimisst, weshalb der Begriff des Risikos verwendet wird.

Abhängig von der individuellen Einstellung des Entscheiders bezüglich des Risikos unterscheidet sich auch dessen Zielgröße. Während ein risikoneutraler Entscheider sich allein am mathematischen Erwartungswert einer Zielgröße orientiert, präferiert ein risikoaverser Entscheider bei gleichem Erwartungswert die Alternative mit geringerem Risiko. Die Zielgröße des mathematischen Erwartungswerts ist für ihn nicht allgemeingültig, sondern wird durch die individuelle Risikopräferenz erweitert. Er wählt die Alternative mit dem höchsten Erwartungswert des Nutzens, der sich anhand seiner Risikonutzenfunktion ergibt (Hirschauer und Mußhoff 2012, 63ff). Da unternehmerische Entscheidungen immer risikobehaftet sind können Entscheidungen bezüglich einer ausschließlichen Optimierung des Erwartungswertes nur getroffen werden, „wenn der Entscheider risikoneutral ist“ (Eisenführ und Weber 2003, S. 19). Wenn Entscheider nicht risikoneutral sind, kann die Zielgröße einer Entscheidung somit nicht der Erwartungswert einer Alternative sein, sondern sollte sich am Risikonutzen bzw. dem Erwartungswert des Nutzens orientieren. Dieser ergibt sich aus der individuellen Risikonutzenfunktion des Entscheiders (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 63ff). Danach bedarf es einer Quantifizierung von Risikoaversion.

4.1.1 Risikoarten in der Landwirtschaft

Landwirtschaft befasst sich mit der Erzeugung von Primärprodukten u.a. mit natürlichen Produktionsfaktoren (z.B. Boden und Niederschlag) und lebenden Organismen (Pflanzen und Tiere). Das grundsätzliche Risiko der landwirtschaftlichen Urproduktion besteht demnach in der nicht oder nur begrenzt vorherzusehenden Witterung und der unsicheren Leistungsfähigkeit von Pflanzen und Tieren. Neben diesem sog. Produktionsrisiko bestehen weitere Geschäfts- und Finanzrisiken, die das Schaubild in Abbildung 7 schematisch darstellt.

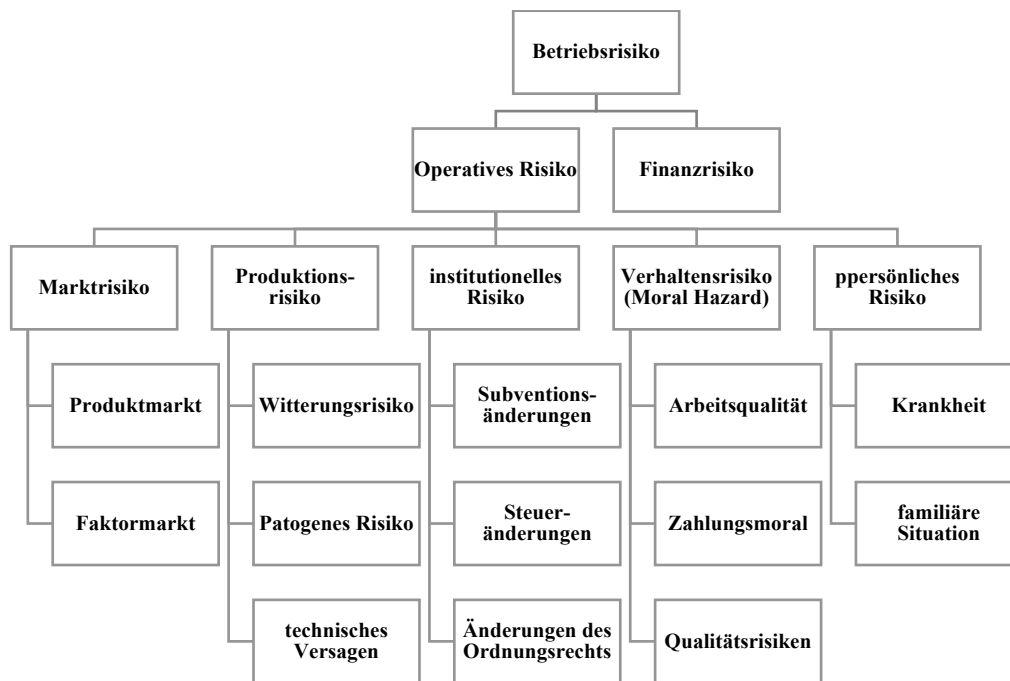


Abbildung 7: Risikoarten eines landwirtschaftlichen Betriebs (eigene angepasste und ergänzte Darstellung nach Hirschhauer und Mußhoff 2012, S. 9)

Das Produktionsrisiko ist aufgrund der Relevanz verschiedener natürlicher Einflüsse spezifisch für die Landwirtschaft (Hardaker et al. 2015, S. 5). Daneben unterliegt der wirtschaftliche Erfolg, wie in den meisten anderen Branchen auch, der Unsicherheit über Produkt- und Faktorpreise und der Marktsituation allgemein, was als Markt- oder Preisrisiko beschrieben werden kann (Hardaker et al. 2015, S. 5; Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 9). In einer globaleren Betrachtung über die Betriebsgrenzen hinaus, ist der Markt für landwirtschaftliche Erzeugnisse neben der Nachfrage wiederum von den äußeren Bedingungen (Witterung, Gesundheitszustand der Pflanzen und Tiere) abhängig, unterliegt also dem Produktionsrisiko. Aufgrund eines zunehmend globalisierten Marktes für weltweit gehandelte Agrarrohstoffe (Weizen, Mais, Raps, Soja) sinkt der Einfluss regionaler Witterungsverhältnisse auf den Weizenpreis. Unabhängig vom wirtschaftlichen Erfolg des landwirtschaftlichen Betriebs muss dieser finanziellen Verpflichtungen für nicht betriebseigenes Kapital nachkommen (Fremdkapital, Pachtland). Die mögliche Änderung der Konditionen (Zins, Pachtpreis) bzw. der Kosten dieses Kapitals werden als Finanzrisiko bezeichnet (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 9). Für Investitionen in PF stellen Karatay und Meyer-Aurich (2020, S. 451) fest, dass diese das finanzielle Risiko des Betriebs steigern können. Ein weiterer wesentlicher äußerer Faktor, welcher (mittel- und langfristige) Entscheidungen in der Landwirtschaft beeinflusst, sind politische Rahmenbedingungen. Im konkreten Fall der N-Düngung schränken Auflagen der DüV u.U. die physiologisch und ökonomisch optimale Düngung ein. Darüber hinaus ist ein

großer Teil des Gewinns von landwirtschaftlichen Betrieben auf staatliche Subventionszahlungen zurückzuführen (Schmitz et al. 2013). Eine Änderung der Förderhöhe hätte einen großen Einfluss auf den wirtschaftlichen Erfolg und auf die unternehmerischen Entscheidungen des Landwirts. Neben dem Begriff des institutionellen Risikos (Hardaker et al. 2015, S. 5) kann auch von Politikänderungsrisiko gesprochen werden (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 10). Den entscheidenden Institutionen ist in diesem Fall kein direkter Eigennutz zu unterstellen. Anders stellt sich dies im Fall des Verhaltensrisiko dar (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 10). Der Begriff des *Moral Hazard*²⁸ beschreibt opportunistisches Verhalten von Geschäftspartnern oder anderen Stakeholdern außerhalb und innerhalb eines Unternehmens. Beispiele hierfür sind die Qualitätsunsicherheit bei der Beschaffung von Betriebsmitteln, Arbeitsqualität von Mitarbeitern oder die Zahlungsmoral von Abnehmern. Neben äußeren Risikofaktoren unterliegen Entscheidungen auch dem individuellen Verhalten des Entscheiders. In Bezug auf landwirtschaftliche Betriebe schreiben Hardaker et al. (2015), dass die Landwirte selbst eine Ursache für Risiko im Hinblick auf die Profitabilität und Nachhaltigkeit ihres eigenen Betriebs sein können. Sie beziehen sich dabei vor allem auf persönliche und familiäre Situationen und Verhältnisse, die Entscheidungen von Landwirten beeinflussen können. Da viele landwirtschaftliche Betriebe in Deutschland familiengeführte Einzelunternehmen oder Personengesellschaften mit vergleichsweise wenigen Mitarbeitern sind (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021), spielt das personenbezogene Risiko eine entscheidende Rolle für allgemeinen Erfolg oder Misserfolg des Betriebs.

Für die Wirtschaftlichkeit von PF-Technologien sind vor allem Produktionsrisiko, Marktrisiko und Finanzrisiko relevant (Karatay und Meyer-Aurich 2020, S. 451). Der Entscheidung der ökonomisch optimalen N-Düngung liegt neben der Unsicherheit über den zu erzielenden Weizenpreis (Marktrisiko) auch Produktionsrisiko zugrunde. Wie aus Kapitel 2 hervorgeht, sind u.a. die Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Kornfüllung ausschlaggebend für den Ertrag des Weizens. Der Landwirt kann zu diesem Zeitpunkt jedoch üblicherweise (es sei denn er verfügt bei mangelndem Niederschlag über die Möglichkeit einer Beregnung) keine Maßnahmen mehr ergreifen, diesem Risiko zu begegnen. Politikänderungsrisiken spielen für die mittel- bis langfristige Betrachtung der N-Düngung eine Rolle. Zum Zeitpunkt der Entscheidung über die N-Düngung sind die institutionellen Rahmenbedingen für den betreffenden Planungshorizont bis zur Ernte des Weizens bekannt. Die Kosten der N-Düngung

²⁸ Moral Hazard bezeichnet ein Fehlverhalten oder Leichtsinns von Geschäftspartnern, welches aufgrund ökonomischer Fehlanreize entsteht. Eine der Parteien kann demnach aufgrund dieser Fehlanreize von vereinbarten Konditionen abweichen, da es für ihn wirtschaftlich vorteilhaft ist dies zu tun. Albers und May (2008, S. 438) nennen als Beispiel die Verhaltensänderung eines Entscheiders nach Abschluss einer Versicherung.

kennt der Landwirt ebenfalls, da er zum Zeitpunkt der Düngung den Dünger üblicherweise bereits eingekauft hat. Ex-ante trifft er Annahmen über Umweltzustände während der Vegetationsperiode, Leistungsfähigkeit der Sorte und des Standorts sowie einem kalkulatorischen Weizenpreis, den er mit dem Verkauf erzielen kann, sofern er diesen noch nicht vollständig über Vorkontrakte abgesichert hat. Mit Hilfe dieser Annahmen optimiert er unter gegebener Risikopräferenz seine Entscheidung. Da es sich um ein kalkulatorisches Optimum handelt, bezeichnet man dies auch als ex-ante-Optimalität (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 7). Aufgrund der unbekanntenen Umweltzustände (bspw. N-Mineralisation, Produkt- und Faktorpreisschwankungen) ist die ex-post-Optimalität in der Praxis nur zufällig erreichbar (Karatay und Meyer-Aurich 2020, S. 451). Hirschauer und Mußhoff (2012, S. 8) beschreiben zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts das Casino-Syndrom, bei dem ein Spieler nur durch Zufall Geld gewinnt, langfristig aber nicht das optimale Ergebnis erreichen kann. Die Autoren stellen deshalb fest: „Die Zukunft ist unsicher! Man kann im Planungszeitpunkt nur versuchen, diejenige Entscheidung zu fällen, die im Lichte der verfügbaren Informationen die beste ist.“ Welches das beste Ergebnis ist, hängt von der Risikopräferenz des Entscheiders ab. Dieser kann entweder den Erwartungswert der Entscheidung oder deren erwarteten Nutzen (Erwartungsnutzen) maximieren. Bei sinkender Risikoaversion (und zunehmender Risikoneutralität) geht die Maximierung des Erwartungsnutzens in die Maximierung des Erwartungswerts über.

4.1.2 Risikopräferenz von Landwirten

Um einzelbetriebliche Instrumente der Entscheidungsunterstützung adäquat einzusetzen, muss die subjektive Risikopräferenz des Entscheiders berücksichtigt werden (Ewald et al. 2012, S. 159). Wie zuvor beschrieben, optimiert der Entscheider den Erwartungswert der Entscheidung und bei zunehmender Risikoaversion den Erwartungsnutzen. Dementsprechend unterscheidet sich auch die Herangehensweise eines Entscheidungsunterstützungsmodells. Einem risikoneutralen Entscheider kommt es lediglich auf den Erwartungswert als Zielgröße an. Er gewichtet die Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikos und stellt in der ökonomischen Theorie das Idealbild des *homo oeconomicus* dar. Abweichend hierzu gibt es risikofreudige und risikoaverse Entscheider. Während der risikofreudige Entscheider bei mehreren zur Auswahl stehenden Alternativen diejenige mit dem höheren Risiko wählt, verhält sich ein risikoaverser Entscheider bei gleichem Erwartungswert genau umgekehrt. Für ihn „besteht ein Zielkonflikt zwischen dem Einkommens- und Sicherheitsstreben.“ (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 63) Da der Erwartungswert einer Entscheidungssituation das Risiko unberücksichtigt lässt, eignet

sich dieser für einen risikoaversen Entscheider nur bedingt. Er wird den Erwartungsnutzen optimieren, indem ein Risikomaß mit der Risikopräferenz gegenüber dem Erwartungswert gewichtet wird. „Dabei werden zunächst alle Handlungsergebnisse über eine Risikonutzenfunktion in dimensionslose kardinale Nutzeinheiten übersetzt.“ (Berg 2012, S. 13) Dann werden die Nutzeinheiten mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit gewichtet und aggregiert (Erwartungsnutzen). Die Alternative mit dem höchsten Erwartungsnutzen wird präferiert. Der Entscheider gibt sich mit einem geringeren Ertrag zufrieden, als dieser theoretisch möglich wäre. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom Sicherheitsäquivalent. Dieses entspricht dem monetären Ertrag unter Sicherheit, der den gleichen Nutzen wie die vorliegende risikobehaftete Entscheidung erbringt (Karatay und Meyer-Aurich 2020, S. 452). Die Differenz zwischen Erwartungswert und Sicherheitsäquivalent ist die Risikoprämie, die der Entscheider für die Übernahme des Risikos fordert. „Dies ist nichts anderes als der kritische Trade-off zwischen den Zielen Einkommen und Sicherheit, der zu Kombinationen von Einkommenserwartung und Risiko führt, bei denen der jeweilige Erwartungswert denselben Nutzen hat, also indifferent ist.“ (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 64). In Abbildung 8 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt.

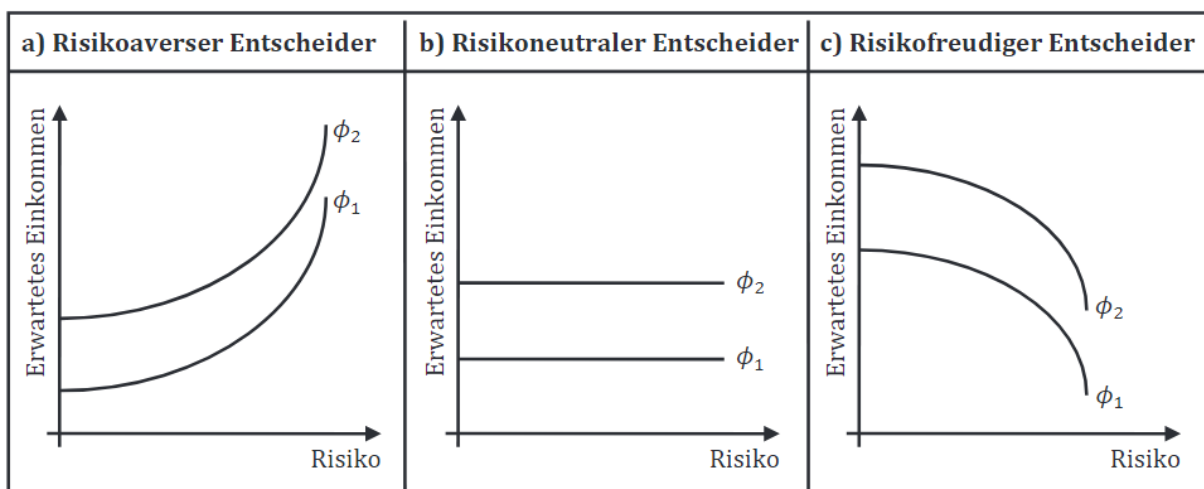


Abbildung 8: Indifferenzkurven für verschiedene Risikoeinstellungen (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 64)

Um zu verstehen, wieso Risikoaversion in der Praxis weit verbreitet ist, lohnt sich ein Blick auf die erste Definition von Risiko nach Hirschauer und Mußhoff (2012). Die Autoren machen deutlich, dass im allgemeinen Sprachgebrauch Risiko als die Wahrscheinlichkeit des Eintretens negativer Ereignisse oder eines Verlusts verstanden wird. Der Begriff wird mit einem negativeren Ergebnis als die jeweilige Zielgröße assoziiert (Berg und Starp 2006, S. 4). Dieses Verständnis ist bei risikoaversen Entscheidern daher weit verbreitet. Sie bewerten das Sicherheitsäquivalent einer weniger riskanten aber weniger lukrativen Alternative höher als das

Sicherheitsäquivalent einer lukrativen, aber riskanteren Alternative. Da das Sicherheitsäquivalent in der gleichen Rangfolge wie der entsprechende Erwartungsnutzen liegt, jedoch im Gegensatz zum Erwartungsnutzen in einer monetären Einheit (bspw. €/ha) beschrieben wird, wird es oftmals dazu verwendet den Nutzen verschiedener Handlungsalternativen zu spezifizieren (Monjardino et al. 2013). Monjardino et al. (2015) untersuchen die Risikopräferenz von Landwirten bei der N-Düngung, indem sie die Sicherheitsäquivalente verschiedener Handlungsalternativen vergleichen. Sie kommen zu dem Schluss, dass Landwirte mehr oder weniger risikoaverse Entscheidungen treffen. Die Landwirte gewichten die Risikoprämiendifferenz höher als die Gewinndifferenz. Während das Sicherheitsäquivalent die allgemeine Berücksichtigung der Variabilität (die Existenz von Risiko) in beide Richtungen (Gewinne und Verluste) betrachtet, orientiert sich das Downside-Risk nur an der Veränderung nach unten und nicht an möglichen Verlusten (Karatay und Meyer-Aurich 2020, S. 452; Lowenberg-Deboer 1999). Die Beschreibung des Downside-Risk geht zurück auf die Portfoliotheorie nach Markowitz (1952), mit der er einen quantitativen Rahmen für das Risiko eines Portfolios und Zahlungen daraus erstellte. Somit kann der Fokus neben dem möglichen Erwartungswert auch auf das Risiko einer Anlage oder allgemein einer Entscheidung gelegt werden (Nawrocki 1999, S. 9). Dieses eigentlich finanzökonomische Modell findet inzwischen bei verschiedenen Entscheidungssituationen außerhalb der Finanzwelt Anwendung und eignet sich auch, um das Entscheidungsverhalten von Landwirten zu beschreiben. Wie in Kapitel 2.5 angeschnitten, spielt Downside-Risk (noch nicht unter diesem Begriff beschrieben) auch bei der N-Düngung von Weizen eine wichtige Rolle. Die Unsicherheit dieser Entscheidungssituation ist nach Sieling et al. (2011, S. 170) darin begründet, dass die optimale N-Düngung von Jahr zu Jahr aufgrund der unterschiedlich ausgeprägten Umweltfaktoren und veränderlichen Produkt- und Faktorpreisen schwankt. Zur Vermeidung von entgangenem Einkommen in guten Ertragsjahren hat der risikoaverse Landwirt den Anreiz, ein höheres Düngenniveau zu wählen als es für einen risikoneutralen Landwirt optimal wäre. Wagner (1995) beschreibt dies als eine Art „Versicherung“, deren Kosten denen für die erhöhte N-Düngung entsprechen. Das daraus resultierende entgangene Einkommen ist, im Fall einer neoklassischen (quadratischen) Produktions- bzw. Ertragsfunktion, in schwachen oder durchschnittlichen Ertragsjahren geringer als der entgangene Nutzen in guten Ertragsjahren. Dies führt zu einer systematisch höheren N-Düngung, als sie im Mittel der Jahre ökonomisch sinnvoll wäre. Dennoch kann diese ineffiziente Entscheidung für einen risikoaversen Entscheider ex-ante nutzenmaximierend sein. Die schon in Kapitel 2.5 zitierte Feststellung von Monjardino et al. (2015) („*Farmers typically*

respond to this situation by making risk-averse decisions that are neither yield- nor profit-maximising.“) beschreibt die Situation bei Risikoaversion. Die Maximierung des Erwartungsnutzens hingegen macht eine erhöhte N-Düngung erforderlich. Bei sinkenden Getreidepreisen oder steigenden Düngerkosten ohne gleichzeitige Getreidepreissteigerung sinkt der Nutzen der unangepassten Düngung (Kuhlmann und Neumann 2011). Der grundsätzliche Effekt bleibt jedoch erhalten. Diesen theoretischen Zusammenhang zwischen risikoaversen und risikoneutralen Entscheidungen über die N-Düngung scheinen die Daten von Heyn (2010) sowie Henke et al. (2007) zu bestätigen. Wie aus Kapitel 2.4 hervorgeht, kann eine unangepasste N-Düngung negative Umwelteffekte, wie bspw. langfristig eine Nitratbelastung des Grundwassers, auslösen. Die Feststellung von Monjardino et al. (2015) muss aus diesem Grund dahingehend ergänzt werden, dass risikoaverse Entscheidungen bezüglich der N-Düngung neben nicht-optimalen Erträgen und Einkommen auch zu erhöhten ökologischen Kosten beitragen.

4.1.3 Risikomanagement

Um die Unsicherheit über Umweltzustände zu begrenzen bzw. sich an risikobehaftete Situationen anzupassen, gilt es ein entsprechendes Risikomanagement umzusetzen. Hirschauer und Mußhoff (2012, S. 33) definieren zwei wesentliche Vorgehensweisen. Einerseits gilt es, die Streuung von Zufallsgrößen zu reduzieren. Andererseits besteht Risikomanagement daraus, Abschätzungen über die zukünftige finanzielle Situation des Betriebs oder eines Produktionsverfahrens zu treffen, die auf der Auswertung des bisherigen Vorgehens beruhen. Die Autoren schlagen hierzu die Brücke zum Controlling, das „die Verbesserung unternehmerischer Entscheidungen durch eine verbesserte Informationsbereitstellung“ (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 33) zum Ziel hat. Bezüglich der Planung von Produktionsverfahren und bestimmten Arbeitsgängen kommt vor allem das ex-ante-Risikomanagement zum Tragen. Dabei geht es u.a. um die Reduktion von Negativausprägungen des Erwartungswerts, was durch Diversifizierung und Versicherungen erreicht werden kann. Es hat sich gezeigt, dass Landwirte solche Maßnahmen bereits ergreifen. Ein Beispiel ist die Aufteilung der Düngermengen für Weizen auf mehrere Gaben oder der Anbau verschiedener Kulturen (Fruchtfolge). Außerdem ist Controlling durch eine verbesserte Bereitstellung von Informationen dazu in der Lage, die Entscheidungsqualität zu erhöhen. Dies stellt aus pflanzenbaulichen Gesichtspunkten u.a. die Nmin-Beprobung zu Vegetationsbeginn oder weitere Boden- und Pflanzenanalysen dar. Erträge aus der Vergangenheit oder die langjährige Erfassung von Umweltzuständen eignen sich dazu, realistische Ertragserwartungen

treffen zu können. Hirschauer und Mußhoff (2012, S. 34) stellen fest, dass die „Informationen in einem angemessenen Verdichtungsgrad“ bereitgestellt werden sollten, um effiziente Entscheidungen treffen zu können. Eisenführ und Weber (2003, S. 21) gehen daher auf die „Zweckmäßigkeit“ der Modellierung einer Entscheidungssituation ein. Hierzu ist es bspw. sinnvoll, kontinuierliche Variablen zu diskretisieren, um die Entscheidungssituation zu vereinfachen und dennoch sinnvoll abzubilden. Dies gilt bei der Modellierung der N-Düngung für die Diskretisierung von kontinuierlichen Umweltfaktoren, wie z.B. Niederschlagsmengen, Temperatur oder der Ertragsleistung einer Sorte. So können bspw. verschiedene Niederschlagsmengen in diskrete Klassen zusammengefasst werden (hoch, mittel, niedrig) oder „gute Jahre“ von „schlechten Jahren“ unterschieden werden, indem diese in einer ordinalen Skala bewertet werden. Dies ermöglicht es dem Landwirt, für verschiedene Umweltsituationen sinnvolle Annahmen und anschließend Entscheidungen zu treffen. Eine weitere Möglichkeit ist die Annahme einer bestimmten Verteilung der Ausprägungen einer Zufallsvariablen. In der Praxis hat sich bei kontinuierlichen Variablen die Annahme einer Normalverteilung bewährt. Dabei wird von einem z.B. durch historische Beobachtungen ermittelten Erwartungswert und einer entsprechenden Standardabweichung ausgegangen und eine Verteilung in Form einer Glockenkurve angenommen. Der Entscheider berücksichtigt somit keine diskreten Eintrittswahrscheinlichkeiten, sondern einen kontinuierlichen bzw. stetigen Verlauf, durch den die Ausprägungen ökonomischer und natürlicher Zufallsvariablen und Größen beschrieben werden können (Hirschauer und Mußhoff 2012, S. 23).

Insbesondere die Risikoaversion, die nach Monjardino (2015) der Entscheidung über die Höhe der N-Düngung zugrunde liegt, erfordert Risikomanagement. Durch die räumliche Variabilität verschiedener Umweltfaktoren (N-Nachlieferung, Versorgung mit Grundnährstoffen, nFK etc.) kommt der Berücksichtigung dieser Variabilität eine wichtige Bedeutung für das Risikomanagement der Düngerentscheidung zu. Daher kann PF als Instrument des Risikomanagement verstanden werden, welches die Informationslücke des Landwirts über die Ausprägungen der Umweltzustände, auch hinsichtlich räumlicher Verteilung, verkleinert. Dies betrifft in erster Linie das Produktionsrisiko. Demgegenüber stehen die Investitionen in Systeme und Technologien, die ihrerseits riskant sein können. Dies erhöht das Finanzrisiko. Hierzu schreiben Karatay und Meyer-Aurich (2020) mit Bezug auf Whelan und McBratney (2000): *„While the possibilities to consider site-specific variability in the field may be attractive for risk-averse decision-makers because sources of risk from heterogeneity of fields can be better addressed, the investments in PF technologies themselves imply specific risks, which need to be traded off.“* Wie bereits angedeutet, gibt es hinsichtlich der technischen Intensität von PF

Unterschiede. Während vorhandenes Wissen über Standortheterogenität, welches auf der langjährigen Erfahrung des Landwirts beruht, nur in der Umsetzung Investitionen erforderlich macht, können intensive Map-Overlay-Verfahren inklusive N-Sensor erhebliche Kosten verursachen. Zunächst stellt sich hingegen die Frage, warum eine vermeintlich schlechtere Alternative bevorzugt werden kann, obwohl optimierte Verfahren verfügbar sind. Neben dem höheren Investitionsaufwand ist dies auf die Theorie der begrenzten Rationalität zurückzuführen, die die Effizienz von heuristischen Entscheidungsverfahren hervorhebt.

4.2 Rationalität in Entscheidungssituationen

Um Entscheidungen zu bewerten, werden oftmals ex-post-Betrachtungen vorgenommen. Hirschauer und Mußhoff (2012, S. 7) sprechen hierbei auch von der „ex-post-Optimalität“, die als Zielgröße formuliert wird und Entscheidungen danach bewertet werden. Nach Eisenführ und Weber (2003, S. 4) sagt dies jedoch nichts über die Rationalität einer Entscheidung aus, denn: „Der spätere Erfolg oder Misserfolg ist aber kein zuverlässiger Maßstab. (...) Man muss also unterscheiden zwischen einer rationalen und einer erfolgreichen Entscheidung. Zwar ist es der Zweck erhöhter Rationalität, erfolgreiche Entscheidungen zu produzieren. Aber wenn Erkenntnisse unsicher sind, kann man Pech oder Glück haben.“ Dementsprechend gilt es, Risiko in Entscheidungen zu berücksichtigen und entsprechend der eigenen Risikopräferenz ex-ante-optimale Entscheidungen zu treffen. Diese sind, abhängig vom Kenntnisstand des Entscheiders über die erwarteten Ausprägungen von Umweltfaktoren, rational, wenn sie vorhandene Informationen berücksichtigen. Gleichzeitig kann es durch die Einsparung von Denk- bzw. Datenverarbeitungsaufwand für einen Entscheidungsprozess effizient sein, weniger rationale Entscheidungen zu treffen. Dazu bliebe verfügbare Informationen unberücksichtigt. Beispielhaft hierfür ist das Inferenzproblem des Pflanzenbaus, welches sich u.a. aus der Unsicherheit über die räumliche und zeitliche Variabilität von Ertragsbedingungen ergibt.

Sowohl Sensoren als auch Remote-Sensing-Systeme, die in-season-Informationen über einen Pflanzenbestand erfassen, sind auf dem Markt vorhanden. Verfahren zur Kartierung von Standortheterogenität sind ebenfalls marktreif und werden schon seit mehreren Jahrzehnten eingesetzt. Gleichzeitig scheinen die Voraussetzungen für die Umsetzung optimierter Systeme inzwischen verbreitet (Aulbur et al. 2019; Bovensiepen et al. 2016; Bitkom e.V. 2016). Insbesondere auf kleinen und kleinstrukturierten Betrieben wird PF jedoch nur in geringem Umfang eingesetzt (Schimmelpfennig und Lowenberg-Deboer 2020; Paustian und Theuvsen 2017, 2016). Anders als bei einer automatisierten Applikationssteuerung (Schneider et al. 2006;

Schneider und Wagner 2008; Weigert 2006) würde die Anpassung manuell und auf Basis von subjektiv wahrgenommenen Umweltfaktoren vorgenommen. Verschiedene Autoren heben das Wissen des Bewirtschafters (und somit des Entscheidungsträgers) als Informationsquelle hervor (Lorenz und Münchhoff 2015; Heijting et al. 2011; Fleming et al. 2000; Lindblom et al. 2017). Es stellt sich nun die Frage, ob auf Erfahrungen und individuellem Wissen bzw. Subjektivität basierende Entscheidungen technisch optimierten Alternativen gleichwertig oder sogar überlegen sind. Um dies zu beantworten, lohnt sich zunächst ein Blick in die entscheidungstheoretischen Grundlagen des Rationalitätsbegriffs.

In der klassischen ökonomischen Theorie bildet der *homo oeconomicus* die Annahme eines vollständig rationalen Entscheiders. Dieser verfügt über genügend Zeit, Informationen, Wissen sowie kognitive Leistungsfähigkeit zur Lösung von Entscheidungsproblemen (Franz 2004) und liegt als Idealtypus der **Theorie der rationalen Entscheidung** zugrunde. Wie bereits in Kapitel 4.1 festgestellt, bilden Entscheider in der Praxis meist jedoch nicht diesen Idealtypus ab. Vielmehr sind sie selten risikoneutral und ihre Entscheidungen nicht immer von einer rationalen Herangehensweise geprägt. Dies gilt insbesondere für Landwirte (Monjardino et al. 2015), deren Entscheidungen unsicheren Umweltzuständen bzw. verschiedenen Risiken unterliegen. Gigerenzer und Gaissmaier (2011) schreiben hierzu: „(...) *the classical model of rationality requires knowledge of all the relevant alternatives, their consequences and probabilities, and a predictable world without surprises. These conditions, however, are rarely met for the problems that individuals and organizations face.*“ Die Anforderungen für einen rationalen Entscheidungsprozess sind in den meisten Situationen demnach nicht vollständig gegeben, daher ist auch der Begriff der Rationalität neu zu definieren (Simon 1959). In den letzten Jahrzehnten hat sich die **Theorie der begrenzten Rationalität** nach Herbert A. Simon (1966) als Abgrenzung zur vollständigen Rationalität herausgebildet. Hier wird Unsicherheit über Umweltzustände explizit im Entscheidungsprozess berücksichtigt. Dennoch gibt es insbesondere im Bereich der PF-Technologie Verfahren, die den Anspruch umfassender Informationen, in diesem Fall von räumlich variablen Ertragsbedingungen, vertreten.

4.2.1 Rationale Entscheidungen und Begrenzte Rationalität

Bei der Frage nach einer Definition von Rationalität stellen Eisenführ und Weber (2003, S. 5) fest, dass dies keine „objektive, beweisbare Eigenschaft“ ist. Vielmehr sollte die Vernünftigkeit von Entscheidungen „den meisten Menschen einleuchten.“ Die Autoren geben zwei Kriterien für Rationalität an. Erstens die prozedurale Rationalität, die sich auf den Prozess der

Entscheidungsfindung bezieht, und zweitens Konsistenz, eine auf sich nicht widersprechenden Prämissen begründete Argumentationskette. Bamberg et al. (2008, S. 3) definieren hierzu den Begriff der formalen Rationalität, der sich nicht auf das jeweilige Ziel, sondern lediglich auf ein widerspruchsfreies Zielsystem bezieht. Für den individuellen Entscheider kann es dabei auch individuelle rationale Entscheidungen geben, die sich von anderen erheblich unterscheiden können. Solange Erwartungen und (Risiko-)Präferenzen begründet und konsistent sind, können subjektive Entscheidungen dennoch rational sein. Eisenführ und Weber (2003, S. 10) stellen fest, dass in ökonomischen Fragen Rationalität „nicht identisch mit Gewinnmaximierung oder Kostenminimierung“ ist. Dies deckt sich mit den Optimierungszielen von risikoaversen Entscheidern, die sich nicht auf den Erwartungswert, sondern den Erwartungsnutzen beziehen. Man spricht hierbei auch von subjektiver Rationalität und grenzt dieses Verhalten somit von objektiver Rationalität ab (Bamberg et al. 2008, S. 3). Die Annahme von objektiv rationalem Verhalten, wie sie in der betriebswirtschaftlichen Theorie oft getroffen wird, widerspricht realen Entscheidungssituationen, denn dort gilt die Annahme von vollständig vorhandener Information nicht. Daher ist es in der betriebswirtschaftlichen Theorie das Ziel eines rationalen Entscheiders, möglichst umfassende Informationen zu einer Entscheidungssituation zu gewinnen, um maximal mögliche Rationalität zu erreichen. Werden die Kosten zusätzlicher Informationsgewinnung im Zielsystem einer Entscheidung höher bewertet, als der daraus entstandene Nutzen, kommt das Prinzip der formalen Rationalität an seine Grenzen (Bamberg et al. 2008, S. 4).

Das Prinzip der begrenzten Rationalität (*bounded rationality*) geht auf Herbert A. Simon zurück, der diesen theoretischen Strang der Entscheidungstheorie vom Prinzip der rationalen Entscheidung abgrenzte. Es beruht auf der Annahme von nur begrenzt vorliegenden Ressourcen in Form von Zeit, Information (Menge und Qualität) oder der kognitiven Leistungsfähigkeit des Entscheiders. Simon (1990) beschreibt diesen Zusammenhang wie folgt: „*Because of the limits on their computing speeds and power, intelligent systems must use approximate methods to handle most tasks. Their rationality is bounded.*“ Hieraus ergibt sich, dass Entscheider nicht alle Alternativen und deren Eintrittswahrscheinlichkeit kennen (können)²⁹. Aus diesem Grund können Entscheidungen nach dem Prinzip der begrenzten Rationalität, obwohl sie nicht den Kriterien für Rationalität (Bamberg et al. 2008; Eisenführ und Weber 2003) (da sie bspw. vorhandene Informationen unberücksichtigt lassen) entsprechen, aber dennoch effizient und

²⁹ Mit der voranschreitenden Nutzung von selbstlernenden Systemen, kommt die Aussage von Herbert Simon ins Wanken. Dies gilt insbesondere für die Verarbeitung räumlicher Variabilität. Wie aus Kapitel 4.1.1 hervorgeht, werden zunehmend auch zeitlich variable Informationen in der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Dennoch sind bspw. Wettervorhersagen oder Marktentwicklungen höchstens kurzfristig prognostizierbar.

nicht irrational sein. Die beschriebenen Einschränkungen schwanken in Abhängigkeit des individuellen Entscheiders und der konkreten Entscheidungssituation, in der dieser sich befindet. Er kann sich der optimalen Entscheidung also nur annähern. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts nutzt Simon (1990, S. 7) die Metapher einer Schere, deren Klingen die kognitive Leistungsfähigkeit des Entscheiders einerseits und die Struktur der Entscheidungssituation andererseits darstellen. Müller (2017, S. 42) stellt fest, dass es aufgrund der Variabilität der Entscheidungsträger und -situationen keinen allgemeingültigen Entscheidungsweg gibt. Zur Lösung von Entscheidungsproblemen gilt es deshalb, eine Theorie über den Entscheidungsprozess zu definieren und die Umwelt, in der dieser stattfindet, zu erklären (Simon 1990, S. 7). Hierzu existiert eine Vielzahl von vereinfachten Entscheidungsverfahren, die allgemein als heuristische Entscheidungsverfahren bezeichnet werden. Zur Veranschaulichung der Theorien der vollständigen und begrenzten Rationalität werden in Kapitel 4.3 für die teilflächenspezifische N-Düngung verschiedene Verfahren gegenübergestellt, die sich hinsichtlich des Informationsgehalts und der technischen Ausprägung unterscheiden.

4.2.2 Heuristische Entscheidungsverfahren

Im Vergleich zur Theorie der rationalen Entscheidung sind heuristische Entscheidungsverfahren weniger aufwendig und unterliegen Vereinfachungsprinzipien (Payne et al. 1993). Ein Beispiel hierfür ist das Ignorieren von Information. Heuristiken sind nach Simon (1990, S. 11) keine Verfahren zur Optimierung von Entscheidungen, jedoch dazu geeignet zufriedenstellende Lösungen mit weniger aufwendigen Entscheidungsprozessen zu finden. Die Theorie der begrenzten Rationalität, welche Heuristiken zugrunde liegt, ist jedoch nicht mit Irrationalität gleichzusetzen (Simon 1956). Heuristiken können rational sein, wenn die Kosten eines höheren Aufwands größer sind als der Nutzen der höheren Genauigkeit, welcher durch ein optimiertes Verfahren erreicht würde. Dies lässt sich als einen trade-off zwischen Aufwand und Genauigkeit beschreiben (Gigerenzer und Gaissmaier 2011, 456f). Aufwand bedeutet auch kognitive Leistungsfähigkeit, die hinsichtlich der Verarbeitung relevanter Informationen in komplexen Entscheidungssituationen mit vielen Variablen begrenzt sein kann. Plass et al. (2010) nennen diesbezüglich die sog. *cognitive load theory*, welche die kognitive Belastung beim Lernen beschreibt und auch auf die Verarbeitung von Information insgesamt angewendet werden kann. Besonders in schlecht strukturierten Entscheidungssituationen, welche von Unsicherheit, einem großen Entscheidungsspielraum sowie einer Vielzahl von Alternativen und Merkmalen charakterisiert sind, kommen Heuristiken demnach zur Anwendung (Müller 2017,

S. 43). In solchen Situationen können sie durch das Ignorieren von Informationen oder alternativ durch eine vereinfachte Verarbeitung der Information Entscheidungsprozesse schneller und einfacher machen als komplexere Verfahren (Gigerenzer und Gaissmaier 2011, S. 454). Gigerenzer und Gaissmaier (2011, S. 453) bezeichnen dies als einen *less-is-more*-Effekt, um die präskriptive Rolle von Heuristiken zu erklären. Die deskriptive Frage nach der richtigen Heuristik ist problemabhängig und wird an dieser Stelle nicht diskutiert. Gigerenzer und Gaissmaier (2011, S. 453f) unterscheiden Entscheidungssituationen in Inferenz- und Präferenzprobleme. Während Präferenzen individuell variieren, können Entscheidungen bezüglich eines Inferenzproblems eindeutig bewertet werden. Dies führt dazu, dass auch heuristische Entscheidungsverfahren bezüglich ihrer Eignung für Präferenz- oder Inferenzprobleme unterschieden werden müssen. Präferenzheuristiken werden demnach dazu verwendet Entscheidungsprozesse zu vereinfachen, bei denen eine objektive Bewertung des Nutzens einer Entscheidung ex-post nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. Bei Inferenzheuristiken kann die Ausprägung der Zielvariablen überprüft und demnach die Wahl von Alternativen bewertet werden. Sie lassen zudem ex-ante Rückschlüsse zu, welche Alternativen sich in welchem Maß auf die Ausprägung der Zielvariablen auswirken (sollten). Da bei Sachfragen hauptsächlich Inferenzheuristiken verwendet werden, wird im Folgenden näher darauf eingegangen.

Als Beispiel für ein agrarökonomisches Inferenzproblem beschreibt Müller (2017, S. 49f) die Preisentwicklung von Agrarrohstoffen. Demnach ist dem Landwirt die Preisentwicklung nicht bekannt, weshalb er Statistiken und Prognosen über Angebot und Nachfrage von Rohstoffen als Information nutzt, um die zukünftige Preisentwicklung abzuschätzen. Seine Vermarktungsentscheidung kann er somit anpassen. Zum Teil basieren Inferenzheuristiken auf den gleichen Prinzipien wie Präferenzheuristiken (Gigerenzer und Gaissmaier 2011). Dabei werden bei bestimmten Verfahren nur Informationen berücksichtigt, die einen größeren Einfluss auf die Zielvariable erwarten lassen. Gleichzeitig gibt es Inferenzheuristiken, die anderen Prinzipien folgen. Entscheider verwenden hierzu bspw. Alternativen und Informationen, an die sie sich erinnern können. Der kognitive Aufwand wird demnach durch die Erinnerbarkeit reduziert (Shah und Oppenheimer 2008, S. 210) und interne statt externe Informationen (mediale Umwelt, Erinnerungsvermögen etc.) herangezogen.

Bei Bewirtschaftungsentscheidungen steht der Landwirt ebenfalls vor einem Inferenzproblem. Neben Marktrisiko zu Produkt- und Faktorpreisen, welche die ex-ante-optimale N-Düngermenge beeinflussen, besteht außerdem Unsicherheit über die Höhe des Ertrags. Um diesen abschätzen zu können, nutzt der Landwirt Informationen über seine Umwelt (erwartete

Witterung, langjährige Erfahrung über Ertragsfähigkeit des Standorts, Ertragsfähigkeit der Sorte etc.) und passt seine Bewirtschaftung entsprechend an. Nach der Ernte kann bewertet werden, wie gut die verwendete Information dazu geeignet war, die Ausprägung der Zielvariablen, hier den physiologischen Ertrag, abzuschätzen (ex-post-Optimalität). Die Identifikation von Teilflächen und die daran angepasste Düngung kann ebenfalls als Inferenzproblem beschrieben werden. Der Landwirt nutzt zur Abschätzung räumlicher Variabilität seines Schlags Informationen, die er seiner Erinnerung bzw. Beobachtungen aus der Vergangenheit entnimmt. Alternativ oder ergänzend können aufwendigere technische Verfahren eingesetzt werden. Gleiches gilt für die Anpassung der N-Düngung an sich, die entweder auf Basis subjektiver Beobachtungen des Landwirts oder mit online-Verfahren auf Basis von sensorisch erfasster Information durchgeführt werden kann. Die Validierung der Teilflächen bzw. der angepassten Düngung erfolgt ex-post bspw. über Ertragskarten und/oder Bodenproben oder in-season durch Bonitieren des Pflanzenbestands (Biomassekarten o.ä.).

4.2.3 Ökologische Rationalität

Der Nutzen von heuristischen Entscheidungsverfahren ergibt sich zusammengefasst vor allem aufgrund des Trade-offs zwischen Aufwand und Genauigkeit eines Entscheidungsprozesses. Dieser ist situativ anzupassen und durch den Begriff der ökologischen Rationalität (*ecological rationality*) geprägt. Ob ein heuristisches Verfahren effiziente Entscheidungen liefert, hängt demnach vor allem davon ab, wie gut dieses an die Umweltfaktoren der jeweiligen Entscheidungssituation angepasst ist. Heuristische Entscheidungsverfahren beruhen nicht nur auf dem Prinzip der begrenzten Rationalität nach Simon (1955). Gleichzeitig brechen sie mit dem Anspruch, uniforme Modelle für verschieden Situationen zu bieten. Der Begriff der ökologischen Rationalität beschreibt spezifische Verfahren, die an die jeweilige Entscheidungssituation und deren Umwelt angepasst werden (Todd und Gigerenzer 2012, S. 14). Die Autoren stellen fest, dass es keinen allgemeingültigen Ansatz dafür gibt, wie Entscheidungsverfahren in unterschiedlichen Situationen gewählt werden (Müller 2017; Todd und Gigerenzer 2012).

Beim Ansatz der ökologischen Rationalität wird angenommen, dass der Entscheidungsträger „intuitiv“ in verschiedenen Situationen bestimmte Heuristiken verwendet. Diesen bedient er sich auf Basis seines Wissens oder aufgrund von Erfahrungen aus der Vergangenheit. Die

Forschung bezüglich ökologischer Rationalität knüpft eng an die der *adaptive toolbox*³⁰ an. Die Metapher einer Schere, mit der Simon (1990, S. 7) die Beziehung des Entscheiders zu seiner Umwelt beschreibt, findet auch in Bezug auf ökologische Rationalität ihre Anwendung. Todd und Gigerenzer (2012, S. 15) beschreiben dies wie folgt: „*The study of ecological rationality is about finding out which pairs of mental and environmental structures go together.*“ Müller (2017, S. 82) erklärt den Prozess der Entscheidungsfindung mit der Voraussetzung, dass „ein Modell über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge vorliegt, welches die zur Verfügung stehenden Informationen in eine Inferenz übersetzt.“ Neben der Qualität der Information beschreibt er die kognitive Leistungsfähigkeit des Entscheiders zur Lösung von Problemen als zentrale Aspekte der Entscheidungsfindung.

4.2.4 Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge

Auch als *Mentale Modelle* bezeichnet beschreiben Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der entscheidungstheoretischen Forschung vereinfachte Vorstellungen eines Entscheiders über reale Zusammenhänge (Jones et al. 2011, S. 5). Abhängig von der kognitiven Leistungsfähigkeit des Entscheiders und dem vorhandenen Wissen über einen Umweltzustand ist ein mentales Modell eine individuelle und subjektive Modellierung eines inferenziellen Zusammenhangs, in dessen Kontext eine Entscheidung zu treffen ist. Johnson-Laird (2010, S. 18244) erklärt es so: „(...) *when they understand a description of the world, they can construct a similar, albeit less rich, representation — a mental model of the world based on the meaning of the description and on their knowledge.*“ Der Entscheider nutzt beobachtbare Informationen aus seiner Umwelt und schließt auf die Ausprägung der Zielvariablen in der Zukunft. Diese ist zum Zeitpunkt der Entscheidung noch nicht messbar, dem Entscheider ist jedoch eine Korrelation der genutzten Informationen mit der Zielvariable bekannt. Beispielsweise könnte ein Landwirt aus einem subjektiv wahrgenommenen dichten Pflanzenbestand auf einer Teilfläche auf einen höheren physiologischen Ertrag schließen und die ertragsabhängige Düngermenge daher in diesem Bereich erhöhen. Die Überprüfung des mentalen Modells erfolgt ex-post durch Messung der Zielvariablen. Dadurch lässt sich die Qualität des subjektiven Prognosemodells zur Entscheidungsfindung ableiten. Bezogen auf das Beispiel der subjektiv angepassten Düngermenge könnte der Ertrag bei der Ernte mit entsprechender Technik kartiert werden.

³⁰ Der Begriff der *adaptive toolbox* wurde geprägt von Gigerenzer und Goldstein (1996). Neben externer Information werden ebenso interne Informationen des Entscheidungsträgers für die Entscheidung berücksichtigt. Hierbei werden reale Alternativen in realen Umweltzuständen diskutiert.

4.3 Einordnung in den Kontext der Arbeit

Eingangs wurde das Inferenzproblem des Pflanzenbaus als ursächlich für unangepasste Stickstoffdüngung und die negativen ökonomischen und ökologischen Folgen beschrieben. Der Landwirt als Entscheider nutzt hierbei Erfahrungen aus der Vergangenheit und Beobachtungen seiner Umwelt als Informationen, um auf seinen erwarteten Ertrag zu schließen. Aus den Daten von Heyn (2010) und den theoretischen Berechnungen von Kuhlmann und Neumann (Kuhlmann und Neumann 2011) geht hervor, dass eine Lücke zwischen der (ökonomisch) ertragsoptimalen und der tatsächlichen N-Düngung besteht. Diese lässt sich durch ex-ante unvollständige Information und die daraus resultierende Risikoaversion des Entscheiders erklären, gleichzeitig ist jedoch auch die Zielgröße verschieden. Sieling et al. (2011, S. 170) sehen vor allem in den jährlich schwankenden Umwelt- und Ertragsbedingungen den Grund für unangepasste N-Düngung, was sich mit den Einschätzungen von Kuhlmann und Neumann deckt. Die Implementierung von PF soll dazu beitragen, diese Informationslücke zu verkleinern. Neben der umfassenden Nutzung von technologischen Verfahren sind nach Schneider und Wagner (2008, S. 402) außerdem „Entscheidungsregeln notwendig, die die erfassten Informationen in für den Landwirt notwendige Bewirtschaftungsempfehlungen ‚übersetzen‘. Diese Regeln beinhalten das Know-how des PF. In ihnen ist das Wissen über die ertragsbeeinflussenden Eigenschaften der genutzten teilflächenspezifischen Information enthalten.“ Die Autoren definieren den Landwirt als nutzenmaximierenden Entscheider. Dieser maximiert demnach den physiologischen Ertrag. Unter Berücksichtigung von zum Entscheidungszeitpunkt gültigen Faktor- und Produktpreisen kommen Entscheidungsregeln zur Anwendung, die die Optimierung des ökonomischen Outputs zum Ziel haben. Zwar beschreiben die Autoren die Individualität der Entscheidungssituationen, zu denen entsprechende Regeln passen müssen. Die Komplexität der Entscheidungssituation kann jedoch auch mit heutiger (Stand Februar 2023) praxistauglicher Technik noch nicht vollständig abgebildet werden. Hierfür gibt es mehrere Argumente:

- Aus der Bewertung der möglichen Datengrundlage hinsichtlich der Einordnung nach beschreibender und erklärender Information nach Lorenz und Münchhoff (2015, S. 27ff) ergibt sich, dass einige Datenquellen zwar räumliche Variabilität erfassen können, nicht jedoch quantifizierbare ertragsrelevante Informationen liefern. Erklärende Informationen für Bestandsheterogenität können die praxiserprobten Verfahren des Remote Sensing nicht liefern und auch Standortheterogenität wird mit den meisten Verfahren nur beschrieben. Hierzu fehlt das notwendige valide mentale

Modell. Erst eine Validierung durch bspw. Bodenuntersuchungen, Bonitierungen o.a. kann einen Rückschluss auf die erkannte Variabilität geben und dieses Wissen in den Entscheidungsprozess integrieren. Darüber hinaus können simultane Handlungsempfehlungen (bspw. Düngermengen) über den gesamten Schlag gelten, die jedoch aus unterschiedlichen pflanzenbaulichen Gründen zustande kommen. Dies führt dazu, dass das Kriterium der konsistenten Entscheidungsargumentation nicht immer erfüllt ist. Das System der Biomassekarten nimmt bspw. an, dass bei höherer Biomasse auch höherer Ertrag zu erwarten ist. Dies ist jedoch, wie aus Schubert (2011, S. 82) hervorgeht, nicht immer der Fall. Somit kann eine technologiegestützte N-Düngung auf Basis der Biomasse auch den gegenteiligen Effekt einer unangepassten Düngung bewirken.

- Beisecker et al. (2015) formulieren mit Hilfe der Daten von Heyn (2010) die Lücke zwischen tatsächlicher und optimaler Düngung in der ex-post-Betrachtung, die u.a. auf die Unsicherheit über die Wirkung von zeitlich variablen Umweltbedingungen auf die potenzielle N-Mineralisationsrate zurückzuführen ist. Zwar gibt es am Markt zunehmend verfügbare Bodensensoren mit angeschlossenen Auswertungsalgorithmen (als ein Beispiel ist die Firma *Agvolution* zu nennen), jedoch keine kontinuierliche Erfassung der N-Mineralisationsrate.
- Zeitlich variable Umweltzustände (Witterungsereignisse, Marktlage, Stressfaktoren) stellen auch unter theoretisch vollständiger Information über räumliche Variabilität einen wesentlichen Unsicherheitsfaktor bei der Optimierung des pflanzenbaulichen Entscheidungsprozesses dar (Kuhlmann und Neumann 2011).

Nichtsdestotrotz können technische Hilfsmittel einen Aufschluss über räumliche Variabilität geben und die Informationslücke des Inferenzproblems im Pflanzenbau helfen zu verkleinern. Die Ergebnisse von Schneider und Wagner (2008) scheinen diese Annahme zu bestätigen. Heijting et al. (2011) und Fleming et al. (2000) stellen fest, dass Landwirte ganz ohne technische Unterstützung die räumliche Variabilität ihrer Schläge nicht nur kennen. Vielmehr ist eine angepasste N-Düngung an diese Unterschiede auf Basis des Wissens der Landwirte im Vergleich zur homogenen Düngung auch vorteilhaft. In Tabelle 2 sind nachfolgend zwei Verfahren des PF hinsichtlich ihrer Einordnung in den entscheidungstheoretischen Kontext gegenübergestellt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der technologischen Intensität und des Anspruchs an möglichst rationale Entscheidungen der Bewirtschaftungsanpassung.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der angepassten N-Düngung auf Basis der Erfahrung des Bewirtschafters mit dem Map-Overlay-Verfahren im entscheidungstheoretischen Kontext (eigene Angaben auf Basis des erarbeiteten Wissens)

N-Düngung auf Basis langjähriger Erfahrung	Sensorbasierte N-Düngung
<ul style="list-style-type: none"> • weiterer Witterungsverlauf nicht bekannt • schlagspezifische Besonderheiten sind subjektiv bekannt, was erklärende Information über einen Standort liefert • weitere Informationen über einen Standort oder die Bestandsentwicklung, werden entweder substituiert oder bewusst ignoriert • Investitionskosten des PF werden als Finanzrisiko angesehen und von risikoaversen Entscheidern nicht getätigt 	<ul style="list-style-type: none"> • weiterer Witterungsverlauf nicht bekannt • Erfassung von Bestandsheterogenität durch objektives Verfahren und in Kombination mit der N-Düngung • weitere Informationen über einen Standort können digital ergänzt werden (jedoch nicht zwingend weitere erklärende Informationen liefern) • Senkung des Produktionsrisikos durch Erfassung der räumlichen Variabilität und Übersetzung in Handlungsempfehlungen

Es zeigt sich, dass eine (potenzielle) Reduktion des Produktionsrisikos durch optimierte bzw. rationalere Verfahren (bspw. Map-Overlay) nur über einen Trade-off mit einer gleichzeitigen Steigerung des Finanzrisikos erreicht werden kann. Unter Berücksichtigung der zuvor diskutierten Einschränkungen stellt sich daher die Frage, ob technisch optimierte Verfahren dazu in der Lage sind, effizientere Entscheidungen hinsichtlich der N-Düngung zu ermöglichen. Oder sind in bestimmten Fällen heuristische Verfahren zur Erfassung und Berücksichtigung von räumlicher Variabilität effizienter? Gigerenzer und Gaissmaier (2011, S. 453) stellen hierzu die passende Frage: „*When should people rely on a given heuristic rather than a complex strategy to make more accurate judgments?*“ In der Praxis wird diese Frage meistens mit dem höheren Nutzen eines Verfahrens beantwortet. Hierbei werden neben den Investitionskosten für die nötige technische Ausstattung auch Lernkosten, Managementkosten sowie weitere Aufwendungen für die Umsetzung eines Entscheidungsverfahrens berücksichtigt. Dem wird ein möglicher höherer Nutzen in Form eines höheren Erlöses (Ertragssteigerungen und Betriebsmitteleinsparungen) sowie Vorteile bezüglich externer Kosten (Stickstoffeffizienz, Reduktion von Stickstoffverlusten etc.) dieses aufwendigeren Verfahrens gegenübergestellt. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob die Wahl des optimalen Verfahrens bei einem risikoaversen Landwirt, wie er in der Praxis verbreitet ist, von der des risikoneutralen Entscheiders aus der betriebswirtschaftlichen Theorie abweicht.

5. Expertenbefragung I – Umfrage

5.1 Theoretischer Kontext

Wie sich aus den Forschungsfragen und der Darlegung des wissenschaftlichen Kontexts ergibt, steht der Landwirt als Entscheider im Zentrum dieser Arbeit. Er trifft auf Basis von Erfahrungswerten, Beratungsinformationen und ggf. Entscheidungsunterstützungssystemen Bewirtschaftungsentscheidungen. Dies gilt auch für die Berücksichtigung von räumlich variablen Umweltbedingungen (Standort- und Bestandsheterogenität), woraus die Rolle des Landwirts bei der Nutzung von PF abgeleitet werden kann. Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Nehmen Landwirte mögliche Heterogenität ihrer Flächen wahr?
- Wird diese Heterogenität bei Bewirtschaftungsentscheidungen berücksichtigt?
- Bei welchen Arbeiten erfolgt ggf. eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung?

Aus der Beantwortung dieser Fragestellungen könnte sich ergeben, dass Anpassungen der Bewirtschaftung durch heuristische oder nicht-technologische Verfahren oder strukturell bedingte Anpassungen bereits erfolgen. Digitale Lösungen und technisch aufwendigere Verfahren würden somit nicht eingesetzt, obwohl die grundsätzliche Motivation zur Nutzung von PF (nämlich die Berücksichtigung kleinräumig unterschiedlicher Wachstumsbedingungen von Kulturpflanzen) vorhanden ist. Daneben ist die grundsätzliche Einstellung der Landwirte zu Technologie allgemein und speziell zu PF relevant, um die Verbreitung von PF zu untersuchen. So könnten bspw. Vorbehalte zu technologischen Neuerungen bestehen, fehlender ersichtlicher Nutzen von PF oder andere Faktoren dessen Implementierung in den Betrieben verhindern. Daraus ergeben sich weitere Motive einer Umfrage:

- Welche Voraussetzungen und Hindernisse nehmen Landwirte bei der Implementierung von PF wahr?
- Erkennen Landwirte mögliche ackerbaulichen und ökonomischen Vorteile von PF?
- Wie ist die grundsätzliche Einstellung der Landwirte zu technologischen Neuerungen und der wahrgenommene Nutzen von digitalen Anwendungen für PF?

Die Ergebnisse von Paustian und Theuvsen (2016) zeigen, dass vor allem Landwirte in den südwestdeutschen Bundesländern PF in nur geringem Umfang nutzen. Da sich die Autoren vor allem auf die Nutzung von Technologien beziehen, könnte die Ursache für dieses Antwortverhalten in der fehlenden Wirtschaftlichkeit entsprechender Systeme liegen.

Gleichzeitig existieren auch für diese Betriebe Verfahren, die eine wirtschaftliche Nutzung angepasster Bewirtschaftung unter bestimmten Voraussetzungen ermöglichen könnten. Es stellt sich daher die Frage, ob die befragten Betriebe PF tatsächlich in nur geringerem Maß einsetzen, wie Paustian und Theuvsen es ermittelt haben, oder ob möglicherweise in anderer Form eine Anpassung der Bewirtschaftung vorgenommen wird. Aus diesem Grund geht die Erhebung u.a. der Frage nach, ob die Landwirte Heterogenität in ihren Flächen erkennen, ihre Bewirtschaftung danach anpassen und überhaupt sich ergebende Potenziale erkennen.

Die Befragung wurde gemeinsam mit Mohr und Kühl (2021) durchgeführt, wobei die dort veröffentlichten Ergebnisse nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit sind. Der Fragebogen (siehe Anhang 3) wurde aus diesem Grund in mehrere Abschnitte unterteilt, wobei die betrieblichen und persönlichen Informationen für beide Studien gleichermaßen relevant sind. Erste Ergebnisse dieser Befragung wurden bereits vom Autor veröffentlicht (Monath 2021) und werden hier weiter ausgearbeitet.

5.2 Formulierung der Hypothesen

Mohr und Kühl (2021) führen eine Auswahl an Arbeiten auf, die sich mit der Technologieadaption von Landwirten befassen. Darunter sind auch Barnes et al. (2019), die ihren Fokus auf Landwirte in einigen EU-Staaten legen. Schimmelpfennig und Loewenberg-DeBoer (2020) finden ähnliche Ergebnisse für Landwirte in den USA. Es zeigt sich, dass neben sozioökonomischen Faktoren die Betriebsgröße ein wesentlicher Faktor bei der Umsetzung von PF ist. Außerdem unterscheiden sich die Antworten auch hinsichtlich der betrieblichen Ausrichtung und des Standorts. Die Antworten auf die oben formulierten Fragen, die mit der vorgestellten Umfrage gefunden werden sollen, könnten sich somit ebenfalls hinsichtlich dieser Faktoren unterscheiden.

Aus den vorgestellten Arbeiten anderer Autoren können Hypothesen über das mögliche Antwortverhalten der befragten Landwirte abgeleitet werden. Es soll zudem ein Überblick darüber gewonnen werden, ob es Unterschiede aufgrund soziodemographischer oder betriebspezifischer Eigenschaften gibt.

Die Hypothesen werden in zwei Bereiche eingeteilt. Zum einen sollen die identifizierten Stichprobengruppen hinsichtlich ihrer Technologieaffinität und Einschätzungen bezüglich der Implementierung von PF überprüft werden. Außerdem geht es darum herauszufinden, ob sich die Gruppen bezüglich wahrgenommener Heterogenität und der Anpassung der

Bewirtschaftung an diese Heterogenität unterscheiden. Die eingangs dieser Arbeit formulierte Überlegung einer strukturell bedingten Anpassung der Bewirtschaftung aufgrund geringer Schlaggrößen soll vor allem durch diese Umfrage überprüft werden. Aus diesem Grund wird auch unterschieden, ob die Heterogenität zwischen und innerhalb der Schläge vorliegt. Grundsätzlich ist die Einschätzung der Landwirte über die vorhandene Heterogenität subjektiv, allerdings ist eben diese Subjektivität das zu untersuchende Attribut dieser Arbeit. Es stellt sich die Frage: Kann subjektives Wissen über die Charakteristik eines Schlags dazu beitragen die Wirtschaftlichkeit von PF in kleinen Betrieben zu erhöhen? Zudem ist es von Interesse, ob Landwirte die Heterogenität innerhalb bzw. zwischen ihren Schlägen erkennen und bei ihrer Bewirtschaftung berücksichtigen. Diese Frage lässt sich nicht in die beiden Hypothesengruppen einordnen, daher wird sie gesondert untersucht. Hierzu wird die ordinalskalierte (unabhängige) Variable der wahrgenommenen Heterogenität gruppiert und in die zwei Klassen „geringe Heterogenität“ (Likert-Skala 1-3) und „hohe Heterogenität“ (4-5) eingeteilt.

H1a: Landwirte, die Heterogenität zwischen ihren Schlägen wahrnehmen, passen ihre Bewirtschaftung auch danach an.

H1b: Landwirte, die Heterogenität innerhalb ihrer Schläge wahrnehmen, passen ihre Bewirtschaftung auch danach an.

Die Wahrnehmung von Heterogenität in der Fläche stellt nun eine abhängige Variable (AV) dar, deren ordinalskalierte Daten nicht gruppiert werden. Die unabhängigen Variablen (UV) der zu überprüfenden Hypothesen sind nachfolgend aufgeführt. Intervallskalierte Variablen werden gruppiert, dabei wurde der Median als Trennwert verwendet, um in etwa gleich große Klassen zu erhalten. Der Ausbildungsgrad ist bereits ordinalskaliert, wurde jedoch zur einfacheren Auswertung in vier Klassen mit ähnlichen Ausbildungsniveaus zusammengefasst.

- Standort: 3 Gruppen (A, B, C)
- Erwerbsform: 2 Klassen (Haupterwerb, Nebenerwerb)
- Hauptbetriebszweig: 2 Klassen (Ackerbau, kein Ackerbau)
- Grünlandanteil: 2 Klassen (gruppiert)
- Viehbesatz: 2 Klassen (gruppiert)
- Betriebsgröße: 2 Klassen (gruppiert)
- Alter: 2 Klassen (gruppiert)
- Ausbildungsgrad: 4 Klassen (keine Ausbildung, Ausbildung, weiterführend, akademisch)
- Arbeitserledigung: je 3 Klassen (Betriebsleiter, generell innerbetrieblich, Lohnarbeit)

Der Standort eines Betriebs ist durch eine Ansammlung bewirtschafteter Schläge geprägt. Deren Eigenschaften ergeben sich aus den naturräumlichen Gegebenheiten, weshalb aus der Schlagheterogenität auf die Heterogenität eines Standorts geschlossen werden kann, solange die Schläge demselben Naturraum zugeordnet werden können. Zwischen den Standorten, die in der Umfrage in drei Gruppen getrennt wurden, unterschieden sich somit auch die Charakteristiken der Schläge, aus denen auf die Heterogenität eines Standorts geschlossen werden kann. Das Antwortverhalten der Landwirte bezüglich der vorliegenden Heterogenität und der Anpassung daran würde sich somit standortabhängig unterscheiden. Aus diesem Grund wurde der Standort des Betriebs in der Umfrage durch eine vordefinierte Auswahl abgefragt.

H2a: Der Standort des Betriebs wirkt sich auf die Heterogenität zwischen den Schlägen aus.

H2b: Der Standort des Betriebs wirkt sich auf die Heterogenität innerhalb der Schläge aus.

H2c: Die Anpassung der Bewirtschaftung zwischen den Schlägen erfolgt abhängig vom Standort des Betriebs unterschiedlich stark.

H2d: Die Anpassung der Bewirtschaftung innerhalb der Schläge erfolgt abhängig vom Standort des Betriebs unterschiedlich stark.

Laut Breunig et al. (2022) scheitert die Umsetzung von PF oftmals am fehlenden ersichtlichen Nutzen für den Landwirt. Dieser Effekt ist möglicherweise größer, wenn der Fokus des Befragten auf einem anderen Betriebszweig oder gar anderen Erwerbsmöglichkeiten liegt (bspw. bei Nebenerwerbsbetrieben). Für den Betriebsleiter könnte die Anpassung der Bewirtschaftung eine zusätzliche Belastung darstellen. Hintergrund dieser Annahme ist die *cognitive load theory* (Plass et al. 2010), die das Lernen neuer Dinge (in diesem Fall der Umgang mit PF) mit kognitiver Belastung verknüpft. Demnach hätten Landwirte, in deren Betrieb der Ackerbau eine geringere Bedeutung hat, auch ein geringeres Interesse oder nicht genügend Zeit für die Umsetzung von PF. Außerdem könnten daraus unterschiedliche Auffassungen über den Nutzen von digitalen Anwendungen für PF, sowie den ackerbaulichen und ökonomischen Nutzen von PF resultieren.

H3a: Die Erwerbsform des Betriebs beeinflusst, wie stark die Anpassung der Bewirtschaftung zwischen den Schlägen erfolgt.

H3b: Die Erwerbsform des Betriebs beeinflusst, wie stark die Anpassung der Bewirtschaftung innerhalb der Schläge erfolgt.

- H3c:** Die Erwerbsform des Betriebs beeinflusst die Technologieaffinität und Risikobereitschaft des Betriebsleiters.
- H3d:** Die Erwerbsform des Betriebs beeinflusst den wahrgenommenen Nutzen von digitalen Anwendungen für die Implementierung von PF.
- H3e:** Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich abhängig von der Erwerbsform des Betriebs.
- H3f:** Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich abhängig von der Erwerbsform des Betriebs.
- H4a:** Ackerbaubetriebe passen ihre Bewirtschaftung eher an vorhandene Unterschiede zwischen den Schlägen an.
- H4b:** Ackerbaubetriebe passen ihre Bewirtschaftung eher an vorhandene Unterschiede innerhalb der Schläge an.
- H4c:** Die Technologieaffinität und Risikobereitschaft unterscheidet sich danach, ob der Ackerbau ein Hauptbetriebszweig ist.
- H4d:** Der wahrgenommene Nutzen von digitalen Anwendungen bei der Implementierung von PF unterscheidet sich abhängig davon, ob der Ackerbau ein Hauptbetriebszweig ist.
- H4e:** Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich in Abhängigkeit davon, ob der Ackerbau ein Hauptbetriebszweig ist.
- H4f:** Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich in Abhängigkeit davon, ob der Ackerbau ein Hauptbetriebszweig ist.

Der Ackerbau als Hauptbetriebszweig sagt nichts über andere betriebsspezifische Besonderheiten aus, die eine Umsetzung von PF ggf. beeinflussen könnten. Deshalb wurde die Relevanz des Ackerbaus zusätzlich mit weiteren Betriebsdaten validiert. Hierzu wurde der Viehbesatz (errechnet aus der Anzahl Großvieheinheiten im Betrieb geteilt durch die Betriebsfläche), sowie der Grünlandanteil als Indikatoren herangezogen.

- H5a:** Betriebe mit einem höheren Viehbesatz passen ihre Bewirtschaftung weniger stark an vorhandene Unterschiede zwischen den Schlägen an.
- H5b:** Betriebe mit einem höheren Viehbesatz passen ihre Bewirtschaftung weniger stark an vorhandene Unterschiede innerhalb der Schläge an.

- H5c:** Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Viehbesatzes.
- H5d:** Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Viehbesatzes.
- H6a:** Betriebe mit einem höheren Grünlandanteil passen ihre Bewirtschaftung weniger stark an vorhandene Unterschiede zwischen den Schlägen an.
- H6b:** Betriebe mit einem höheren Grünlandanteil passen ihre Bewirtschaftung weniger stark an vorhandene Unterschiede innerhalb der Schläge an.
- H6c:** Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Grünlandanteils.
- H6d:** Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheiden sich hinsichtlich des Grünlandanteils.

Neben der betrieblichen Ausrichtung könnte die Betriebsgröße ausschlaggebend bei der Berücksichtigung von Heterogenität und der Implementierung von PF auf dem Betrieb sein. Auch die Heterogenität der bewirtschafteten Schläge könnte sich mit steigender Betriebsgröße erhöhen. Schläge stellen grundsätzlich nur Bewirtschaftungseinheiten dar, die aufgrund von eigentumsrechtlichen oder strukturbedingten Grundlagen gebildet werden. Sie orientieren sich nur bedingt an naturräumlichen und bodenbedingten Gegebenheiten. Vielmehr hat der Bewirtschafter den Anreiz, möglichst große Schläge zu konstruieren, um so die Arbeitserledigungskosten der Bewirtschaftung zu senken. Dies bedeutet, dass mehr Fläche auch vermehrt unterschiedliche Bedingungen enthält, egal ob sie auf einer größeren Anzahl an Schlägen oder auf größeren Schlägen bewirtschaftet wird. Somit müsste eine Zunahme der Betriebsgröße entweder eine höhere Heterogenität zwischen oder innerhalb der Schläge bewirken oder beides. Eine Zunahme der Heterogenität sagt jedoch nichts darüber aus, ob darauf auch eine Anpassung der Bewirtschaftung erfolgt. Daher muss auch untersucht werden, ob eine größere Anbaufläche bewirkt, dass eine verstärkte Anpassung an die vorhandene Heterogenität erfolgt. Gleichzeitig könnten Skaleneffekte dazu beitragen, dass die wirtschaftliche Nutzung von technischen Systemen für PF auf größeren Betrieben eher gegeben ist. Potenziale und Hindernisse, die die befragten Landwirte sehen, würden sich unterscheiden.

- H7a:** Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und dem angegebenen Heterogenitätsgrad zwischen den Schlägen.

- H7b:** Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und dem angegebenen Heterogenitätsgrad innerhalb der Schläge.
- H7c:** Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und dem Anpassungsgrad der Bewirtschaftung an die Heterogenität zwischen den Schlägen.
- H7d:** Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und dem Anpassungsgrad der Bewirtschaftung an die Heterogenität innerhalb der Schläge.
- H7e:** Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich der Betriebsgröße.
- H7f:** Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich der Betriebsgröße.

In der landwirtschaftlichen Praxis könnte die Berücksichtigung von Heterogenität auch davon abhängig sein, von wem welche Arbeiten durchgeführt werden. So ist der Landwirt bei der Beauftragung von Lohnunternehmern auf dessen vorhandene Technik angewiesen. Dies kann vorteilhaft, aber auch nachteilig für die Umsetzung von PF sein. Einfachere Anpassungsstrategien, die vom Wissen des Bewirtschafters abhängen, sind wiederum darauf angewiesen, dass dieser den jeweiligen Arbeitsgang selbst ausführt. Somit könnte das spezifische Wissen des Betriebsleiters dazu führen, dass eine Anpassung der Bewirtschaftung eher erfolgt, wenn der jeweilige Arbeitsgang von ihm durchgeführt wird. Die Hypothesen werden dabei nach Arbeitsgängen getrennt getestet.

- H8:** Ob eine Anpassung der Bewirtschaftung in den jeweiligen Arbeitsgängen erfolgt, hängt davon ab, wer diesen Arbeitsgang im Betrieb überwiegend durchführt.

(a: Bodenbearbeitung, b: Aussaat, c: N-Düngung, d: Grunddüngung, e: Pflanzenschutz)

Soziodemografische Faktoren wie bspw. die Berufsbildung und das Alter haben auch in der Landwirtschaft häufig Auswirkungen auf das Antwortverhalten in Umfragen. Dies geht u.a. aus den Untersuchungen von Paustian und Theuvsen (2016, 2017) hervor. Daher liegt es nahe herauszufinden, ob dies auch für die Anpassung der Bewirtschaftung, sowie für Voraussetzungen und Hindernisse bei der Implementierung von PF gilt.

- H9a:** Die Häufigkeit der Anpassung der Bewirtschaftung an die Heterogenität zwischen den Schlägen unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Landwirts.

- H9b:** Die Häufigkeit der Anpassung der Bewirtschaftung an die Heterogenität innerhalb der Schläge unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Landwirts.
- H9c:** Die Technologieaffinität und die Risikobereitschaft der Befragten unterscheiden sich hinsichtlich des Alters.
- H9d:** Der wahrgenommene Nutzen digitaler Anwendungen für die Implementierung von PF unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Befragten.
- H9e:** Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Befragten.
- H9f:** Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Befragten.
- H10a:** Der Anpassungsgrad der Bewirtschaftung zwischen den Schlägen erfolgt in Abhängigkeit des Ausbildungsgrads des Befragten.
- H10b:** Der Anpassungsgrad der Bewirtschaftung innerhalb der Schläge erfolgt in Abhängigkeit des Ausbildungsgrads des Befragten.
- H10c:** Die Technologieaffinität und die Risikobereitschaft des Befragten, unterscheidet sich hinsichtlich seines Ausbildungsgrads.
- H10d:** Der wahrgenommene Nutzen digitaler Anwendungen für die Implementierung von PF unterscheidet sich hinsichtlich des Ausbildungsgrads des Befragten.
- H10e:** Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Ausbildungsgrads des Befragten.
- H10f:** Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Ausbildungsgrads des Befragten.

Die Hypothesentests erfolgen in Kapitel 5.4. Nachfolgend wird zunächst die Methodik der Umfrage und der Datenerhebung beschrieben und ein Überblick der befragten Gruppe und Region gegeben, in der die Umfrage durchgeführt wurde.

5.3 Datenerhebung und Methodik

Die Teilnehmer der Umfrage wurden auf Basis eines Kooperationsvertrags des lokalen Wasserversorgers ZVG mit den ansässigen Landwirten kontaktiert. Die Teilnahme an der Wasserschutzkooperation ist für die Betriebe freiwillig, umfasst allerdings sämtliche Betriebe mit Ackerbau in der untersuchten Region³¹. So konnten zwischen November 2019 und März 2020 insgesamt 120 Landwirte in den südhessischen Landkreisen Darmstadt-Dieburg und Offenbach mit einem schriftlichen Fragebogen (siehe Anhang) kontaktiert werden. Als zusätzlicher Teilnahmeanreiz wurden insgesamt fünf Gutscheine eines Anbieters für Arbeits- und Schutzbekleidung verlost. Dies führte zu einem Rücklauf von 50 Fragebögen, was einem Anteil von ca. 42 % entspricht. Da der Fokus insbesondere auf kleinen Betrieben mit vergleichsweise kleinen Flächenstrukturen liegt, eignen sich die beiden Landkreise als charakteristische Regionen zur Untersuchung der Nutzung von PF im kleinstrukturierten Ackerbau. Die untersuchte Region wurde vorab vom Autor dieser Arbeit in drei geografische Zonen (nachfolgend Standorte genannt) mit in sich ähnlichen Standortbedingungen eingeteilt (siehe Abbildung 9), die sich an den Naturräumen (Klausing 1968), den Bodenarten (Bodenvierer Hessen, Weinberger et al. 2017) sowie nach außen in etwa an den jeweiligen Gemarkungsgrenzen (Geoportal Hessen) orientieren.

³¹ Laut Schwarz und Bischoff (2009; 2017), sowie Bischoff et al. (2017) zeichnet sich die Region durch ein vergleichsweise hohes Nitratinfiltrationsvermögen ins Grundwasser aus. Ausgelöst u.a. durch eine unangepasste N-Düngung kommt es daher teilweise zu Nitratauswaschungen ins Grundwasser, weshalb seitens der örtlichen Wasserversorger in Kooperation mit den ansässigen Landwirten Anstrengungen vorgenommen werden, den Einfluss der Landwirtschaft zu reduzieren. Daher könnte eine höhere N-Effizienz oder eine geringere N-Düngung durch den Einsatz von PF einen positiven Effekt auf die Grundwasserqualität haben.

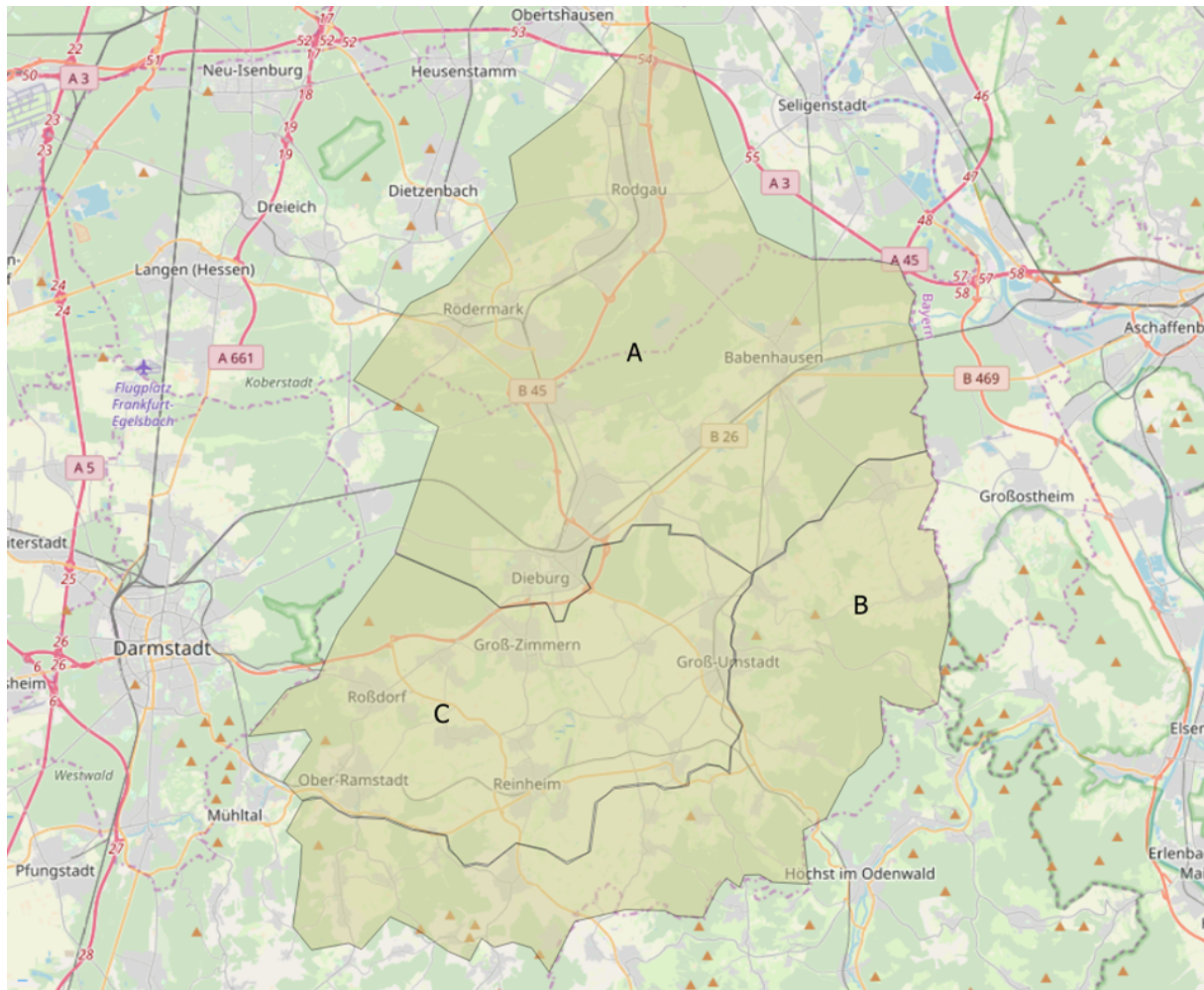


Abbildung 9: Umfragegebiet, unterteilt in drei Standortzonen, die sich an den Naturräumen orientieren (eigene Darstellung mit QGIS, Verwendung der OpenStreetMap)

Wie vorab erklärt, sollten die befragten Landwirte ihren Betrieb (überwiegender Anteil der Flächen) in eine der drei Zonen einordnen. Standort A beschreibt ein Gebiet mit alluvial-diluvialer Heterogenität der Böden. Naturräumlich ist dieser Bereich der Untermainebene zuzuordnen, die sich vor allem durch sandige und nährstoffärmere Böden kennzeichnet. In Standort B wurde der Naturraum Vorderer Odenwald sowie die sog. Kleine Bergstraße eingeteilt. Außerdem umfasst diese Zone den südlichen Teil des Reinheimer Hügellands. Die Flächen und auch einzelne Schläge in diesem Bereich sind durch topografisch bedingte Heterogenität gekennzeichnet. Der nördliche Teil des Reinheimer Hügellands, welches sich von Ober-Ramstadt im Westen bis Groß-Umstadt im Osten erstreckt und von Untermainebene und Vorderem Odenwald eingeschlossen ist, sowie der Übergangsbereich zur Untermainebene bilden Standort C. Die Böden dieses Standorts zeichnen sich durch ihre hohe Ertragsfähigkeit und vergleichsweise geringen Heterogenität aus und verfügen über einen hohen Lössanteil.

Die Erhebung betriebs- und sozioökonomischer Daten zielte darauf ab, mögliche Unterschiede hinsichtlich der Einstellung zu PF in Abhängigkeit dieser Faktoren zu erfassen. Nach Paustian und Theuvsen (2016; 2017) haben bspw. das Alter der Betriebsleiter, deren Ausbildung, die Betriebsgröße oder die betriebliche Ausrichtung einen wesentlichen Einfluss auf die Umsetzung von PF im Betrieb. Bezüglich der betrieblichen Ausrichtung wurden den Befragten Antwortmöglichkeiten vorgegeben. Mehrfachnennungen unter den Alternativen *Ackerbau*, *Tierhaltung*, *Sonderkulturen*, *Direktvermarktung* und *Sonstiges* waren zugelassen. Darüber hinaus sollte mit der Angabe der auf dem Betrieb vorhandenen Großvieheinheiten (GV) und des Grünlandanteils der Betrieb ergänzend charakterisiert werden. Die Erwerbsform (Haupt- oder Nebenerwerb), die Art der Bewirtschaftung (ökologisch oder konventionell wirtschaftend) sowie die Anzahl der verfügbaren Arbeitskräfte im Betrieb als Indikator für arbeitswirtschaftliche Überlegungen wurde ebenfalls abgefragt. Zusätzlich sollten die Landwirte ihre Pflanzenbaustrategie einordnen, indem sie unter verschiedenen Antwortmöglichkeiten (Futterbau, Cash-Crops, Diversifizierung, Aspekte der Arbeitswirtschaft) wählen konnten und die Intensität des Pflanzenbaus auf einer Likert-Skala beschreiben. Der Frage, wer zentrale Arbeiten des Pflanzenbaus im Betrieb durchführt (innerbetrieblich, vom Betriebsleiter selbst erledigt oder im Lohn vergeben), wird ebenfalls nachgegangen. Die zentrale Frage, ob die Landwirte innerhalb und zwischen ihren Flächen heterogene Bedingungen sehen und ob sie ihre Bewirtschaftung danach anpassen, wurde wiederum mit Likert-Skalen untersucht. Gleiches gilt für den angenommenen ackerbaulichen und ökonomischen Nutzen von PF. Die Voraussetzungen und Hemmnisse bei der Einführung von PF, die die Landwirte für sich und ihren Betrieb sehen, wurden zur Auswahl vorgegeben.

5.4 Ergebnisse der Umfrage

Die 50 eingegangenen Fragebögen wurden vollständig beantwortet und gingen somit in die Auswertung ein. Obwohl auch ökologisch wirtschaftende Betriebe kontaktiert wurden, sind unter den beantworteten Fragebögen nur konventionell wirtschaftende Betriebe. Die Fragebögen wurden digitalisiert und die gewonnenen Daten mit dem Programm *SPSS* ausgewertet.

5.4.1 Deskriptive Statistik

Die Einteilung der Betriebe zu den vorgegebenen Standorten ergibt ein heterogenes Verteilungsbild. Die Hälfte der Landwirte ordnen sich dem Standort C zu, während auf die Standorte A und B 32 % bzw. 18 % entfallen.

In den Tabellen 3-5 sind die Ergebnisse der betriebs- und sozioökonomischen Erhebung aufgeführt. Nach Angaben der befragten Landwirte liegt die durchschnittliche Betriebsgröße in der Stichprobe bei ca. 105 ha. Hiervon entfielen ca. 19 ha auf Grünland und ca. 86 ha auf die Bewirtschaftung von Ackerland, zu dem auch Dauerkulturflächen wie Spargel oder Erdbeeren gezählt werden. Die mittlere Kulturenanzahl von 5,65 inkl. Ackergras lässt eine diversifizierte Fruchtfolgegestaltung vermuten, wobei diese zwischen 3 und 10 Kulturen schwankt. Der durchschnittliche Viehbesatz in den befragten Betrieben ergibt sich durch Division der GV durch die bewirtschaftete Fläche, dieser liegt bei 0,48 GV/ha. Auffällig ist zudem, dass mit 4 % (2 von 50) nur ein geringer Anteil der Befragten angab, weiblichen Geschlechts zu sein.

Tabelle 3: Deskriptive Statistik zur soziodemografischen und betriebsspezifischen Charakterisierung mit n = 50 (eigene Erhebung)

Variable	Beschreibung	Min	Max	Median	Mittelwert (SA)
Alter	Das Alter des befragten Landwirts	19	67	50	46,26 (12,11)
Personal	Anzahl der Mitarbeiter inklusive des Betriebsleiters	1	6	3	2,87 (1,36)
LF	Bewirtschaftete landwirtschaftl. Nutzfläche in ha	22	290	100,50	104,96 (52,27)
Grünlandanteil	Anteil des bewirtschafteten Grünlands in %	0	80	16,5	17,74 (17,49)
Großvieheinheiten	Anzahl der im Betrieb befindlichen GV	0	250	30	57 (70,95)
Viehbesatz	GV pro Hektar Betriebsfläche	0	1,82	0,29	0,48 (0,54)
Kulturen	Anzahl der auf dem Ackerland angebauten Kulturen inkl. Ackerfutter	3	10	5,00	5,66 (1,6)

Tabelle 4: Deskriptive Statistik zum Berufsabschluss der befragten Landwirte mit n = 50 (eigene Erhebung)

Landwirtschaftlicher Berufsabschluss	Klasse	Anteil
Keine landwirtschaftliche Ausbildung	1	10 %
Ausgebildeter Landwirt	2	18 %
Meister (weiterführende Ausbildung)	3	32 %
Techniker (weiterführende Ausbildung)	3	20 %
Fachhochschulabschluss (akademische Ausbildung)	4	14 %
Universitätsabschluss (akademische Ausbildung)	4	2 %
Sonstiges (Antwort: jeweils staatl. geprüfter Wirtschaftler, weiterführende Ausbildung)	3	4 %

Tabelle 5: Deskriptive Statistik zur soziodemografischen und betriebsspezifischen Charakterisierung mit n = 50, Teil II (eigene Erhebung)

Variable	Beschreibung	Anteil
Geschlecht	Anteil der weiblichen befragten Landwirte	4 %
Erwerbsform	Anteil der Haupterwerbsbetriebe unter den Befragten	76 %
Ackerbau als Hauptbetriebszweig	Anteil der Befragten die den Ackerbau als Hauptbetriebszweig nennen	86 %
Tierhaltung als Hauptbetriebszweig	Anteil der Befragten die Tierhaltung als Hauptbetriebszweig nennen	66 %
Sonderkulturen als Hauptbetriebszweig	Anteil der befragten die Sonderkulturen als Hauptbetriebszweig nennen	12 %
Direktvermarktung als Hauptbetriebszweig	Anteil der befragten die Direktvermarktung als Hauptbetriebszweig nennen	18 %

Es zeigt sich, dass nicht alle Betriebe ihren Betriebs- bzw. Erwerbsschwerpunkt im Ackerbau haben. Insbesondere die Tierhaltung spielt in der betrachteten Region eine Rolle, es werden Sonderkulturen (bspw. Spargel und Erdbeeren) angebaut und Direktvermarktung betrieben. Einige Betriebe haben sonstige Betriebszweige, die einen wesentlichen Einkommenseffekt für die Betriebe haben, wie bspw. Pferdepension, Lohnarbeit oder Erneuerbare Energien (Antworten der Befragten). Außerdem führen 24 % der befragten Landwirte ihren Betrieb im Nebenerwerb. Die Pflanzenbaustrategie der Betriebe ergibt sich aus der betrieblichen Ausrichtung und wurde mit einer Vorauswahl abgefragt. Eine Diversifizierung der Fruchtfolge ist für fast die Hälfte der Befragten die Orientierung ihres Pflanzenbaus. Ein großer Teil orientiert sich am Anbau von Kulturen mit hohem Deckungsbeitrag (Cash-Crops). Andere Anbauswerpunkte, wie bspw. Futterbau, sind eher weniger ausschlaggebend. Die Frage nach der Intensität abgefragt mit einer Likert-Skala (intensiv = 1, extensiv = 6) ergibt eine Tendenz in Richtung höherer Bewirtschaftungsintensität (Mittelwert 2,54).

Tabelle 6: Überwiegende Ausrichtung der befragten Landwirte hinsichtlich des Pflanzenbaus in ihrem Betrieb mit n = 50 (eigene Erhebung)

Variable	Beschreibung	Anteil
Diversifizierung der Fruchtfolge	Der Landwirt streut Anbaurisiko durch den Anbau von Kulturen im Sinn einer ausgewogenen Fruchtfolge	46 %
Wirtschaftliche Kulturen	Der Fokus des Landwirts liegt auf dem Anbau von Kulturen mit hohem Deckungsbeitrag	38 %
Arbeitswirtschaftliche Überlegungen	Aus verschiedenen Gründen wird der Ackerbau danach ausgerichtet möglichst wenig Zeit damit zu verbringen.	8 %
Anbau von Futter	Die Tierhaltung stellt den/einen Hauptbetriebszweig des Betriebs dar, der sich durch den Ackerbau mit Futter versorgt.	6 %
Sonstiges		2 %

Die Diversifizierung der Fruchtfolge ist ein Anzeichen für die Anpassung der Betriebe an vorhandene Standortheterogenität. Dies steht in Verbindung mit der Anzahl der angebauten Kulturen. So könnten die Bodenbedingungen auf bestimmten Schlägen nicht für den Anbau einiger Kulturen geeignet sein, weshalb auf den Anbau einer anderen, besser geeigneten Kultur zurückgegriffen wird (bspw. Raps und Roggen auf Sandböden mit niedriger nFK statt Weizen und Zuckerrüben). Gleichzeitig dürften wirtschaftliche Überlegungen bezüglich der Reduktion von Risiko (Risikomanagement) und ackerbauliche Anforderungen eine wesentliche Rolle bei der Gestaltung der Fruchtfolge spielen.

Die Arbeitserledigung in den Betrieben unterscheidet sich vor allem bezüglich der Arbeitsgänge. So werden insbesondere Schlüsselaufgaben im Pflanzenbau (N-Düngung und Pflanzenschutz) sowie die Feld- bzw. Bestandsbonitur überwiegend vom Betriebsleiter durchgeführt, während die Ernte überwiegend an Lohnunternehmen vergeben wird. Die nachfolgende Tabelle 7 gibt die Häufigkeitsverteilung der Antworten der Befragten an, welche Arbeitsgänge von wem überwiegend durchgeführt werden. Dabei mussten sich die Befragten zwischen einer der drei Möglichkeiten entscheiden, wer welche Arbeiten überwiegend ausführt. Die Kommentare lassen vermuten, dass dies nicht immer eindeutig zu beantworten war.

Tabelle 7: Deskriptive Statistik der Antworten auf die Frage, durch wen welche Arbeitsgänge überwiegend durchgeführt werden mit n = 50 (eigene Erhebung)

Arbeitsgang	Betriebsleiter	Generell innerbetrieblich	Im Lohn vergeben
Bodenbearbeitung	30 %	70 %	0 %
Aussaat	70 %	28 %	2 %
Düngung (organisch)	38 %	42 %	20 %
N-Düngung (mineralisch)	87 %	18 %	4 %
Grunddüngung (mineralisch)	64 %	30 %	6 %
Pflanzenschutz/ Pflege	72 %	14 %	14 %
Ernte	8 %	18 %	74 %
Feld-/Bestandsbonitur	68 %	26 %	6 %

Die Gründe für die Verteilung der einzelnen Arbeiten ähneln sich. So werden insbesondere bei der Auftragsvergabe an Lohnunternehmen Kostengründe für den erforderlichen Maschineneinsatz genannt. Aber auch der Faktor Arbeitszeit bzw. die Verfügbarkeit ausreichend qualifizierter Arbeitskräfte ist für die Betriebsleiter ein wichtiger Entscheidungsgrund. Demgegenüber werden insbesondere zentrale Arbeiten des Pflanzenbaus, wie bspw. Pflanzenschutz, Aussaat und N-Düngung von den Landwirten selbst durchgeführt. Eine Auswahl der diesbezüglichen Antworten ist in Tabelle 8 wiedergegeben.

Tabelle 8: Auswahl der Begründungen der befragten Landwirte, weshalb die Durchführung der Arbeiten im Pflanzenbau entsprechend erfolgt (eigene Erhebung)

Wer erledigt die Arbeit?	Begründungen
Betriebsleiter	„Arbeitseinteilung und Erfahrung, ich kenne meine Schläge“; „weil meistens nur ich Zeit habe/ einzige Arbeitskraft im Betrieb“; „Höhere Genauigkeit als Lohnunternehmer; Genauigkeit und Zuverlässigkeit“; „Nur ich habe einen Sachkundenachweis für den Pflanzenschutz“; „betriebswirtschaftliche Gründe; Arbeitskraftverfügbarkeit“; „weil der Betriebsleiter eine kontrollierende Funktion hat; Arbeitsteilung im Betrieb“
generell innerbetrieblich	„Weil dadurch die Arbeiten zum besten Zeitpunkt und in bester Qualität ausgeführt werden“; „Kostengründe; Maschinen sind vorhanden“; „Auslastung von Maschinen; Terminarbeit erfordert direkte Umsetzung“; „gut ausgebildete, interessierte, verantwortungsbewusste Mitarbeiter“; „Arbeitskraft ist vorhanden“;
durch Lohnarbeit	„Insbesondere Investitionen in Erntemaschinen zu teuer“; „Auslastung für Maschinen fehlt“; „Zeit- und Kostenersparnis; Schlagkraft und Arbeitswirtschaft“; „bessere Technik und besseres Wissen“; „Pflanzenschutz- und Dreschgemeinschaft“; „Zuckerrübenaussaat und -ernte ist günstiger, da Auslastung fehlt“; „Kosten, Zeit, Maschinen, Platzbedarf“

Obwohl sich die Antworten auf die Frage, wer welche Arbeiten durchführt, unterscheiden, sind die Begründungen dafür ähnlich. Neben den Faktoren Arbeitszeit, Kosten sowie der Verfügbarkeit ausreichend qualifizierter Mitarbeiter, wird die Bedeutung der Erfahrung des Betriebsleiters für die Bewirtschaftungsentscheidungen und die Arbeitserledigung herausgestellt. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen, wie die Landwirte die Heterogenität innerhalb und zwischen ihren Schlägen einschätzen und ob sie ihre Bewirtschaftung an diese Unterschiede anpassen. Nach Einschätzung der befragten Landwirte liegen innerhalb der Schläge geringere Bodenunterschiede vor als zwischen den Schlägen. Auch wird deutlich, dass sie ihre Bewirtschaftung eher zwischen als innerhalb der Schläge anpassen.

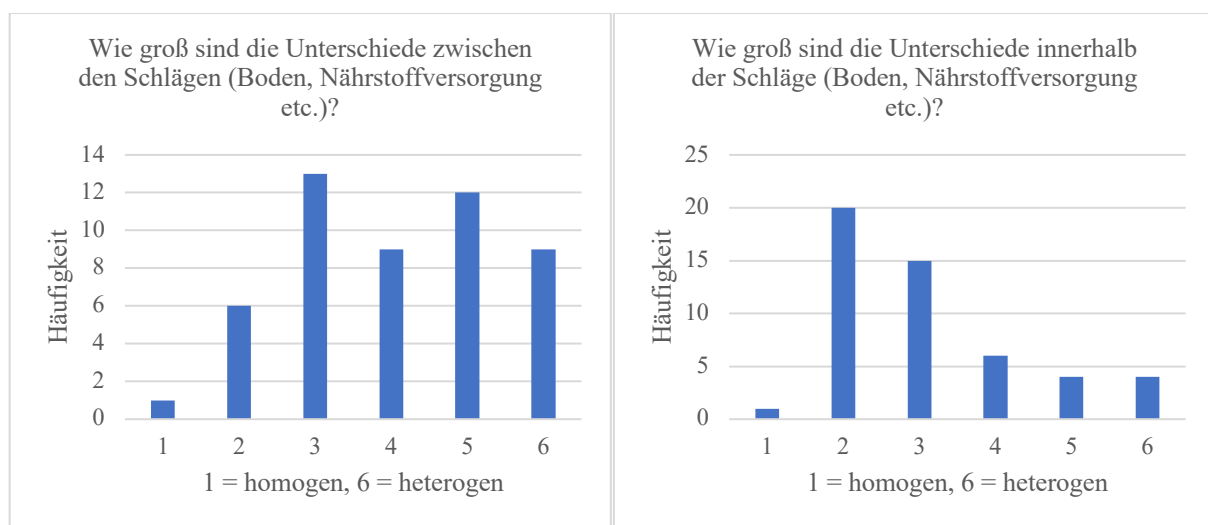


Abbildung 10: Häufigkeit der Antworten zur Frage nach der wahrgenommenen Heterogenität zwischen (links) und innerhalb (rechts) Schläge der Befragten mit n = 50 (Auszug aus SPSS)

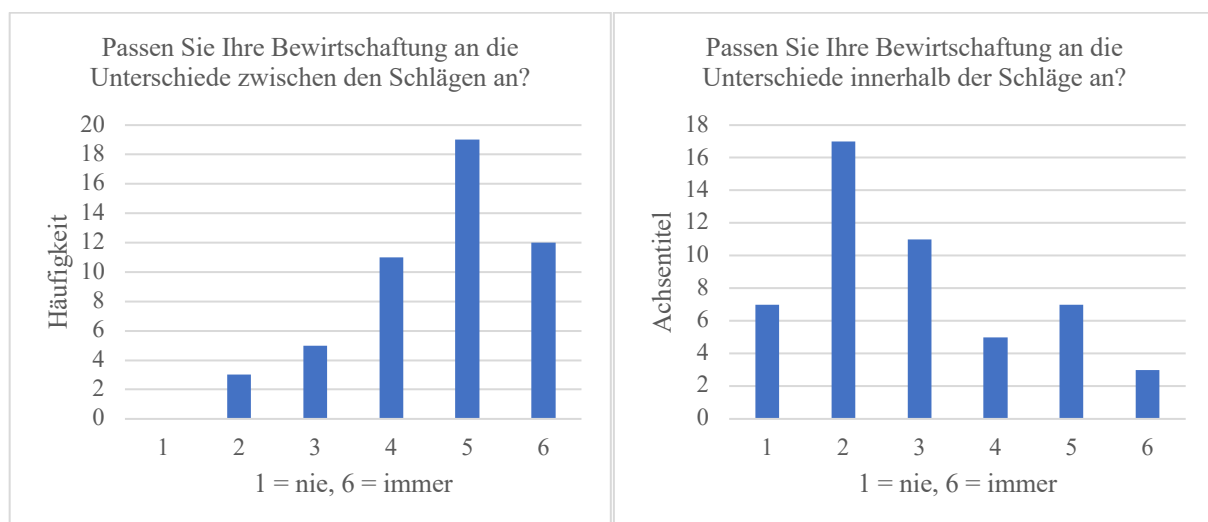


Abbildung 11: Häufigkeit der Antworten zur Frage, ob die Befragten Ihre Bewirtschaftung an die Unterschiede zwischen (links) und innerhalb (rechts) ihrer Schläge anpassen mit n = 50 (Auszug aus SPSS)

Um zu identifizieren, welche Anpassungen die Landwirte tätigen, sollten die Befragten angeben, bei welchem Arbeitsgang sie diese vornehmen. Es zeigt sich, dass insbesondere bei der N-Düngung Anpassungen an die Bodenunterschiede erfolgen. Während sich bezüglich der Bodenbearbeitung und des Pflanzenschutzes ein ausgeglichenes Bild ergibt, passen die meisten Befragten sowohl die Aussaat als auch die Grunddüngung nicht an die Unterschiede an. In Tabelle 9 sind darüber hinaus noch einige Kommentare der befragten Landwirte aufgeführt.

Tabelle 9: Deskriptive Statistik und Kommentare zu Anpassungsformen der Bewirtschaftung unter den befragten Landwirten mit n = 50 (eigene Darstellung und Erhebung)

Arbeitsgang	Anteil der Befragten
Bodenbearbeitung	48 %
„Bearbeitungstiefe“; „Bearbeitungsintensität“; „Fahrgeschwindigkeit“; „Einstellung“; „teilweise doppelt“	
N-Düngung	66 %
„in Bereichen mit Lagerneigung Minustaste“; „Variation der Menge abhängig von Wasserversorgung und Boden“; „nach Bestandsentwicklung angepasst“; „schneller oder langsamer fahren, um Menge anzupassen“	
Grunddüngung	32 %
„mehrere Bodenproben je Schlag hängig von Bodenbedingungen und Vorbewirtschafter; „bei organischer Düngung“; „Mengenvariation je nach Lage“	
Aussaat	24 %
„Sortenwahl und Aussaatstärke“; „Ablagetiefe möglichst an Bodenbedingungen angepasst, wenn möglich“; „Aussaatmenge bzw. Pflanzendichte variiert“	
Pflanzenschutz/ Pflege	48 %
„nach Feldkontrolle an Unkrautbesatz“; „Aufwandmenge an bei stärkerem Unkrautbesatz“; „Unkrautunterschiede“; „Anpassung an Bodenart bzw. Erfolgsfähigkeit“; „bestandsabhängig“	
Sonstiges	2 %
k.A.	

Es fällt auf, dass sich die Kommentare zur Durchführung der Anpassungsmaßnahmen nicht auf technisch aufwendige Verfahren wie bspw. Biomassekarten oder N-Sensoren beziehen. Vielmehr erfolgen die Anpassungen vor allem analog durch Maschineneinstellungen und händische Mengenanpassungen oder es werden lediglich Teilflächen bearbeitet. Dies ist bemerkenswert, da bspw. Paustian und Theuvsen (2016) aber auch Michels et al. (2019; 2020) die Technikaffinität von Landwirten betonen. Auch für die befragten Landwirte bestätigt sich die Einschätzung einer hohen Technologieaffinität in dieser Berufsgruppe. Zwar schätzen sich die Befragten im Durchschnitt nicht als risikofreudig ein, jedoch ist die Neugier bezüglich neuer Technologien und die Bereitschaft diese auszuprobieren hoch. Auch der Austausch mit Kollegen und Informationsbeschaffung über Technologie insgesamt wird positiv bewertet.

Zudem sehen die Landwirte digitale Anwendungen als sinnvolle Entscheidungshilfen bei der Bewertung und Bewirtschaftung heterogener Flächen an. Die Berücksichtigung vorhandener Heterogenität wird als ackerbaulich und ökonomisch sinnvoll erachtet, ohne dabei Bezug auf digitale Entscheidungshilfen zu nehmen.

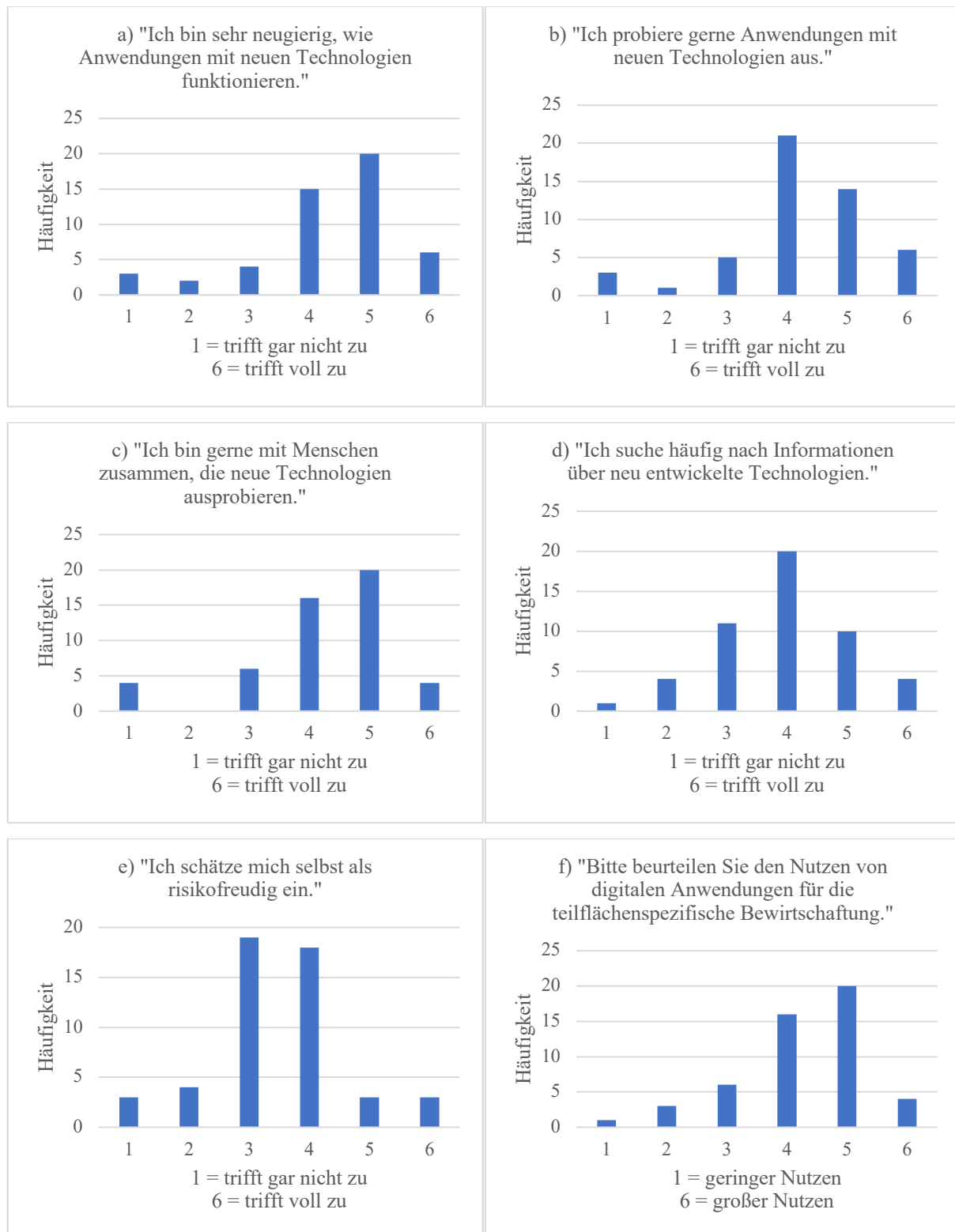


Abbildung 12: Antwortverhalten der befragten Landwirte bezüglich der Anwendung von neuen Technologien (a – e)), sowie des Nutzens von digitalen Anwendungen für PF (f)) mit n = 50 (Auszug aus SPSS)

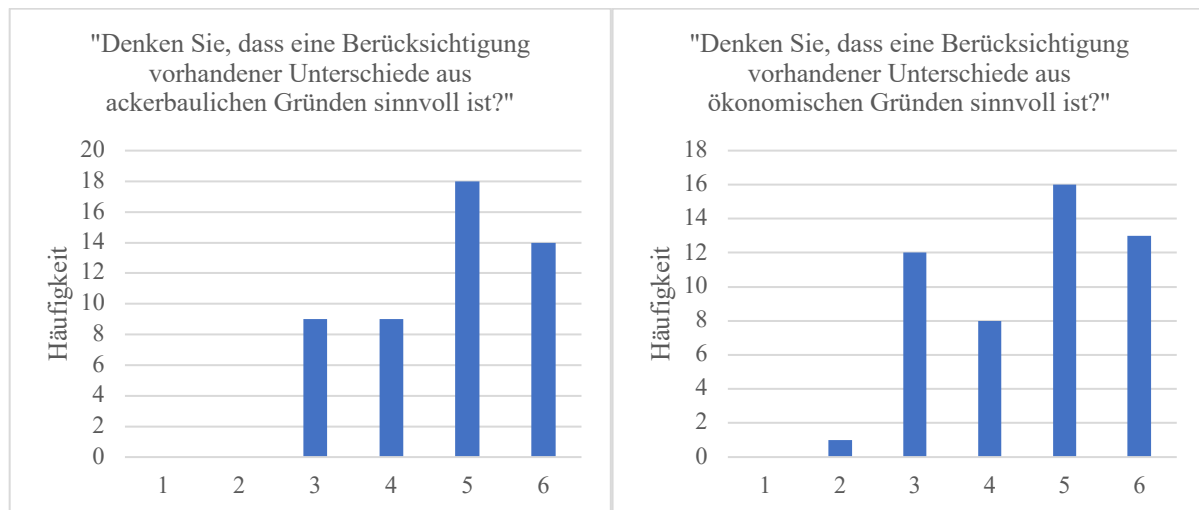


Abbildung 13: Antwortverhalten der befragten Landwirte bezüglich der Sinnhaftigkeit der Berücksichtigung vorhandener Unterschiede aus ackerbaulichen (links) und ökonomischen (rechts) Gründen mit n = 50 (Auszug aus SPSS)

Es stellt sich die Frage, welche Voraussetzungen die Landwirte erfüllt sehen wollen, um PF auf ihren Betrieben implementieren zu können. Dabei ist der Fokus vor allem auf die Anpassung innerhalb der Schläge zu richten, die im betrachteten Umfragegebiet nur eine geringe Bedeutung hat. Konkret wurde folgende Frage gestellt: Unter welchen Voraussetzungen würden Sie die teilflächenspezifische bzw. angepasste Bewirtschaftung auf Ihrem Betrieb einführen bzw. ausbauen, wo sehen Sie das größte Potenzial für ihren Betrieb?

Eine mehrfache Antwort war den Befragten gestattet. Die Frage nach der Wirtschaftlichkeit der Verfahren spielt für die Landwirte dabei eine wichtige Rolle. So gibt eine Mehrheit der Befragten an, dass ökonomische Vorteile, sowohl durch Ertragssteigerungen als auch durch Kostensenkungen, für sie eine Voraussetzung für die Nutzung von PF ist und an dieser Stelle das größte Potenzial für deren Betrieb liegt. Darüber hinaus wollen sie jedoch auch ökologische Faktoren, wie z.B. ein effizienterer Betriebsmitteleinsatz, erfüllt sehen³². Sollten sich grundsätzliche pflanzenbaulichen Vorteile ergeben oder gesetzliche Standards besser erfüllen lassen, so würde das die Implementierung ebenfalls vorantreiben. Eine eher geringere Bedeutung haben für die Betriebe jedoch politische und gesellschaftliche Anreize, arbeitswirtschaftliche Vorteile werden ebenfalls nur von knapp der Hälfte der Befragten als Voraussetzung genannt. Der Aspekt des technischen Fortschritts spielt für die Betriebe, obwohl

³² Kuhlmann und Neumann (2011) stellen in ihrer Sensitivitätsanalyse fest, dass ein höherer Stickstoffpreis (oder auch knappere Verfügbarkeit, die sich in einem höheren Preis niederschlägt) zu einem wirtschaftlichen Vorteil von PF führt. Dieser ökonomische Vorteil entsteht durch sowohl Kostensenkungen als auch Ertragssteigerungen und hat durch den effizienteren Einsatz des Stickstoffs einen positiven ökologischen Effekt aufgrund geringerer N-Überschüsse.

sie grundsätzlich eine positive Einstellung gegenüber neuen Technologien haben, eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 10: Voraussetzungen für die befragten Landwirte zur Implementierung bzw. Erweiterung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung in ihrem Betrieb mit n = 50 (eigene Erhebung)

Voraussetzung	Anteil der Befragten
Ökonomische Vorteile durch Kostensenkungen	76 %
Pflanzenbauliche Vorteile	72 %
Ökonomische Vorteile durch Ertragssteigerungen	72 %
Ökologische Vorteile durch effizienteren Betriebsmitteleinsatz	68 %
Besseres Erfüllen gesetzlicher Standards (z.B. DüV)	66 %
Arbeitswirtschaftliche Vorteile	48 %
Gesellschaftliche Anreize (Akzeptanzsteigerung in der Bevölkerung)	32 %
Politische Anreize zur Nutzung der Technik (z.B. Förderungen)	30 %
Schritthalten mit technischem Fortschritt	18 %
Sonstiges	0 %

Neben Treibern, die die Voraussetzungen zur Implementierung von PF schaffen, bestehen außerdem auch gewisse Hindernisse, die die Betriebe aktuell an einer Investition hindern. Der wichtigste Punkt ist den befragten Landwirten dabei die Höhe der Anschaffungskosten. So geben 94 % aller Befragten an, dass die hohen Investitionskosten nicht einem möglichen Nutzenzuwachs entsprechen. Dies ist insofern interessant, da nur genau die Hälfte der Befragten fehlenden ökonomischen Nutzen als Hindernis nennt. Fehlenden ackerbaulichen Nutzen nennen nur etwa ein Viertel der Befragten als Grund für eine ausbleibende Investition. Eine Minderheit von 4 % der Befragten gibt fehlende Bereitschaft zur Aneignung und Umsetzung von Wissen als Hindernis an, was wiederum die Technologieaffinität der untersuchten Gruppe bestätigt. Als sonstige Gründe werden der Zeitmangel für die Implementierung entsprechender Systeme des PF im jeweiligen Betrieb und die häufig „zu kleinen Schlagstrukturen“ genannt, die den Nutzen von PF grundsätzlich in Frage stellen (Vgl. nachfolgende Tabelle 11).

Tabelle 11: Hindernisgründe für die befragten Landwirte bei der Implementierung von Techniken und Methoden des PF auf ihrem Betrieb mit n = 50 (eigene Darstellung und Erhebung)

Hindernisse zur Implementierung von PF	Anteil der Befragten
Höhe der Anschaffungskosten	94 %
Fehlender ökonomischer Nutzen	50 %
Fehlender ackerbaulicher Nutzen	26 %
Fehlende Bereitschaft zur Aneignung und Umsetzung von Wissen	4 %
Sonstiges	10 %

Mit der Analyse der Deskriptiven Statistik konnte ein Überblick über die befragte Gruppe von Landwirten gewonnen werden. Aus der Befragung geht zusammenfassend hervor, dass die grundsätzlich positive Einstellung der Landwirte gegenüber Technologie, die in anderen Studien bereits festgestellt wurde, zumindest für die Untersuchungsgruppe bestätigt werden kann. Dies gilt auch für die Nutzung von Systemen des PF. Technisch aufwendigere Verfahren haben aktuell nur eine geringe Bedeutung in den befragten Betrieben. Die Höhe der Anschaffungskosten und der nicht offensichtliche oder fehlende tatsächliche adäquate Nutzen der Technik verhindern höhere Implementierungsraten. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen von Breunig et al. (2022) sowie Gandorfer und Meyer-Aurich (2017). Anstatt neue Technologien einzusetzen vertrauen die befragten Landwirte in Bezug auf mögliche Bewirtschaftungsanpassungen bei vorhandener Heterogenität ihrer Flächen eher auf ihr einschlägiges Expertenwissen über die betreffende Schlagcharakteristik. Die Einschätzung eines strukturbedingten Precision Farming scheint sich ebenfalls zu bestätigen, was aus den Antworten bezüglich der Bewirtschaftungsanpassung zwischen den Schlägen hervorgeht.

5.4.2 Überprüfung der Hypothesen

Durch die Deskriptive Statistik der Umfragedaten konnte ein genauer Einblick in die Stichprobe gewonnen werden. Die gewonnenen Daten zeigen erste Einschätzungen über die Präferenzen der befragten Landwirte bezüglich des Einsatzes neuer Technologien des PF und der möglichen Implementierung auf ihren Betrieben. Daran anschließend stellt sich die Frage, ob Unterschiede hinsichtlich des Antwortverhaltens zwischen den Befragten hinsichtlich des Betriebsstandorts, der Betriebsgröße, der betrieblichen Ausrichtung und Arbeitserledigung bestehen. Gleichzeitig ist zu prüfen, ob und inwieweit soziodemografische Einflussfaktoren auf das Antwortverhalten

wirken. Zur Überprüfung der Hypothesen werden statistische Verfahren (Tests) herangezogen. Während Hypothesen mit ordinal skalierten abhängigen Variablen durch einen Kruskal-Wallis-Test (H-Test) überprüft werden können, ist dies mit nominalskalierten Variablen nicht möglich. Demzufolge wird die Hypothese H8 mit einer Kreuztabellierung mit Kontingenzanalyse überprüft. Der H-Test überprüft, ob sich die zentralen Tendenzen unabhängiger Stichproben unterscheiden. Die absoluten Abstände der Daten werden beim H-Test nicht berücksichtigt und diese lediglich in eine Rangordnung gebracht. Anschließend werden Rangsummen für jede Testgruppe gebildet und daraus die Teststatistik errechnet. Der so errechnete Wert wird mit einem Tabellenwert verglichen und daran abgeleitet, ob ein beobachteter Unterschied signifikant und ökonomisch bedeutsam ist. Da die Signifikanz allein nichts über die Richtung eines Zusammenhangs aussagt, werden zudem die mittleren Ränge der Variablengruppen bestimmt und miteinander verglichen. Für den Fall, dass die Nullhypothese abgelehnt wird und ein signifikanter Zusammenhang festgestellt wurde, sind zudem die mittleren Ränge der Variablengruppen tabellarisch aufgeführt. Daran kann jeweils die Effektrichtung, die nachfolgend auch erläutert wird, abgelesen werden.

Mit einer Kreuztabellierung und Kontingenzanalyse werden Zusammenhänge zwischen nominalskalierten Variablen geprüft. Dabei wird zunächst eine Kreuztabelle erstellt und die Gesamtzahl an Beobachtungen der jeweiligen Kombination bestimmt. Häufig werden diese Werte in Prozentzahlen überführt, was eine Verbesserung der Übersichtlichkeit bewirkt. Anschließend erfolgt die Interpretation der Ergebnisse. Mit der Prüfung auf mögliche Zusammenhänge wird die Kontingenzanalyse abgeschlossen und so ermittelt, ob sich die aus der Ergebnisinterpretation hervorgegangenen vermuteten Zusammenhänge auf die Grundgesamtheit übertragen lassen oder rein zufällig aufgetreten sind. Darüber hinaus wird bestimmt, wie stark der beobachtete Zusammenhang ist (Backhaus et al. 2018). Die Ergebnisse der H-Tests sind in den Tabellen 12-16 aufgeführt, die der Kontingenzanalyse in den Tabellen 17-21.

Tabelle 12: Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen mit dem Kruskal-Wallis-Test (H-Test) und Bestimmung der Signifikanzniveaus (errechnet mit SPSS) Teil 1

Hypothese	Beschreibung	Kruskal-Wallis-H	Exakte Signifikanz p
H1a	Landwirte, die Heterogenität zwischen ihren Schlägen wahrnehmen, passen ihre Bewirtschaftung auch danach an.	1,459	0,230
H1b	Landwirte, die Heterogenität innerhalb ihrer Schläge wahrnehmen, passen ihre Bewirtschaftung auch danach an.	1,841	0,181
H2a	Der Standort des Betriebs wirkt sich auf die Heterogenität zwischen den Schlägen aus.	5,949	0,048**
H2b	Der Standort des Betriebs wirkt sich auf die Heterogenität innerhalb der Schläge aus.	4,017	0,134
H2c	Die Anpassung der Bewirtschaftung zwischen den Schlägen erfolgt abhängig vom Standort des Betriebs unterschiedlich stark.	2,629	0,274
H2d	Die Anpassung der Bewirtschaftung innerhalb der Schläge erfolgt abhängig vom Standort des Betriebs unterschiedlich stark.	0,262	0,882
H3a	Die Erwerbsform des Betriebs beeinflusst, wie stark die Anpassung der Bewirtschaftung zwischen den Schlägen erfolgt.	2,334	0,130
H3b	Die Erwerbsform des Betriebs beeinflusst, wie stark die Anpassung der Bewirtschaftung innerhalb der Schläge erfolgt.	0,066	0,807
H3d	Die Erwerbsform des Betriebs beeinflusst den wahrgenommenen Nutzen von digitalen Anwendungen für die Implementierung von PF.	0,643	0,428
H3e	Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich abhängig von der Erwerbsform der Betriebe.	3,910	0,051*
H3f	Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich abhängig von der Erwerbsform der Betriebe.	0,009	0,927
H4a	Ackerbaubetriebe passen ihre Bewirtschaftung eher an vorhandene Unterschiede zwischen den Schlägen an.	4,224	0,049**
H4b	Ackerbaubetriebe passen ihre Bewirtschaftung eher an vorhandene Unterschiede innerhalb der Schläge an.	8,703	0,002***
H4d	Der wahrgenommene Nutzen von digitalen Anwendungen bei der Implementierung von PF unterscheidet sich abhängig davon, ob der Ackerbau ein Hauptbetriebszweig ist.	4,623	0,027**

Signifikanzniveaus: * $p \leq 0,1$; ** $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,01$

Tabelle 13: Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen mit dem Kruskal-Wallis-Test (H-Test) und Bestimmung der Signifikanzniveaus (errechnet mit SPSS) Teil 2

Hypothese	Beschreibung	Kruskal-Wallis-H	Exakte Signifikanz p
H4e	Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich in Abhängigkeit davon, ob der Ackerbau ein Hauptbetriebszweig ist.	5,506	0,019**
H4f	Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich in Abhängigkeit davon, ob der Ackerbau ein Hauptbetriebszweig ist.	4,592	0,033**
H5a	Betriebe mit einem höheren Viehbesatz passen ihre Bewirtschaftung weniger stark an vorhandene Unterschiede zwischen den Schlägen an.	0,266	0,604
H5b	Betriebe mit einem höheren Viehbesatz passen ihre Bewirtschaftung weniger stark an vorhandene Unterschiede innerhalb der Schläge an.	0,168	0,693
H5c	Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Viehbesatzes.	1,193	0,285
H5d	Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Viehbesatzes.	0,045	0,836
H6a	Betriebe mit einem höheren Grünlandanteil passen ihre Bewirtschaftung weniger stark an vorhandene Unterschiede zwischen den Schlägen an.	0,118	0,752
H6b	Betriebe mit einem höheren Grünlandanteil passen ihre Bewirtschaftung weniger stark an vorhandene Unterschiede innerhalb der Schläge an.	0,280	0,609
H6c	Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Grünlandanteils.	1,650	0,209
H6d	Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Grünlandanteils.	2,850	0,093*
H7a	Es besteht ein (positiver) Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und dem angegebenen Heterogenitätsgrad zwischen den Schlägen.	3,745	0,057*
H7b	Es besteht ein (positiver) Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und dem angegebenen Heterogenitätsgrad innerhalb der Schläge.	2,930	0,090*
H7c	Es besteht ein (positiver) Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und dem Anpassungsgrad der Bewirtschaftung an die Heterogenität zwischen den Schlägen.	0,125	0,734

Signifikanzniveaus: * $p \leq 0,1$; ** $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,01$

Tabelle 14: Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen mit dem Kruskal-Wallis-Test (H-Test) und Bestimmung der Signifikanzniveaus (errechnet mit SPSS) Teil 3

Hypothese	Beschreibung	Kruskal-Wallis-H	Exakte Signifikanz p
H7d	Es besteht ein (positiver) Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße und dem Anpassungsgrad der Bewirtschaftung an die Heterogenität innerhalb der Schläge.	0,002	0,966
H7e	Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich der Betriebsgröße.	2,718	0,102
H7f	Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich der Betriebsgröße.	0,063	0,807
H9a	Die Häufigkeit der Anpassung der Bewirtschaftung an die Heterogenität zwischen den Schlägen unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Landwirts.	0,004	0,958
H9b	Die Häufigkeit der Anpassung der Bewirtschaftung an die Heterogenität innerhalb der Schläge unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Landwirts.	0,333	0,575
H9d	Der wahrgenommene Nutzen digitaler Anwendungen für die Implementierung von PF unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Befragten.	2,509	0,115
H9e	Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Befragten.	0,471	0,493
H9f	Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Alters des Befragten.	0,027	0,881
H10a	Der Anpassungsgrad der Bewirtschaftung zwischen den Schlägen erfolgt in Abhängigkeit des Ausbildungsgrads des Befragten.	6,761	0,076*
H10b	Der Anpassungsgrad der Bewirtschaftung innerhalb der Schläge erfolgt in Abhängigkeit des Ausbildungsgrads des Befragten.	3,152	0,379
H10d	Der wahrgenommene Nutzen digitaler Anwendungen für die Implementierung von PF unterscheidet sich hinsichtlich des Ausbildungsgrads des Befragten.	6,731	0,076*
H10e	Die Einschätzung, ob PF aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Ausbildungsgrads des Befragten.	1,110	0,784
H10f	Die Einschätzung, ob PF aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist, unterscheidet sich hinsichtlich des Ausbildungsgrads des Befragten.	3,104	0,386

Signifikanzniveaus: * $p \leq 0,1$; ** $p \leq 0,05$; *** $p \leq 0,01$

Tabelle 15: Ergebnisse der Überprüfung der Hypothesen zur Technologieaffinität in Abhängigkeit der Erwerbsform (3c), der Rolle des Ackerbaus im Betrieb (4c), des Alters des Befragten (9c) sowie dessen Ausbildungsgrad (10c) mit dem Kruskal-Wallis-Test (H-Test) und Bestimmung des Signifikanzniveaus (errechnet mit SPSS)

Hypothese	Beschreibung	Kruskal-Wallis-H	Exakte Signifikanz p
H3c	Erwerbsform - „Ich bin sehr neugierig, wie Anwendungen mit neuen Technologien funktionieren.“	2,117	0,151
	Erwerbsform - „Ich probiere gerne Anwendungen mit neuen Technologien aus.“	0,568	0,457
	Erwerbsform - „Ich schätze mich selbst als risikofreudig ein.“	0,359	0,559
	Erwerbsform - „Ich bin gerne mit Menschen zusammen, die neue Technologien ausprobieren.“	0,229	0,662
	Erwerbsform - „Ich suche häufig nach Informationen über neu entwickelte Technologien.“	0,088	0,781
H4c	Rolle des Ackerbau - „Ich bin sehr neugierig, wie Anwendungen mit neuen Technologien funktionieren.“	0,750	0,386
	Rolle des Ackerbau - „Ich probiere gerne Anwendungen mit neuen Technologien aus.“	0,042	0,825
	Rolle des Ackerbau - „Ich schätze mich selbst als risikofreudig ein.“	0,000	0,999
	Rolle des Ackerbau - „Ich bin gerne mit Menschen zusammen, die neue Technologien ausprobieren.“	0,043	0,836
	Rolle des Ackerbau - „Ich suche häufig nach Informationen über neu entwickelte Technologien.“	0,358	0,575
H9c	Alter - „Ich bin sehr neugierig, wie Anwendungen mit neuen Technologien funktionieren.“	0,568	0,460
	Alter - „Ich probiere gerne Anwendungen mit neuen Technologien aus.“	0,052	0,822
	Alter - „Ich schätze mich selbst als risikofreudig ein.“	0,931	0,342
	Alter - „Ich bin gerne mit Menschen zusammen, die neue Technologien ausprobieren.“	0,002	0,984
	Alter - „Ich suche häufig nach Informationen über neu entwickelte Technologien.“	0,233	0,638
H10c	Ausbildungsgrad - „Ich bin sehr neugierig, wie Anwendungen mit neuen Technologien funktionieren.“	7,889	0,043**
	Ausbildungsgrad - „Ich probiere gerne Anwendungen mit neuen Technologien aus.“	0,976	0,817
	Ausbildungsgrad - „Ich schätze mich selbst als risikofreudig ein.“	0,243	0,973
	Ausbildungsgrad - „Ich bin gerne mit Menschen zusammen, die neue Technologien ausprobieren.“	3,927	0,276
	Ausbildungsgrad - „Ich suche häufig nach Informationen über neu entwickelte Technologien.“	1,119	0,784

Signifikanzniveaus: *p≤0,1; **p≤0,05; ***p≤0,01

Tabelle 16: Rangfolge der Faktorstufen und deren mittlere Ränge für die signifikant getesteten Hypothesen (eigene Erhebung mit SPSS)

Hypothese	Beschreibung	Rangfolge	Mittlere Ränge in Rangfolge
2a	Wie groß sind die Unterschiede zwischen den Schlägen?*Standort	Standort A > Standort B > Standort C	30,81 > 29,67 > 20,60
3e	Denken Sie, dass eine Berücksichtigung vorhandener Unterschiede aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist?*Erwerbsform	Haupterwerb > Nebenerwerb	27,70 > 18,54
4a	Passen Sie die Bewirtschaftung an die Unterschiede zwischen den Schlägen an?*Ist Ackerbau ein Hauptbetriebszweig?	Ackerbaubetrieb > kein Ackerbaubetrieb	27,14 > 15,43
4b	Passen Sie die Bewirtschaftung an die Unterschiede innerhalb der Schläge an?*Ist Ackerbau ein Hauptbetriebszweig?	Ackerbaubetrieb > kein Ackerbaubetrieb	27,98 > 10,86
4d	Nutzen digitaler Anwendungen für PF*Ackerbau als Hauptbetriebszweig?	Ackerbaubetrieb > kein Ackerbaubetrieb	27,20 > 15,07
4e	Denken Sie, dass eine Berücksichtigung vorhandener Unterschiede aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist?*Ackerbau als Hauptbetriebszweig?	Ackerbaubetrieb > kein Ackerbaubetrieb	27,37 > 14,00
4f	Denken Sie, dass eine Berücksichtigung vorhandener Unterschiede aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist?*Ackerbau als Hauptbetriebszweig?	Ackerbaubetrieb > kein Ackerbaubetrieb	27,22 > 14,93
6d	Denken Sie, dass eine Berücksichtigung vorhandener Unterschiede aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist?*Grünlandanteil (Gruppe)	Grünlandanteil gering > Grünlandanteil hoch	28,86 > 22,14
7a	Wie groß sind die Unterschiede zwischen den Schlägen?*Betriebsgröße (2 Klassen)	Betriebsgröße groß > Betriebsgröße klein	29,40 > 21,60
7b	Wie groß sind die Unterschiede innerhalb der Schläge?*Betriebsgröße (2 Klassen)	Betriebsgröße groß > Betriebsgröße klein	29,86 > 22,14
7d	Denken Sie, dass eine Berücksichtigung vorhandener Unterschiede aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist?*Betriebsgröße (2 Klassen)	Betriebsgröße groß > Betriebsgröße klein	28,76 > 22,24
10a	Passen Sie die Bewirtschaftung an die Unterschiede zwischen den Schlägen an?*Ausbildungsniveau (4 Klassen)	Klasse 1 > Klasse 3 > Klasse 4 > Klasse 2	30,42 > 28,70 > 18,71 > 17,56
10c (1)	„Ich bin sehr neugierig, wie Anwendungen mit neuen Technologien funktionieren.“*Ausbildungsniveau (4 Klassen)	Klasse 3 > Klasse 4 > Klasse 2 > Klasse 1	30,11 > 23,07 > 19,50 > 15,83
10d	Nutzen digitaler Anwendungen für PF*Ausbildungsniveau (4 Klassen)	Klasse 4 > Klasse 3 > Klasse 2 > Klasse 1	31,50 > 28,02 > 18,83 > 16,75

Der Vergleich der mittleren Ränge zeigt, dass sich die zentralen Tendenzen der Stichprobe bezüglich der unabhängigen Variablen unterscheiden. Dies ist vor allem bei der Betrachtung von betriebspezifischen Variablen (Hauptbetriebszweig, Erwerbsform, in Teilen Betriebsgröße und Standort) der Fall. Unterschiede im Antwortverhalten, die auf das jeweilige Alter zurückzuführen sind, sind hingegen nicht zu erkennen. Die genannten vorangegangenen Studien bezüglich der Nutzung von digitalen Anwendungen und PF soziodemografische Faktoren als wesentliche Einflussfaktoren. Signifikante Zusammenhänge sind bei der vorliegenden Befragung lediglich in Abhängigkeit des Ausbildungsgrades festzustellen. Eine positive Korrelation mit dem Ausbildungsniveau (bspw. höheres Interesse bei höherem Bildungsniveau) liegt nicht vor. Während digitale Anwendungen vor allem von Landwirten mit Hochschulabschluss, gefolgt von denen mit erweitertem Berufsabschluss (bspw. Meister) ein hoher Nutzen bei der Implementierung von PF zugeschrieben wird, wird die Bewirtschaftung zwischen den Schlägen am meisten von Betriebsleitern ohne landwirtschaftlichen Berufsabschluss angepasst. Ein besonderes Interesse an neuen Technologien scheint hauptsächlich mit einem erweiterten landwirtschaftlichen Berufsabschluss in Verbindung zu stehen.

Bei der Betrachtung von betriebspezifischen Variablen wurde zunächst überprüft, ob der genannte Betriebsstandort die vom Landwirt wahrgenommene Heterogenität der Flächen des Betriebs beeinflusst. Dies scheint insbesondere bei der Heterogenität zwischen den Schlägen der Fall zu sein, hier kann die Nullhypothese abgelehnt werden. Betriebe in der Untermainebene (Standort A), gefolgt von Betrieben im vorderen Odenwald (Standort B), weisen den höchsten Rang auf, während Landwirte mit Betrieben im Reinheimer Hügelland (Standort C) eine deutlich niedrigere Heterogenität zwischen den Schlägen erkennen. Bei der Heterogenität innerhalb der Schläge kann eine Tendenz zu Standort B ($B > A > C$), jedoch keine statistische Abhängigkeit festgestellt werden. Die Theorie, dass sich der wahrgenommene Heterogenitätsgrad standortabhängig unterscheidet, kann somit in Teilen bestätigt werden. Dies gilt nicht für die Anpassung an die beobachtete Heterogenität, die nicht durch den Standort beeinflusst wird. Es zeigt sich, dass Landwirte, die Heterogenität zwischen und innerhalb ihrer Schläge erkennen, dazu tendieren, ihre Bewirtschaftung daran anzupassen. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht signifikant und die Nullhypothese kann in beiden Fällen (H1a und H1b) nicht abgelehnt werden. Anders ist dies bei Betrieben, deren Hauptbetriebszweig u.a. der Ackerbau ist. Diese passen ihre Bewirtschaftung sowohl zwischen als auch innerhalb der Schläge deutlich öfter an vorhandene Unterschiede an, als anderweitig orientierte Betriebe. Insbesondere der ursprüngliche Gedanke von PF, nämlich die Anpassung innerhalb

vorhandener Schlaggrenzen wird von diesen Betrieben vermehrt umgesetzt, was das hohe Signifikanzniveau dieses Zusammenhangs vermuten lässt (H4b). Dies gilt bezüglich der zwischen den Schlägen vorhandenen Heterogenität auch für Haupterwerbsbetriebe im Vergleich zu Betrieben, die im Nebenerwerb geführt werden. Überhaupt sehen Ackerbaubetriebe die Nutzung von PF aus ackerbaulichen und ökonomischen Gründen positiver als Betriebe ohne entsprechende Spezialisierung. Gleiches gilt für den Nutzen von digitalen Anwendungen für PF. Bei allen drei Hypothesen kann die Nullhypothese abgelehnt werden. Anders als die Rolle des Ackerbaus haben der Viehbesatz sowie der Grünlandanteil keinen Einfluss auf das Antwortverhalten der befragten Landwirte. Lediglich der ackerbauliche und ökonomische Nutzen von PF wird von Betrieben mit geringerem Grünlandanteil höher bewertet. Die Nullhypothese kann hier jedoch nur bei der Wahrnehmung von ökonomischem Nutzen abgelehnt werden (H6d). Neben der betrieblichen Ausrichtung wurden auch Hypothesen bezüglich der Betriebsgröße getestet. Dabei konnte die Vermutung nach einer höheren Heterogenität zwischen und innerhalb der Schläge in größeren Betrieben bestätigt und die Nullhypothese jeweils abgelehnt werden. Eine Tendenz hin zu höherem ackerbaulichem Nutzen von PF für größere Betriebe lässt sich beobachten, jedoch liegt hier kein signifikanter Zusammenhang vor, der eine Ablehnung der Nullhypothese zulassen würde. Auffällig ist, dass die Hypothesen bezüglich Risikobereitschaft und Technologieaffinität fast ausnahmslos keine signifikanten Zusammenhänge ergeben. Weder das Alter des befragten Landwirts noch die Rolle des Ackerbaus oder die Erwerbsform haben einen Einfluss auf das Antwortverhalten. Lediglich der Ausbildungsabschluss hat, wie beschrieben, einen signifikanten Zusammenhang mit der Neugier nach Technologien. Andere Tendenzen sind aus den Daten nicht abzuleiten.

Die Hypothesen bezüglich der untersuchten Arbeitsgänge konnten nicht mit einem Kruskal-Wallis-Test überprüft werden. Da die abhängige Variable hier nominal verteilt ist, wurde eine Kreuztabellierung mit Kontingenzanalyse durchgeführt. Neben dem Pearson-Chi-Quadrat-Wert und der Signifikanz der Ergebnisse (p) wurde zudem der Kontingenzkoeffizient (CC) ausgerechnet, um die Stärke des Zusammenhangs abzuschätzen. Dieser ist eine Erweiterung des Phi-Koeffizienten. So kann davon gesprochen werden, dass die Stärke des Zusammenhangs mehr als trivial ist, wenn CC über 0,3 liegt (Backhaus et al. 2018, S. 350).

Tabelle 17: Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8a unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit n = 50 (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)

N=50		Anpassung der Bewirtschaftung bei Bodenbearbeitung		
Wer führt die Arbeit überwiegend aus?		Ja	Nein	Gesamt
Betriebsleiter		6 (40%)	9 (60%)	15
Generell innerbetrieblich		18 (51%)	17 (49%)	35
Im Lohn vergeben		0	0	0
Gesamt		24 (48%)	26 (52%)	50
Pearson-Chi-Quadrat (p)		0,549 (0,459)		Kontingenzkoeffizient
				0,104

Tabelle 18: Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8b unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit n = 50 (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)

N=50		Anpassung der Bewirtschaftung bei Aussaat		
Wer führt die Arbeit überwiegend aus?		Ja	Nein	Gesamt
Betriebsleiter		5 (14%)	30 (86%)	35
Generell innerbetrieblich		6 (43%)	8 (57%)	14
Im Lohn vergeben		1 (100%)	0	1
Gesamt		12 (24%)	38 (76%)	
Pearson-Chi-Quadrat (p)		7,707 (0,021**)		Kontingenzkoeffizient
				0,365

Tabelle 19: Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8c unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit n = 50 (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)

N=50		Anpassung der Bewirtschaftung bei N-Düngung		
Wer führt die Arbeit überwiegend aus?		Ja	Nein	Gesamt
Betriebsleiter		28 (72%)	11 (28%)	39
Generell innerbetrieblich		3 (33%)	6 (67%)	9
Im Lohn vergeben		2 (100%)	0	2
Gesamt		33 (66%)	17 (34%)	
Pearson-Chi-Quadrat (p)		5,894 (0,053*)		Kontingenzkoeffizient
				0,325

Tabelle 20 Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8d unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit n = 50 (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)

N=50		Anpassung der Bewirtschaftung bei Grunddüngung		
Wer führt die Arbeit überwiegend aus?		Ja	Nein	Gesamt
Betriebsleiter		8 (25%)	24 (75%)	32
Generell innerbetrieblich		7 (47%)	8 (53%)	15
Im Lohn vergeben		1 (33%)	2 (67%)	3
Gesamt		16 (32%)	34 (68%)	
Pearson-Chi-Quadrat (p)		2,206 (0,332)		Kontingenzkoeffizient
				0,206

Tabelle 21 Ergebnisse der Kontingenzanalyse zur Überprüfung von Hypothese H8e unter Verwendung einer Kreuztabellierung mit Pearson-Chi-Quadrat-Test mit n = 50 (eigene Erhebung, errechnet mit SPSS)

N=50		Anpassung der Bewirtschaftung bei Pflanzenschutz/Pflege		
Wer führt die Arbeit überwiegend aus?		Ja	Nein	Gesamt
Betriebsleiter		19 (53%)	17 (47%)	36
Generell innerbetrieblich		4 (57%)	3 (43%)	7
Im Lohn vergeben		1 (14%)	6 (86%)	7
Gesamt		24 (48%)	26 (52%)	
Pearson-Chi-Quadrat (p)		3,751 (0,153)		Kontingenzkoeffizient
				0,264

Eine signifikante Abhängigkeit wird bei N-Düngung und Aussaat festgestellt. Hier wird die Nullhypothese abgelehnt. Bei beiden Arbeitsgängen wird davon ausgegangen, dass eine Anpassung der Bewirtschaftung aufgrund dessen erfolgt, wer den Arbeitsgang durchführt. Anders als erwartet, ist dies bei der Aussaat jedoch nicht der Betriebsleiter. Eine Anpassung erfolgt vor allem in den Betrieben, in denen die Aussaat generell innerbetrieblich, aber nicht ausschließlich durch den Betriebsleiter erfolgt. Eine Anpassung der N-Düngung erfolgt hingegen erwartungsgemäß in den Betrieben, in denen diese vom Betriebsleiter selbst erledigt wird. Bei beiden Variablen lässt ein Blick auf den Korrelationskoeffizienten auch die Einschätzung zu, dass der beobachtete Zusammenhang nicht nur signifikant, sondern auch bedeutsam ist. Weiterhin ist eine Tendenz ebenfalls beim Pflanzenschutz zu erkennen. Wird dieser an einen Dienstleister vergeben, erfolgt meist keine Anpassung. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht signifikant, weshalb die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann.

5.5 Diskussion der Ergebnisse

Es zeigt sich, dass die befragten Landwirte heterogene Standortbedingungen auf ihren Flächen erkennen. Vor allem zwischen den Schlägen wird diese Heterogenität erkannt, während innerhalb der Schläge die Heterogenität geringer zu sein scheint oder nicht erkannt wird. Dieses Antwortverhalten wird u.a. von der Betriebsgröße und dem jeweiligen Standort des Betriebs beeinflusst. Bei der Frage, ob die Landwirte, die Heterogenität wahrnehmen, diese auch berücksichtigen, kann kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Dies ist insofern beachtenswert, als dass eine Anpassung der Bewirtschaftung zwischen den Schlägen auf einem großen Teil der Betriebe erfolgt. Berücksichtigt man zudem eine vermehrte Anpassung bei steigender Betriebsgröße, ist dies ein Indiz für die Vermutung nach einer Art strukturbedingtem Precision Farming. Danach würde die Bodenheterogenität durch die Schlaggrenzen hinreichend gut abgebildet, weshalb eine Erstellung von Teilflächen nicht zu einer verbesserten Berücksichtigung von Bodencharakteristika und Ertragspotenzialen führen würde. Kleinere Schläge hätten hier einen höheren Nutzen bezüglich eines strukturbedingten Precision Farming. Dessen Umsetzung durch eine an die Heterogenität zwischen den Schlägen angepasste Sorten- und Kulturwahl und Bewirtschaftungsanpassungen würde zunehmen. Die Bezeichnung der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung ist hier ungenau, da die Schläge für sich jeweils bereits getrennte Bewirtschaftungseinheiten darstellen. Dies lässt sich auch an den Antworten der Landwirte ablesen, in welcher Form eine mögliche Anpassung der Bewirtschaftung bei verschiedenen Arbeitsgängen erfolgt. Auch innerhalb der Schläge erfolgt eine Anpassung, hier jedoch häufig mit einfachen Methoden (Plus-Minus-Taste, händische Einstellungen o.ä.) anstatt

technologisch aufwändiger Applikationsverfahren. Es besteht also eine Diskrepanz zwischen der Bewirtschaftungsanpassung und Technologieaffinität, die bei den Landwirten offensichtlich vorhanden ist. Einfache Anpassungsmaßnahmen, wie sie durch die Kommentare der Landwirte beschrieben werden, werden hingegen umgesetzt. Die Voraussetzung zur Investition in entsprechende Technologie, die die Landwirte nennen, scheinen offenbar nicht erfüllt zu sein und die Hindernisse zur Implementierung zu überwiegen (analoge Anpassungen, siehe (Breunig 2022; Preuße 2022)). Wie oft und zuverlässig diese Anpassung erfolgt wurde nicht ermittelt. So ist davon auszugehen, dass vermeintlich kleine Unterschiede von Standort und Pflanzenbestand nur geringe Beachtung finden und Anpassungen mit den Möglichkeiten erfolgen, die vorhandene Technik den Landwirten bietet. Obwohl ein Großteil der Landwirte sich als risikoneutral einschätzt und sowohl ackerbaulichen als auch ökonomischen Nutzen bei PF erkennt, werden Investitionskosten in entsprechende Technik als größtes Hindernis bei dessen Implementierung im Betrieb gesehen. Dies könnte u.a. ein Hinweis darauf sein, dass PF in anderer Form umgesetzt wird (z.B. händisch oder strukturbedingt) oder aber eine fehlerhafte Selbsteinschätzung bezüglich der Risikobereitschaft bedeuten. Letzteres würde die Einschätzungen aus Kapitel 4.1.2 bestätigen, die Landwirten eine risikoaverse Einstellung zuschreiben (z.B. Monjardino et al. 2015). Demnach würde die Risikoaversion der Landwirte bezüglich Investitionen trotz hohem Interesse an Technologie und wahrgenommenem Nutzen von digitalen Anwendungen für PF eine Implementierung verhindern. Der ackerbauliche, ökonomische und ökologische Nutzen, welcher PF zugeschrieben wird, würde somit nicht oder nicht in vollem Maße erreicht. Voraussetzung hierfür ist ein höherer betriebswirtschaftlicher Wert für die Landwirte. Ein weiteres Indiz für die Risikoaversion der Landwirte ist, dass Arbeiten mit höherem Qualifikations- bzw. Wissensbedarf (bspw. Bonitur, Pflanzenschutz, N-Düngung) überwiegend durch die Betriebsleiter selbst durchgeführt werden. Die Vermutung, dass insbesondere in diesen Bereichen eine Anpassung der Bewirtschaftung stattfindet, hat sich jedoch nur in Teilen bestätigt und wird hauptsächlich bei der N-Düngung umgesetzt. Gleiches gilt für das Alter der Befragten. Ein höheres Alter (und damit implizierte längere Berufserfahrung) ist hier weder ein Indikator für die Nutzung von spezifischem Wissen bzw. Anpassung der Bewirtschaftung, noch ist ein jüngeres Alter ausschlaggebend für den wahrgenommenen Nutzen digitaler Anwendungen oder PF allgemein. Eine mögliche Fehlerquelle bei dieser Erhebung könnte jedoch die vorangegangene Klassierung des Alters in zwei Gruppen getrennt durch den Median sein. Eine größere Gruppenanzahl hätte möglicherweise die Information, die die Variable des Alters normalerweise bietet, besser abgebildet. Allerdings hätte die dadurch geringere Anzahl der Ausprägungen innerhalb der

Gruppe die Reliabilität negativ beeinflusst. Gleiches gilt für die Variablen der Betriebsgröße, des Viehbesatzes und des Grünlandanteils. Obwohl die beiden letztgenannten Variablen keine Aussagekraft über die Nutzung von bzw. Einschätzungen zu PF bieten, hat die Rolle des Ackerbaus einen großen Einfluss darauf. Betriebe, die den Ackerbau als einen Hauptbetriebszweig ansehen, passen ihre Bewirtschaftung häufiger an die Heterogenität ihrer Flächen an. Dies gilt sowohl für die Heterogenität zwischen als auch innerhalb der Schläge, wobei eine besonders hohe Signifikanz ($p = 0,002^{***}$) beim eigentlichen Ansatz von PF, der Anpassung innerhalb der Schläge, festzustellen ist. Gleiches gilt für den wahrgenommenen Nutzen von PF und von digitalen Anwendungen für die Implementierung von PF. Da der Fokus der Betriebe meistens auf den Hauptbetriebszweigen liegt, ist es naheliegend, dass Ackerbaubetriebe für sich größere Vorteile durch PF sehen als bspw. ausschließlich auf die Tierhaltung spezialisierte Betriebe. Hier dient der Ackerbau vor allem dem Anbau von Futter und somit der Maximierung des physiologischen Ertrags.

Die Ergebnisse der Umfrage und deren Analyse zeigen, dass Landwirte in kleinstrukturierten Ackerbaugebieten Standortheterogenität wahrnehmen. Es wird zudem deutlich, dass die Betriebe Schlüsselaufgaben des Pflanzenbaus, vor allem die N-Düngung, größtenteils selbst erledigen, was die Nutzung von spezifischem Wissen bei der Durchführung ermöglicht. Gleichzeitig kann daraus auch ein risikoaverses Verhalten abgeleitet werden. Untermuert wird dies durch die Aussagen der Landwirte, die mangelndes Vertrauen in bspw. Mitarbeiter oder Lohnunternehmen, bzw. ein Fehlen ausreichend qualifizierter Mitarbeiter erahnen lassen. Eine Aussage bezüglich der Qualität des bei den Landwirten vorliegenden Wissens kann anhand der Ergebnisse nicht abgeleitet werden.

6. Expertenbefragung II - Landwirte als Informationsquelle

In der nachfolgenden Untersuchung werden die Ergebnisse aus Monath (2021) empirisch und methodisch ergänzt. Neben einer Erweiterung der Datengrundlage durch Hinzunahme zusätzlicher Flächen wird eine genauere Methodik in der Datenverarbeitung eingesetzt. Die zentrale Frage, ob die Landwirte dazu in der Lage sind, Teilflächen auf ihren Schlägen zu erkennen und wie genau die so ermittelten Teilflächen im Vergleich mit durch technische Verfahren ermittelte Teilflächen sind, bleibt bestehen. Hierzu wurden durch ausgewählte Landwirte unter den 120 angesprochenen Landwirten aus Kapitel 5 auf Basis ihres subjektiven Wissens über Bodenunterschiede und Ertragspotenzial Teilflächen angelegt und bewertet.

Hieraus soll abgeleitet werden, ob das spezifische Wissen der Landwirte die Informationsgewinnung durch technologisch aufwendigere (digitale) Verfahren substituieren kann. Liese sich zudem ein höherer betriebswirtschaftlicher Wert daraus ableiten, würde das die Eingangshypothese bestätigen, wonach die Landwirte bereits einfachere Verfahren des PF mit entsprechendem Erfolg umsetzen. Die Bewertung und Identifizierung der Teilflächen wurde anschließend durch eine Korrelationsanalyse mit den Ergebnissen technischer Verfahren zur Identifikation von Bodenunterschieden und Ertragspotenzial verglichen. Mit der Expertenbefragung sollen die Ergebnisse u.a. von Heijting et al. (2011) überprüft werden, die das Wissen des Landwirts über die Bodenunterschiede und das Ertragspotenzial seiner Flächen als mentale Karten charakterisieren.

6.1 Methodische Vorgehensweise

Zunächst wurden den Landwirt Schläge ausgewählt, die hinsichtlich ihrer Standortbedingungen repräsentativ für die betreffende Region und den Betrieb sind. Die Teilflächen wurden durch den Bewirtschafter händisch in eine Blanko-Karte des jeweiligen Schlags eingezeichnet und anschließend mittels *QGIS* digitalisiert. Um die so entstandenen Teilflächen mit anderen Daten vergleichen und einer Korrelationsanalyse unterziehen zu können, ist eine Bewertung hinsichtlich der Ertragsfähigkeit erforderlich. Hierzu wurde eine dimensionslose intervallskalierte Rangfolge von 1 bis 10 (1 = niedrige Ertragsfähigkeit, 10 = hohe Ertragsfähigkeit) herangezogen. Die Vergleichsdaten entstammen aus der Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit in 0-90 cm (ECa), sowie einer mehrjährigen Biomassekarte auf Basis des NDVI. Beide Datenquellen wurden im theoretischen Teil erklärt. Da beide Informationsquellen relative Daten des Schlags liefern und sich nicht dazu eignen Schläge miteinander zu vergleichen, wurde auch die Bewertung der Teilflächen durch den Landwirt relativ auf den Schlag bezogen durchgeführt. Die Erhebung der Vergleichsdaten erfolgte folgendermaßen:

- Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (ECa): Die Datenerhebung wurde mit dem Sensor *VERIS 3000* der Hochschule Triesdorf vorgenommen (Agrarsystemtechnik Prof. Noack), der in Spurabständen von ca. 10 m mit einem Traktor über den Schlag gezogen wurde. Das Messinstrument misst alle 3 Sekunden, sodass die Abstände der Messpunkte abhängig von der Fahrgeschwindigkeit sind. Hier wurde eine Geschwindigkeit von 5-8 km/h abhängig von den Bodenbedingungen gewählt. Erfasst wurde die ECa in 0-30 cm Tiefe, sowie in 0-90 cm, wobei letzterer

Wert hier relevant ist. Die Werte sind in Millisiemens pro Zentimeter (mS/cm) angegeben. Die Messungen wurden hauptsächlich im Sommer 2019 durchgeführt. Da zum Zeitpunkt der Messung nicht alle betreffenden Flächen abgeerntet waren, wurden jeweils ein Schlag der Betriebe 2, 3 und 5 im Jahr 2021 beprobt. Die so erfassten Daten lagen zunächst als Punktdaten vor und wurden zur weiteren Verarbeitung in *QGIS* aufbereitet.

- mehrjährige Biomassekarten auf Basis des NDVI: Mit dem cloudbasierten Programm *365farmnet* konnte im Baustein *Claas CropView* eine mehrjährige Biomassekarte für jeden Schlag erstellt werden. Dieser liegen Satellitendaten aus den Jahren 2016-2020 zugrunde, die u.a. auch den multispektralen Farbverlauf erfassen und den NDVI berechnen. Da die Daten aus dem Programm zunächst als Rasterdatei vorliegen, ist eine Überführung in eine Vektordatei mit relationalem Charakter notwendig. Dies wurde wiederum mit *QGIS* durchgeführt. Die Werte sind in Prozent angegeben, wobei 100 eine für den betrachteten Schlag durchschnittlichen Wert darstellt und die durchschnittliche Biomasse auf dem Schlag beschreibt. Eine farbliche Darstellung der NDVI-Messung findet sich für alle Schläge und Teilflächen in Anhang 4.

Um die drei Datenquellen (*Landwirt*, *ECA* und *NDVI*) in eine gleiche räumliche Auflösung zu bringen, wurde zunächst erneut mit *QGIS* ein gleichmäßiges Gitter über jeden Schlag gelegt. Anders als bei Monath (2021) jedoch nicht durch ein Hexagongitter, sondern mit der Verwendung von Voronoi-Polygonen³³. Hierbei kann auch auf die Bearbeitungsrichtung der Schläge Rücksicht genommen werden. Die Größe der Polygone orientiert sich in der Breite an den Abständen der Fahrgassen bzw. Arbeitsbreiten von Spritze und Düngerstreuer (21 m in Betrieb 5, 27 m auf den anderen vier Betrieben), in Fahrtrichtung wurden 10 m als Länge gewählt. Durch dieses Vorgehen können die Ergebnisse der Analyse u.U. für die Erstellung einer Applikationskarte herangezogen und für Bewirtschaftungsmaßnahmen wie Pflanzenschutz und Düngung genutzt werden. Den so erstellten Polygonen, die sich gleichmäßig über den Schlag verteilen, werden nun mit einer Spatial-Join-Funktion³⁴ die Werte des NDVI und der ECA-Messung zugewiesen. Die in Punktdaten vorliegenden ECA-Daten werden räumlich interpoliert, indem der Mittelwert aller im Polygon befindlichen Punktdaten gebildet wird. Dem so entstandenen Datensatz eines jeden Polygons wird zuletzt der Wert

³³ Eine zuvor definierte Menge an Punkten teilt den Raum in Regionen ein. Die Punkte bilden die Zentren dieser Regionen, die als Polygone definiert in GIS erstellt und abgebildet werden können (nach Okabe et al. 2000).

³⁴ räumliche Zuordnung von verschiedenen Attributen zu einem Datensatz (Jacox und Samet 2007).

zugeordnet, den der Landwirt der an dieser Stelle befindlichen Teilfläche zugewiesen hat. Nachfolgend ist in Abbildung 14 das Vorgehen für drei ausgewählte Schläge dargestellt.

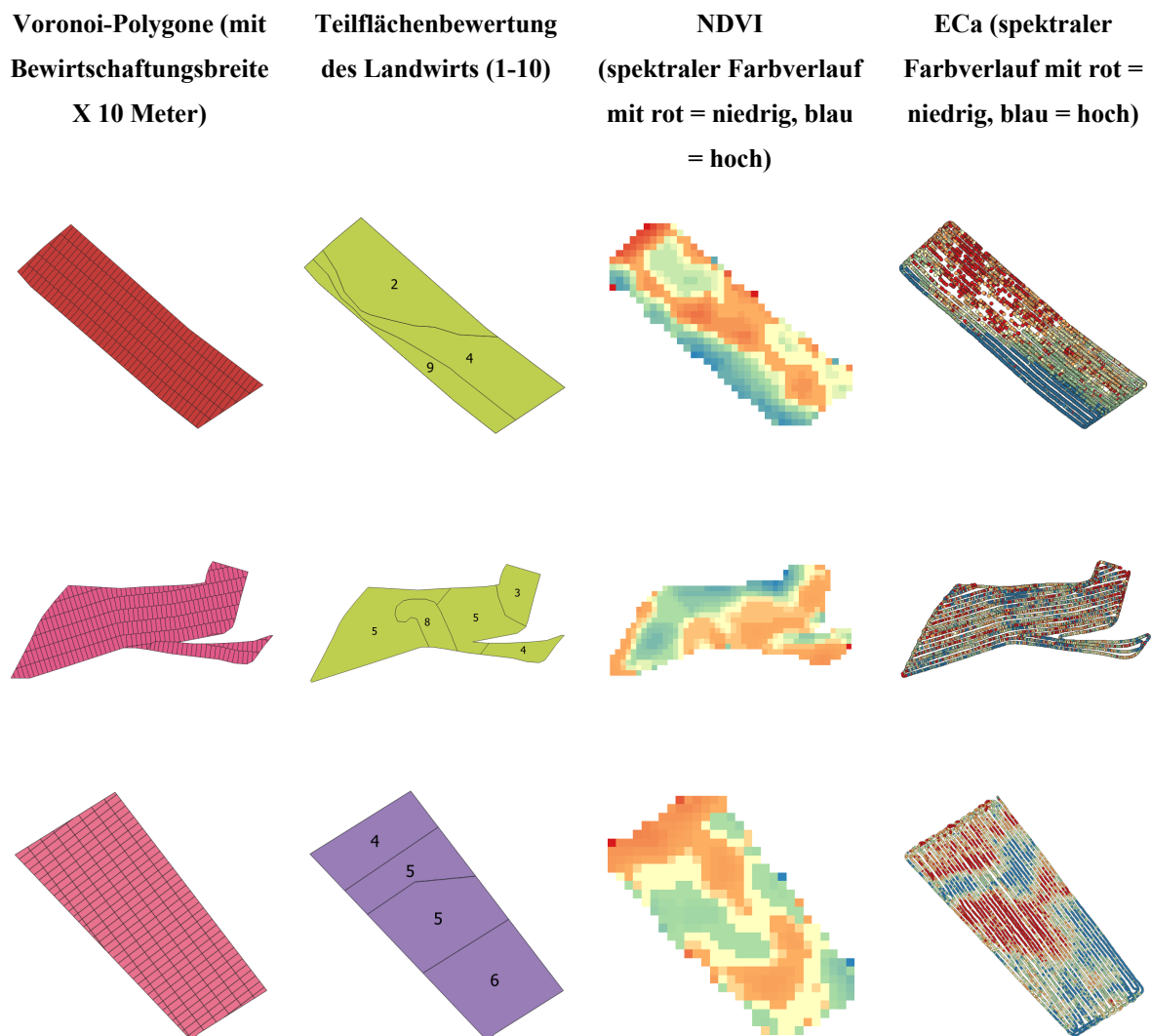


Abbildung 14: Beispielhafte Eingangsdaten für die Zusammensetzung der Daten mit Spatial-Join und Zuordnung zu den in Spalte 1 aufgezeigten Voronoi-Polygonen (eigene Darstellung mit QGIS)

Das Ergebnis ist ein relationaler Datensatz, der alle Informationen über den jeweiligen Schlag enthält, die zur Untersuchung des spezifischen Wissens des Landwirts herangezogen werden. Diese wird mit *SPSS* einer Korrelationsanalyse nach Bravais-Pearson unterzogen. Hierbei werden keine kausalen Aussagen getroffen, sondern lediglich der lineare Zusammenhang zweier intervallskalierten Variablen untersucht. Es wird somit nicht zwischen einer abhängigen und einer unabhängigen Variablen unterschieden. Der errechnete Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 (negativer linearer Zusammenhang) und 1 (positiver linearer Zusammenhang) annehmen. Ist der errechnete Korrelationskoeffizient signifikant und belegt damit eine Korrelation, stellt er selbst ein Maß für die Stärke des beobachteten Zusammenhangs

dar. Von einem starken positiven (negativen) Effekt bzw. Zusammenhang kann dabei gesprochen werden, wenn der Korrelationskoeffizient (r) über einem Wert von 0,5 (oder $< -0,5$) liegt ($r \geq 0,10$ = schwacher Zusammenhang +; $r \geq 0,30$ = mittlerer Zusammenhang ++; $r \geq 0,50$ = starker Zusammenhang +++) (Schwarz et al. 2022). Neben den quantitativen Daten werden außerdem die qualitativen Aussagen der Landwirte über die Charakteristik der Teilflächen diskutiert. Hier liegen häufig erklärende Informationen vor, die über die rein beschreibende Dimension der anderen Datenquellen hinausgehen bzw. nicht von diesen abgebildet werden. Hieraus gewinnt der Landwirt bspw. weitere Informationen zur Optimierung von Bearbeitungszeitpunkten, Einstellungen der Maschine und Applikationsmengen von Dünger und Pflanzenschutz. Außerdem kann die Kenntnis über mögliche Ursachen von vorliegender Heterogenität auch den Nutzen von Anpassungsmaßnahmen der Bewirtschaftung beeinflussen.

6.2 Standorte und Betriebe

Die untersuchten Schläge gehören zu Betrieben auf allen drei Standorten, die in Kapitel 5 definiert wurden und unter denen die Teilnehmer der Umfrage wählen und ihren Standort beschreiben sollten. Die Charakteristik der Standorte wurde dabei hinreichend beschrieben. Während auf Standort A drei Betriebe und insgesamt sieben Schläge untersucht werden, befindet sich auf den Standorten B und C nur jeweils ein Betrieb mit je drei Schlägen. Alle fünf Betriebe sind u.a. vom Ackerbau geprägt und weisen hinsichtlich der bewirtschafteten Fläche eine ähnliche Betriebsgröße auf. Zudem spielt auf allen Betrieben die Tierhaltung in verschiedenen Formen eine Rolle. In Tabelle 22 sind sie zusammenfassend charakterisiert und die untersuchten Schläge auf der Karte in Abbildung 15 eingezeichnet.

Tabelle 22: Charakterisierung der an der Expertenbefragung teilnehmenden Betriebe zur Identifikation von schlagspezifischem Wissen der Landwirte (eigene Darstellung, Betriebsdaten mit Stand Sommer 2019)

A			B	C
Betrieb 1	Betrieb 4	Betrieb 5	Betrieb 3	Betrieb 2
Ca. 110 ha	Ca. 150 ha	Ca. 110 ha	Ca. 120 ha	Ca. 130 ha
Milchviehhaltung, ca. 50 GV, 20 % Grünland	Milchviehhaltung, ca. 180 GV, 25 % Grünland	Milchviehhaltung, Hühnermobil, ca. 85 GV, 35 % Grünland	Pensionspferde, ca. 50 GV, 25 % Grünland	Schweinemast, ca. 200 GV, 0 % Grünland
	Biogasanlage	Spargel, Erdbeeren	Staatsdomäne	

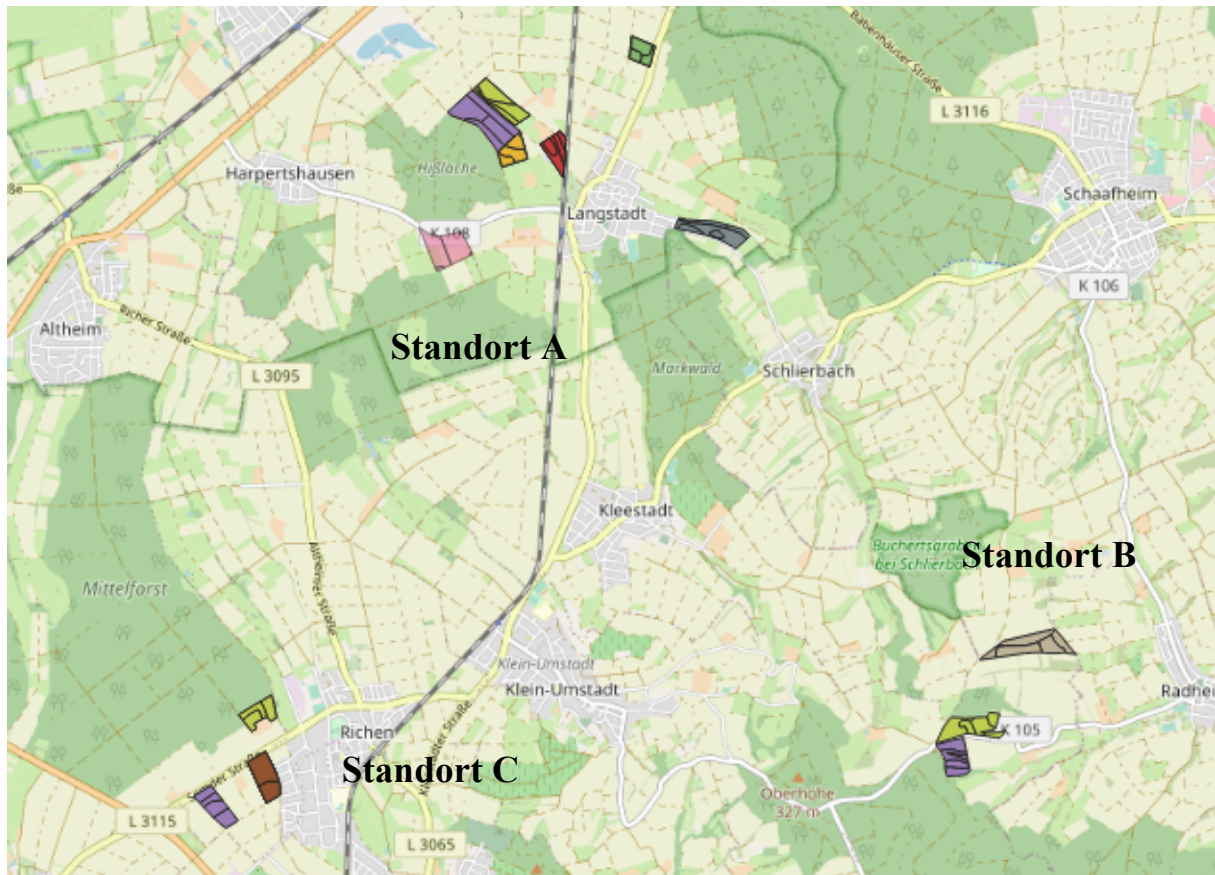


Abbildung 15: Übersichtskarte der untersuchten Schläge in der Expertenbefragung mit den von den Landwirten eingezeichneten (und bewerteten) Teilflächen (eigene Darstellung mit QGIS unter Verwendung der Übersichtskarte von OpenStreetMap)

6.3 Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Bravais-Pearson

Nachfolgend ist zunächst ein Ausschnitt aus dem relationalen Datensatz dargestellt (Tabelle 23), der sich aus der in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Spatial-Join-Operation ergibt. Aus den so erstellten Datensätzen ergibt sich die Grundgesamtheit der Stichprobe, getrennt für jeden untersuchten Schlag.

Tabelle 23: Auszug aus der Attributtabelle des Schlates Hamchesberg zur Veranschaulichung der in der Korrelationsanalyse verwendeten Datensätze (erstellt mit einem Spatial-Join in QGIS)

ID	Landwirt	ECa	NDVI
...
24	2	2,46	95,57
25	2	2,39	93,40
26	4	6,08	99,00
...
91	4	13,97	101,50
92	9	24,18	106,67
93	9	28,76	106,57
...

Die drei Variablen Landwirt, ECa und NDVI werden paarweise der Korrelationsanalyse unterzogen. Ist ein starker positiver Zusammenhang festzustellen, kann die Variable die Ausprägung der jeweils anderen abbilden. Im Falle einer Ablehnung der Nullhypothese (keine Korrelation der Bewertung des Landwirts mit den Werten von NDVI und ECa), können für die untersuchten Schläge mit dem Wissen und den Erfahrungen des Landwirts in vergleichbarer Genauigkeit und Qualität Teilflächen identifiziert werden, wie es technische Anwendungen versprechen. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse sind nachfolgend in Tabelle 24 aufgeführt. Blau unterlegt sind die in Abbildung 14 dargestellten Schläge, in der gleichen Reihenfolge von oben nach unten.

Tabelle 24: Pearson-Korrelationskoeffizient r , Signifikanzniveau p und Stichprobengröße N der Korrelation zwischen den untersuchten Variablen Landwirt, ECa und NDVI unter Angabe des Standorts (Betrieb) auf den untersuchten Schlägen; die in Abbildung 15 dargestellten Schläge sind blau unterlegt (berechnet mit SPSS)

Schlag Anzahl der Polygone	Standort (Betrieb)	Landwirt/ ECa	Landwirt/ NDVI	ECa/ NDVI
Kleeplatz 1 N = 418	A (1)	0,544 (+++) 0,000**	0,780 (+++) 0,000**	0,612 (+++) 0,000**
Hammchesberg N = 226	A (1)	0,872 (+++) 0,000**	0,836 (+++) 0,000**	0,875 (+++) 0,000**
Länderbach Bahn N = 152	A (1)	0,734 (+++) 0,000**	0,860 (+++) 0,000**	0,698 (+++) 0,000**
Kleeplatz 2 N = 147	A (4)	0,375 (++) 0,000**	0,396 (++) 0,000**	0,506 (+++) 0,000**
Flurscheide N = 109	A (4)	0,381 (++) 0,000**	-0,041 0,631	0,201 (+) 0,037*
Harpertshäuserweg N = 305	A (5)	0,311 (++) 0,000**	0,595 (+++) 0,000**	0,358 (++) 0,000**
Schlierbacherweg N = 243	A (5)	0,559 (+++) 0,000**	0,493 (++) 0,000**	0,413 (++) 0,000**
Schaafheimergrenze N = 207	B (3)	-0,104 0,135	0,024 0,735	0,011 0,870
24-Morgen N = 293	B (3)	0,231 (+) 0,000**	0,075 0,187	0,067 0,250
Waldacker N = 212	B (3)	0,144 (+) 0,036*	-0,270 (+) 0,000**	0,310 (++) 0,000**
Hinterm Hof N = 186	C (2)	0,573 (+++) 0,000**	0,091 0,190	0,048 0,514
Siedlung N = 275	C (2)	0,717 (+++) 0,000**	0,428 (++) 0,000**	0,466 (++) 0,000**
Winkelfeld N = 260	C (2)	0,494 (++) 0,000**	0,365 (++) 0,000**	0,022 0,723

Signifikanzniveaus der Korrelation: $p \leq 0,05^*$, $p \leq 0,01^{**}$

(+) = schwacher Zusammenhang, (++) = mittlerer Zusammenhang, (+++) = starker Zusammenhang

Mit einigen Ausnahmen können Zusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen festgestellt werden ($r \geq 0,1$). Dies gilt vor allem für die Korrelation zwischen *Landwirt* und *Eca*. Aber auch zwischen *Landwirt* und *NDVI* sowie *Eca* und *NDVI* können starke Zusammenhänge beobachtet werden. Ausnahmen bilden u.a. die Schläge auf Standort B (Betrieb 3). Auffällig ist zudem, dass die Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden digitalen Datenquellen offensichtlich nicht höher sind als die zwischen den Datenquellen und der Bewertung durch den Landwirt. Dies spricht für die Qualität der durch den Landwirt bestimmten Teilflächen.

Tabelle 25: Qualitative Beschreibungen der Teilflächen durch die Landwirte (eigene Erhebung)

Standort A	Standort B	Standort C
<ul style="list-style-type: none"> • Ablagerungen von (ehemaligem) Bachlauf (mehrfach genannt) • mit Tonboden aufgefüllt • lag länger still • Grundwasser drückt sich raus • höherer Widerstand bei Bodenbearbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Kuppe mit rotem Ton (flachgründig) • Zwischensenke mit erodiertem Boden (tiefgründig) • viele Steine • Drehzahl bei Bodenbearbeitung höher 	<ul style="list-style-type: none"> • Drainage defekt • Waldschatten • Ablagerungen von Bachlauf

Zusätzlich zu den quantitativen Ergebnissen sind in Tabelle 25 qualitative Beschreibungen der Landwirte zu einzelnen Teilflächen aufgeführt. Ergänzend zur Auswertung der Korrelationsanalyse können daraus erklärende Informationen zu den Teilflächen abgeleitet werden, die technische Anwendungen wie der NDVI oder die Eca-Messung nicht bieten.

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Da die Korrelationskoeffizienten zu einem großen Teil einen Zusammenhang der Variablen erkennen lassen, scheint sich die Hypothese zu bestätigen, dass das Wissen der befragten Landwirte über Bodenunterschiede und Ertragspotenzial dazu geeignet ist, Teilflächen auf deren Flächen zu identifizieren. Ein weiteres Indiz dafür ist, dass sich die Korrelation zwischen den beiden digitalen Datenquellen hinsichtlich der Stärke des Zusammenhangs nicht von der Korrelation mit der subjektiven Bewertung durch den Landwirt unterscheiden. Die Information, die der Landwirt über seine Schläge aufgrund seiner Erfahrung hat, kann somit für die Identifikation von Teilflächen als gleichwertig mit der Eca-Messung und den mehrjährigen Biomassekarten angesehen werden. Dafür sprechen auch die erklärenden Informationen bzw. Kenntnisse über mögliche Ursachen der Heterogenität, die die Landwirte zu den Teilflächen äußern. Durch die Erkenntnisse werden auch die Ergebnisse von Heijting et al. (2011) und Fleming et al. (2000) über den Nutzen von *farmer defined management zones* für die

untersuchten Standorte bestätigt. Die Hintergrundinformationen über die Standortheterogenität bestätigt zudem die Arbeit von Lorenz und Münchhoff (2015), die im spezifischen Wissen des Landwirts eine wichtige Quelle über beschreibende und erklärende Information sehen.

Eine Ausnahme stellen die Teilflächen auf Betrieb 3 (Standort B) dar. Deren Korrelationskoeffizienten sind niedriger als auf den anderen Flächen und Betrieben und weisen zum Teil niedrigere Signifikanzniveaus auf. Möglich ist zwar, dass der Landwirt besonders kleinräumige Bodenunterschiede ignoriert und zu größeren Teilflächen einheitlicher Ertragsfähigkeit zusammengefasst hat. Die Begutachtung einschlägiger Luftbilder der Schläge (Drohnen- und Satellitenaufnahmen) lässt jedoch den Schluss einer hinreichenden Genauigkeit der angelegten Teilflächen zu. Die Gründe für die schwachen Korrelationskoeffizienten werden daher nicht beim bewirtschaftenden Landwirt vermutet. Vielmehr ist die Erfassungsgenauigkeit und Auflösung der ECa und der Biomasse so ungenau, dass kleinste Unterschiede der Bodenbedingungen u.U. nicht berücksichtigt werden. So ist die Auflösung der den Biomassekarten (10x10 m) zugrundeliegenden Satellitenaufnahmen zu ungenau, um die kleinräumigen Unterschiede in den Schlägen abzubilden. Gleiches gilt für die Erfassung der ECa mit dem VERIS-Sensor, die im Abstand von 10 Metern zwischen den befahrenen Spuren durchgeführt wurde. Darüber hinaus sind insbesondere entlang der Waldränder der Schläge auf Standort B höhere Biomassewerte zu erkennen. Dies spiegelt nicht deren reale Ertragsfähigkeit wider und zeigt eine Fehlinterpretation des reflektierten Farbspektrums (beschattete Pflanzen erscheinen dunkler) aufgrund fehlender Hintergrundinformation. Darüber hinaus tendiert das Versuchsdesign dazu, durch die Bildung von Mittelwerten innerhalb der Gitter-Polygone kleinräumige Unterschiede zu vernachlässigen bzw. zu glätten. Ob die schwachen Korrelationskoeffizienten dem Standort oder dem Landwirt zuzurechnen sind, kann nicht mit einem Hypothesentest überprüft werden, da der Betrieb 3 der einzige auf dem entsprechenden Standort B ist. Den schwachen Koeffizienten auf Standort B gegenüber stehen die starken Korrelationen auf den beiden anderen Standorten. Dies gilt vor allem für die Korrelation mit der ECa.

Im Vergleich mit anerkannten technischen Methoden zur Identifikation von Teilflächen können Landwirte aufgrund ihrer langjährigen Erfahrung Teilflächen identifizieren und auch hinsichtlich deren relativer potenzieller Ertragsfähigkeit bewerten. Die Ergebnisse der beiden Expertenbefragungen I und II bestätigen die bisherigen Erkenntnisse ausgewählter Studien, wie bspw. Heijting et al. (2011) und Fleming et al. (2000). Insbesondere die Korrelationsanalyse zwischen dem spezifischen Wissen des Bewirtschafters über Bodenunterschiede und Ertragspotenzial als quantifizierte Datenquelle mit der ECa und mehrjährigen Biomassekarten

zeigen die Eignung dieses Wissens auf. Die Theorie der erklärenden Information nach Lorenz und Münchhoff (2015) wird neben den Ergebnissen der Korrelationsanalyse durch die Hintergrundinformationen und Ursachen der Bodenunterschiede, welche durch den Landwirt genannt werden, gestützt. Heijting et al. (2011) gehen zudem auf die Erstellung mentaler Karten vor dem geistigen Auge des Landwirts ein. Mentale Karten enthalten demnach neben der beschreibenden Information auch Hintergrundinformationen zu den Teilflächen. Ziel muss es somit sein, die mentalen Karten in digitale Modelle zu überführen und durch weitere Informationen gestützt für PF bereitzustellen. Ob sich für die Betriebe daraus ein betriebswirtschaftlicher Mehrwert ableiten lässt und ob darüber hinaus auch eine bessere N-Effizienz zur Reduktion von Externalitäten entsteht, muss nachfolgend erarbeitet werden. Die Ergebnisse der Expertenbefragung verdeutlichen zumindest den Bedarf an einfachen und günstigen PF-Systemen für kleinere Ackerbaubetriebe, um den erwarteten Nutzen von PF zu realisieren.

7. Wirtschaftlichkeit von teilflächenspezifischer Bewirtschaftung

Die Zielsetzung von PF ist es, Unsicherheit und damit ökonomisches (Produktions-)Risiko für den Landwirt abzubauen. Durch die Berücksichtigung von räumlicher Variabilität soll bspw. die N-Düngung optimiert werden. Dies soll über die ökonomischen Aspekte hinaus negative Externalitäten des Ackerbaus, wie bspw. N-Auswaschung aufgrund einer ineffizienten N-Düngung, reduzieren. Soweit die Theorie, die u.a. von Schneider und Wagner (2008) und in Ansätzen von Kuhlmann und Neumann (2011) hinsichtlich geringerer N-kostenfreien Leistungen (Nkfl) bestätigt wird. Nach Karatay und Meyer-Aurich (2019, S. 469) müssen die Vorteile von PF hinsichtlich teilweise geringerer Direktkosten (N-Dünger), höheren Qualitätseinstufungen des Weizens und der Optimierung der Erlöse im Kontext höherer Arbeiterledigungskosten (AEK) und Investitionskosten in erforderliche Technik betrachtet werden. Diese hängen maßgeblich von der Auslastung und den Kosten der Investitionen in PF ab. In Tabelle 26 sind die Kosten und mögliche Vorteile von PF nach Gandorfer und Meyer-Aurich (2017, S. 81) aufgeführt.

Tabelle 26: Kosten und mögliche Vorteile von Precision Farming mit Bezug zur N-Düngung (Gandorfer und Meyer-Aurich 2017)

Kosten von Precision Farming	Mögliche Vorteile
Kosten der Informationsgewinnung	Positive Ertragseffekte
Kosten der Datenverarbeitung	Höhere Nutzungseffizienz von Dünger oder eine Senkung des Düngereinsatzes
Kosten durch eine Veränderung der betrieblichen Abläufe	Positive Effekte auf betriebliche Abläufe durch effizienteres Arbeiten
Lernkosten	Arbeitsqualität steigt
Höheres finanzielles Risiko	Senkung von Produktionsrisiken

Die Autoren stellen fest, dass die Kosten von PF wesentlich präziser abgeschätzt werden können als die möglichen Vorteile. Sie schlagen hierzu eine Analyse von Produktionsfunktionen vor. Abhängig von der technischen Intensität von PF aber auch von der Betriebsgröße bzw. Einsatzfläche variieren die Kosten, insbesondere Investitionskosten, teilweise erheblich. Gleichzeitig unterscheiden sich auch die zu erwartenden Vorteile, welche sich durch die Nutzung der Systeme ergeben (könnten). „Die Betriebsgröße hat aus wirtschaftlicher Sicht einen erheblichen Einfluss auf die notwendige Stickstoffeinsparung bzw. den notwendigen Mehrertrag zum Ausgleich der Sensorkosten.“ (Borchardt et al. 2018, S. 92)

Aus diesem Grund lohnt sich ein Verfahrenvergleich von unterschiedlich stark technisierten PF-Verfahren, der verschiedene Betriebsgrößen bzw. Einsatzflächen berücksichtigt. Dazu wird der Ansatz von Kühl et al. (2021) verwendet und hinsichtlich einer erwarteten höheren N-Effizienz weiterentwickelt. Dies beruht auf den Ergebnissen von Kuhlmann und Neumann (2011), deren theoretische Analyse Vorteile von PF hinsichtlich der N-Überschüsse ergaben, und wird u.a. von Bongiovanni und Lowenberg-DeBoer (2004) gestützt. Darüber hinaus werden die Erkenntnisse von Karatay et al. (2018; 2020) bezüglich einer tendenziell höheren Weizenqualität und ein damit verbundener höherer Auszahlungspreis berücksichtigt. Hinsichtlich der absoluten Minderungspotenziale von N-Dünger zeichnet sich in der gegenwärtigen wissenschaftlichen Diskussion ein gemischtes Bild. Während u.a. Schneider und Wagner (2008) eine Reduktion der N-Düngung ermitteln, zeigen die praktischen Ergebnisse von Borchardt et al. (2018) ein konträres Bild. Auch ein Langzeitversuch des LfL Bayern (Wendland et al. 2010) konnte beim Einsatz des N-Sensors keinen signifikanten Vorteil mit Blick auf eingespartem Stickstoff oder besseren N-Bilanzen feststellen. Es besteht die Vermutung, dass diese gegensätzlichen Ergebnisse u.a. damit zu begründen sind, dass heterogenere Standorte ein größeres Minderungspotenzial und vor allem ein größeres Potenzial zur Anpassung der N-Düngung bieten. Dies zeigen auch die Berechnung von Kuhlmann und Neumann (2011) bezüglich des Nutzens von PF bei unterschiedlicher Variabilität der

Bodenwasservorräte. Daher werden in der Berechnung exemplarisch drei verschiedene Niveaus der N-Minderungspotenziale berücksichtigt.

Der Nutzen von PF wird insbesondere in der älteren Literatur häufig mit der N-kostenfreien Leistung (Nkfl) bewertet. Für einen Vergleich der Wirtschaftlichkeit eignet sich eine vereinfachte Betrachtung des Deckungsbeitrags (durch die Nkfl) nur bedingt. Ein Verfahrensvergleich auf Grundlage der Nkfl bildet zwar die Wirkungen potenzieller Erlös- und Düngerkostenveränderungen auf die Wirtschaftlichkeit des Pflanzenbaus ab. Dies lässt jedoch außer Acht, dass erst durch Investitionen in PF-Technik die potenziellen Effizienzsteigerungen ermöglichen. Diese steigern die Fixkosten des Betriebs und würden somit in einem Vergleich der Deckungsbeiträge bzw. Nkfl unberücksichtigt bleiben. Die Ergebnisse der Expertenbefragung I zeigen jedoch, dass die Landwirte vor allem in den Investitionskosten das größte Hindernis bei der Implementierung von PF in ihrem Betrieb sehen. Es sollten daher bei der Suche nach geeigneten PF-Verfahren auch die verursachten Fixkosten berücksichtigt werden.

7.1 Methodik – Untersuchte Verfahren und Datengrundlage

Für den nachfolgenden Verfahrensvergleich werden Systeme untersucht, die sich hinsichtlich ihrer technischen Intensität und somit auch in den nötigen Investitions- bzw. Implementierungskosten unterscheiden. Gleichzeitig werden ihnen Annahmen über Einsparpotenziale für N-Dünger und Erlössteigerungen zugewiesen.

- **Verfahren 1 „Landwirt“:** Anpassungen der N-Düngung an räumliche Unterschiede erfolgen auf Basis des subjektiven Wissens bzw. der Erfahrungswerte des Bewirtschafters sowie den augenscheinlichen Unterschieden im Pflanzenbestand. Bodenuntersuchungen werden auf zuvor vom Landwirt eingeteilten Teilflächen durchgeführt.
- **Verfahren 2 „Landwirt ISOBUS“:** Ergänzung von Verfahren 1 mit der ISOBUS-Schnittstelle an Zugmaschine und Applikationsgerät. Hintergrund ist die perspektivische Intensitätssteigerung von PF. Der Unterschied zu Verfahren 1 besteht lediglich in der technischen Umsetzung der Applikationssteuerung.
- **Verfahren 3 „Karte“:** Erfassung der räumlichen Heterogenität der gesamten Betriebsfläche durch die Erstellung einer Hofbodenkarte. Die Anpassung der N-Düngung erfolgt ausschließlich nach standortbedingten Unterschieden. Bodenuntersuchungen erfolgen in den sich daraus ergebenden Teilflächen.

- **Verfahren 4a „Sensor“:** Nutzung eines N-Sensors (*Yara ALS*) in-season-Erfassung von Bestandsheterogenität und im Online-Verfahren Anpassung der N-Düngung. Bodenuntersuchungen erfolgen auf Teilflächen, die sich langfristig durch Unterschiede der Biomasse ergeben.
- **Verfahren 4b „Satellit“:** Ähnliches Vorgehen wie bei Verfahren 4a, die N-Düngung erfolgt jedoch nicht im Online-Verfahren, sondern wird vorab durch auf Biomasse basierenden Applikationskarten geplant. Mehrjährige Biomassekarten der Vorjahre bilden die Grundlage für Teilflächen, auf denen die Bodenuntersuchungen durchgeführt werden.
- **Verfahren 5 „Map-Overlay“:** Kombination der Verfahren 3 und 4a bzw. 4b durch die Nutzung neuronaler Netze. In Abhängigkeit davon, ob für eine Betriebsgrößenklasse entweder 4a oder 4b vorteilhaft ist, wird das Map-Overlay mit diesem Verfahren gerechnet. Bodenuntersuchungen erfolgen äquivalent zu Verfahren 3.

Nachfolgende Tabelle 27 zeigt die Kosten technischer Komponenten und systemischer und organisatorischer Implementierungsmaßnahmen von PF auf. Diese sind jeweils den untersuchten Verfahren zugeordnet, um die Investitions- und Implementierungskosten der Verfahren ermitteln zu können. In Anhang 5 ist die Berechnung der Maschinenkosten mit dem MaKo-Rechner des KTBL aufgeführt.

Tabelle 27: Notwendige technische Komponenten und weitere Investitionen zur angepassten N-Düngung und Geo-Positionierung zur Umsetzung der beschriebenen Verfahren 1-5, inklusive Investitionskosten und jährlich anfallende Gesamtkosten (darin enthalten auch Variable Kosten) (Kosten der Komponenten und Systeme entstammen den unten genannten Quellen)

Komponente	Investitionskosten	Kosten/Jahr	Verfahren					
			1	2	3	4a	4b	5
Betriebssoftware Kauf*	3.800,00 €	759,00 €	X	X	X	X	X	X
Betriebssoftware Nutzung/Datenverarbeitung****	- €	250,00 €	X	X	X	X	X	X
GPS-Empfänger*	450,00 €	69,00 €	X	X	X	X	X	X
Datenlogger*	300,00 €	46,00 €	X	X	X	X	X	X
Referenzsignal*	250,00 €	248,33 €	X	X	X	X	X	X
ISOBUS-Ausstattung*	4.300,00 €	869,33 €		X	X	X	X	X
ISOBUS-Freischaltung***	1.500,00 €	250,00 €		X	X	X	X	X
Datenerhebung Standortheterogenität (Hofbodenkarte)/ ha**	50,00 €	4,33 €			X			X
Biomassekarten Kauf/ ha (bspw. Modul in Betriebssoftware 4 Monate)**/****	- €	12,00 €					X	(X)
Biomassekarten Datenverarbeitung****	- €	250,00 €					X	(X)
N-Sensor YARA ALS*/****	39.000,00 €	9.110,00 €				X		(X)
Georeferenzierte Bodenuntersuchungen Grundnährstoffe/ Probe** ³⁵	- €	5,00 €	X	X	X	X	X	X
Georeferenzierte Bodenuntersuchungen Nmin/ Probe**	- €	15,00 €	X	X	X	X	X	X
Lernkosten	625,00 €	125,00 €	X	X	X	X	X	X
Kosten Einführungsseminar PF	100,00 €	20,00 €	X	X	X	X	X	X

* Maschinenkostenrechner des (KTBL 2022)

** Lorenz & Münchhoff (2015, S. 98)

*** eigene Recherche nach Marktpreisen für Komponenten und Servicegebühren (Biomassekarten, Servicegebühr Sensor)

**** eigene Berechnungen mit Lohnansatz Betriebsleiter 25,00 €/h und 10 h Arbeitsaufwand (unabhängig von der Betriebsgröße)

***** angelehnt an Breunig et al. (2022), 15 h für Fortbildungen, 10 h zusätzlich entlang der Einsatzzeit mit Kosten von 25,00 €/h

³⁵ Die Bodenuntersuchung auf Grundnährstoffe wird zwar vor allem für die teilflächenspezifische Grunddüngung oder Kalkung benötigt und spielt für die teilflächenspezifische N-Düngung nur eine untergeordnete Rolle. Zum Zweck der Bonitierung von Teilflächen und Berücksichtigung von Nährstoff-Wechselwirkungen werden diese jedoch miterfasst.

Neben den Investitionskosten führt Tabelle 27 auch variable Kosten, wie bspw. Servicegebühren, Reparaturkosten, der N-Düngung zuzuordnende Vorarbeiten (Datenverarbeitung und -aufbereitung) und in Anspruch genommene Dienstleistungen (Bodenproben) auf. Verfahrensvergleiche werden üblicherweise mit Hilfe einer Deckungsbeitragsrechnung durchgeführt. Da in einer klassischen Deckungsbeitragsrechnung Fixkosten (wie die Investitionskosten) nicht berücksichtigt werden ist sie nicht die geeignete Methode zur Bewertung der Verfahren. Stattdessen werden sämtliche Kosten (fixe und variable) für jedes der betrachteten Verfahren dem entsprechenden Einsatzumfang zugeordnet. Die Berechnung orientiert sich methodisch am Vorgehen von Breunig et al. (2022), die aus der Veränderung der variablen und fixen Kosten durch den Einsatz von PF einen sog. betriebswirtschaftlichen Wert errechnen. Hierbei werden von der Veränderung der Direkt- und Arbeiterledigungskostenfreien Leistung (DAEKfL)³⁶ die Kosten der Technologie abgezogen. In Abbildung 16 ist das methodische Vorgehen dargestellt.

Veränderte DAEKfL von PF	Technologiekosten von PF
(Wirtschaftlicher Nutzen von PF)	
<u>Veränderung der Leistung</u>	<u>Variable Kosten von PF</u>
= Ertragsveränderung	(Wartungskosten, variable Lohn-, Lizenz- und Datenkosten etc.)
X Produktpreis für jeweilige Qualität	
<u>Veränderung der Direktkosten</u>	<u>Fixe Kosten von PF</u>
= Veränderte Düngermenge X Düngerpreis	(Abschreibungen, Zinsen, Lernkosten, Fixe Lohn-, Lizenz- und Datenkosten)
Betriebswirtschaftlicher Wert = Veränderte DAEKfL – Technologiekosten von PF	

Abbildung 16: Methodisches Vorgehen der Wirtschaftlichkeitsberechnung verschiedener Technologien der teilflächenspezifischen Düngung (eigene Darstellung)

Den Kosten der Implementierung stehen der Nutzen durch die mögliche Reduktion der Direktkosten aufgrund geringerer N-Düngermengen und eine Leistungssteigerung durch Ertragszuwächse bzw. Qualitätsverbesserungen gegenüber. Der Nutzen von PF ist ungleich schwieriger zu bewerten als die Kosten der nötigen Technologie. Breunig et al. (2022) ergänzen zudem, dass der Nutzen von angepasster Düngung auch häufig nicht direkt ersichtlich ist. Insbesondere Standortbesonderheiten wie die Standortheterogenität oder Niederschläge und

³⁶ Da die variablen Kosten der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung (PF) in diesem Fall den Technologiekosten zugeschrieben werden, beeinflussen sie die DAEKfL bei diesem methodischen Vorgehen nicht. Daher werden nur Veränderungen der Direktkosten, die sich aus der Nutzung der Technologie ergeben aufgeführt und die Kosten der Technologie als Block vom wirtschaftlichen Nutzen abgezogen (siehe auch Abbildung 16).

biologische Aspekte entscheiden über die Wirtschaftlichkeit von PF. Wie soll also der Nutzen von PF allgemein beschrieben werden und einer Wirtschaftlichkeitsberechnung standhalten?

Die Veränderung der DAEKfL ergibt sich aus den Annahmen zu eingespartem N-Dünger, höheren Erträgen sowie einem höheren Produktpreis durch eine verbesserte Kornqualität. Den Verfahren wurden zwei Intensitätsstufen des PF zugeordnet (PF1 und PF2), die unterschiedliche Potenziale für Ertragssteigerungen und Qualitätsverbesserungen aufweisen. Die Berechnungen werden für vier Betriebsgrößen – 100 ha, 200 ha, 500 ha und 1000 ha – durchgeführt und der Anbauanteil von Weizen der sog. Deutschlandfruchtfolge aus dem Anhang der Arbeit von Kühl et al. (2021) entnommen. Dieser beträgt ca. 25,5 %, der Anteil aller für die teilflächenspezifische N-Düngung geeigneten Kulturen 59,2 %³⁷. Hieraus ergeben sich exemplarische Einsatzflächen zu den jeweiligen Betriebsgrößen. Mit Bezug auf weitere Nutzungsmöglichkeiten von Komponenten, die der technischen Grundausstattung zuzuordnen sind, werden die Kosten hierfür anteilig auf die Fläche der teilflächenspezifischen Düngung (von Winterweizen) zugerechnet. Mögliche Skalen- und Verbundeffekte ergeben sich z.B. aus der Nutzung von GPS-Signalen für automatische Lenksysteme. Spezielle Fixkosten für PF allgemein müssen hingegen auf alle Kulturen aufgeteilt werden, in denen PF möglich ist (bspw. Lernkosten für PF, N-Sensor). Hierbei wird zunächst vernachlässigt, dass PF auch im Pflanzenschutz möglich ist und Investitionen in spezielle Komponenten auch von diesen Verfahren genutzt werden. Die Skaleneffekte der Investitionen werden dadurch verstärkt, dass sich die Einzelkomponenten nicht hinsichtlich der vorhandenen Betriebsgröße bzw. Einsatzfläche anpassen lassen. So wird bspw. die passende Maschine für die Bodenbearbeitung über die Arbeitsbreite oder der passende Traktor u.a. über die Zugleistung differenziert. Dies ist bei der Etablierung von PF nur über die Wahl eines möglicherweise günstigeren Verfahrens möglich. Hierbei ist jedoch u.U. ein Verlust der Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Betriebsmittelloptimierung in Kauf zu nehmen. Dieser Sachverhalt wird durch die Ergebnisse des Verfahrensvergleichs aufgezeigt. Für alle Betriebsgrößen sollen nachfolgend gleiche Annahmen über Erträge, Qualitäten, Produkt- und Faktorpreise sowie den Zinssatz gelten., die in Tabelle 28 aufgeführt sind.

³⁷ Dieser umfasst sämtliche Winter- und Sommergetreidearten sowie Raps. Diese Annahme wird getroffen, da die gegenwärtige Forschung zur angepassten N-Düngung sich häufig auf diese Kulturen (Weizen, Raps und Gerste) bezieht.

Tabelle 28: Kennzahlen zur Ertrags- und Qualitätsentwicklung durch teilflächenspezifische Düngung (eigene Darstellung und Berechnung auf Basis von Daten des BMEL, Breunig et al. (2022), Karatay und Meyer-Aurich (2020) sowie Kühl et al (2021))

Ausgangssituation		Intensitätsstufe PF1 (Verfahren 1, 2 und 3)		Intensitätsstufe PF2 (Verfahren 4 und 5)	
Ertrag	73,9 dt/ha	Ertragszuwachs	1,1 %	Ertragszuwachs	2,2 %
Proteingehalt	13,00 %	Proteingehalt	13,34 %	Proteingehalt	13,37 %
Weizenpreis	18,43 €/dt	Weizenpreis	18,83 €/dt	Weizenpreis	18,90 €/dt
Düngerkosten 1,00 €/kg N					
Zinssatz 2,00 %					

Während der Ertrag auf dem durchschnittlichen Weizenenertrag in Deutschland beruht (Kühl et al. 2021), entstammt der Ertragszuwachs den Annahmen von Breunig et al. (2022). Für die geringere Intensitätsstufe wurde hierzu ein geringerer Ertragszuwachs von 1,1 % angenommen. Der Weizenpreis in der Ausgangssituation ergibt sich aus dem Durchschnitt der Jahre 2019-2021 (BMEL 2019, 2020, 2021) und dem jeweiligen Anteil der erzielten Qualitätsstufe (Zuschläge bei höherer Kornqualität). Karatay und Meyer-Aurich (2020) haben durch PF mögliche Qualitätssteigerungen errechnet. Ein höherer durchschnittlicher Weizenpreis ergibt sich somit aus dem Einsatz von PF und damit verbundenen höheren erwarteten Kornqualitäten. Hieraus werden die (höheren) Weizenpreise für die Intensitätsstufen 1 und 2 abgeleitet. Die Düngerkosten entstammen einer Befragung der Landwirte, die an der Expertenbefragung teilgenommen hatten, während der Zinssatz auf Annahmen beruht (kalkulatorischer Wert in der betriebswirtschaftlichen Rechnung). Bei allen Preisen handelt es sich um Netto-Preise, die bei der Regelbesteuerung des Umsatzes betriebswirtschaftlich relevant sind³⁸.

Die Kennzahlen aus Tabelle 28 verdeutlichen, zumindest aufgrund von Versuchen und teilweise Annahmen, mögliche Leistungssteigerungen. Die Einsparung von N-Dünger hingegen ist wesentlich schwieriger zu überprüfen, da die N-Dynamik des Bodens und der daraus abzuleitende N-Bedarf komplexen Zusammenhängen unterliegen. Dies macht auch die schon umfassend aufgezeigte Diskrepanz verschiedener Studien zu diesem Thema deutlich. Aus diesem Grund werden für die Reduktion der Düngermenge durch PF drei verschiedene Reduktionsniveaus angenommen, die in Tabelle 29 aufgeführt sind. Die Annahmen bestehen zusätzlich zu denen der Erlössteigerungen und sind hier nicht alternativ. Es sei zudem darauf verwiesen, dass eine Ertrags- und Qualitätssteigerung bei gleichbleibender N-Düngung eine höhere N-Effizienz bedeutet. Diese äußert sich zwar nicht durch eine Reduktion der N-Menge, positive ökologische Aspekte können dennoch daraus abgeleitet werden.

³⁸ An der Expertenbefragung haben auch pauschalierende Betriebe teilgenommen. Um mit gleichen Preisen zu kalkulieren, wurde die einheitliche Annahme von zur Umsatzsteuer optierenden Betrieben getroffen.

Tabelle 29: Annahmen über die Reduktion der N-Düngung in kg N/ha der untersuchten Verfahren für drei Reduktionsniveaus

Reduktionsniveau	Landwirt	Landwirt ISOBUS	Karte	Sensor/ Satellit	Map- Overlay
1	0	3	3	5	8
2	3	5	8	8	10
3	5	8	10	10	18

Die Reduktionspotenziale beruhen u.a. auf der Annahme, dass ein technologisch optimiertes Verfahren auch ein höheres Reduktionspotenzial der N-Düngung aufweist. Dies ergibt sich u.a. aus den Ergebnissen von Schneider und Wagner (2008). Das dies in der Realität nicht unbedingt zutrifft, zeigen Borchardt et al. (2018), jedoch soll in dieser Berechnung diese Annahme weiterhin gelten. Die Reduktionsniveaus stellen Standorte dar, die durch unterschiedlich stark ausgeprägte Heterogenität gekennzeichnet sind. Niveau 1 stellt einen Standort dar, dessen Flächen vergleichsweise homogen sind und Bestandsheterogenität hauptsächlich durch einjährige Faktoren bestimmt wird. Demgegenüber repräsentiert Niveau 3 die Einsparpotenziale auf einem stark heterogenen Standort, Niveau 2 bei mittlerer Standortheterogenität. In Verbindung mit den in Tabelle 28 aufgeführten Ertrags- und Qualitätszuwächsen durch PF ergibt sich das Leistungspotenzial von PF für jedes der Verfahren, die den Technologiekosten gegenüberstehen.

Tabelle 30 weist die durchschnittliche Größe der Schläge und Teilflächen der vier Betriebsgrößen aus. Dabei ist festzuhalten, dass diese lediglich geschätzt wurden. Tatsächlich dürften die Durchschnittsgrößen von Betrieb zu Betrieb und vor allem in Abhängigkeit der jeweiligen Region, in der sich der Betrieb befindet, schwanken. Darüber hinaus führt Tabelle 30 die Anzahl der fortzubildenden Personen im Betrieb auf. So ist darauf hinzuweisen, dass in kleineren Betrieben Schlüsselaufgaben wie Pflanzenschutz und häufig auch die N-Düngung vom Betriebsleiter selbst durchgeführt werden (siehe Kapitel 5.4, Ergebnisse der Umfrage). In größeren Betrieben hingegen werden diese Arbeiten teilweise von mehreren Personen durchgeführt. Aus diesem Grund müssen auch mehrere Arbeitskräfte in der Nutzung teilflächenspezifischer Maßnahmen geschult sein, was eine stufenweise Erhöhung der Lernkosten abhängig von der Betriebsgröße bedeutet (basierend auf Annahmen).

Tabelle 30: Durchschnittliche Größen der Schläge und Teilflächen, sowie auszubildende Fachkräfte für PF bei den zu untersuchenden Betriebsgrößen (eigene Annahmen)

Betriebsgröße	100 ha	200 ha	500 ha	1.000 ha
Durchschnittliche Schlaggröße	3 ha	6 ha	12 ha	24 ha
Durchschnittliche Größe der Teilflächen	1 ha	1 ha	2 ha	2 ha
Fortzubildende Fachkräfte	1	1	2	3

7.2 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Schlussendlich ergibt sich unter Berücksichtigung der aufgeführten Kennzahlen und Zuordnung der technischen Komponenten zu den Verfahren ein Modell, mit dem die Technologiekosten der Verfahren 1-5 errechnet werden können. Diese sind in Tabelle 31 aufgeführt und in Anhang 6 detailliert berechnet.

Tabelle 31: Technologiekosten von Precision Farming in Abhängigkeit der eingesetzten Komponenten und der Betriebsgröße in €/ha (eigene Berechnungen)

Betriebsgröße		100 ha	200 ha	500 ha	1.000 ha
Weizenfläche		26 ha	51 ha	128 ha	255 ha
1	Landwirt	37,26 €/ha	28,63 €/ha	14,15 €/ha	12,32 €/ha
2	Landwirt ISOBUS	56,43 €/ha	38,22 €/ha	17,99 €/ha	14,24 €/ha
3	Karte	64,93 €/ha	46,02 €/ha	24,75 €/ha	20,48 €/ha
4a	Sensor	210,29 €/ha	115,14 €/ha	48,76 €/ha	29,62 €/ha
4b	Satellit	72,60 €/ha	56,14 €/ha	34,86 €/ha	30,60 €/ha
5	Map-Overlay	76,93 €/ha	61,86 €/ha	40,58 €/ha	35,34 €/ha

Es zeigt sich, dass insbesondere die Verfahren mit einem vergleichsweise hohen Investitionsbedarf (Sensor und Map-Overlay) in besonderem Maß von Skaleneffekten profitieren. Auch kann festgestellt werden, dass ein Anstieg der technischen Intensität unabhängig von der Betriebsgröße zu höheren Verfahrenskosten je Hektar führt. Dies sagt zunächst jedoch nichts über die Wirtschaftlichkeit der Verfahren aus, da mögliche niedrigere Direktkosten aufgrund von Düngereinsparungen oder Ertrags- und Qualitätsverbesserungen in dieser Betrachtung zunächst unberücksichtigt bleiben. Das ist jedoch entscheidend, um die Wirtschaftlichkeit der Verfahren bewerten zu können. Es gilt außerdem die Annahme, dass die Verfahren 4a (Sensor) und 4b (Satellit) keinen Unterschied hinsichtlich des Effizienzgewinns von gedüngtem Stickstoff bzw. eingespartem Dünger sowie Ertragssteigerungen und Qualitätsverbesserungen aufweisen. Diesbezüglich werden nicht-monetäre Vor- und Nachteile beider Verfahren nachfolgend zwar diskutiert, diese wirken sich jedoch nicht auf das rechnerische Ergebnis des Verfahrensvergleichs aus. Das Verfahren 5 (Map-Overlay) besteht aus der Kombination des Kartenansatzes (Standortheterogenität) mit der Erfassung der

(aktuellen) Bestandsheterogenität durch einen Sensor oder Biomassekarten. Die Erfassung der Bestandsheterogenität für das Map-Overlay wird mit jeweils dem System durchgeführt, welches im Vergleich zwischen 4a und 4b bei der jeweiligen Betriebsgröße die niedrigeren Technologiekosten aufweist. Daraus errechnet sich der veränderte kalkulatorische Gewinn durch den Einsatz von PF, den Breunig et al. (2022) als betriebswirtschaftlichen Wert von PF bezeichnen. Dieser kann u.U. auch negativ sein und in Tabelle 32 getrennt für jedes Reduktionsniveau der N-Düngung aufgeführt. Zur Berechnung des betriebswirtschaftlichen Werts wurde neben den Technologiekosten auch die veränderte Erlössituation unter Berücksichtigung von angenommenen Ertrags- und Qualitätsveränderungen herangezogen. Die detaillierte Kalkulation findet sich in Anhang 6.

Tabelle 32: Der betriebswirtschaftliche Wert der untersuchten Verfahren zur teilflächenspezifischen N-Düngung gegliedert nach Betriebsgröße und N-Reduktionsniveau (1,2 und 3) in €/ha (eigene Berechnungen)

Betriebsfläche		100 ha	200 ha	500 ha	1.000 ha
Weizenfläche		26 ha	51 ha	128 ha	255 ha
1	1 Landwirt	7,43 €/ha	16,06 €/ha	30,54 €/ha	32,37 €/ha
	2 Landwirt ISOBUS	- 8,74 €/ha	9,47 €/ha	29,70 €/ha	33,45 €/ha
	3 Karte	- 17,24 €/ha	1,67 €/ha	22,94 €/ha	27,21 €/ha
	4a Satellit	- 2,28 €/ha	14,18 €/ha	35,45 €/ha	39,72 €/ha
	4b Sensor	- 139,97 €/ha	- 44,83 €/ha	21,56 €/ha	40,69 €/ha
	5 Map-Overlay	- 3,62 €/ha	11,46 €/ha	32,73 €/ha	37,97 €/ha
2	1 Landwirt	10,43 €/ha	19,06 €/ha	33,54 €/ha	35,37 €/ha
	2 Landwirt ISOBUS	- 6,74 €/ha	11,47 €/ha	31,70 €/ha	35,45 €/ha
	3 Karte	- 12,24 €/ha	6,67 €/ha	27,94 €/ha	32,21 €/ha
	4a Satellit	0,72 €/ha	17,18 €/ha	38,45 €/ha	42,72 €/ha
	4b Sensor	- 136,97 €/ha	- 41,83 €/ha	24,56 €/ha	43,69 €/ha
	5 Map-Overlay	- 1,62 €/ha	13,46 €/ha	34,73 €/ha	39,97 €/ha
3	1 Landwirt	12,43 €/ha	21,06 €/ha	35,54 €/ha	37,37 €/ha
	2 Landwirt ISOBUS	- 3,74 €/ha	14,47 €/ha	34,70 €/ha	38,45 €/ha
	3 Karte	- 10,24 €/ha	8,67 €/ha	29,94 €/ha	34,21 €/ha
	4a Satellit	2,72 €/ha	19,18 €/ha	40,45 €/ha	44,72 €/ha
	4b Sensor	- 134,97 €/ha	- 39,83 €/ha	26,56 €/ha	45,69 €/ha
	5 Map-Overlay	6,38 €/ha	21,46 €/ha	42,73 €/ha	47,97 €/ha

Es zeigt sich, dass die Wirtschaftlichkeit von technisch aufwändigeren Verfahren einerseits durch die Betriebsgröße und andererseits durch das Einsparpotenzial der N-Düngung determiniert ist. Bei zunehmender Betriebsgröße steigt der betriebswirtschaftliche Wert aller Verfahren. Die einfache Anpassung der Düngermenge über händische Mengensteuerung (Verfahren 1) ist trotz geringem Einsparpotenzial bei geringer Betriebsgröße den technisch aufwändigeren Verfahren überlegen. Dies gilt auch für den Fall höherer Standortheterogenität (Niveau 3). Dennoch gibt es einige Faktoren, die in der Praxis den Einsatz der technischen Grundausstattung begünstigen (bspw. haben größere Betriebe oftmals verschiedene Fahrer mit

unterschiedlicher technischer Qualifikation und Motivation). Auffällig ist, dass die Verfahren mit dem höchsten Einsparpotenzial nicht automatisch die höchste Wirtschaftlichkeit aufweisen. Der betriebswirtschaftliche Wert sagt somit nur wenig über den ökologisch-ökonomischen Nutzen aus. Dieser kann bspw. durch eine Analyse der Verfahrenseffizienz ermittelt und daraus kosteneffiziente Verfahren zur Reduktion der N-Düngung ermittelt werden.

Verbindet man ökologischen mit ökonomischem Nutzen, stellt sich die Frage nach der Verfahrenseffizienz. Das Ziel ist es demnach, mit möglichst geringem monetärem Aufwand eine entsprechende Reduktion der N-Düngung oder einen höheren betriebswirtschaftlichen Wert zu erzielen und dafür die optimale technische Intensität zu wählen (Technologieeffizienz). Diese Zielgröße ist nicht gleichbedeutend mit dem betriebswirtschaftlichen Wert für den Betrieb, da dieser nicht das günstigste Verfahren für die Einsparung einer Einheit Stickstoff (kg N) bzw. erzieltm Mehrerlös für das eingesetzte Kapital benennt. Die Ergebnisse dieser ergänzenden Berechnung sind in Anhang 7 aufgeführt. Relevant ist die Verfahrenseffizienz u.a. für Grundwasserschutzkooperationen, da sie für verschiedene Betriebe ein optimales Verfahren zur Erreichung von Reduktionszielen unter den getroffenen Annahmen identifiziert. Auch im Hinblick auf die Reduktionsziele im Rahmen der Farm2Fork-Strategie bietet sie eine alternative Betrachtungsweise, die dem Gesetzgeber günstige Verfahren aufzeigt.

7.3 Diskussion der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Zunächst ist festzuhalten, dass die Ergebnisse der Berechnungen u.a. auf Annahmen zur Düngerreduktion sowie Ertrags- und Qualitätssteigerungen beruhen. Die Ergebnisse sind demnach nicht hinsichtlich ihrer absoluten Höhe (bspw. des Betriebswirtschaftlichen Werts eines Verfahrens bei einer bestimmten Betriebsgröße) zu bewerten. Vielmehr gilt es anhand der Ergebnisse Trends abzulesen, nach denen der Einsatz von PF-Verfahren bei bestimmten Bedingungen (Betriebsgröße, Standortheterogenität, Anbaufläche von Weizen) interpretiert werden kann. Außerdem ist festzuhalten, dass neben zuvor bekannten Größen die Unsicherheit über Witterungsereignisse die Ergebnisse bezüglich der Erträge und Qualitäten, als auch die optimale Höhe der N-Düngung maßgeblich beeinflussen. Wie bereits diskutiert kann dies erst ex-post bewertet werden. Aus diesem Grund können die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung nur der Orientierung dienen und erheben nicht den Anspruch auf eine abschließende Empfehlung zum Einsatz von PF.

Es wird gezeigt, dass eine Zunahme der Betriebsgröße bzw. Anbaufläche von Weizen (und anderen Getreidearten sowie Raps) und eine Zunahme der Standortheterogenität die

Wirtschaftlichkeit technisch aufwendiger Verfahren begünstigt. Höhere Investitionskosten können somit durch Skaleneffekte oder ein höheres Einsparpotenzial von N-Dünger kompensiert werden. Daraus ergeben sich auf der Ebene des Landwirts ökonomische Vorteile für vereinfachte Verfahren bei kleinerer Einsatzfläche. Entscheidungen auf Basis von Erfahrungswerten und exklusivem Wissen des Landwirts sind unter diesen Bedingungen effizienter als technisch aufwendige Verfahren. Für kleinere Betriebe stellen einfache Verfahren, insbesondere bei unsicherem Nutzen, deshalb ökonomisch die zu bevorzugende Alternative dar. Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese vorrangig eingesetzt werden. Wie aus den Ergebnissen von Paustian und Theuvsen (2017) hervorgeht, sind Landwirte grundlegend technikaffin. Diese Einschätzung bestätigen die Ergebnisse der Expertenbefragung aus Kapitel 5. So kann bei einer längerfristigen Betrachtung von einer zunehmenden Implementierung von grundlegender technischer Ausstattung auf den Betrieben ausgegangen werden, die, unter den getroffenen Annahmen, eine verbesserte N-Effizienz und ggf. höhere N-Reduktionen ermöglicht.

Die Voraussetzung für die Gültigkeit der Ergebnisse ist die realistische Einschätzung der getroffenen Annahmen. Insbesondere die höhere Leistungsfähigkeit technisch aufwendiger Verfahren im Hinblick auf die N-Reduktion sowie Ertrags- und Qualitätssteigerungen ist eine Voraussetzung für deren Wirtschaftlichkeit auch bei größerer Einsatzfläche. Können unter Praxisbedingungen mit den einfachen Verfahren ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden, gibt es zunächst keinen ökonomischen Grund in aufwendige Technik wie bspw. N-Sensoren oder Map-Overlay-Systeme zu investieren. Hier greift jedoch eine zentrale Einschränkung bei der Nutzung von anwenderorientierten Verfahren. Während in Betrieben unter 500 ha zentrale Arbeiten des Pflanzenbaus (Düngung und Pflanzenschutz) vom Betriebsleiter selbst durchgeführt werden (siehe Umfrage in Kapitel 5) ist dies in größeren Betrieben seltener der Fall. Das Wissen über Standortheterogenität nimmt somit insbesondere bei wechselnden Fahrern ab. Dies bedeutet, dass die Voraussetzungen für die Verfahren 1 und 2 in großen Betrieben nicht gegeben sind und der Nutzen von PF-Technik zunimmt. Grundsätzlich entscheidet sich die Wirtschaftlichkeit von PF in der Abbildung der realen Ertragssituation durch den Landwirt oder das genutzte System. Einen Ansatz zur Überprüfung dieser Frage liefern u.a. Karatay et al. in verschiedenen Veröffentlichungen (2020; 2019b). Die Autoren beziehen N-Produktionsfunktionen von Weizen mit ein und erweitern somit die Berechnung der Wirtschaftlichkeit durch eine ökonomische Optimierung. PF wird somit dahingehend bewertet, wie gut auf einem Schlag wechselnde Produktionsoptima abgebildet werden bzw. wie gut die N-Düngung dem ex-post-Optimum entspricht.

8. Feldversuch zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit verschiedener PF-Verfahren zeigt, dass Heuristiken unter den getroffenen Annahmen für kleinere und kleinstrukturierte Betriebe eine sinnvolle Alternative bei der Berücksichtigung von Standort- und Bestandsheterogenität sein können. Damit werden auch die Ergebnisse der Expertenbefragung II bestätigt. Voraussetzung ist die Richtigkeit der getroffenen Annahmen zur N-Effizienz und Ertrags- und Qualitätssteigerungen. Die vereinfachte Vorgehensweise bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung unter der Annahme von N-Einsparungen wird der komplexen Thematik jedoch nur unzureichend gerecht. Insbesondere die N-Dynamik des Bodens in Verbindung mit dem Pflanzenbau und der N-Düngung erschwert die Nutzenabschätzung. Dies stellen auch Gandorfer und Meyer-Aurich (2017) fest, die von einer schwierigen Abschätzung des Nutzens von PF sprechen. Aus diesem Grund soll ein Praxisversuch dazu beitragen, verschiedene Kennzahlen zur Bestimmung des ökologischen und ökonomischen Nutzens von PF zu ermitteln. Ziel ist es, den ökonomischen und ökologischen Nutzen von heuristischen PF-Verfahren im Vergleich zu technisch aufwendigeren Verfahren zu untersuchen. Hierzu wurde ein dreijähriger Versuch (2019-2021) zur teilflächenspezifischen N-Düngung bei Winterweizen durchgeführt. In Zusammenarbeit mit einem örtlichen Wasserversorger (ZVG Dieburg) und einem zugehörigen Ingenieurbüro (AGGL) wurden auf drei Betrieben praxisnah (On-Farm-Research) drei PF-Systeme hinsichtlich der Berücksichtigung der Bestandsheterogenität bei der N-Düngung verglichen. Die Grundlage des Versuchs bildeten die Teilflächen, die von den Landwirten vorab festgelegt und aus der Expertenbefragung II übernommen wurden. Die Teilflächen, die als repräsentativ für die Standortheterogenität der Schläge angesehen werden, blieben bei der N-Düngung unberücksichtigt und dienten lediglich als Grundlage für die Erhebung der N-Min-Werte, Grundnährstoff- und Pflanzenanalysen. Darüber hinaus wurden sie als Grundlage für die Auswertung der Ergebnisse herangezogen. Neben den Erträgen, ermittelt über eine im Mährescher verbaute Ertragskartierung, wurden Nmin-Werte, Grundnährstoffe in Boden und Pflanze, sowie der Eiweißgehalt des Erntegutes teilflächenspezifisch erfasst. Aus diesen Daten konnten anschließend der N-Entzug sowie N- und Düngebilanzen für jedes Verfahren und die aNMR sowie ex-post-Ertrags- und Proteinfunktionen teilflächenspezifisch errechnet werden. Zudem wurde die N-Kosten-freie Leistung (Nkfl) errechnet (siehe hierzu u.a. Schneider und Wagner (2008)), um N-Einsparungen sowie mögliche Veränderungen der Kornqualität und damit verbundene Auszahlungspreise (Karatay und Meyer-Aurich 2020) einzubeziehen. Darauf aufbauend können Aussagen über das ökonomische und ökologische Potenzial verschiedener Verfahren getroffen werden. Untersucht wurde die Variation der N-Düngung aufgrund des

Wissens und Wahrnehmung des Landwirts (Verfahren Landwirt), darauf aufbauend eine Entscheidungsunterstützung durch ein Falschfarbenbild einer Drohnenaufnahme (Verfahren Drohne), sowie eine Applikationskarte auf Basis von Satellitenaufnahmen mit errechneter Biomasse bzw. NDVI (Verfahren NDVI). Zur Kontrolle wurde die homogene N-Düngung als vierte Variante berücksichtigt (Verfahren Homogen). Aus den bisherigen Erkenntnissen ergeben sich für die Ergebnisse des Versuchs zwei Hypothesen.

- Sowohl N_{min}-Werte als auch die Grundnährstoffe und die Versorgung der Pflanze unterscheiden sich innerhalb der Schläge zwischen den Teilflächen.
- Das Verfahren L kann hinsichtlich der untersuchten ökonomischen und ökologischen Kennzahlen vergleichbare Ergebnisse liefern.

Als weitere zentrale Zielsetzung des Feldversuchs, sollte die optimale spezielle Intensität sowie das Ertragsmaximum für alle Flächen und Teilflächen bestimmt werden. Hintergrund ist die Annahme von Gandorfer und Meyer-Aurich (2017), die eine abschließende Nutzenabschätzung von PF mit der Überprüfung von Produktionsfunktionen vorschlagen. Zusätzlich sollen die Einschätzungen von Heyn (2010) und Beisecker et al. (2015) überprüft werden, die als Ursache für N-Verluste den Fokus des Landwirts auf eine ertragsmaximale N-Düngung sehen und empfehlen daher eine ökonomisch-orientierte Optimierung. Auf dieser ex-post-Betrachtung aufbauend, wurden zudem ex-ante-Ertrags- und Proteinfunktionen ermittelt und einer Risikosimulation hinsichtlich einer optimalen N-Düngung unterzogen. Berücksichtigt wurde neben dem Marktrisiko aufgrund unsicherer Preise und Kosten auch das Produktionsrisiko, welches u.a. auf einen unsicheren Witterungsverlauf sowie räumlich variable Umweltfaktoren (Standortheterogenität) zurückzuführen ist.

Nachfolgend werden zunächst die Betriebe und die Standortbedingungen inklusive des während der Versuchsjahre beobachteten Witterungsverlaufs und eine mehrjährige Betrachtung des vorherrschenden Klimas vorgestellt.

8.1 Betriebe, Standorte und Klimatische Bedingungen

Für den Praxisversuch wurden konventionell wirtschaftende Haupterwerbsbetriebe gesucht, die sich hinsichtlich der Betriebsgröße ähneln und deren Hauptbetriebsfläche innerhalb des Kooperationsgebietes des Wasserversorgers mit der Landwirtschaft befinden. Die Betriebe sollten die unterschiedlichen Standortbedingungen des Kooperationsgebiets abdecken, die sich hinsichtlich der Ertragsfähigkeit, Topografie und Bodenart unterscheiden. Als Grundlage

hierfür kann das Umfragegebiet der Expertenbefragung angesehen werden. Auf den Standorten A, B und C, welche die Naturräume in der untersuchten Region der beiden Expertenbefragungen in den Kapiteln 5 und 6 repräsentieren, wurde jeweils ein Betrieb ausgewählt, dessen Flächen repräsentativ für die Standortbedingungen sind. Gleichzeitig wurde von den Landwirten bei der Teilnahme am Versuch erwartet, Daten bezüglich der Nährstoffversorgung, der Erträge sowie weitere Betriebsdaten zur Verfügung zu stellen. Außerdem mussten mögliche Ertragsminderungen und eine aufwendigere Ernte aufgrund der Datenerfassung akzeptiert sowie ein höherer organisatorischer Aufwand durch die Landwirte geleistet werden. Im Gegenzug erhielten die Betriebe vollständigen Zugriff auf die erhobenen Daten und nachträglich eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 100 €/ha der Versuchsfläche. Schließlich konnten hinsichtlich der unterschiedlichen Standortbedingungen repräsentative Betriebe für den Versuch gewonnen werden, die nachfolgend vorgestellt werden. Die nachfolgende Charakterisierung bietet erweiterte Informationen und beschreibt die am Versuch beteiligten Schläge. In den Darstellungen der Schlaggrenzen sind die Teilflächen eingezeichnet, die von den Landwirten identifiziert wurden und in Kapitel 6 analysiert wurden. Sie bilden die Grundlage für begleitende Daten und die Auswertung der Ergebnisse. Zusätzlich wurden die Anbauhistorie, die Weizensorte und der Aussaattermin vom Betriebsleiter erfragt. Die Ackerschlagkarteien für die Versuchsschläge sind im Anhang hinterlegt. Mit dem Bodenviewer Hessen (Weinberger et al. 2017) wurden die Daten zur Beschreibung der Böden ermittelt (Entstehungsart, Bodenart, Ackerzahl, nFK). Die abgebildeten Luftbilder der Schläge sind aus zusammengesetzten Orthofotos (Orthomosaik) entstanden, die mit einer Drohne (Typ *DJI Mavic 2 Zoom*) durch den Autor selbst aufgenommen wurden. Dabei wurde auch mit Hilfe des zugehörigen Programms die mittlere Höhe über dem Meeresspiegel (NN) bestimmt. Die Betriebsdaten beziehen sich auf das Jahr 2019, welches dem Startjahr des Versuchs entspricht.

8.1.1 Betrieb 1 auf Standort A

Geografisch befindet sich Betrieb 1 am südlichen Rand der Untermainebene (Standort A), unweit der Grenze zum Vorderen Odenwald, in dem ebenfalls Flächen durch den Betrieb bewirtschaftet werden. Der Hauptteil der Flächen ist jedoch der Untermainebene zuzuordnen, dies gilt auch für die beiden Versuchsschläge. Es handelt sich um einen Mischbetrieb aus Milchviehhaltung und Ackerbau, wobei dieser sich durch eine vergleichsweise diversifizierte Fruchtfolge auszeichnet. Dies ist nach Aussage des Landwirts auf die Heterogenität zwischen den Schlägen einerseits und die Vorteile einer weiten Fruchtfolge andererseits zurückzuführen. Insbesondere auf den trockenheitsgefährdeten (Teil-)Flächen ist aufgrund des

Infiltrationsvermögens der vorliegenden Sandböden eine hohe Auswaschungsgefahr von Nitrat erkennbar. Aus diesem Grund ist eine auf realistische Ertragserwartungen ausgelegte N-Düngung hier für den Grundwasserschutz entscheidend (Bischoff et al. 2017). Neben einem Betriebsspiegel sind nachfolgend zudem die beiden Schläge *Kleeplatz* (2019 und 2021) und *Hammchesberg* (2020) dargestellt und beschrieben, auf denen der Versuch durchgeführt wurde.

Tabelle 33: Betriebsspiegel von Betrieb 1 im Jahr 2019 (Monath 2019)

Alter des Betriebsleiters	54 Jahre (männlich)
Ausbildung	Staatlich geprüfter Wirtschaftler
Arbeitskräfte gesamt	3,5
Betriebsgröße	107 ha
Grünlandanteil	20 %
Viehbestand	50 GV (Milchvieh und Nachzucht)
Anzahl angebaute Kulturen	9 (Weizen, Gerste, Roggen, Raps, Zuckerrüben, Erbsen, Mais, Hafer, Klee gras)
Weitere Angaben des Betriebsleiters:	Durchschnittliche Schlaggröße von 1,6 ha. Die Anzahl der angebaute Kulturen ergibt sich aus den stark heterogenen Böden zwischen den Schlägen. Die Pflanzenschutzspritze, mit der auch hauptsächlich die mineralische N-Düngung (AHL) durchgeführt wird, wird in einer Maschinengemeinschaft genutzt (hohe Auslastung >2.000 ha/Jahr).

Tabelle 34: Steckbrief des Schrages Kleeplatz mit Daten der Versuchsjahre 2019 und 2021 (eigene Erhebung)

Kleeplatz (Versuchsjahr 2019 und 2021)	
Größe	10,55 ha
durchschnittliche Höhe über NN	137 m
Fruchtfolge	ZR/Erbsen-WW-WW(2019)-WR-WW(2021)
Aussaatdatum (2019/2021)	15.10.2018/ 19.10.2020
Sorte (2019/2021)	Ambello A/ Chevignon B
Erntedatum (2019/2021)	1.8.2019/ 22.7.2021
Entstehungsart Boden	D, A1
Bodenart	IS, SI, SL
Ackerzahl	35-70 BP
nFK	130-390



Abbildung 17: Luftbild des Schlags Kleeplatz vom 10.5.2019 (Auszug aus DroneDeploy)

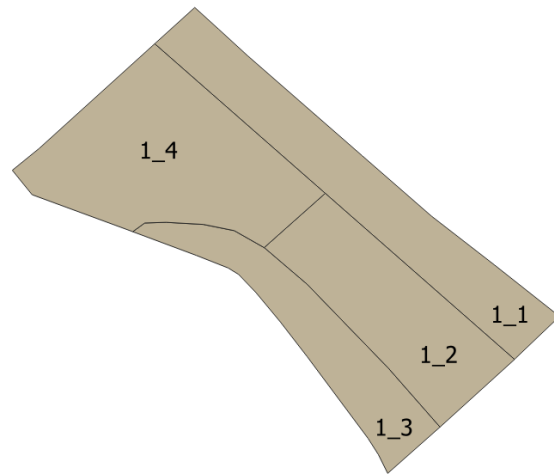


Abbildung 18: Schlaggrenzen mit Teilflächen des Schlags Kleeplatz (Auszug aus QGIS)

Tabelle 35: Steckbrief des Schlags Hammchesberg mit Daten des Versuchsjahrs 2020 (eigene Erhebung)

Hammchesberg (Versuchsjahr 2020)	
Größe	5,65 ha
durchschnittliche Höhe über NN	136 m
Fruchtfolge	WG-WR-WW(2020)
Aussaatdatum	15.10.2019
Sorte	Chevignon B
Erntedatum	22.7.2020
Entstehungsart Boden	D, A1
Bodenart	IS, SI, L
Ackerzahl	30-75 BP
nFK	130-390



Abbildung 19: Luftbild des Schlags Hammchesberg vom 14.5.2020 (Auszug aus DroneDeploy)

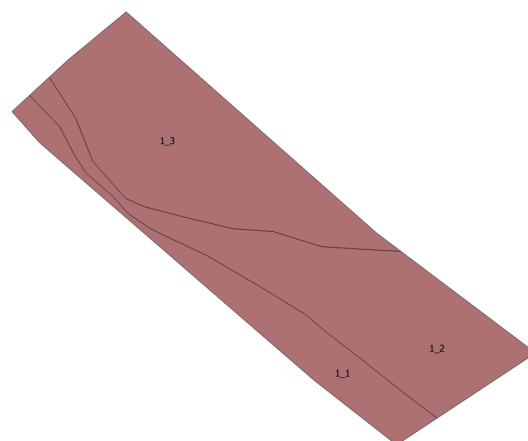


Abbildung 20: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags Hammchesberg (Auszug aus QGIS)

8.1.2 Betrieb 2 auf Standort C

Betrieb 2 repräsentiert mit Standort C einen Hohertragsstandort am Rande des Odenwalds. Der Betrieb liegt an der nördlichen Grenze des Reinheimer Hügellands und zeichnet sich durch eine hohe durchschnittliche Ertragsfähigkeit der Böden aus. Diese lässt sich auch an den Bodenzahlen der untersuchten Schläge ablesen, die im Gegensatz zu den Flächen der anderen beiden Betriebe vergleichsweise homogen sind. Da die Böden einen hohen Lössanteil aufweisen und der Viehbesatz auf den langjährigen Einsatz von organischem Dünger schließen lässt, ist im Boden auch ein höherer N-Pool zu erwarten. Hieraus ergeben sich entsprechende N-Nachlieferungen. Wird dieser mineralisierte Stickstoff nicht bei der Bewirtschaftung berücksichtigt, kann es zu einer Belastung des Grundwassers mit Nitrat kommen (Beisecker et al. 2015). Im Fokus des Ackerbaus des Betriebs steht die Produktion von Futter, weshalb auf eine Qualitätsdüngung des Weizens verzichtet wird³⁹. Dies unterscheidet den Betrieb von den anderen, deren Strategie auf die Erzeugung von Backweizen abzielt. Auf den Schlägen *An der Siedlung* (2019), *Hinterm Hof* (2020) und *Winkelfeld* (2021) wurde der Versuch durchgeführt, sie sind nachfolgend ebenfalls charakterisiert.

Tabelle 36: Betriebsspiegel von Betrieb 2 im Jahr 2019 (Monath 2019)

Alter des Betriebsleiters	47 Jahre (männlich)
Ausbildung	Diplom-Agraringenieur
Arbeitskräfte gesamt	3
Betriebsgröße	130 ha
Grünlandanteil	0 %
Viehbestand	200 GV (Schweinemast)
Anzahl angebaute Kulturen	6 (Weizen, Gerste, Roggen, Zuckerrüben, Mais, Erbsen)
Weitere Angaben des Betriebsleiters:	Bis auf die Zuckerrüben orientiert sich der Ackerbau ausschließlich am Anbau von Futter. Aufgrund des anfallenden Wirtschaftsdüngers werden alle Flächen langjährig organisch gedüngt und mit der mineralischen N-Düngung lediglich eine Ausgleichsdüngung durchgeführt. Dadurch hohe N-Nachlieferung der Böden.

³⁹ Nach Aussage des Betriebsleiters hat Weizen mit einem geringeren Anteil Rohprotein für ihn einen höheren Wert, als es der Preis für Futterweizen repräsentieren würde. Dies ist auf einen höheren Anteil essenzieller Aminosäuren zurückzuführen, die wertvoll für die Schweinefütterung sind (siehe hierzu Stalljohann et al. 2019). Vor diesem Hintergrund müsste auch der innerbetriebliche Wert des Futterweizens bewertet werden. Dies wird nachfolgend aus Gründen der Vergleichbarkeit jedoch nicht bei den Berechnungen berücksichtigt, abschließend aber entsprechend diskutiert.

Tabelle 37: Steckbrief des Schlags Siedlung mit Daten des Versuchsjahrs 2019 (eigene Erhebung)

Siedlung (Versuchsjahr 2019)	
Größe	5,63 ha
durchschnittliche Höhe über NN	153 m
Fruchtfolge	WG-ZR-WW(2019)
Aussaatdatum	7.11.2018
Sorte	Chevignon B
Erntedatum	1.8.2019
Entstehungsart Boden	Lö
Bodenart	sL
Ackerzahl	70-75 BP
nFK	260-390



Abbildung 21: Luftbild des Schlags An der Siedlung vom 4.5.2019 (Auszug aus DroneDeploy)

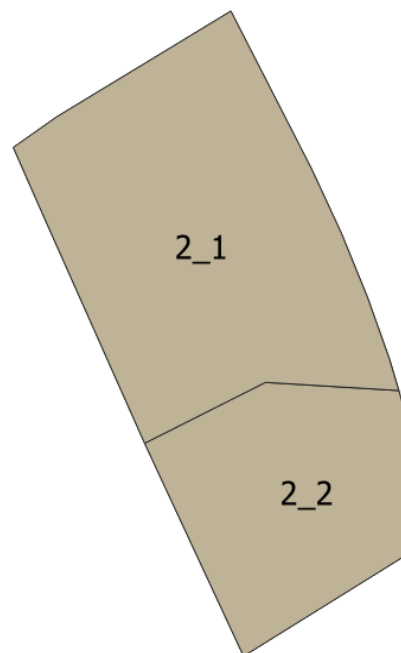


Abbildung 22: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags An der Siedlung (Auszug aus QGIS)

Tabelle 38: Steckbrief des Schlags Hinterm Hof mit Daten des Versuchsjahrs 2020 (eigene Erhebung)

Hinterm Hof (Versuchsjahr 2020)	
Größe (Teilflächen)	3,96 ha
durchschnittliche Höhe über NN	150 m
Fruchtfolge	WG-KM-WW(2020)
Aussaatdatum	31.10.2019
Sorte	Chevignon B
Erntedatum	22.7.2020
Entstehungsart Boden	Lö
Bodenart	sL, L
Ackerzahl	50-60 BP
nFK	260-390



Abbildung 23: Luftbild des Schlags Hinterm Hof vom 1.7.2020 (Auszug aus DroneDeploy)

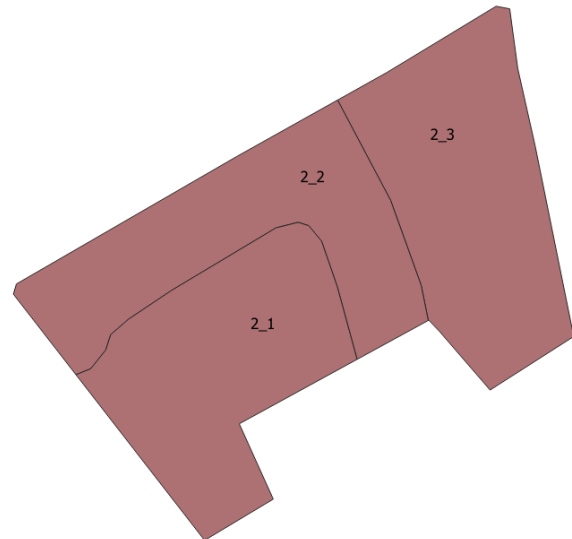


Abbildung 24: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags Hinterm Hof (Auszug aus QGIS)

Tabelle 39: Steckbrief des Schlages Winkelfeld mit Daten des Versuchsjahrs 2021 (eigene Erhebung)

Winkelfeld (Versuchsjahr 2021)	
Größe (Teilflächen)	5,10 ha
durchschnittliche Höhe über NN	158 m
Fruchtfolge	WG-ZR-WW(2021)
Aussaatdatum	24.10.2020
Sorte	Chevignon B
Erntedatum	22.7.2021
Entstehungsart Boden	Lö
Bodenart	sL
Ackerzahl	70-75 BP
nFK	260-390

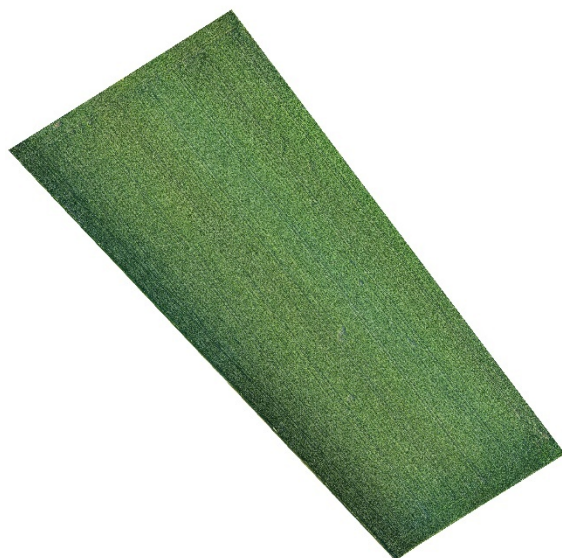


Abbildung 25: Luftbild des Schlags Winkelfeld vom 14.5.2021 (Auszug aus DroneDeploy)

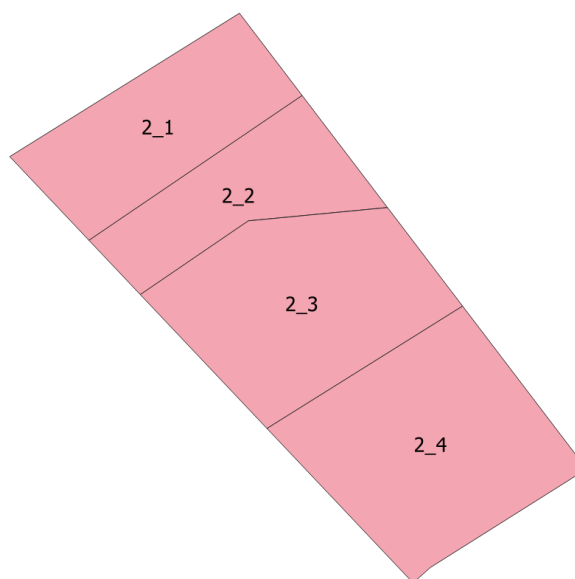


Abbildung 26: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags Winkelfeld (Auszug aus QGIS)

8.1.3 Betrieb 3 auf Standort B

Der dritte beteiligte Betrieb 3 bewirtschaftet seine Flächen auf Standort B, der die topografischen Bedingungen des Vorderen Odenwalds repräsentiert. Die Flächen sind teils stark geneigt und erosionsgefährdet. Hieraus ergibt sich auch die vorliegende Heterogenität der Böden und das Wassergefährdungspotenzial. Nichtgenutzter Stickstoff kann durch Wassererosion in Oberflächengewässer und dann ins Grundwasser ausgewaschen werden. Als Staatsdomäne sind die Flächen fast vollständig arrondiert. Tierhaltung findet auf dem Betrieb in Form einer Pensionspferdehaltung statt. Der Versuch wird auf den Schlägen *Waldacker* (2019 und 2021) und *24-Morgen* (2020) durchgeführt.

Tabelle 40: Betriebsspiegel von Betrieb 3 im Jahr 2019 (Monath 2019)

Alter des Betriebsleiters	51 Jahre (männlich)
Ausbildung	Techniker
Arbeitskräfte gesamt	3,5
Betriebsgröße	118 ha
Grünlandanteil	25 %
Viehbestand	50 GV (Pensionspferde)
Anzahl angebauter Kulturen	6 (Weizen, Gerste, Raps, Zuckerrüben, Mais, Erbsen)
Weitere Angaben des Betriebsleiters:	Staatsdomäne mit fast vollständig arrondierten Flächen. Betrieb nimmt am Programm HALM C.1 (Vielfältige Kulturen) teil.

Tabelle 41: Steckbrief des Schlags Waldacker mit Daten der Versuchsjahre 2019 und 2021 (eigene Erhebung)

Waldacker (Versuchsjahr 2019 und 2021)	
Größe (Teilflächen)	5,58 ha
durchschnittliche Höhe über NN	250 m
Fruchtfolge	WG-WR-WW(2019)-ZR-WW(2021)
Aussaatdatum (2019/2021)	5.10.2018/ 10.10.2020
Sorte (2019/2021)	Reform A
Erntedatum (2019/2021)	31.7.2019/ 30.7.2021
Entstehungsart Boden	Lö, V
Bodenart	sL, L, LT
Ackerzahl	30-75 BP
nFK	260-520



Abbildung 27: Luftbild des Schlags Waldacker vom 30.5.2019 (Auszug aus DroneDeploy)

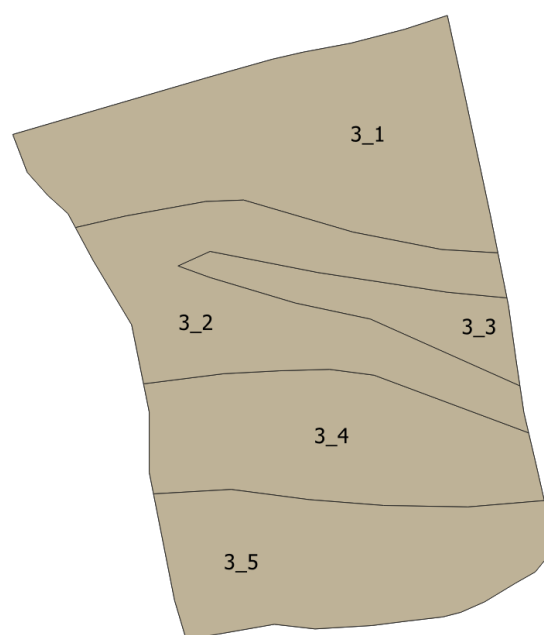


Abbildung 28 Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags Waldacker (Auszug aus QGIS)

Tabelle 42: Steckbrief des Schlags 24-Morgen mit Daten des Versuchsjahrs 2020 (eigene Erhebung)

24-Morgen (Versuchsjahr 2020)	
Größe (Teilflächen)	6,84 ha
durchschnittliche Höhe über NN	265 m
Fruchtfolge	WG-WR-WW(2020)
Aussaatdatum	22.10.2019
Sorte	Reform A
Erntedatum	23.7.2020
Entstehungsart Boden	Lö, V
Bodenart	sL, L
Ackerzahl	40-70 BP
nFK	130-390

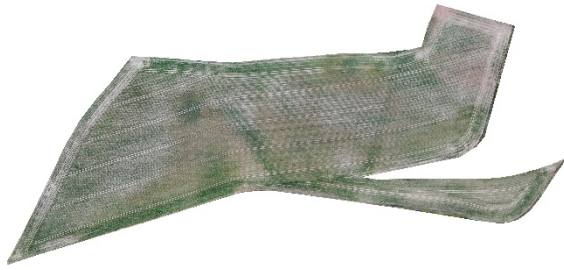


Abbildung 29: Luftbild des Schlags 24-Morgen vom 2.4.2020 (Auszug aus DroneDeploy)

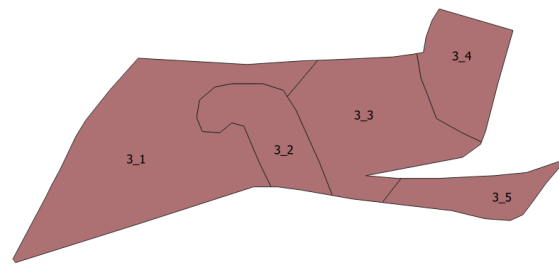


Abbildung 30: Schlaggrenzen und Teilflächen des Schlags 24-Morgen (Auszug aus QGIS)

Häufig stellt die Pflanzenschutzintensität einen weiteren Faktor der Ertragsfähigkeit dar. Die Aufzeichnungen der Ackerschlagkarteien, die dem Autor vorlagen und in Anhang 9 hinterlegt sind, lassen auf eine vergleichbare mittlere Pflanzenschutzintensität der Betriebe schließen. Aus diesem Grund wird nachfolgend nicht weiter auf diesen Punkt eingegangen. Die Aussaat und Grundbodenbearbeitung erfolgte ebenfalls in allen Versuchsjahren und Betrieben einheitlich (Grubber, Kreiseleggen-Sämaschinen-Kombination).

8.1.4 Klimatische Bedingungen

Da keine spezifischen Wetterdaten für die drei Betriebe vorliegen, werden die durchschnittlichen Niederschlagsmengen und Temperaturen der Wetterstation Schaaheim-Schlierbach (157 m über NN) als Referenz herangezogen. Diese befindet sich zwischen zwei und sechs Kilometer von Schlägen der Betriebe entfernt und wird vom Deutschen Wetterdienst (DWD) betrieben. Nähere Wetterstationen, deren Daten abgerufen werden könnten, sind dem Autor nicht bekannt. Eine Wetterstation des LLH in Groß-Umstadt, die von den Flächen von Betrieb 2 nur etwa ein bis zwei Kilometer entfernt und somit wesentlich näher liegt, lieferte im Versuchszeitraum keine vollständigen Daten, weshalb diese nicht berücksichtigt wurden. Neben den Durchschnittswerten (Tabelle 43) sind nachfolgend auch Grafen der Niederschlagsverteilung und Temperaturentwicklung für die Versuchsjahre 2019-2021 dargestellt (Abbildungen 31-33).

Tabelle 43: Niederschlagssumme und Durchschnittstemperatur der Jahre 2016-2021 für Gesamtjahr und Vegetationsperiode des Weizens (März-Juli) der Wetterstation Schaaflheim-Schlierbach (eigene Darstellung der Daten von Meteostat (2022))

	Gesamtjahr		Vegetationsperiode (März-Juli)	
	Niederschlag Σ	Temperatur $\bar{\theta}$	Niederschlag Σ	Temperatur $\bar{\theta}$
2016	643,6 l/m ²	10,77 °C	314,3 l/m ²	13,38 °C
2017	714,1 l/m ²	11,04 °C	325,7 l/m ²	14,49 °C
2018	447,4 l/m ²	12,00 °C	213,6 l/m ²	15,18 °C
2019	619,1 l/m ²	11,45 °C	278,9 l/m ²	14,28 °C
2020	586,0 l/m ²	11,74 °C	234,3 l/m ²	13,82 °C
2021	645,0 l/m ²	10,24 °C	313,4 l/m ²	12,72 °C
$\bar{\theta}$	609,2 l/m²	11,21 °C	280,0 l/m²	13,98 °C

Wie aus der Tabelle hervorgeht kann auf den Versuchsstandorten mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von ca. 610 l/m² und einer Durchschnittstemperatur von 11,2 °C gerechnet werden. In Betrieb 3 geht der Betriebsleiter aufgrund des Höhenunterschieds und seinen Erfahrungen abweichend von leicht höheren Niederschlägen, niedrigeren Temperaturen und einem späteren Vegetationsbeginn aus (Monath 2019). Diese Abweichungen können jedoch nicht quantifiziert werden, weshalb die Annahme gleicher klimatischer Bedingungen auf allen drei Standorten weiterhin gilt. Bei der Betrachtung der Niederschläge und Temperaturen während der Wachstumsperiode des Winterweizens fällt auf, dass im Jahr 2020 unterdurchschnittliche und im Jahr 2021 überdurchschnittliche Niederschläge gemessen wurden. Insbesondere im April scheinen im Vergleich zu den übrigen Frühjahrsmonaten geringere Niederschläge zu fallen, wie aus den nachfolgenden Grafiken hervorgeht. Christen (2009, S. 60ff) stellt eine günstige Temperaturentwicklung als Voraussetzung für gute Weizenerträge heraus. Hierbei verweist er insbesondere auf kühle Bedingungen während der Bestockungsphase (Makrostadium 2, BBCH), die am betrachteten Standort zum Monatswechsel März/April festzustellen sind. In den Versuchsjahren scheinen insgesamt günstige Bedingungen für den Weizenanbau geherrscht zu haben (siehe Abbildungen). Trockenstress während der Blüte und Kornfüllungsphase (Juni) kann in den Versuchsjahren anhand der Wetterdaten nicht festgestellt werden. Obwohl in allen drei Jahren insbesondere zu Frühjahrsbeginn eher niedrige Niederschläge zu verzeichnen waren, kann insgesamt von guten Wachstumsbedingungen für Weizen während des dreijährigen Versuchs ausgegangen werden (Christen 2009, S. 60–62).

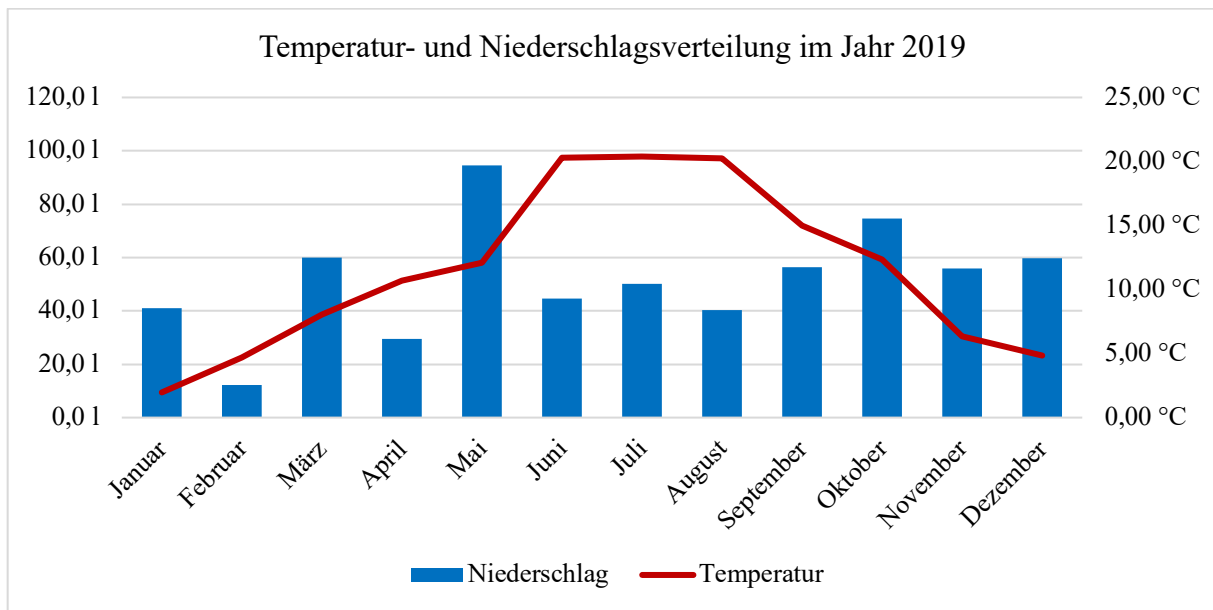


Abbildung 31: Monatliche Durchschnittstemperatur und Niederschlagssumme des Jahres 2019 gemessen an der Wetterstation Schaafheim-Schlierbach (eigene Darstellung der Daten von Meteostat (2022))

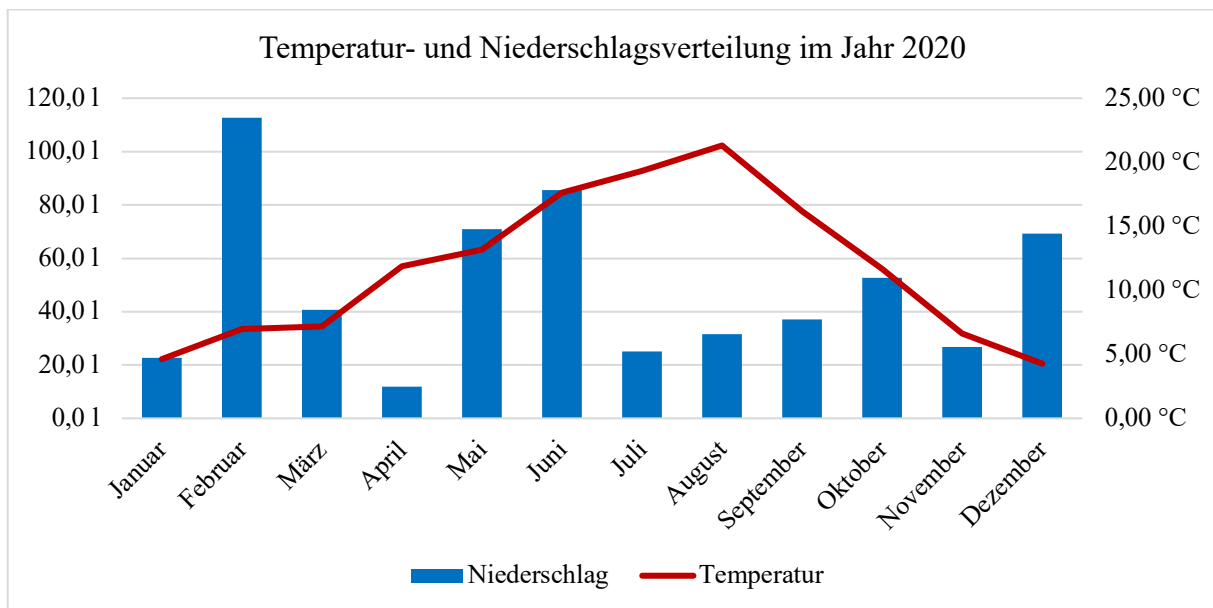


Abbildung 32: Monatliche Durchschnittstemperatur und Niederschlagssumme des Jahres 2020 gemessen an der Wetterstation Schaafheim-Schlierbach (eigene Darstellung der Daten von Meteostat (2022))

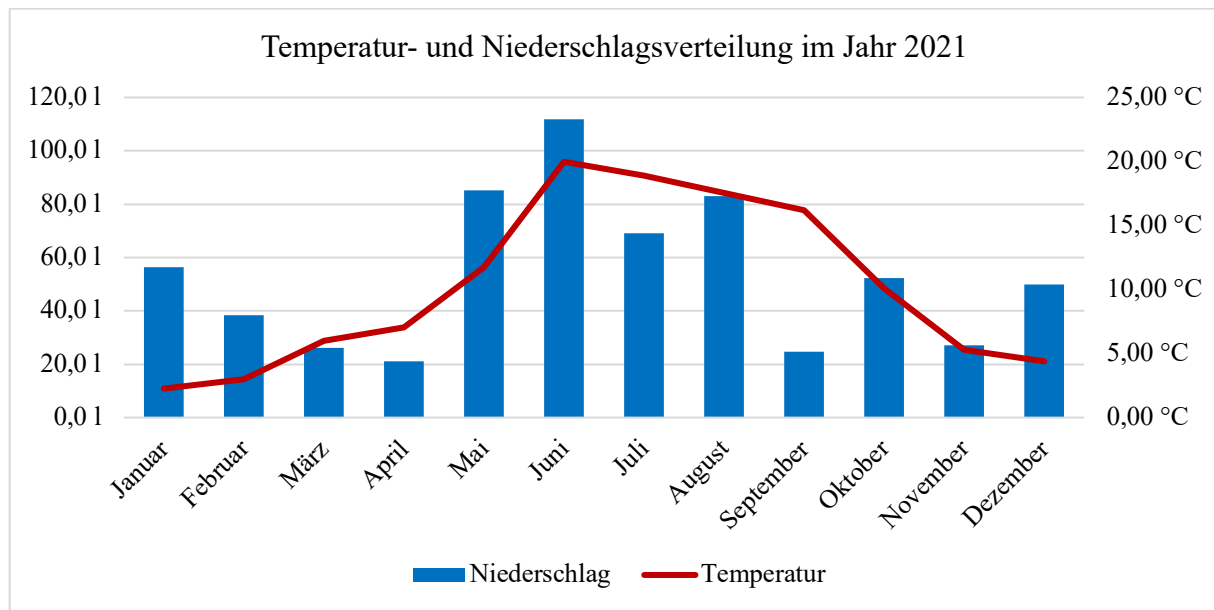


Abbildung 33: Monatliche Durchschnittstemperatur und Niederschlagssumme des Jahres 2021 gemessen an der Wetterstation Schaafheim-Schlierbach (eigene Darstellung der Daten von Meteostat (2022))

8.2 Methodik

Ziel des Versuchsaufbaus ist die Herstellung eines engen praktischen Bezugs zu pflanzenbaulichen Produktionssystemen. Dabei soll der Einsatz der eingangs des Kapitels aufgeführten Verfahren des PF unter realen Bedingungen verglichen werden, in denen die einzige Variation die Entscheidung über die räumliche Verteilung der N-Düngung ist. Mögliche Fruchtfolgeeffekte und Bearbeitungsfehler haben zwar einen wesentlichen Ertragseinfluss, werden in diesem Fall jedoch lediglich in der Diskussion der Ergebnisse berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde auf ein Versuchsdesign nach vorher festgelegten und statistisch abgesicherten Parzellen verzichtet. Da ein solches Versuchsdesign Bodenunterschiede ausschließen soll, musste ein Design verwendet werden, das diese explizit berücksichtigt und die Entscheidungen des Landwirts unter realen Bedingungen zulässt. Daher wurden die Versuchspartellen so angelegt, dass sie **a)** sich in den betriebstypischen Produktionsprozess integrieren lassen (entlang der Fahrspuren für Düngestreuer/ Pflanzenschutzspritze), **b)** mit betriebsüblicher Technik (Aussaat, Pflanzenschutz, Düngung, Ernte) vom Landwirt selbst bewirtschaftet werden können und **c)** die zuvor angelegten Teilflächen des vorliegenden Schlags einschließen. So sollten die Voraussetzungen für die Umsetzung von PF im Betrieb möglichst praxisnah simuliert werden. Gleiches gilt für die Kontrollparzelle (Verfahren H). Dort wurde trotz unterschiedlicher Standortbedingungen eine homogene N-Düngung gewählt, was auf allen drei Betrieben überwiegend dem betriebsüblichen Verfahren entspricht. Die Höhe und der Zeitpunkt der N-Düngung wurden jeweils vom Landwirt festgelegt und orientierten

sich neben gesetzlichen Anforderungen vor allem an den folgenden Gegebenheiten, die der Landwirt individuell berücksichtigt:

- organische Düngung des Betriebs (Nachlieferung der Böden)
- Sortentyp (Ertragsbildung) und Produktionsziel (Qualität)
- Spezifikation des eingesetzten Düngers
- arbeitswirtschaftliche Überlegungen

Daraus ergibt sich der Pflanzenbedarf, wobei vom gesamten N-Bedarf entlang der Vegetationsperiode und der Menge unterschieden werden muss, die zu einem bestimmten Zeitpunkt appliziert wird. Die hier gewählte N-Menge dient zudem als Durchschnittswert für die drei PF-Verfahren. Dies entspricht auch der Vorgehensweise bei marktüblichen Systemen, wie bspw. dem N-Sensor und satellitengestützten Applikationskarten (bspw. auch beim im Versuch eingesetzten System *Claas CropView* von *365farmnet*). Daraus ergibt sich, dass zwar die räumliche Verteilung der N-Menge verfahrensabhängig unterschiedlichen Entscheidungen unterliegt, die zeitliche Verteilung und die Gesamtmenge an Stickstoff durch den Landwirt festgelegt wird. Bei letzterer müssen zudem rechtliche Vorgaben eingehalten werden.

Wie aus der Expertenbefragung II in Kapitel 6 hervorgeht, eignen sich die Teilflächen, die der Landwirt mit seinem Wissen angelegt hat, um die Standortheterogenität hinreichend gut abzubilden. Daher werden diese auch für die begleitenden Untersuchungen des Versuchs (Nmin-Untersuchungen, Pflanzenproben etc.) herangezogen und sind auch in den Darstellungen der Schläge bereits berücksichtigt. Um eine kleinräumige Vergleichbarkeit des Standorts gewährleisten zu können, wurden die Parzellen in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander angelegt. Eine vergleichbare Versuchsanlage und -auswertung findet sich u.a. bei Dammer und Ehlert (2006, S. 141). In Abbildung 34 ist die Versuchsanlage exemplarisch dargestellt (hier schon unter Darstellung der im nachfolgenden Kapitel 8.2.1 definierten Verfahren). Um den Versuch in den üblichen betrieblichen Ablauf integrieren und dennoch alle Teilflächen abbilden zu können, wurden auf dem abgebildeten Schlag *Kleeplatz* zwei Versuchsblöcke mit den zu untersuchenden Verfahren angelegt. So wurde auch bei anderen Schlägen verfahren, die diese Besonderheit aufweisen. Die Datenerhebung erfolgt sowohl auf Teilflächen- als auch Parzellenebene, um sowohl den Einfluss der Teilflächen als auch der Verfahren auf das Ergebnis überprüfen zu können.



Abbildung 34: Versuchspartellen der Jahre 2019 und 2021 auf dem Schlag Kleeplatz (eigene Darstellung mit QGIS)

Da die erste N-Düngung (N1 zur Bestockung) auf zwei der drei Betriebe teilweise über Gülle erfolgt, wurde diese einheitlich auf dem gesamten Schlag appliziert. Eine Variation der N-Düngung hätte hier auch eine Variation der weiteren im Dünger enthaltenen Nährstoffe bewirkt. Schwefel, der häufig mit mineralischem N-Dünger ausgebracht wird, wurde in dieser Betrachtung vernachlässigt. Eine Auswirkung von angepasster Schwefel-Düngung kann jedoch insbesondere bei unterversorgten Beständen nicht ausgeschlossen werden. Nachfolgend werden zunächst die untersuchten Verfahren vorgestellt bevor auf die Methodik der Auswertung eingegangen wird. Zudem wird die Durchführung des Versuchs und der zeitliche Ablauf der relevanten Bewirtschaftungsmaßnahmen und der den Versuch begleitenden Untersuchungen beschrieben.

8.2.1 Untersuchte Verfahren

Verfahren H (Homogen):

Die durchschnittliche N-Düngermenge wurde, wie eingangs beschrieben, durch die Landwirte zum jeweiligen Zeitpunkt festgelegt. Diese galt in diesem Verfahren einheitlich für den gesamten Schlag und lehnt sich an die betriebsübliche Düngung an. Die homogene N-Düngung stellt daher auch die Kontrollgruppe dar, anhand der ceteris paribus der Einfluss des Bodens auf den Ertrag ermittelt werden kann (durch bspw. N-Nachlieferungen).

Verfahren L (Landwirt):

Die Düngermenge wurde durch die Landwirte während der Fahrt nach vorherigen Überlegungen angepasst. Dies erfolgte durch die Plus-Minus-Tasten an den Terminals der Ausbringgeräte. Die Landwirte zogen für ihre Entscheidungen über die räumliche Verteilung der Düngermenge die subjektiv wahrgenommene Bestandsheterogenität während der Fahrt heran. Das Wissen über die Standortheterogenität wird hierbei, bewusst oder unbewusst, berücksichtigt. Während der Fahrt wurden die Ausbringmengen vom Autor als Beifahrer dokumentiert. Ein automatisches Datentracking war mit der genutzten Technik der Betriebe nicht möglich.

Verfahren D (Drohne):

Eine Erweiterung des Verfahren L stellt die Berücksichtigung von Drohnen Daten dar. Dem Landwirt wurde hierbei ein Falschfarbenbild einer Drohnenaufnahme als Entscheidungshilfe zur Verfügung gestellt. Dieses entstammt dem Programm *DroneDeploy* und stellt den VARI-Index dar, der in Abbildung 35 gezeigt wird. Als Quelle dienten digitale Orthofotos, die durch den Autor einige Tage vor der jeweiligen Düngung aufgenommen wurden. Die Luftbilder setzen sich aus einem Orthomosaik zusammen und weisen eine Auflösung von bis zu 2cm/Pixel auf. Für die Aufnahmen wurde eine Drohne vom Typ *DJI Mavic 2 Zoom* verwendet, die auf mit *DroneDeploy* vorgeplanten Routen automatisch Bilder vom jeweiligen Schlag aufnahm. Äquivalent zu Verfahren L wurde die Variation der N-Düngung durch den Autor während der Fahrt dokumentiert und anschließend digitalisiert. Die Navigation und Orientierung auf dem Feld erfolgte durch die Darstellung und GPS-Positionierung eines handelsüblichen Tablets und der darauf installierten Anwendung *QField*.

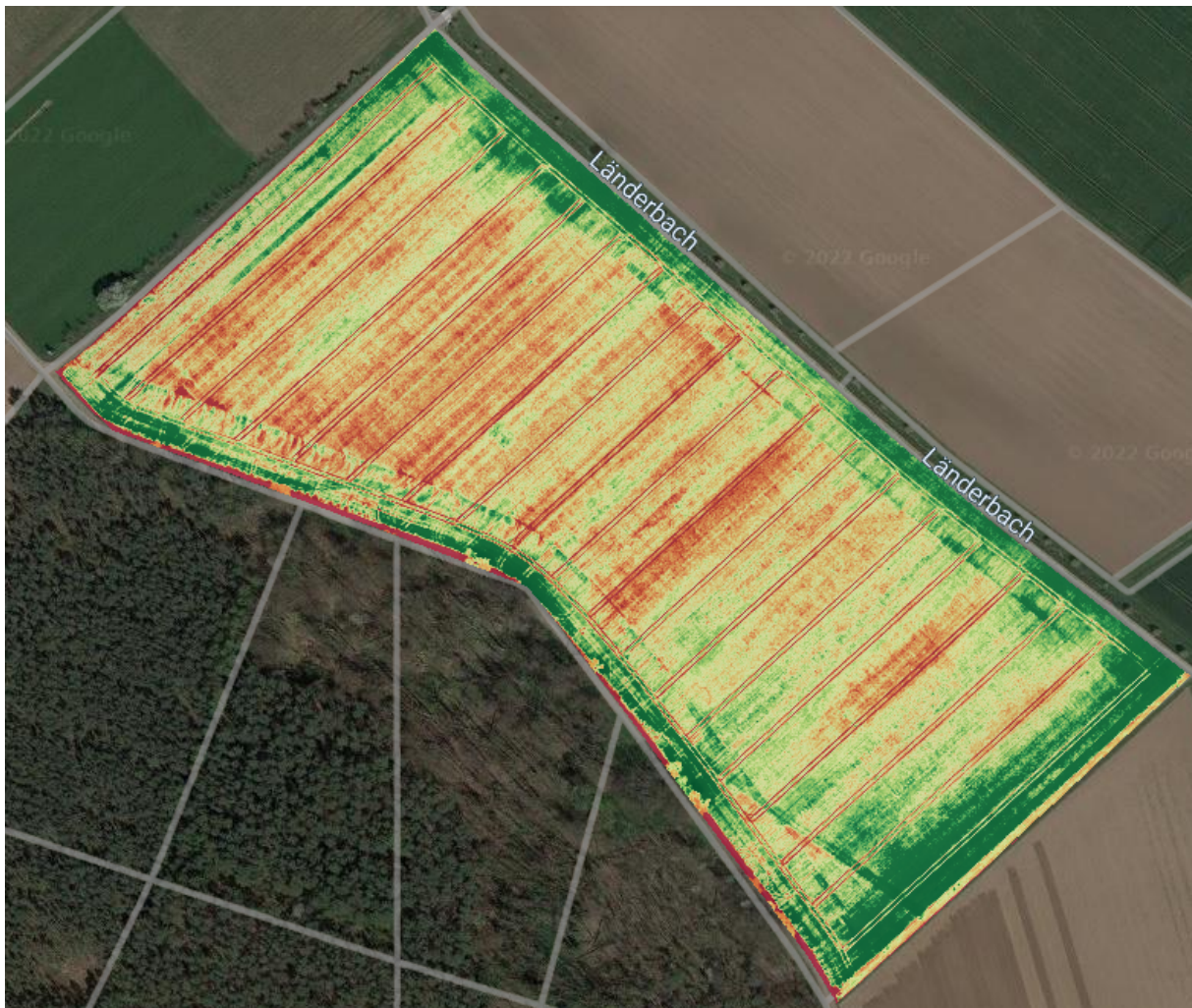


Abbildung 35: Falschfarbenbild (VARI-Index) des Schlags Kleeplatz vom 25.5.2021, erstellt aus einer Drohnenaufnahme mit dem Farbverlauf rot-gelb-grün und aufsteigender Biomasse (Auszug aus DroneDeploy)

Verfahren N (NDVI):

Für dieses Verfahren wurden Applikationskarten verwendet, die mit dem Programm *Claas CropView* auf der Plattform *365farmnet* erstellt wurden. Hierzu wurde die aktuelle Biomasse durch multispektrale Satellitenaufnahmen (Auflösung 10x10 Meter) erfasst. In der Anwendung ist ein Durchschnittswert der N-Düngung anzugeben, um den die N-Menge variiert wird. Dieser wurde durch den Landwirt festgelegt und entspricht der homogen gedüngten N-Menge (Verfahren H). Das Programm gibt auf dieser Grundlage eine Applikationskarte im geotiff-Format aus. Da die Terminals der Landwirte die Karte nicht auslesen konnten, wurde die N-Menge dennoch händisch entsprechend den Vorgaben der Applikationskarte angepasst. Hierzu wurde, wie auch schon in Verfahren L und D, ein Tablet zur Navigation und Orientierung verwendet, welches die Applikationskarte dem Landwirt anzeigte.

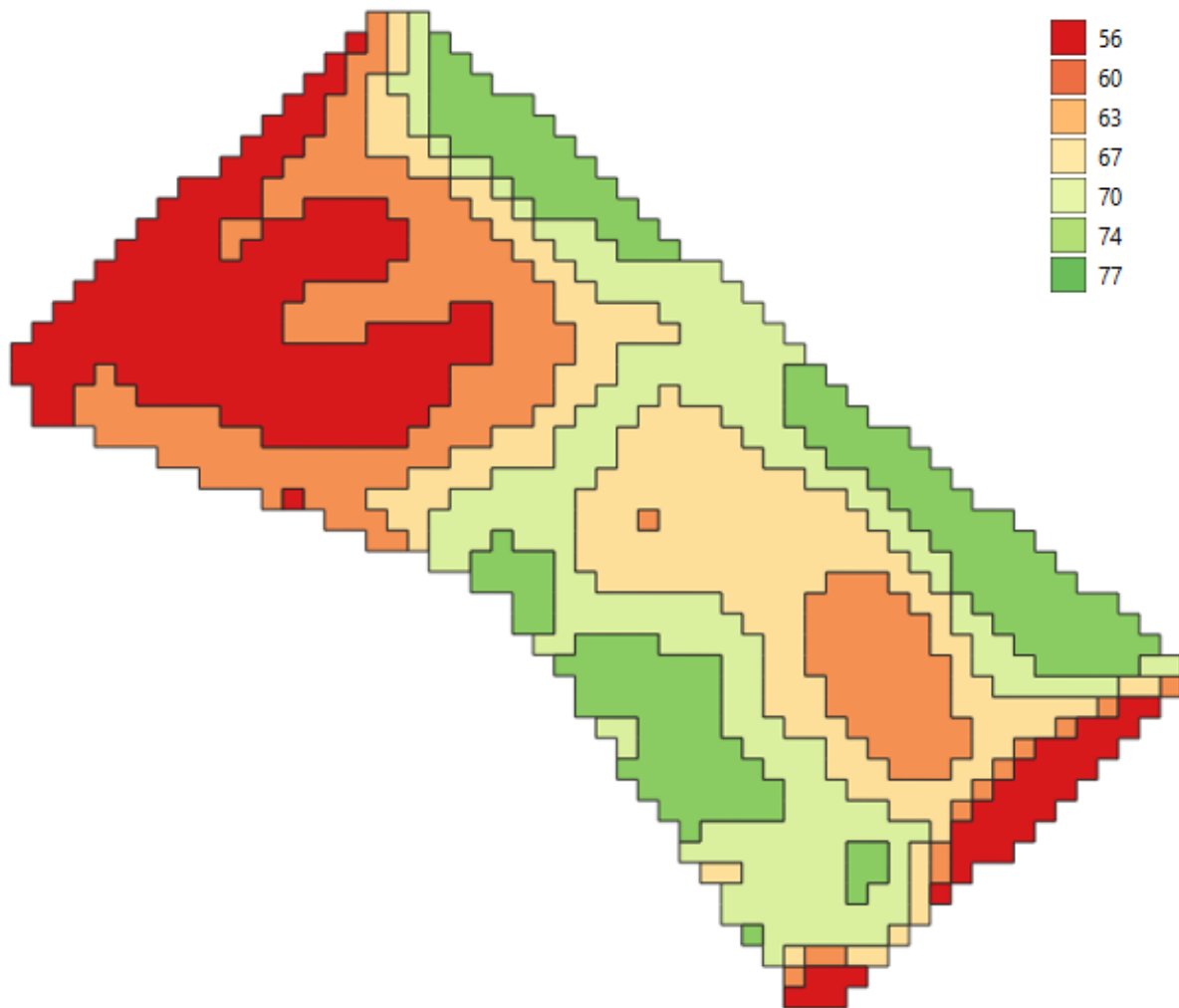


Abbildung 36: Applikationskarte aus CropView auf Grundlage einer Biomassekarte (NDVI, satellitengestützt) vom 25.5.2021 zur Durchführung von N3 auf dem Schlag Kleeplatz. Die Legende bezieht sich auf die Höhe der N-Düngung mit kg N/ha (Auszug aus CropView, dargestellt mit QGIS)

Die Wahl der Verfahren zielte u.a. auf die praktikable Implementierung von PF auf den Betrieben ab. Insbesondere die begrenzten finanziellen Möglichkeiten des Projekts erlaubten keine Investitionen in bspw. Sensortechnik oder spezielle Terminals. Stattdessen sollte der Implementierungsaufwand möglichst geringgehalten werden. Die eingesetzten Verfahren stellen unterschiedliche Intensitätsstufen der PF-Technologie dar. Während Verfahren H die einfachste Form der N-Düngung beschreibt und räumliche Variation außer Acht lässt, ist die Nutzung der Applikationskarte der Versuch einer technischen Optimierung unter den geschilderten Voraussetzungen des Projekts. Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von PF in Kapitel 7 nimmt ebenfalls Bezug auf die technischen Möglichkeiten unterschiedlicher PF-Verfahren. Dem Nutzen von Heuristiken im Vergleich zu (technisch) optimierten Verfahren, der im entscheidungstheoretischen Teil dieser Arbeit beschrieben wird, trägt die Auswahl der Verfahren ebenfalls Rechnung. Das Verfahren L kann in diesem Fall als heuristische

Entscheidungsfindung beschrieben werden, da es auf Erfahrung und sich wiederholenden Ereignissen basiert. Im Verfahren L ist der Einfluss des Landwirts auf die räumliche Verteilung der N-Düngung am höchsten, da dort keinerlei technische Unterstützung bei der Berücksichtigung von Bestandsheterogenität vorliegt. Dem gegenüber hat der Landwirt keinen Einfluss auf die räumliche Variation der N-Düngung bei der Nutzung einer Applikationskarte (Verfahren N) und bei der homogenen N-Düngung (Verfahren H). Eine mögliche Optimierung in Bezug auf die zeitliche Variation der N-Düngung wird in diesem Versuch nicht untersucht. Stattdessen unterliegt sie der betriebsüblichen Entscheidung, wobei bei allen drei Betrieben auf eine heuristische Entscheidungsfindung bezüglich der absoluten N-Menge und deren zeitlicher Variation zurückgegriffen wird. Es ist nicht auszuschließen, dass die zeitliche Verteilung einen wichtigen Einflussfaktor auf die N-Effizienz und Anpassung an Umweltbedingungen darstellt. Gesetzliche Anforderungen bezüglich der N-Menge schränken den Entscheidungsspielraum über die maximale N-Menge zudem ein.

8.2.2 Versuchsdurchführung und zeitlicher Ablauf

Der Versuch wurde über einen Zeitraum von drei Jahren (2019-2021) durchgeführt. Eine kontinuierliche Datenerfassung und -verarbeitung war in jeder Phase des Versuchs gewährleistet. Das Ablaufschema des Versuchs wird wie folgt beschrieben:

1. Auswahl der Schläge und Anlage der Teilflächen durch den Landwirt. Parzellen für N-Düngungs-Versuch werden in QGIS angelegt
2. Nmin-Untersuchungen und ggf. Untersuchung der Grundnährstoffe auf Teilflächenebene (teilweise fehlerhafte Probennahme, was zu nicht verwertbaren Daten führte)
3. N1 homogen gedüngt, Düngermenge und Zeitpunkt durch den Landwirt dokumentiert
4. Pflanzenuntersuchung im Labor auf Teilflächenebene (u.a. N, P, K), erster Drohnenflug, Erstellung der Applikationskarte und Durchführung von N2, Dokumentation durch den Autor
5. Messung des im Pflanzensaft enthaltenen Nitrats mittels *Nitracheck* auf Parzellenebene, zweiter Drohnenflug, Erstellung der Applikationskarte und Durchführung von N3 (außer auf Betrieb 2), Dokumentation durch den Autor
6. Ggf. dritter Drohnenflug zum Zeitpunkt der Abreife, um Teilflächen mit besserer Wasserführung (Pflanzen sind länger grün) erkennen zu können

7. Probedrusch mit Handdrescher *Minibatt* auf Parzellenebene, Untersuchung der Weizenproben mit NIRS-Messgerät der Uni Gießen (Standort Weilburger Grenze) auf den Proteingehalt (nur in den Jahren 2020 und 2021, im Jahr 2019 wurde der Proteingehalt schlageinheitlich ermittelt)
8. Mähdrusch mit marktüblichem Mähdrescher *Claas Lexion 770 TT* (im Jahr 2019) bzw. *Claas Lexion 570* (in den Jahren 2020 und 2021) mit integrierter Ertragskartierung, Auswertung der Rohdaten durch den Autor
9. Erfassung der Nmin-Gehalte auf Teilflächenebene direkt nach der Ernte ohne vorangegangene Stoppelbearbeitung (nur in den Jahren 2020 und 2021)

Die Zeitpunkte und die durchschnittliche Höhe der N-Düngung wurden durch die Landwirte individuell festgelegt. Dazu orientieren sich die Betriebsleiter an unterschiedlichen Quellen für Nmin-Werte. Während Betrieb 1 konsequent (teil-)flächenspezifische Nmin-Werte erhebt (Orientierung an den gemessenen Nmin-Werten), orientiert sich Betrieb 3 an den von der Officialberatung bereitgestellten Daten (2019: 40 kg N/ha, 2020; 50 kg N/ha; 2021: 40 kg N/ha). Betrieb 2 ermittelt repräsentative Daten für den Gesamtbetrieb, indem er einzelne Schläge beprobt und mit den gewonnenen Daten auf die Ausprägung der N-min-Werte auf dem Rest seiner Flächen schließt (2019: 80 kg N/ha; 2020: 60 kg N/ha; 2021: 60 kg N/ha).

8.2.3 Ökologische Kennzahlen

Um die Rohdaten der als Punktdaten vorliegenden Ertragskartierung mit denen der N-Düngung verrechnen zu können, wird auf die Methodik der Expertenbefragung II zurückgegriffen. Ziel ist es, die Punktdaten flächig darzustellen und so auch mögliche Ausreißer und Fehler ausgleichen zu können (Bildung von Mittelwerten). Diese werden für jede Versuchsparzelle auf jeder Teilfläche ermittelt. Die Daten der N-Düngung, der Erträge, der Kornqualitäten sowie die vorliegenden Nmin-Werte werden in den Datensatz überführt und weiterverarbeitet. Daraus lassen sich der N-Entzug, N- und Düngebilanzen für jede Parzelle berechnen. Die Ermittlung der ex-post-Ertrags- und Proteinfunktionen erfolgt hingegen umgekehrt durch die Zuordnung der Düngemengen, Nmin-Werte und Kornqualitäten zu den Erträgen, die als Punktdaten vorliegen. Hierfür wird eine Spatial-Join-Operation angewendet. Während die Nmin-Werte auf Ebene der Teilflächen ermittelt wurden, wurde die N-Düngung in Fahrtrichtung variiert und den Versuchspartzen als Arbeitsbreite zugeordnet. Gleiches gilt für die Kornqualität, die für jede Teilfläche in jeder Variante ermittelt wurde. Der Spatial-Join erfolgt, indem die Werte den punktuellen Ertragsdaten zugeordnet werden, die diese räumlich überlagern. Aus dieser

Vorgehensweise ergibt sich eine größere Datenbasis für jede Teilfläche. Zudem stellen die ex-post-Funktionen an sich eine Glättung der Daten dar, weshalb die Bildung von Ertragsmittelwerten über Polygone nicht erforderlich ist. Die Bewertung der untersuchten Verfahren bezüglich der Nähe zur ex-post-optimalen speziellen Intensität erfolgt wiederum auf Parzellenebene (Vgl. Abbildung 34: Versuchsparzellen der Jahre 2019 und 2021 auf dem Schlag Kleeplatz (eigene Darstellung mit QGIS).

Im theoretischen Teil hergeleitet wurde die bodenabhängige N-Dynamik und N-Verfügbarkeit und deren Auswirkungen auf die Ertragsfähigkeit hergeleitet (siehe hierzu Kapitel 2.2) und die Rolle von PF bei der Berücksichtigung dieser Faktoren beschrieben. Zur Überprüfung dieses Sachverhalts werden der teilflächenspezifische und verfahrensabhängige N-Entzug und die N- und Düngebilanzen errechnet. Trifft die Theorie über den ökologischen Nutzen von PF zu, sind bei einer teilflächenspezifischen N-Düngung im Vergleich zu homogener N-Düngung niedrigere N-Bilanzen festzustellen.

Formel 5: Berechnung des N-Gehalts im geernteten Weizenkorn mit kg N/dt abhängig vom Eiweißgehalt des Ernteguts und dem N-Gehalt im Rohprotein (eigene Darstellung nach Beisecker et al. (2015, S 20))

$$\text{N-Gehalt Korn} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{dt}} \right] = \text{Eiweißgehalt} \left[\frac{\text{kg}}{\text{dt}} \right] \times \text{N-Gehalt Eiweiß} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{kg}} \right]$$

Formel 6: Berechnung des N-Entzugs mit kg N/ha für Winterweizen abhängig vom N-Gehalt des Haupternteprodukts, ergänzt durch den N-Entzug des Nebenernteprodukts (eigene Darstellung nach Beisecker et al. (2015, S. 20))

$$\begin{aligned} \text{N-Entzug} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] &= \text{N-Gehalt Korn} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{dt}} \right] \times \text{Kornertrag} \left[\frac{\text{dt}}{\text{ha}} \right] \\ &+ \left(\text{Strohertrag} \left[\frac{\text{dt}}{\text{ha}} \right] \times \text{N-Gehalt-Stroh} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{dt}} \right] \right) \end{aligned}$$

Für den N-Gehalt pro Kilogramm Rohprotein ergibt sich ein Wert von 0,151 kg, der sich aus dem N-Gehalt des Weizenkorns von 1,81 kg N/dt bei 12 % Eiweiß ergibt, die in den Basisdaten zur Umsetzung Düngeverordnung angegeben sind (LfL Bayern 2013). Multipliziert mit dem Proteingehalt ergibt sich der N-Gehalt des Weizenkorns (siehe Formel 5) und damit der N-Entzug einer dt. Der N-Entzug kg N/ha des Haupternteprodukts (HEP), dem Weizenkorn, errechnet sich durch Multiplikation mit dem Kornertrag (siehe Formel 6). Für das Nebenernteprodukt (NEP), dem Stroh, wird ein Wert von 0,5 kg N/dt angenommen. Der Strohertrag wird ebenfalls geschätzt und ergibt sich bei einem Korn-Stroh-Verhältnis von 0,8 aus dem gemessenen Kornertrag. Auch diese Daten wurden den Basisdaten zur Umsetzung der Düngeverordnung entnommen. Der N-Entzug des NEP wird nur bei der Berechnung der aNMR

berücksichtigt, da hier das Nachlieferungsvermögen des Bodens geschätzt wird. Der räumlich dargestellte N-Entzug wird für das HEP und NEP getrennt ermittelt, für die Berechnung der N- bzw. Düngebilanz wird nur der N-Entzug des HEP herangezogen.

Formel 7: Berechnung der N-Bilanz unter Berücksichtigung der gesamten gedüngten N-Menge, des gemessenen N_{min} -Werts sowie des N-Entzugs (eigene Darstellung nach (Beisecker et al. 2015))

$$\text{N-Bilanz} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] = \text{N-Düngung} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] + N_{min} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] - \text{N-Entzug-HEP} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right]$$

Die Düngebilanz ergibt sich äquivalent zu Formel 7, nur ohne Berücksichtigung des N_{min} -Wertes. Damit wird die Input-Output-Beziehung der N-Düngung mit dem Ertrag untersucht und der verfügbare Rest-Stickstoff aus dem Vorjahr ignoriert. Dies kann bspw. bei einheitlichen N_{min} -Werten die Ertragswirkung der Düngung aufzeigen. Um festzustellen, ob die Verwendung von PF-Anwendungen einen positiven Effekt auf die N- und Düngebilanzen, den N-Entzug und auf Erträge und Kornqualitäten haben, wurde mit *SPSS* eine mehrfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Dabei wurden die Versuchsergebnisse nicht nur hinsichtlich der jeweiligen Varianten, sondern auch hinsichtlich der Teilflächen untersucht. Bestätigen sich die Theorien zu PF, so müsste die an Standortgegebenheiten bzw. Ertragspotenzial angepasste N-Düngung höhere Erträge und Kornqualitäten sowie damit verbunden einen höheren N-Entzug bewirken. Gleichzeitig hätte dies niedrigere N- und Düngebilanzen zur Folge, was einen positiven Effekt hinsichtlich des Grundwasserschutzes darstellen würde. Besteht kein Zusammenhang, würden sich die Ergebnisse von Borchardt et al. (2018) bestätigen, wonach von teilflächenspezifischer N-Düngung keine positiven ökonomischen und ökologischen Effekte ausgehen. Begleitend wurde zudem die aNMR berechnet (siehe Formel 8), um das Nachlieferungsvermögen der Teilflächen zu untersuchen.

Formel 8: Berechnung der aNMR (eigene Darstellung nach Beisecker et al. (2015))

$$\text{aNMR} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] = \left(\text{N-Entzug} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] + N_{min_{NE}} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] \right) - \left(\text{N-Düngung} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] + N_{min} \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] \right)$$

Die aNMR unterscheidet sich nach Beisecker et al. (2015) u.a. hinsichtlich des vorliegenden Bodens. Ein Einfluss der Bewirtschaftung kann zwar gegeben sein, dennoch wird damit vor allem das Nachlieferungsvermögen mit Stickstoff skizziert. Neben dem üblicherweise zu Vegetationsbeginn ermittelten N_{min} -Gehalts berücksichtigt die Formel auch den N_{min} -Gehalt unmittelbar nach der Ernte, hier als $N_{min_{NE}}$ bezeichnet.

8.2.4 Produktionsfunktionen und ökonomische Kennzahlen

Die vorgestellten ökologischen Kennzahlen dienen u.a. der Bewertung der durchgeführten N-Düngung. Dessen durchschnittliche Höhe und Zeitpunkt werden vom Landwirt gewählt. Produktionsfunktionen beschreiben die Input-Output-Beziehung zwischen einem Faktor und einem Endprodukt. So kann auch der Einfluss der N-Versorgung auf den Ertrag von Weizen dargestellt und durch Ableitung der Funktion die optimale spezielle Intensität der N-Düngung bei gegebenen Preisen für Weizen und Stickstoffdünger berechnet werden. Meist wird die N-Ertragsfunktion von Weizen als quadratische Funktion beschrieben. Hierbei wird vom Prinzip des abnehmenden Ertragszuwachs ausgegangen, die Steigung der Funktion wird ab einem bestimmten Punkt negativ. In diesem Punkt liegt die ertragsoptimale N-Düngung. Die Ertragsfunktionen der Teilflächen auf dem Gesamtschlag werden nachträglich als Mittelwert der erfassten Ertragsdaten mit der eingesetzten N-Düngung inklusive des N_{min} -Wertes ermittelt. Aus diesem Grund werden diese auch ex-post-Ertragsfunktionen genannt. Der Landwirt kann diese spezifischen Funktionen ex-ante nicht kennen, da sie sich erst aus den vorherrschenden Umweltbedingungen und den vom Landwirt getroffenen Bewirtschaftungsentscheidungen ergeben. Die fehlende Information führt zu einer Differenz zwischen der ex-ante-Ertragsfunktion, die vom Landwirt angenommen wird, und der ex-post-Ertragsfunktion. Dieses Phänomen wird in der Einleitung und im theoretischen Teil dieser Arbeit als Inferenzproblem des Pflanzenbaus beschrieben. PF zielt darauf ab, Informationslücken über die räumlich variablen Umweltbedingungen zu schließen. Die Anpassung an die zeitlich variablen Umweltbedingungen, die sich aus der Entscheidung über die durchschnittliche Düngermenge und den Düngezeitpunkt ergibt, obliegt weiterhin dem Landwirt. Unterschieden wird zudem zwischen dem Ertragsoptimum und der optimalen speziellen Intensität, dem ökonomischen Optimum. Dieses Vorgehen entspricht dem von Heyn (2010) und darauf aufbauend dem von Beisecker et al. (2015). Die Autoren nehmen an, dass die Landwirte aus Unwissenheit über die Ertragssituation strukturell höhere N-Mengen düngen und sich bei ihrer Entscheidung eher am Ertragsmaximum als am ökonomischen Maximum orientieren, was zu einer ineffizient höheren Düngung führt. Diese Annahme wird durch die Auswertung des Feldversuchs überprüft. Eine Unterscheidung der Betrachtungsperspektiven bezüglich einer ex-ante- und einer ex-post-Optimalen N-Düngung und einer Bewertung der Entscheidung unter diesen Gesichtspunkten findet nicht statt. Das von Kuhlmann und Neumann (2011) entwickelte theoretische Modell beschreibt die höhere N-Düngung als eine Art Versicherung die der Landwirt abschließt um auch unter günstigsten Ertragsbedingungen den maximalen Ertrag zu realisieren und nicht etwa durch eine zu niedrige N-Düngung zu verfehlen.

Demnach führt die Risikoaversion des Landwirts tendenziell zu einer höheren N-Düngung (Monjardino et al. 2015). Um die N_{min}-Werte in der Entscheidung über die N-Düngung zu berücksichtigen, wurden die Ertrags- und Proteinfunktionen um die N_{min}-Werte erweitert. Graphisch stellt dies eine Linksverschiebung in Höhe des vorliegenden N_{min}-Werts dar. Damit wird versucht, den Einfluss unterschiedlicher Vorfrüchte, Bodenbearbeitung und Düngermengen des Vorjahrs auf den pflanzenverfügbaren (mineralisierten) Stickstoff in der Funktion zu berücksichtigen. Ergänzend wurde der Einfluss des Eiweißgehalts auf den Weizenpreis berücksichtigt. Wie Christen (2009, 133f) feststellt, ist dieser neben dem N-Einsatz auch vom Kornertrag abhängig. Hohe Ertragspotenziale können demnach zu einem Verdünnungseffekt und damit verbundenen geringeren Proteingehalten im Korn führen. Somit bestehen neben standortspezifischen Ertragsfunktionen auch Proteinfunktionen, die den Einfluss der N-Düngung auf den Proteingehalt (in %) erklären. Nach u.a. Karatay und Meyer-Aurich (2020) besteht, anders als bei der Ertragsfunktion, ein linearer Zusammenhang zwischen N-Einsatz und Proteingehalt. Um den Verdünnungseffekt bei höheren Erträgen nach Christen zu berücksichtigen, wird als unabhängige Variable der Proteinfunktion nicht der N-Einsatz, sondern die N-Ertragseffizienz in kg N/dt des Kornertrags gewählt. Somit hängt der Proteingehalt neben der N-Versorgung auch vom jeweiligen Kornertrag ab. Christen (2009, S. 134) stellt zudem fest, dass der Verdünnungseffekt bei höheren Erträgen nicht vollständig durch eine höhere N-Düngung kompensiert werden kann. Mathematisch käme somit auch eine logarithmische Form der Proteinfunktion, angelehnt an eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion, in Betracht. Diese wird als Alternative zur linearen Proteinfunktion nach Karatay und Meyer-Aurich (2020) ebenfalls angegeben. Streng genommen ist durch den nicht linear, sondern hat einen linear-progressiven Verlauf. Dies ist auf den Ertrag Y(N) im Nenner zurückzuführen, der nicht konstant, sondern nichtlinear von N abhängig ist. Im relevanten Wertebereich ist dieser Umstand jedoch zu vernachlässigen, weshalb nachfolgend weiterhin von einer linearen Proteinfunktion ausgegangen wird. Zusammenfassend ergeben sich folgende Funktionen in Abhängigkeit der N-Menge für Ertrag Y(N) und Proteingehalt P(N).

Formel 9: Mathematische Vorlage einer quadratischen Ertragsfunktion in Abhängigkeit des Stickstoffeinsatzes N in kg N/ha mit Y = Ertrag in dt/ha (eigene Herleitung)

$$Y(N) = a + b \times N + c \times N^2$$

Formel 10: Mathematische Vorlage einer linearen (linear-progressiven) Proteinfunktion in Abhängigkeit des Stickstoffeinsatzes N und der Ertragsfunktion Y(N) aus Formel 9 mit P = Proteingehalt in Prozentpunkten % (eigene Herleitung)

$$P(N) = \alpha + \beta \times \frac{N}{Y(N)}$$

Formel 11: Mathematische Vorlage einer logarithmischen Proteinfunktion in Abhängigkeit des Stickstoffeinsatzes N in kg N/ha und der Ertragsfunktion $Y(N)$ aus Formel 9 mit P = Proteingehalt in Prozentpunkten % und unter Verwendung des Logarithmus naturalis \ln (eigene Herleitung)

$$P(N) = \hat{\alpha} \times \left(\frac{N}{Y(N)} \right)^{\hat{\beta}} \rightarrow \ln(P(N)) = \ln(\hat{\alpha}) + \hat{\beta} \times \ln\left(\frac{N}{Y(N)}\right)$$

mit a , b , c als Parameter der quadratischen Ertragsfunktion (Formel 9), α und β als Parameter der linearen Proteinfunktion (Formel 10), sowie N als Stickstoffeinsatz in kg N/ha. Im Fall einer logarithmischen Proteinfunktion wird die Produktionselastizität der N-Ertragseffizienz mit $\hat{\beta}$ beschrieben, $\hat{\alpha}$ stellt den Effizienzparameter dar (Formel 11). Geschätzt werden Produktionsfunktionen mathematisch üblicherweise mit der Methode der kleinsten Quadrate (OLS = ordinary least squares) und einer je nach Funktionsform linearen (bspw. bei der Herleitung der linearen Proteinfunktion) oder nichtlinearen (bspw. bei der Herleitung der Ertragsfunktion) Regression. Für einen vorhandenen Datensatz, bspw. eines Feldversuchs mit variiertem N-Düngung und gemessenen Erträgen, wird eine (angenommene quadratische) Funktion solange verändert, bis die Summe aller quadrierten Abweichungen zur beobachteten Ausprägung minimal wird und das mathematische Modell den realen Zusammenhang möglichst gut beschreibt (Kosfeld und Dreger 2022, S. 26ff).

Eine Erweiterung des Modells unter Berücksichtigung von Faktor- und Produktpreisen überführt den Zusammenhang zwischen N-Düngung und Ertrag bzw. Proteingehalt in eine ökonomische Funktion. Die Ertragsfunktion $Y(N)$ wird dazu in die Formel der N-kostenfreien Leistung (Nkfl in €/ha) überführt. Diese stellt eine vereinfachte Deckungsbeitragsrechnung unter Ausschluss anderer variablen Kosten außer der N-Düngung dar.

Formel 12: Berechnung der N-kostenfreien-Leistung (Nkfl) in €/ha unter Berücksichtigung der Ertragsfunktion, der applizierten N-Düngung, den Preisen für Weizen (in €/dt) und Stickstoff (in €/kg) sowie den vom Proteingehalt abhängigen Preiszuschlägen für höhere Qualitätsstufen (eigene Herleitung)

$$\text{Nkfl} \left[\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right] = Y(N) \left[\frac{\text{dt}}{\text{ha}} \right] \times \left(p_w \left[\frac{\text{€}}{\text{dt}} \right] + \text{Zuschläge} \left[\frac{\text{€}}{\text{dt}} \right] \right) - \text{N-Düngung} \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right] \times q_N \left[\frac{\text{€}}{\text{kg N}} \right]$$

Die Proteinfunktion $P(N)$ wird indirekt über den Einfluss der Qualität auf den Auszahlungspreis ebenfalls in der Nkfl berücksichtigt. Für den Produktpreis soll $p_w = 16,00$ €/dt bei einem Proteingehalt von < 10 % gelten, der Faktorpreis wird mit $q_N = 1,00$ €/kg beziffert. Bei höheren Kornqualitäten werden Zuschläge in Abhängigkeit des Proteingehalts gewährt. Weitere Qualitätsparameter bleiben unberücksichtigt. Die Zuschläge werden in der Praxis stufenweise bei Erreichen von Qualitätsgrenzen gezahlt. So gilt ab einem Eiweißgehalt von 12 % ein Auszahlungspreis von 18,00 €/dt. Weitere Zuschläge erfolgen bei 13 % (A-Weizen) und 14 %

(E-Weizen), angenommen werden hier jeweils 0,50 €/dt. Für die Kosten der N-Düngung wird ein einheitlicher Preis für Stickstoff angenommen, mögliche Differenzen der Marktpreise verschiedener N-Dünger werden nicht berücksichtigt. Die Preise für Weizen und Stickstoff orientieren sich an der Preisfindung aus Kapitel 7. Im Modell erfolgt die qualitätsabhängige Preissteigerung, anders als in der Praxis, linear und nicht stufenweise. Hintergrund ist die bessere Differenzierung der Verfahren mit dem Ziel der Qualitätsoptimierung. Somit ergibt sich im Intervall zwischen 10 % und 12 % Proteingehalt ein Zuschlag von 1,00 €/dt pro Prozentpunkt (0,10 €/dt für 0,1 %). Damit wird die Annäherung an die nächsthöhere Qualitätsstufe dargestellt. Im Intervall zwischen 12 % und 14 % werden jeweils Zuschläge von 0,50 €/dt gezahlt, ebenfalls über einen linearen Verlauf dargestellt. Ab einem Proteingehalt von 14 % gilt der Maximalpreis von 19,00 €/dt, eine weitere Preissteigerung durch höhere Eiweißgehalte ist ab diesem Punkt nicht mehr möglich. Für den Verfahrensvergleich werden die Nkfl der Verfahren mit der optimalen speziellen Intensität unter den genannten Bedingungen ermittelt. Diese stellt die ökonomisch-optimale N-Düngung auf der jeweils betrachteten Teilfläche dar. Die Optimierung erfolgt durch die erste Ableitung der Funktionen nach N. Hierzu wird mit dem *Excel-Solver*⁴⁰ eine Maximierung der Nkfl unter Veränderung des N-Einsatzes vorgenommen. Die Optimierung der Proteinfunktion erfolgt dabei nicht separat. Sie ist in der Nkfl enthalten, der Proteingehalt und zugehörige Auszahlungspreis ergeben sich aus der Optimierung der N-Düngung. Zusätzlich werden auch die Maxima der Ertragsfunktionen ermittelt. Mit der Berechnung der Differenzen der Nkfl, der N-Düngung, des Ertrags und Proteingehalts sowie der N-Effizienz zwischen den beiden Optima sollen zudem die Erkenntnisse von Heyn (2010), Beisecker et al. (2015) und Kuhlmann und Neumann (2011) überprüft werden.

8.2.5 Ex-ante-Produktionsfunktionen und Nutzen

Die optimale spezielle Intensität (und die Ertragsmaximierung) stellt eine ex-post-Betrachtung dar. Die Ertrags- und Proteinfunktionen und somit der optimale Faktoreinsatz sind dem Landwirt weder für die Teilflächen noch für die Schläge vorab im Detail bekannt. PF soll zwar die Unsicherheit über die effiziente räumliche Verteilung der N-Düngung reduzieren und zu einem optimalen Faktoreinsatz beitragen. Der Zeitpunkt und die durchschnittliche Höhe der N-Düngung werden hingegen vom Landwirt bestimmt. Hier ist die optimale spezielle Intensität der N-Düngung nur in Bezug auf zukünftige Entscheidungen relevant und kann in die

⁴⁰ Der Solver des Programms *@RISK* hat sich für diese Optimierung als ungeeignet erwiesen, da er einen genetischen Algorithmus für die Optimierung nutzt. Dieser ist bei nicht-stochastischen Modellen weniger effizient.

langjährigen Erfahrungen des Landwirts eingeordnet werden. Ex-ante liegen der Entscheidung des Landwirts Erwartungswerte zugrunde. Es kann davon ausgegangen werden, dass zu deren Bestimmung langjährige Erfahrungen eine häufig genutzte Heuristik bei der Entscheidung für einen optimalen N-Einsatz darstellen. Es soll nun die Annahme gelten, dass sich die Erwartungswerte als Mittel der drei Versuchsjahre 2019-2021 ergeben. Technisch ist hierfür eine geeignete Funktion notwendig, um den langfristigen mittleren Zusammenhang zwischen N-Düngung und Ertrag bzw. Proteingehalt abzubilden. Die Herleitung dieser Funktionen erfolgt im nächsten Kapitel. Zudem kann die aktuelle Marktsituation als relevant für angenommene Preise und Kosten angesehen werden. Werden lediglich die Erwartungswerte bei der Entscheidung berücksichtigt, kann von einer statisch-naiven Entscheidungssituation gesprochen werden. Mögliche Veränderungen aufgrund von veränderten Witterungsverhältnissen und damit Ertragsbedingungen (Produktionsrisiko) bleiben dabei unberücksichtigt. Ebenso verhält es sich bei veränderlichen Marktbedingungen (Marktrisiko). Reale Entscheidungsträger verhalten sich jedoch in den seltensten Fällen derart naiv. Somit liegt es nahe, neben der naiven Betrachtungsweise sowohl Produktions- als auch Marktrisiko entsprechend abzubilden und in der Entscheidungssituation zu berücksichtigen. Hierfür wird zunächst das lineare Preisfindungssystem, das in der ex-post-Betrachtung angenommen wurde, durch das in der Praxis vorliegende Stufenmodell ersetzt und daher erneut beschrieben. Höhere Auszahlungspreise bei Erreichen einer Qualitätsstufe stellen einen potenziellen Anreiz für den Landwirt für eine höhere N-Düngung dar und sind entscheidend für die Maximierung des ökonomischen Outputs. Es gilt daher für Futterweizen (Protein < 12 %) ein erwarteter Preis von 16,00 €/dt. Die Preise für höhere Qualitäten werden durch die Zuschläge bestimmt. So ergibt sich durch den erwarteten Zuschlag von 2,00 €/dt ein Preis von 18,00 €/dt für B-Weizen (Proteingehalt zwischen 12 % und 13 %). Der erwartete Zuschlag von 0,50 €/dt für höhere Qualitätsstufen führt zu einem A-Weizenpreis von 18,50 €/dt (Proteingehalt zwischen 13 % und 14 %) und 19,00 €/dt für E-Weizen (Proteingehalt ab 14 %). Für die Stickstoffkosten gilt weiterhin ein Erwartungswert von 1,00 €/kg. Bei einer statisch-naiven Betrachtungsweise wird eine Abweichung von diesen Erwartungswerten nicht berücksichtigt. Für die Verteilung unter Risiko wird für die Preise und Kosten jeweils eine Normalverteilung unterstellt. Die Erwartungswerte und Standardabweichungen beruhen, weiterhin auf den Daten des BMEL in den Jahren 2019-2021, sowie den Einschätzungen der Landwirte für ihren Betrieb. Das Produktionsrisiko wurde über eine additive Konstante ε für die mittleren Ertrags- und Proteinfunktionen der Standorte modelliert. In der mathematischen Grundform wurden jeweils Formel 9 (Ertragsfunktion) und Formel 10 (Proteinfunktion) ergänzt. Dadurch ergeben sich

Formel 13 (ex-ante-Ertragsfunktion) und Formel 14 (ex-ante-Proteinfunktion) als Vorlagen für die Herleitung des erwarteten Zusammenhangs zwischen N-Düngung und Ertrag bzw. Proteingehalt. Ebenfalls normalverteilt wurde ein Erwartungswert $\mu = 0$ (keine Abweichung vom mittleren Ertrag bzw. Proteingehalt) festgelegt. Die Standardabweichung σ der Erträge entspricht der Standardabweichung der ökonomisch optimalen Erträge bzw. Proteingehalte der drei Versuchsjahre auf dem jeweiligen Standort. Es ergeben sich folgende Formeln für die Ertrags- und Proteinfunktionen:

Formel 13: Mathematische Vorlage einer (ex-ante-)Ertragsfunktion $Y(N)$ in Abhängigkeit von N unter Berücksichtigung einer normalverteilten additiven Zufallskonstante (eigene Herleitung)

$$Y(N) = (a + b \times N + c \times N^2) + \varepsilon_Y \text{ mit } \varepsilon_Y \sim NV(\mu = 0; \sigma)$$

Formel 14: Mathematische Vorlage einer (ex-ante-)Proteinfunktion $P(N)$ in Abhängigkeit von N und der Ertragsfunktion aus Formel 13 unter Berücksichtigung einer normalverteilten additiven Zufallskonstante (eigene Herleitung)

$$P(N) = \left(\alpha + \beta \times \frac{N}{Y(N)} \right) + \varepsilon_P \text{ mit } \varepsilon_P \sim NV(\mu = 0; \sigma)$$

Zusätzlich zu den Ertrags- und Proteinfunktionen soll auch der Nmin-Gehalt zu Vegetationsbeginn einer Normalverteilung unterliegen. Der zugehörige Erwartungswert und die Standortabweichung ergibt sich aus dem Mittelwert bzw. der Standortabweichung der Nmin-Werte auf dem Standort in den drei Versuchsjahren.

Neben den Verteilungen der Zufallsvariablen wird überprüft, ob zwischen den Variablen Korrelationen bestehen. Schneider und Wagner (2008, S. 416) gehen bspw. von einem Korrelationskoeffizienten von 0,6 zwischen dem Preis für Stickstoff und Weizen aus. Diese Annahme wird übernommen. Für den Futterweizen und die höheren Qualitätsstufen soll die Annahme einer linearen Preisentwicklung (Korrelationskoeffizient 1) gelten. Die negative Korrelation zwischen Ertrag und Proteingehalt wurde bereits mehrfach beschrieben (siehe u.a. Christen (2009, S. 133)). Eine Korrelationsanalyse der Erträge und Proteingehalte aus den Versuchsdaten (vorgreifend) mit *SPSS* ergibt einen Korrelationskoeffizienten von -0,142. Da der Nmin-Gehalt hauptsächlich von der Bewirtschaftung des Vorjahres und vom Boden bestimmt wird, soll in diesem Fall keine Korrelation mit anderen Zufallsvariablen angenommen werden. Gleiches gilt für einen Einfluss der Ertragsmenge auf den Weizenpreis. Hier gilt die Annahme einer weltmarktabhängigen Preisfindung, auf die regionale Ertragsbedingungen nur geringen Einfluss haben und daher vernachlässigt werden. Mit dem Programm *@RISK*, das als Add-in *MS Excel* als Plattform nutzt, wird eine Risikooptimierung mit Hilfe einer Monte-Carlo-

Simulation⁴¹ durchgeführt. Hierzu bedient sich das Programm einem genetischen Algorithmus. Ähnlich wie zuvor ex-post-Optima errechnet wurden, können mit dem @RISK-Solver ex-ante-Optima für verschiedene Risikopräferenzen bestimmt werden. Während ein risikoneutraler Entscheider den Erwartungswert der Nkfl als Zielfunktion annimmt, orientieren sich risikoaverse Entscheider am Erwartungsnutzen als Zielfunktion. Die Beschreibung der Risikonutzenfunktion $U(Nkfl)$ Formel 15 orientiert sich an Monjardino et al. (2015). Die Autoren gehen bei landwirtschaftlichen Entscheidungsträgern von einer konstanten absoluten Risikoaversion (CARA = constant absolute risk aversion) mit dem Koeffizienten $c \geq 0$ aus. Hardaker et al. (2015, S. 90) beschreiben CARA mit einer konstanten Risikoaversion bei steigendem Ertrag/Wohlstand (*wealth*).

Formel 15: Mathematische Vorlage einer Risikonutzenfunktion mit konstanter absoluter Risikoaversion (CARA) in Abhängigkeit der N-kostenfreien-Leistung (Nkfl) (eigene Herleitung)

$$U(Nkfl) = 1 - e^{-c \times Nkfl \text{€}}$$

Der Koeffizient $c \geq 0$ stellt hier den Grad der Risikoaversion dar. Bei $c = 0$ geht man von einem risikoneutralen Entscheider aus, die Nutzenfunktion wird ebenfalls 0. Monjardino et al. (2015) untersuchen Risikoaversion bis zu einem Koeffizienten von $c = 0,035$, was auf einen stark risikoaversen Entscheider schließen lässt. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass dies nur ein theoretischer Wert ist und Landwirte in praktischen Entscheidungen einen Risikokoeffizienten von höchstens 0,0266 aufweisen. Mit der Herleitung der Risikonutzenfunktion können nun drei Fragestellungen hinsichtlich der ex-ante-optimalen N-Düngung beantwortet werden:

- Wieviel Stickstoff sollte ein Entscheider bei Abwesenheit von Produktions- und Marktrisiko düngen?
- Wieviel Stickstoff sollte ein risikoneutraler Entscheider düngen?
- Wieviel Stickstoff sollte ein risikoaverser Entscheider (bei verschiedenen Niveaus der Risikoaversion) düngen?

Mit der Beantwortung der Fragen können die tatsächlich gewählten N-Düngermengen ex-post bewertet werden. Zuvor müssen geeignete Ertrags- und Proteinfunktionen hergeleitet werden.

⁴¹ Die Monte-Carlo-Simulation ist ein mathematisches Verfahren, welches mögliche Ergebnisse eines ungewissen Ereignisses durch wiederholtes Ziehen von Zufallsstichproben schätzt und so die Annäherung an ein Optimum erlaubt (Churchman et al. 1971 S. 166ff).

8.2.6 Kalibrierung der Produktionsfunktion

Für die Schätzung von N-Produktionsfunktionen werden meist N-Steigerungsversuche angelegt. Hierbei werden unter mehreren Wiederholungen verschiedene Düngeintensitäten eingesetzt, beginnend mit der Nullvariante, und Erträge und Qualitäten unter dem entsprechenden N-Einsatz ermittelt. Mit dem so entstandenen Datensatz kann der Zusammenhang zwischen N-Einsatz und Kornertrag bzw. Proteingehalt mit Hilfe einer mathematischen Funktion geschätzt werden. Da im betrachteten Praxisversuch jedoch weder eine N-Steigerung noch eine Null-Düngung durchgeführt wurde, repräsentieren die Düngeintensitäten und erfassten Erträge bzw. Qualitäten nur einen kleinen Abschnitt der vorliegenden Funktion. Um bei unvollständigen Ausgangsdaten dennoch die Ertrags- und Proteinfunktionen der Standorte untersuchen und die PF-Verfahren danach vergleichen zu können, wird die Schätzung der Ertrags- und Proteinfunktionen mit Hilfe einer Kalibrierung vorgenommen. Für die Kalibrierung wurde folgendes Vorgehen gewählt.

Zunächst wurden die Funktionen eines N-Steigerungsversuchs in räumlicher Nähe zur Versuchsregion geschätzt. Hierzu wurden für die Versuchsjahre 2019-2021 die Daten eines N-Steigerungsversuchs des LLH in Butzbach-Niederweisel (2019, 2020 und 2021) bzw. Riedstadt-Leeheim (2020) verwendet (siehe Anhang 12) (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) 2022). Die Standorte dieser Versuche liegen ca. 65 km (Nieder-Weisel) bzw. 35 km (Leeheim) entfernt. Während Leeheim in derselben Bodenklimazone wie die Versuchsstandorte liegt (121 = Rheinebene und Nebentäler), weicht Nieder-Weisel davon ab (133 = Zentralhessische Ackerbaugebiete) (Mayus und Paeßens 2022). Daten von geografisch näherliegenden Versuchen standen nicht zur Verfügung. Die Versuchsdaten wurden mit Hilfe des Programms *SPSS* einer nichtlinearen (Ertragsfunktionen) bzw. linearen (Proteinfunktionen) Regression unterzogen. Abbildung 37 stellt die Proteinfunktion für das Jahr 2019 in linearer (blau) und (approximativ) logarithmischer Form (schwarz) dar. Hier zeigt sich, dass der von Christen und Sieling et al. beschriebene Verdünnungseffekt im Bereich der praxisüblichen N-Düngung kompensiert werden kann. Für das betrachtete Jahr 2019 (unter Berücksichtigung der Ertragsfunktion) liegt dieser Effekt im Bereich zwischen 2,0 und 3,5 kg N/dt. Aus diesem Grund wird nachfolgend vereinfacht ein linearer Zusammenhang unterstellt, was auch den Annahmen von Karatay und Meyer-Aurich (2020) entspricht. Der grafische Verlauf der Ertragsfunktionen ist in Abbildung 38 zu sehen und wird durch die Funktionsparameter in Tabelle 44 beschrieben.

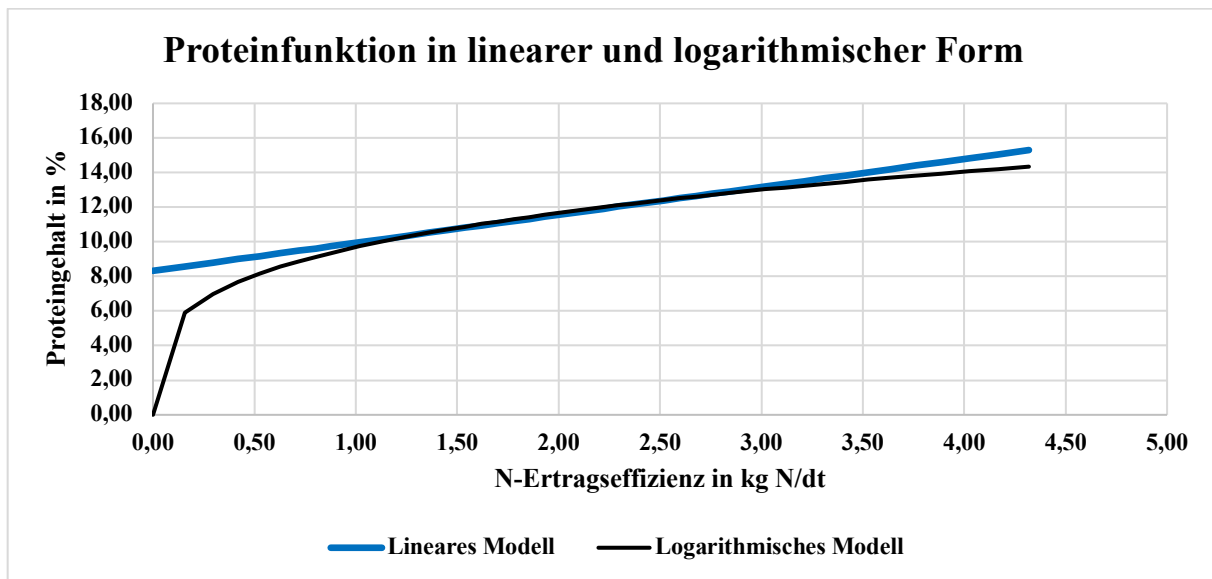


Abbildung 37: Grafischer Verlauf der Proteinfunktion für den Standort Nieder-Weisel im Jahr 2019 als lineares (blau) und logarithmisches (schwarz) Modell (eigene Darstellung und Berechnungen mit MS-Excel von in SPSS geschätzten Funktionen unter Verwendung der Daten des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH))

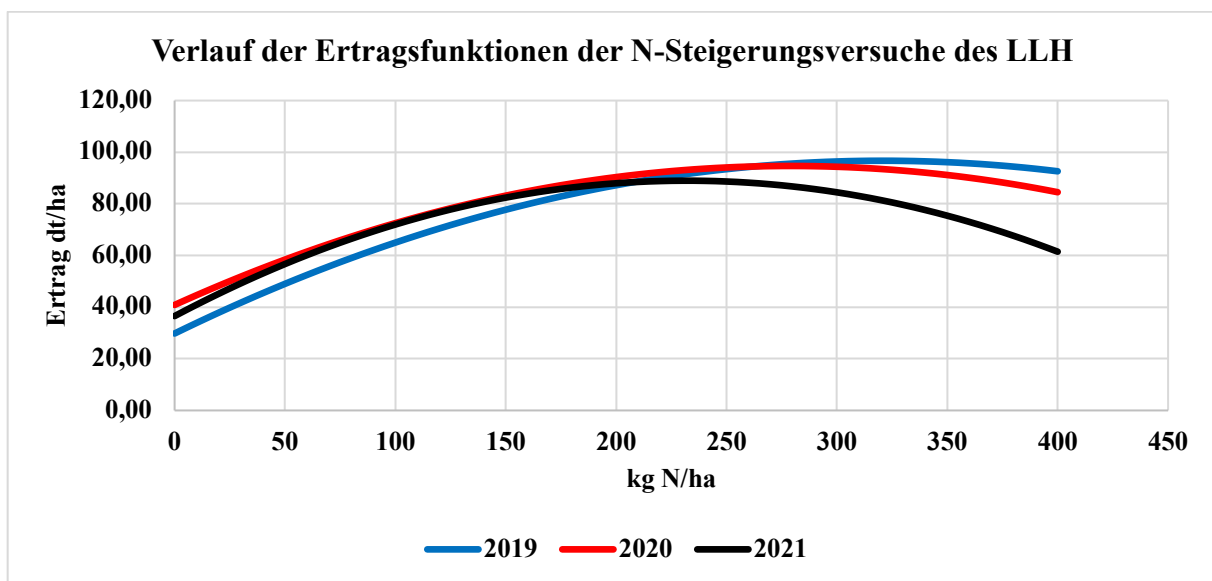


Abbildung 38: Grafischer Verlauf der Ertragsfunktionen $Y(N)$ der N-Steigerungsversuche in Nieder-Weisel (2019 und 2021) sowie Leeheim (2019) (eigene Darstellung und Berechnungen mit MS-Excel von in SPSS geschätzten Funktionen unter Verwendung der Daten des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH))

Tabelle 44: Ausgangsfunktionen der Versuchsjahre 2019-2021 für die Kalibrierung auf die Versuchsstandorte und Bestimmtheitsmaß der Regressionen (eigene Schätzung mit SPSS unter Verwendung der Daten des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) 2022)

Jahr	Ertragsfunktion Y(N)				Proteinfunktion P(N/dt)		
	a	b	c	R ²	α	b	R ²
2019	29,799*	0,41705*	-0,00065	99,5	8,324293**	1,615710**	93,3
2020	40,857*	0,38594	-0,00069	87,7	7,482800**	1,940775**	97,3
2021	36,540*	0,45195*	-0,00097	84,7	9,236080*	0,899255**	54,8

mit a, b, c als Funktionsparameter; Signifikanzniveaus der Regression: $p \leq 0,05^*$, $p \leq 0,01^{**}$

Die Funktionen repräsentieren den Einfluss der N-Düngung auf den Weizenertrag und Proteingehalt auf genau diesem Standort in genau dem betrachteten Jahr. Für den Standort Leeheim, der geografisch näher an den Versuchsstandorten liegt, stehen nur Ertragsdaten für das Jahr 2020 zur Verfügung, jedoch keine Proteingehalte. Aufgrund der geografischen Nähe der Versuchsstandorte zu den LLH-Standorten kann auf vergleichbare Witterungsbedingungen während der Vegetationsperiode geschlossen werden. Diesen Schluss lässt auch ein Vergleich der Klimadaten für die untersuchten Jahre zu. Unterschiedliche Bewirtschaftungsentscheidungen und kleinere klimatische Unterschiede zwischen den Schlägen des Feldversuchs und den Standorten der LLH-Versuche müssen dennoch berücksichtigt werden, was eine Kalibrierung der Funktion erforderlich macht. Die Funktionsparameter a (Konstante), b (linearer Parameter) und c (quadratischer Parameter) bzw. α (Konstante der Proteinfunktion) und β (linearer Parameter der Proteinfunktion) unterscheiden sich abhängig von den realen Bedingungen. Während bspw. der Parameter a den Ertrag ohne Düngung und ohne N_{min} darstellt, der sich allein aus der Bodennachlieferung während der Vegetationsperiode ergibt, ist der Parameter b der Ertragszuwachs, der durch die Erhöhung der N-Düngung um 1 kg/ha erzielt wird. Der abnehmende Ertragszuwachs, der in der Praxis aufgrund einer bspw. höheren Infektionsgefahr bei übermäßiger N-Versorgung der Pflanzen besteht, wird durch den deshalb mit einem negativen Vorzeichen versehenen Parameter c erklärt. Die Konstanten a und α stellen den Schnittpunkt der Graphen der Funktionen mit der y-Achse dar. Da jedoch keine Nulldüngung durchgeführt wurde, ist eine genaue Schätzung dieses Werts nicht möglich. Ersatzweise wurde das Verhältnis der Durchschnittserträge zwischen dem N-Steigerungsversuch (ohne Ertrag bzw. Proteingehalt bei Nulldüngung) und dem jeweils betrachteten Schlag (der betrachteten Teilfläche zum Gesamtschlag) als Kalibrierwert K_a bzw. K_α für die Konstante a bzw. α ermittelt. Die Parameter b und c werden mit eigenen Kalibrierfaktoren berechnet, sodass die so entstehende Funktion möglichst genau den Zusammenhang auf dem untersuchten Schlag modelliert. Das gleiche Vorgehen erfolgt für

die Darstellung des Zusammenhangs von N-Effizienz und Proteingehalt durch Kalibrierung des Parameters β . Als Ausgangsfunktion wird dabei die LLH-Funktion für das jeweilige Versuchsjahr verwendet. Durch die beschriebene Ergänzung der Kalibrierfaktoren zu den Ertrags- bzw. Proteinfunktionen ergeben sich die mathematische Vorlage für die Ertragsfunktionen (Formel 16) und Proteinfunktionen (Formel 17), die zur Unterscheidung von der Ausgangsfunktion gekennzeichnet werden.

Formel 16: Mathematische Vorlage der kalibrierten Ertragsfunktion in Abhängigkeit der N-Düngung unter Berücksichtigung der Kalibrierfaktoren K (eigene Herleitung)

$$Y'(N) = a \times K_a + b \times K_b \times N + c \times K_c \times N^2$$

Formel 17: Mathematische Vorlage der kalibrierten Proteinfunktion in Abhängigkeit der N-Düngung unter Berücksichtigung der Kalibrierfaktoren K und der kalibrierten Ertragsfunktion $Y'(N)$ (eigene Herleitung)

$$P'(N) = \alpha \times K_\alpha + \beta \times K_\beta \times \frac{N}{Y'(N)}$$

Für die Bestimmung der Kalibrierfaktoren K_b , K_c und K_β , die nicht über das Ertragsverhältnis ermittelt werden, wird eine Modellierung nach der OLS-Methode durchgeführt, bei der die Summe der quadrierten Abweichung S minimiert wird (Kosfeld und Dreger 2022, S. 26ff). Die quadrierte Abweichung δ^2_i ergibt sich aus der Differenz des Ertrags $Y'(N)$ (des Proteingehalts $P'(N)$) aus Formel 16 (Formel 17) mit den tatsächlich gemessenen Erträgen Y_i (und Proteingehalten P_i) am Ertragsmesspunkt i . Dies bedeutet, dass die Kalibrierfaktoren K solange verändert werden, bis die Summe der quadrierten Abweichung S gegen ein Minimum strebt.

Formel 18: Skizziertes Vorgehen der OLS-Methode für die Schätzung der Kalibrierfaktoren (eigene Herleitung)

$$\min S = \min \sum \delta^2_i = \min \sum (Y'_i(N_i) - Y_i)^2$$

Die OLS wurde mit dem *MS-Excel Solver* durchgeführt. Die Anzahl der Ertragsmesspunkte i ist durch den Datensatz des jeweiligen Schläges bzw. der Teilfläche festgelegt. Der Grundgedanke der PF ist, dass auch auf ein und demselben Schlag kleinräumige Standortunterschiede bestehen. Die Standortheterogenität muss sich also ebenfalls in der Ausgestaltung der Funktionen wiederfinden. Aus diesem Grund wurde eine zweite Kalibrierung (Ertragsfunktion in Formel 19 und Proteinfunktion in Formel 20) mit den Faktoren K_a' , K_b' und K_c' bzw. K_α' und K_β' analog zur Ersten durchgeführt. Als Ausgangsfunktionen wurden hier die kalibrierten Funktionen $Y'(N)$ bzw. $P'(N)$ der Schläge verwendet. Äquivalent wurde auch bei der Ermittlung der Proteinfunktionen für jede Teilfläche vorgegangen. Da im

Jahr 2019 lediglich der schlagspezifische Proteingehalt des Erntegutes ermittelt wurde, liegen hier nur schlagseinheitliche Proteinfunktionen vor, nicht aber für die Teilflächen.

Formel 19: Mathematische Vorlage der zweiten Kalibrierung der Ertragsfunktion in Abhängigkeit der N-Düngung unter Berücksichtigung der Kalibrierfaktoren K' (eigene Herleitung)

$$Y''(N) = a' \times K_a' + b' \times K_b' \times N + c' \times K_c' \times N^2$$

Formel 20: Mathematische Vorlage der zweiten Kalibrierung der Proteinfunktion in Abhängigkeit der N-Düngung unter Berücksichtigung der Kalibrierfaktoren K' und der zweifach-kalibrierten Ertragsfunktion $Y''(N)$ (eigene Herleitung)

$$P''(N) = \alpha' \times K_\alpha' + \beta' \times K_\beta' \times \frac{N}{Y''(N)}$$

Da die Parameter b und c in einem bestimmten Verhältnis aus Ertragszuwachs und abnehmendem Ertragszuwachs stehen, wurde eine notwendige Nebenbedingung formuliert. Ein Verzicht auf die Nebenbedingung hätte aufgrund der geringen Datenlage und der eingeschränkten Heterogenität der applizierten N-Düngung ein zufälliges Ergebnis zur Folge. Alternativ hätten willkürlich gesetzte Grenzen für die Parameter ein Streben eines Parameters gegen 0 verhindern können. Eine sinnvolle Definition der Grenzen konnte aber nicht gefunden werden. Gleichzeitig stehen auch die durchschnittlichen N-Mengen der Versuchsschläge und Teilflächen in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Dies äußert sich in der durchschnittlichen Düngermenge. Hierbei wird unterstellt, dass der Landwirt, der die durchschnittlichen Düngermengen und deren zeitliche Verteilung zuvor festlegt, die Standortheterogenität kennt. Dafür spricht auch das Ergebnis aus Kapitel 6 aufgrund dessen die Einteilung der Teilflächen für die Versuchsschläge vorgenommen wurde. Zudem wird unterstellt, dass das implizite Wissen des Landwirts auch zu einer Annäherung an die optimale N-Düngung beiträgt. Daher wird das Verhältnis von b zu c im Optimum (erste Ableitung der Ertragsfunktion $\partial Y/\partial N = 0$) ermittelt. Die N-Düngung entspricht der durchschnittlichen N-Menge der Versuchsschläge zum N-Steigerungsversuch (erste Kalibrierung) bzw. der Teilflächen zum Gesamtschlag (zweite Kalibrierung). Die Nebenbedingung für die erste Kalibrierung der Parameter b' und c' unter der Berücksichtigung der durchschnittlichen N-Düngung des Steigerungsversuchs $N_{\theta_{sv}}$ und der des betrachteten Schlags $N_{\theta'}$ ist nach dem Vorgehen in Formel 21 definiert.

Formel 21: Nebenbedingungen für die Funktionsparameter b' und c' der kalibrierten Ertragsfunktion unter Berücksichtigung des Verhältnisses von b und c zueinander und der durchschnittlichen N-Düngung des Ausgangsversuchs und betrachteten Schlags (eigene Herleitung)

$$-\frac{b'}{2c'} = -\frac{b}{2c} \times \frac{N_{\theta'}}{N_{\theta_{sv}}}$$

Durch die doppelte Kalibrierung der Ausgangsfunktionen liegt für jede Teilfläche in jedem Jahr (mit Ausnahme der beschriebenen Einschränkung für 2019) eine Ertrags- und eine Proteinfunktion vor (siehe die Tabellen 45-47). Somit kann die ceteris paribus ex-post-optimale spezielle Intensität für jede Teilfläche bestimmt und mit dem tatsächlichen N-Einsatz verglichen werden. Die Funktionsparameter a, b, c, α und β erhalten nach der Kalibrierung eine Markierung zur Unterscheidung der Ausgangsparameter (a' nach der ersten Kalibrierung und der schlagspezifischen Funktion und a'' nach der zweiten Kalibrierung auf Teilflächenebene).

Tabelle 45: Kalibrierte ex-post-Ertrags- und Proteinfunktionen des Jahres 2019 (mit Excel kalibrierte Funktionsparameter auf Basis der Daten des (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) 2022))

Schlag/ Teilfläche	Ertragsfunktion Y'/Y''			Proteinfunktion P'	
	a'/a''	b'/b''	c'/c''	α'	β'
Kleeplatz	21,83418661	0,28320836	-0,00041025	9,09493230	1,07949475
1_1	21,78774871	0,25676736	-0,00033859		
1_2	23,58991105	0,32326183	-0,00049560		
1_3	22,04872632	0,28015200	-0,00039850		
1_4	20,49478557	0,28187638	-0,00043351		
Siedlung	31,63611747	0,50250317	-0,00089003	6,59556159	1,38690510
2_1	32,25522009	0,48315072	-0,00080991		
2_2	30,44377169	0,54083224	-0,00107513		
Waldacker	30,77055158	0,28765463	-0,00029918	9,65034802	1,15902242
3_1	29,01921275	0,27123654	-0,00028384		
3_2	34,03945934	0,27246994	-0,00024401		
3_3	31,15447089	0,29840274	-0,00031935		
3_4	32,59545277	0,33184413	-0,00037784		
3_5	28,03443747	0,28044143	-0,00031381		

Tabelle 46: Kalibrierte ex-post-Ertrags- und Proteinfunktionen des Jahres 2020 (mit Excel kalibrierte Funktionsparameter auf Basis der Daten des (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) 2022))

Schlag/ Teilfläche	Ertragsfunktion Y'/Y''			Proteinfunktion P'/P''	
	a'/a''	b'/b''	c'/c''	α'/α''	β'/β''
Hammchesberg	37,03092642	0,38158384	-0,00078955	7,32194875	1,66745806
1_1	50,34380957	0,48565783	-0,00094687	7,19970181	2,10034454
1_2	35,24632971	0,36539826	-0,00076506	7,13536131	1,97136084
1_3	30,57782989	0,32234145	-0,00068380	7,51497025	1,71289499
Hinterm Hof	40,61500609	0,59038373	-0,00173319	6,63993947	2,35306264
2_1	37,04010119	0,52205573	-0,00148840	6,54986277	2,05578426
2_2	39,12193240	0,60367272	-0,00188393	6,78148856	2,46081340
2_3	45,01706750	0,63742458	-0,00182549	6,67210972	2,55660182
24-Morgen	41,90461538	0,35731399	-0,00061523	7,23830610	1,55222913
3_1	43,95578804	0,36619884	-0,00061691	7,32194875	1,61145489
3_2	45,09852656	0,39141002	-0,00068674	7,10319106	1,67051529
3_3	41,60158799	0,35690338	-0,00061907	7,23830610	1,55242711
3_4	35,93392331	0,33073902	-0,00061578	7,23830610	1,43931592

Tabelle 47: Kalibrierte ex-post-Ertrags- und Proteinfunktionen des Jahres 2021 (mit Excel kalibrierte Funktionsparameter auf Basis der Daten des (Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) 2022))

Schlag/ Teilfläche	Ertragsfunktion Y'/Y''			Proteinfunktion P'/P''	
	a'/a''	b'/b''	c'/c''	α'/α''	β'/β''
Kleefläch	32,47664034	0,42224455	-0,00096023	10,35190272	0,88368393
1_1	34,57497543	0,43824415	-0,00098206	10,04240444	0,86326806
1_2	33,65831657	0,42748851	-0,00095696	10,11570667	0,88698884
1_3	31,51958972	0,44249245	-0,00106562	10,13199605	0,72179404
1_4	30,39555684	0,41687278	-0,00100794	10,71026914	0,82568898
Winkelfeld	44,51649702	0,47974715	-0,00086723	9,61888049	1,09684309
2_1	42,59850273	0,47165727	-0,00089736	9,30123753	0,99766880
2_2	45,41831921	0,48182978	-0,00080574	9,54557827	1,19012260
2_3	46,21006589	0,49102369	-0,00089488	9,86322123	1,10543870
2_4	43,61641180	0,47372223	-0,00085245	9,53743358	1,09783322
Waldacker	38,58220325	0,49463222	-0,00107270	10,64511160	0,82493647
3_1	35,61644866	0,49787828	-0,00112117	10,84058420	0,73714403
3_2	44,63370149	0,51789197	-0,00104510	10,54737531	0,92694647
3_3	31,60118975	0,46810031	-0,00112205	10,68583506	0,68518034
3_4	40,81325865	0,49770388	-0,00105159	10,53923062	0,87586989
3_5	35,52834557	0,46556707	-0,00105400	10,48221778	0,80881537

Aus der Optimierung (Ableitung) der Funktionen ergeben sich für jede Teilfläche (ökonomisch und ertragsmaximal) ex-post-optimale N-Düngermengen in Abhängigkeit des N_{min}-Wertes sowie der Preise für N-Dünger und Weizen unter Berücksichtigung des jeweiligen Proteingehalts. Im Ergebnisteil werden diese mit den tatsächlich gedüngten N-Mengen abgeglichen.

Aus den kalibrierten Funktionen können nun Ertrags- und Proteinfunktionen abgeleitet werden, denen die ex-ante-Entscheidungen der Landwirte über die N-Düngung zugrunde liegen. Es gilt zunächst die Annahme, dass die Funktionen der drei Versuchsjahre die langjährigen Ertragsbedingungen auf dem betreffenden Standort abbilden. Bei der Auswahl der Versuchsschläge wurde darauf geachtet, dass diese repräsentativ für den Standort sind. Sie sind also hinsichtlich der vorliegenden Ertragsbedingungen vergleichbar. Die ökonomische Optimierung der Funktionen erlaubt es, eine mittlere Funktion hinsichtlich des Ertrags und des Proteingehalts zu identifizieren. Diese wurde jeweils als Ausgangsfunktion der mittleren Standortfunktion herangezogen. Für Standort 1 wurde sowohl Ertrags- als auch Proteinfunktion aus 2021 verwendet, für Standort 2 die Ertragsfunktion aus 2021 und die Proteinfunktion aus 2019. Auf Standort 3 beschreibt die Ertragsfunktion aus 2020 und die Proteinfunktion aus 2021 die mittleren Ertragsbedingungen am besten. Aus den standortweise zusammengeführten Datensätzen der drei Versuchsjahre konnten die durchschnittlichen Erträge und N-Mengen für den Standort hergeleitet werden. Nach dem oben beschriebenen Vorgehen zur Kalibrierung von Produktionsfunktionen wurden die mittleren ex-ante-Standortfunktionen ermittelt. Diese dienen dazu, die ex-ante-Annahme des Landwirts über die Ertragsfähigkeit seines Standorts zu beschreiben. Sie eignen sich zudem dazu, neben der statischen Betrachtungsweise durch die Ergänzung der Zufallsvariablen ε eine Normalverteilung der Erträge und Proteingehalte bei der Abschätzung der ökonomischen Ertragsfähigkeit zu implementieren. Der Verlauf der in Tabelle 48 beschriebenen Funktionen ist in Abbildung 39 dargestellt, die zugehörigen NkFL in Abbildung 40.

Tabelle 48: ex-ante-Ertrags- und Proteinfunktionen der drei Versuchsstandorte (eigene Berechnung)

	ex-ante-Ertragsfunktion			ex-ante-Proteinfunktion	
	a	b	c	α	β
Standort 1	33,27352297	0,366496995	-0,000718502	9,831172481	0,846078697
Standort 2	41,77157519	0,53435768	-0,001071991	7,138861649	2,11689924
Standort 3	42,18323259	0,342091703	-0,000523769	9,928228927	0,813496392

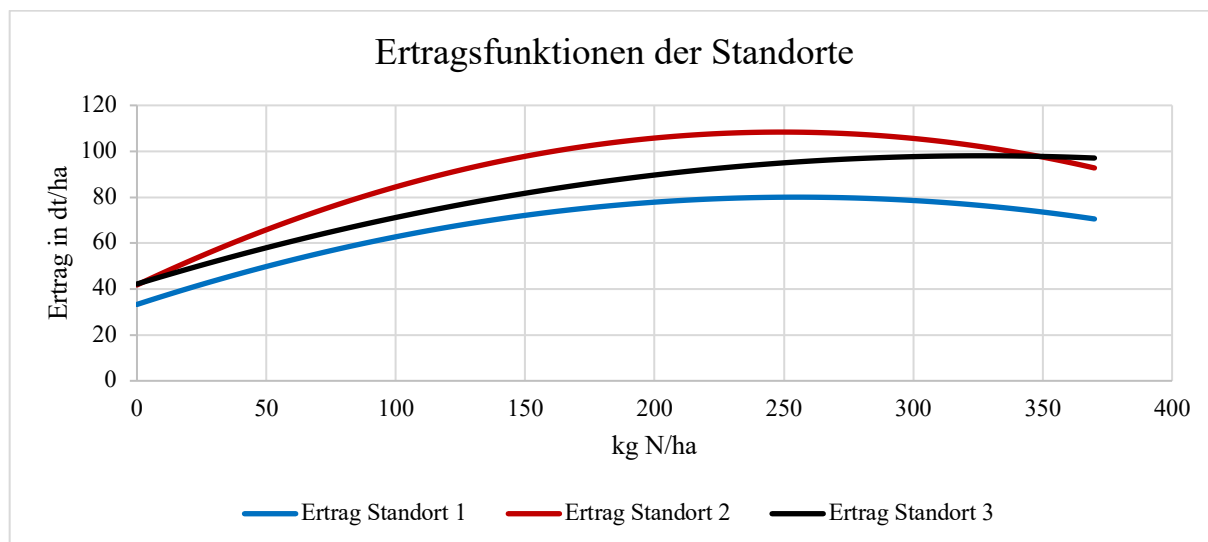


Abbildung 39: Grafischer Verlauf der ex-ante-Ertragsfunktionen der drei Versuchsstandorte (eigene Darstellung und Berechnungen)

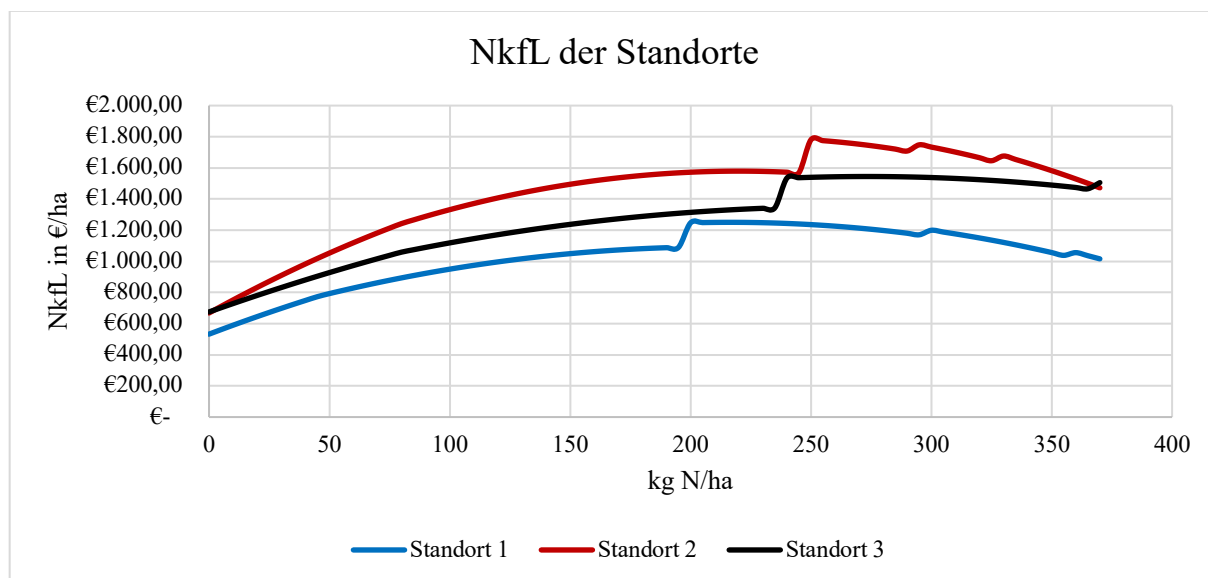


Abbildung 40: Grafischer Verlauf der ex-ante-Funktion der N-kostenfreien-Leistung der drei Versuchsstandorte unter Berücksichtigung einer stufenweisen Preisbildung und statisch-naiven Betrachtungsweise (eigene Darstellung und Berechnungen)

8.3 Beobachtungen und begleitende Untersuchungen

8.3.1 Beobachtungen während der Vegetationsperiode

Insgesamt lagen in allen Versuchsjahren den Standorten entsprechend günstige Ertragsbedingungen für den Anbau von Winterweizen vor. Einsetzende Trockenheit im Frühsommer hatte beispielsweise keine ungewöhnlich negativen Ertragseffekte. Beobachtungen während regelmäßiger Feldbonituren lassen jedoch einen negativen Vorfruchtwert bei Stoppelweizen (Kleeplatz 2019) sowie Körnermais (Hinterm Hof 2020)

erkennen. Insbesondere der Stoppelweizen hatte mit frühzeitigem Krankheitsbefall zu kämpfen. Dies machte eine im Vergleich zu den anderen Schlägen und Versuchsjahren höhere Fungizidintensität erforderlich (siehe Schlagkartei im Anhang). Im frühen Schosstadium war vor allem ein Befall mit DTR-Blattdürre (*Drechslera tritici-repentis*) und trotz erfolgter Fungizidmaßnahme vereinzelt Ährenfusarium festzustellen. Die negativen Ertragseffekte bzw. Krankheitsinfektionen können u.a. auf eine unzureichende Einarbeitung des Strohs bei durchgeführter Mulchsaat zurückgeführt werden (siehe hierzu Pflanzenkrankheiten bei Christen 2009, S. 177ff). Obwohl auch Körnermaisstroh als kritisch hinsichtlich des Infektionsdrucks mit Krankheiten zu bewerten ist, wurde im Jahr 2020 auf dem Schlag *Hinterm Hof* kein erhöhter Krankheitsdruck festgestellt. Hier äußerte sich der negative Vorfruchtwert des Körnermaises durch eine vergleichsweise schlechte Bestockung des Weizens. Bei der Verrottung des Maisstrohs wird zur Herstellung eines notwendigen C:N-Verhältnisses Stickstoff gebunden, der nicht der Versorgung der Weizenpflanze zur Verfügung steht (Amberger 1976). Weitere mögliche ertragsrelevante Beobachtungen auf den Versuchsfeldern sind u.a. der Besatz an vermutlich herbizidresistentem Weidelgras (Aussage des Landwirts nach Rücksprache mit fachkundigen Pflanzenbauberatern) auf dem Schlag *Waldacker* (2021), sowie der vereinzelt Befall mit Getreidehähnchen⁴² auf allen Versuchsschlägen. Da dieser jedoch ausnahmslos unterhalb der angenommenen Schadschwelle lag, wird nicht von einem negativen Ertragseffekt ausgegangen.

Im Jahr 2021 hat ein punktuell Gewitterereignis zu Hagelschaden auf dem Schlag *Winkelfeld* ca. drei Wochen vor der Ernte geführt. Die beiden anderen Versuchsstandorte in wenigen Kilometern Entfernung waren nicht dadurch betroffen. Dabei wurde nach Begutachtung des Schadens gemeinsam mit dem Landwirt und einem Pflanzenbauberater sowie stichprobenweiser Auszählung der ausgefallenen Körner ein Schaden von 25 % ermittelt. Dieser wurde den Ergebnissen der Ertragskartierung zugerechnet, um die tatsächlichen Ertragsbedingungen auf dem Schlag abbilden zu können. Abbildung 41 zeigt u.a. die Aufnahme einer geschädigten Ähre zum Zeitpunkt der Ernte. Außerdem ist der teilweise wieder aufgelaufene Weizen aus den ausgefallenen Körnern zwischen den Weizenstopplern gut zu erkennen.

⁴² *Oulema spec.*, das Schadbild ist ein streifenförmiger Fraß der Larve auf den oberen Blättern ab der Schosspphase, der bei Befall des Fahnenblattes zu einer verringerten Assimilationsleistung während der Phase der Kornfüllung (ab BBCH 55) führen kann (Christen 2009, S. 257ff).



Abbildung 41: Aufnahmen des festgestellten Hagelschadens auf dem Schlag Winkelfeld zum Zeitpunkt der Ernte am 22.7.2021 (eigene Aufnahmen)

8.3.2 Bodenuntersuchungen

Für die Berechnung der Kennzahlen und die Ermittlung der optimalen N-Düngermenge, sind die N_{min} -Werte zu Beginn der Vegetationsperiode relevant. Diese werden meist noch vor

Erreichen der für den Vegetationsstart erforderlichen Temperatursumme erfasst und dienen als Grundlage der Düngerentscheidung für den Landwirt (auch mit Blick auf die DüV relevant). Die Werte in den Tabellen 49-51 beziehen sich auf kg N/ha. Abhängig von der Kulturpflanze sind unterschiedliche Messtiefen anzusetzen. Während bspw. für Hafer der Wert in 0-60 cm Tiefe ausschlaggebend ist, wird für Winterweizen eine Messtiefe von 0-90 cm festgelegt (Bundesministerium für Justiz 2017). Außerdem kann der Nmin-Wert ein Indikator für die klimatischen Bedingungen oder die Bewirtschaftung des Vorjahrs sein. So ergeben sich bspw. aus dem sehr trockenen Jahr 2018 (Meteostat 2022) relativ hohe Nmin-Werte zu Beginn des Jahres 2019. Dies kann u.a. auf die niedrigen Erträge und die damit verbundene geringere Ausnutzung der gedüngten N-Menge zurückzuführen sein. Zudem ist aufgrund der trockenen Bedingungen des Sommers wahrscheinlich, dass organisch gebundener Stickstoff erst mit Eintreten von Niederschlägen im Spätherbst und Winter mineralisiert wurde. Den Landwirten standen, wie beschrieben, die Ergebnisse der Nmin-Gehalte nicht zur Verfügung und orientierten ihre Entscheidungen an den jeweils betriebsüblichen Maßstäben. In den Jahren 2020 und 2021 wurden unmittelbar nach der Ernte, ohne zuvor durchgeführter Bodenbearbeitung, der Nmin-Wert je Teilfläche erfasst (Nmin_{NE}). Da im Jahr 2019 diese Untersuchung erst im Herbst nach (mehrmaliger) Bodenbearbeitung und teilweiser Düngung durchgeführt wurde konnten die Werte daher nicht zur Ermittlung der aNMR herangezogen werden. Deshalb sind sie für das Jahr 2019 nicht ausgewiesen.

Tabelle 49: Nmin-Werte in kg N/ha für das Jahr 2019, gemessen vor Vegetationsbeginn, differenziert nach Messtiefe (Untersuchungsergebnisse des Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL))

Schlag	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	Nmin ges
Kleeplatz				
1_1	34	26	42	102
1_2	24	8	31	63
1_3	31	14	38	83
1_4	23	9	29	61
Siedlung				
2_1	29	74	24	127
2_2	37	31	25	93
Waldacker				
3_1	24	42	67	133
3_2	25	75	96	196
3_3	19	34	73	126
3_4	21	26	58	105
3_5	21	37	60	119

Tabelle 50: Nmin-Werte in kg N/ha für das Jahr 2020, gemessen vor Vegetationsbeginn, differenziert nach Messtiefe, sowie Nmin-Gehalte unmittelbar nach der Ernte (Untersuchungsergebnisse des Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL))

Schlag	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	Nmin ges	Nmin _{NE}
Hammchesberg					
1_1	11	10	14	35	45
1_2	8	3	5	16	45
1_3	4	3	5	12	81
Hinterm Hof					
2_1	9	10	25	44	17
2_2	9	7	16	32	22
2_3	11	11	22	44	24
24-Morgen					
3_1	12	11	15	38	27
3_2	8	10	13	31	52
3_3	10	8	13	31	34
3_4	4	5	6	15	40

Tabelle 51: Nmin-Werte in kg N/ha für das Jahr 2021, gemessen vor Vegetationsbeginn, differenziert nach Messtiefe, sowie Nmin-Gehalte unmittelbar nach der Ernte (Untersuchungsergebnisse des Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL))

Schlag	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	Nmin ges	Nmin _{NE}
Kleeplatz					
1_1	30	15	10	55	47
1_2	20	20	5	45	49
1_3	25	20	8	53	61
1_4	15	8	4	27	55
Winkelfeld					
2_1	30	19	40	89	27
2_2	28	15	29	72	26
2_3	28	18	51	97	27
2_4	24	17	36	77	34
Waldacker					
3_1	39	17	27	83	73
3_2	31	26	18	75	96
3_3	26	18	20	64	60
3_4	32	20	13	65	37
3_5	23	16	9	48	58

Es zeigen sich jahresabhängig teilweise große Unterschiede hinsichtlich des Nmin-Werts auf einem Schlag, was für heterogene Standortbedingungen spricht. Im hohen Wertebereich entfällt auf den Nmin-Wert ein Großteil des gesamten N-Bedarfs der Pflanze. Im Versuchsjahr 2019 zeigen sich vereinzelt Anteile von über 50 % des gesamten voraussichtlichen Pflanzenbedarfs.

Neben den Nmin-Werten liegen für fünf der sieben Versuchsschläge Ergebnisse von teilflächenspezifisch erfasste Grundnährstoffuntersuchungen vor, die in Tabelle 52 aufgeführt

sind. Bei den Schlägen *Waldacker* und *Winkelfeld* hat ein Fehler bei der Probenahme zu unbrauchbaren Ergebnissen geführt. Daher liegen für beide Schläge keine teilflächenspezifischen Ergebnisse vor. Stattdessen wurden die schlageinheitlich ermittelte Versorgung aufgeführt, die von den Landwirten selbst beprobt und ebenfalls im LHL untersucht wurden. Ermittelt wurden die in Gehaltsklassen bzw. Versorgungsstufen eingeteilten Werte für P_2O_5 , K_2O , Mg sowie der pH-Wert (Prüfverfahren nach VDLUFA). Es gilt die Annahme einer dreijährigen Konstanz der Grundnährstoffversorgung (Lorenz und Münchhoff 2015; Schubert 2011; Diepenbrock et al. 2016).

Tabelle 52: Teilflächenspezifische Grundnährstoffgehalte und Versorgungsstufen der Böden auf fünf Versuchsschlägen; schlageinheitliche Werte für die Schläge Winkelfeld und Waldacker (Untersuchungsergebnisse des Landesbetriebs Hessisches Landeslabor (LHL))

Schlag/Teilfläche (Jahr der Probe)	pH-Wert	P2O5 in mg/100g	K2O in mg/100g	Mg in mg/100g
Kleeplatz (2019)				
1_1	6,5 (C)	23 (D)	24 (D)	9 (D)
1_2	6,2 (C)	17 (C)	21 (D)	10 (D)
1_3	6,1 (B)	23 (D)	21 (D)	12 (D)
1_4	6,2 (C)	22 (D)	22 (D)	7 (C)
Hammchesberg (2020)				
1_1	7,2 (D)	37 (E)	31 (D)	10 (D)
1_2	6,3 (C)	27 (D)	22 (D)	8 (C)
1_3	6,2 (C)	21 (D)	19 (C)	6 (C)
Siedlung (2019)				
2_1	6,6 (C)	32 (D)	30 (D)	12 (D)
2_2	7,0 (E)	31 (D)	32 (D)	20 (E)
Hinterm Hof (2020)				
2_1	6,5 (C)	56 (E)	31 (D)	9 (D)
2_2	6,7 (C)	44 (E)	24 (D)	8 (C)
2_3	7,1 (D)	33 (D)	20 (C)	10 (D)
24-Morgen (2020)				
3_1	6,5 (C)	21 (D)	23 (D)	11 (D)
3_2	7,1 (D)	14 (C)	18 (C)	10 (D)
3_3	7,2 (D)	14 (C)	16 (C)	9 (D)
3_4	6,8 (C)	12 (C)	18 (C)	15 (E)
Winkelfeld (2020)	6,9 (D)	31 (D)	22 (C)	10 (D)
Waldacker (2021)	7,4 (E)	11 (B)	13 (C)	10 (D)

Die Standortheterogenität, die sich schon bei den Nmin-Werten zeigte, hat auch Auswirkungen auf die Grundnährstoffversorgung. Die Unterschiede zwischen den Teilflächen sind in diesem Fall jedoch geringer.

8.3.3 Pflanzenuntersuchungen

In jedem Versuchsjahr wurden vor der N2 zum Ende der Bestockung der Weizenpflanze (BBCH 23) teilflächenspezifische Pflanzenuntersuchungen vorgenommen. Dabei wurden für jede Probe ca. 1 kg Pflanzenmasse oberhalb der Bodenoberfläche gesammelt. Neben dem Stickstoffgehalt in der Pflanze wurde auch die Versorgung mit P, K und Mg ermittelt. Die Ergebnisse für das Jahr 2021 sind in Tabelle 53 getrennt nach den Versuchsschlägen und Teilflächen dargestellt (Analyse durch das Institut für Pflanzenernährung der Universität Gießen). Die Analyseergebnisse der Jahre 2019 und 2020 (Analyse durch den LHL, Hessisches Landeslabor) finden sich in Anhang 10.

Tabelle 53: Teilflächenspezifische Ergebnisse der Pflanzenuntersuchung der Versuchsschläge des Jahres 2021, Werte in g/kg (Labordaten)

2021	N	P	K	Mg
Kleeplatz				
1 1	34,53	4,60	38,06	0,86
1 2	31,71	4,18	33,91	0,86
1 3	37,92	5,01	39,73	1,04
1 4	28,21	3,81	30,84	0,74
Winkelfeld				
2 1	36,84	4,62	34,62	1,15
2 2	41,82	4,89	34,48	1,36
2 3	37,53	4,69	35,21	1,02
2 4	43,38	5,02	35,82	1,32
Waldacker				
3 1	45,82	3,03	36,32	1,19
3 2	46,91	3,14	39,93	1,13
3 3	41,39	2,28	29,83	1,11
3 4	43,75	3,19	33,60	1,21
3 5	42,53	3,28	32,73	1,06

Anhand der Ergebnisse kann die Verfügbarkeit von bspw. Stickstoff für die Weizenpflanze auf der jeweiligen Teilfläche abgeleitet werden. Trotz homogener erster N-Düngung kann von einer unterschiedlichen N-Versorgung ausgegangen werden. Mit Blick auf die Nmin-Werte zeigt sich somit nicht nur eine differenzierte N-Verfügbarkeit im Boden, sondern ebenfalls eine unterschiedliche N-Aufnahme in Abhängigkeit der Teilfläche. Es fällt auf, dass in einigen Teilflächen mit guter N-Versorgung der Pflanzen auch gute Versorgungsraten der weiteren Nährstoffe P, K und Mg zu verzeichnen sind. Daraus wird eine insgesamt unterschiedliche Nährstoffverfügbarkeit in Abhängigkeit des vorliegenden Bodens abgeleitet. Eine statistische Überprüfung der Probenergebnisse wird nicht vorgenommen.

Neben den Pflanzenuntersuchungen vor N2, die im Labor analysiert wurden, wurden durch den Autor Schnelltests zur Nitratkonzentration in der Pflanze vorgenommen. Die Messung erfolgte getrennt nach den untersuchten Verfahren, sowie den Teilflächen eine Woche vor N3 in etwa

zum Zeitpunkt des Ährenschiebens (BBCH 40). Der sog. *Nitracheck* (Typ *Horiba LAQUAtwin*) erfasst die Nitratkonzentration (NO_3^-) im Saftstrom der Pflanze und gibt sie in ppm (parts per million) an. Die Messwerte lassen sich somit u.a. auf die bisherige N-Düngung zurückführen. In Abbildung 36 sind einige Bilder zur Durchführung der Messung zu sehen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 54 exemplarisch für das Jahr 2021 aufgeführt und für die Schläge Kleeplatz und Waldacker in Abbildung 43 dargestellt. Die Ergebnisse der Jahre 2019 und 2020 sind in Anhang 11 aufgeführt.



Abbildung 42: Illustration des Nitracheck-Schnelltests zur Feststellung der Nitratkonzentration im Saftstrom der Weizenpflanze (eigene Darstellung und Aufnahmen)

Tabelle 54: Ergebnisse der Nitracheck-Untersuchung im Jahr 2021, getrennt nach Teilflächen und PF-Verfahren. Werte stellen die Nitratkonzentration in ppm dar (eigene Erhebung)

2021	Homogen	Landwirt	Drohne	NDVI
Kleeplatz				
1_1	610	520	540	400
1_2	650	660	480	310
1_3	530	630	510	550
1_4	580	690	540	710
Winkelfeld				
2_1	460			
2_2	430			
2_3	360			
2_4	680			
Waldacker				
3_1	170	600	680	760
3_2	280	270	670	750
3_3	590	590	440	760
3_4	310	250	300	430
3_5	230	180	340	440

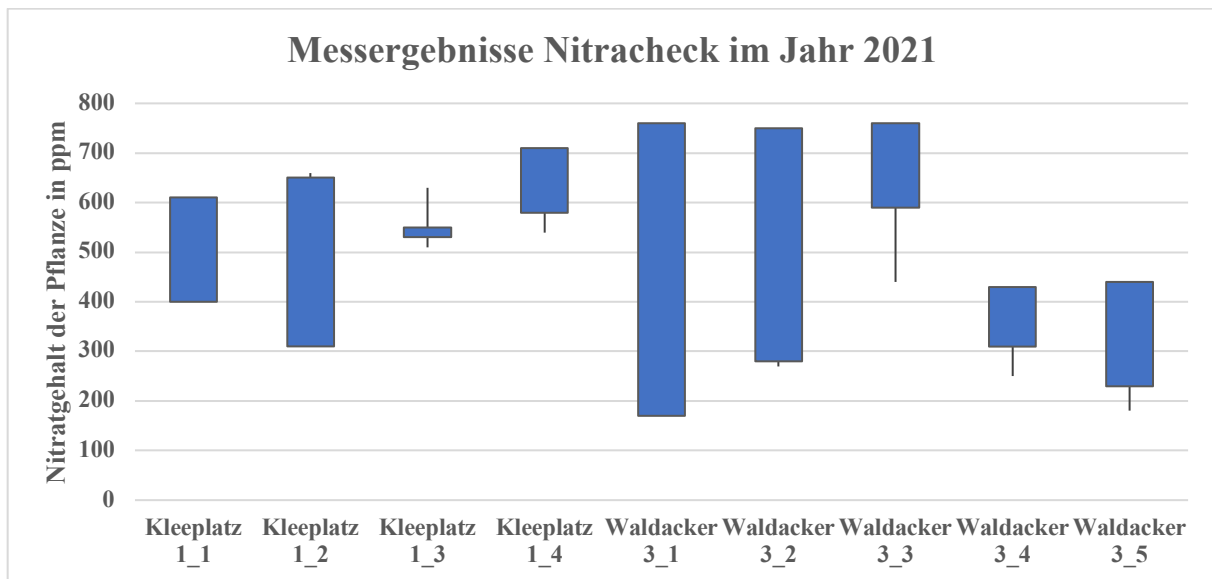


Abbildung 43: Darstellung der Nitracheck-Ergebnisse als Boxplot für das Jahr 2021 auf den Versuchsschlägen Kleeplatz und Waldacker getrennt nach Teilflächen (eigene Darstellung selbst erhobener Daten)

Es zeigt sich, dass auf einigen Teilflächen große Abweichungen hinsichtlich des Mittelwerts zu beobachten sind. Dies ist u.a. auf die unterschiedliche N-Düngung der untersuchten Verfahren bei N2 zurückzuführen. Messfehler sind hingegen ebenfalls nicht auszuschließen, da es sich um einen Schnelltest handelt.

8.4 Ergebnisse des Feldversuchs

8.4.1 N-Düngung, Erträge und Kornqualitäten und Kennzahlen

Zeitliche Verteilung und Höhe der N-Düngung sollten sich am Pflanzenbedarf und der aktuellen bzw. erwarteten Wetterlage richten, den zeitlich variablen Umweltfaktoren. Die nachfolgenden Tabellen 55-57 zeigen hierzu für jedes Versuchsjahr die Düngezeitpunkte, die Art des Düngers und die durchschnittlichen Höhen der N-Düngung (bei homogener Düngung, Verfahren H) auf den untersuchten Schlägen an. Diese wurden vom Landwirt bestimmt. Auch der Durchschnittswert der PF-Verfahren, um den die N-Düngung variiert, entspricht diesem Wert bei N2 und N3, N1 erfolgt homogen.

Tabelle 55: Durchschnittliche N-Düngung auf den Versuchsschlägen im Jahr 2019 (eigene Erhebung)

2019		Kleplatz	Siedlung	Waldacker
N1	Termin	25.2.2019	27.3.2019	20.2.2019
	Höhe	50 kg N/ha	40 kg N/ha	40 kg N/ha
	Dünger	AHL 24/3	Alzon 37/8,5	AHL 28
N2	Termin	15.4.2019	6.5.2019	2.4.2019
	Höhe	50 kg N/ha	50 kg N/ha	110 kg N/ha
	Dünger	AHL 28	Sulfan 24/6	Alzon 40
N3	Termin	2.6.2019		4.6.2019
	Höhe	60 kg N/ha		50 kg N/ha
	Dünger	AHL 28		AHL 28
N-Summe		160 kg N/ha	90 kg N/ha	200 kg N/ha

Tabelle 56: Durchschnittliche N-Düngung auf den Versuchsschlägen im Jahr 2020 (eigene Erhebung)

2020		Hammchesberg	Hinterm Hof	24-Morgen
N1	Termin	16.3.2020	20.3.2020	15.2.2020
	Höhe	55 kg N/ha	50 kg N/ha	45 kg N/ha
	Dünger	AHL 25/6	Harnstoff	AHL 28
N2	Termin	8.4.2020	9.5.2020	2.4.2020
	Höhe	65 kg N/ha	50 kg N/ha	100 kg N/ha
	Dünger	AHL 25/6	KAS 27	Alzon 40
N3	Termin	14.5.2020		29.5.2020
	Höhe	65 kg N/ha		60 kg N/ha
	Dünger	AHL 28		AHL 28
N-Summe		185 kg N/ha	100 kg N/ha	205 kg N/ha

Tabelle 57: Durchschnittliche N-Düngung auf den Versuchsschlägen im Jahr 2021 (eigene Erhebung)

2021		Kleplatz	Winkelfeld	Waldacker
N1	Termin	2.3.2021	5.3.2021	28.2.2021
	Höhe	36 kg N/ha*	80 kg N/ha*	45 kg N/ha
	Dünger	Rindergülle (17 m ³)	Schweinegülle (28m ³)	AHL 28
N2	Termin	10.4.2021	14.5.2021	2.4.2021
	Höhe	60 kg N/ha	50 kg N/ha	100 kg N/ha
	Dünger	AHL 25/6	KAS 27	Alzon 40
N3	Termin	26.5.2021		10.6.2021
	Höhe	70 kg N/ha		65 kg N/ha
	Dünger	AHL 28		AHL 28
N-Summe		190 kg N/ha	130 kg N/ha	210 kg N/ha

* anrechenbare N-Menge (NH₄) aus organischer Düngung

Während die N-Düngung in Betrieb 2 aufgrund des Produktionsziels Futterweizen (keine Qualitätsdüngung N3) in jedem Jahr deutlich moderater erfolgt, ist sie in Betrieb 3 in jedem Versuchsjahr am höchsten. Dies wird u.a. mit einem höheren (angenommenen) Ertragsniveau als in Betrieb 1 begründet. Gemeinsam mit den Mittelwerten der Erträge und Kornqualitäten sind die tatsächlich gedüngten N-Mengen in den Tabellen 58-66 aufgeführt. Die gleichzeitig dargestellten N-Entzüge sowie Dünge- und N-Bilanzen für jede Teilfläche und PF-Variante ergeben sich aus den in Kapitel 8.2.3 definierten Formeln. Zudem zeigen die Tabellen die errechneten Nkfl und die zugrundeliegenden Preise, die sich aus der beschriebenen linearen Preisfindungsfunktion ergeben.

Wie im methodischen Teil beschrieben, wurden die Erträge mit einer handelsüblichen Ertragskartierung auf einem Mähdrescher ermittelt und mit den tatsächlichen Durchschnittserträgen der Schläge verglichen. Es hat sich gezeigt, dass trotz einer vorherigen Kalibrierung der Ertragsmessung auf dem Mähdrescher teilweise Abweichungen von über 15 % auftraten. Die Ertragsdaten wurden daher mit dem so ermittelten Abweichungsverhältnis für jeden Schlag multipliziert, um die tatsächlichen Erträge an den Messpunkten zu erhalten. Anhand eines Spatial-Joins der Ertragspunkte mit den Teilflächen und untersuchten PF-Varianten konnten die zugehörigen Ertragsmittelwerte bestimmt werden. Den Ertragsmittelwerten wurden die Proteingehalte zugeordnet.

Tabelle 58: Versuchsergebnisse und Kennzahlen auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2019 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)

Kleeplatz 2019	N1/N2/N3			Düngung kg N/ha	Nmin kg N/ha	Nges. kg N/ha	Ertrag dt/ha	Protein %	Entzug HEP kg N/ha	Dünge- bilanz kg N/ha	N-Bilanz kg N/ha	Entzug NEP kg N/ha	Entzug ges. kg N/ha	Preis dt	Nkfl/ha
	60	50	60												
Homogen	60	50	60	170	71	241	62,2	13,10	123	47	118	25	148	18,55 €	984,41 €
1-1	60	50	60	170	102	272	63,5	13,10	126	44	146	25	151	18,55 €	1.007,13 €
1-2	60	50	60	170	63	233	67,0	13,10	133	37	100	27	159	18,55 €	1.072,87 €
1-3	60	50	60	170	83	253	63,3	13,10	125	45	128	25	150	18,55 €	1.003,43 €
1-4	60	50	60	170	61	231	58,2	13,10	115	55	116	23	138	18,55 €	910,39 €
Landwirt	60	54	65	179	71	250	63,9	13,10	126	53	124	26	152	18,55 €	1.005,54 €
1-1	60	45	62	167	102	269	56,4	13,10	111	56	158	23	134	18,55 €	878,34 €
1-2	60	55	68	184	63	247	69,8	13,10	138	46	109	28	166	18,55 €	1.111,50 €
1-3	60	50	60	170	83	253	69,9	13,10	138	32	115	28	166	18,55 €	1.127,37 €
1-4	60	57	66	183	61	244	64,1	13,10	127	56	117	26	153	18,55 €	1.006,78 €
Drohne	60	51	66	177	71	248	73,7	13,10	146	31	102	29	175	18,55 €	1.190,78 €
1-1	60	47	63	170	102	272	64,8	13,10	128	42	144	26	154	18,55 €	1.032,44 €
1-2	60	47	67	174	63	237	86,2	13,10	171	4	67	34	205	18,55 €	1.425,17 €
1-3	60	40	59	159	83	242	84,5	13,10	167	-8	75	34	201	18,55 €	1.409,34 €
1-4	60	60	69	189	61	250	66,0	13,10	130	58	119	26	157	18,55 €	1.034,82 €
NDVI	60	51	52	162	71	234	67,2	13,10	133	29	101	27	160	18,55 €	1.084,76 €
1-1	60	45	65	170	102	272	68,5	13,10	135	35	137	27	163	18,55 €	1.099,83 €
1-2	60	48	53	161	63	224	74,3	13,10	147	14	77	30	177	18,55 €	1.218,13 €
1-3	60	46	58	164	83	247	67,6	13,10	134	30	113	27	161	18,55 €	1.090,83 €
1-4	60	57	43	160	61	221	60,5	13,10	120	40	101	24	144	18,55 €	961,83 €

Tabelle 59: Versuchsergebnisse und Kennzahlen auf dem Schlag Siedlung im Jahr 2019 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)

Siedlung 2019	N1/N2/N3			Düngung kg N/ha	Nmin kg N/ha	Nges. kg N/ha	Ertrag dt/ha	Protein %	Entzug HEP kg N/ha	Dünge- bilanz kg N/ha	N-Bilanz kg N/ha	Entzug NEP kg N/ha	Entzug ges. kg N/ha	Preis dt	Nkfl/ha
	37	50	0												
Homogen	37	50	0	87	115	202	89,6	9,50	129	-42	73	36	164	16,00 €	1.346,61 €
2-1	37	50	0	87	127	214	91,3	9,50	131	-44	83	37	168	16,00 €	1.374,27 €
2-2	37	50	0	87	93	180	85,4	9,50	123	-36	57	34	157	16,00 €	1.279,76 €
Landwirt	37	53	0	90	115	205	95,8	9,50	137	-48	68	38	176	16,00 €	1.443,03 €
2-1	37	51	0	88	127	215	98,7	9,50	142	-54	73	39	181	16,00 €	1.491,95 €
2-2	37	55	0	92	93	185	90,8	9,50	130	-38	55	36	167	16,00 €	1.361,49 €
Drohne	37	51	0	88	115	203	94,5	9,50	136	-48	67	38	173	16,00 €	1.424,40 €
2-1	37	49	0	86	127	213	94,4	9,50	135	-50	77	38	173	16,00 €	1.424,52 €
2-2	37	55	0	92	93	185	94,8	9,50	136	-44	49	38	174	16,00 €	1.424,17 €
NDVI	37	48	0	85	115	199	94,6	9,50	136	-51	64	38	174	16,00 €	1.428,10 €
2-1	37	49	0	86	127	213	96,7	9,50	139	-53	74	39	177	16,00 €	1.460,65 €
2-2	37	46	0	83	93	176	92,3	9,50	132	-50	43	37	169	16,00 €	1.393,51 €

Tabelle 60: Versuchsergebnisse und Kennzahlen auf dem Schlag Waldacker im Jahr 2019 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)

Waldacker 2019	N1/N2/N3			Düngung kg N/ha	Nmin kg N/ha	Nges. kg N/ha	Ertrag dt/ha	Protein %	Entzug HEP kg N/ha	Dünge- bilanz kg N/ha	N-Bilanz kg N/ha	Entzug NEP kg N/ha	Entzug ges. kg N/ha	Preis dt	Nkfl/ha
	45	110	50												
Homogen	45	110	50	205	137	342	104,7	13,90	220	-15	122	42	262	18,95 €	1.779,80 €
3-1	45	110	50	205	133	338	99,1	13,90	208	-3	130	40	248	18,95 €	1.672,09 €
3-2	45	110	50	205	196	401	112,2	13,90	235	-30	166	45	280	18,95 €	1.920,53 €
3-3	45	110	50	205	126	331	101,8	13,90	214	-9	117	41	254	18,95 €	1.723,84 €
3-4	45	110	50	205	105	310	108,6	13,90	228	-23	82	43	271	18,95 €	1.852,68 €
3-5	45	110	50	205	118	323	96,8	13,90	203	2	120	39	242	18,95 €	1.630,04 €
Landwirt	45	127	49	220	137	357	103,6	13,90	218	3	139	41	259	18,95 €	1.743,27 €
3-1	45	143	40	228	133	361	82,8	13,90	174	54	187	33	207	18,95 €	1.340,62 €
3-2	45	116	55	216	196	412	114,7	13,90	241	-25	171	46	287	18,95 €	1.958,06 €
3-3	45	143	60	248	126	374	114,3	13,90	240	8	134	46	286	18,95 €	1.918,12 €
3-4	45	129	47	221	105	326	112,5	13,90	236	-15	90	45	281	18,95 €	1.910,45 €
3-5	45	95	50	190	118	308	84,8	13,90	178	12	130	34	212	18,95 €	1.416,40 €
Drohne	45	110	52	207	137	344	87,0	13,90	183	24	161	35	217	18,95 €	1.441,25 €
3-1	45	115	55	215	133	348	81,1	13,90	170	45	178	32	203	18,95 €	1.321,63 €
3-2	45	92	54	192	196	388	95,6	13,90	201	-9	187	38	239	18,95 €	1.620,31 €
3-3	45	116	42	202	126	328	83,1	13,90	174	28	154	33	208	18,95 €	1.372,36 €
3-4	45	114	53	212	105	317	92,7	13,90	195	18	123	37	232	18,95 €	1.543,85 €
3-5	45	99	50	194	118	312	86,1	13,90	181	13	131	34	215	18,95 €	1.437,43 €
NDVI	45	117	53	215	137	352	93,8	13,90	197	18	155	38	234	18,95 €	1.561,79 €
3-1	45	135	44	224	133	357	79,7	13,90	167	57	190	32	199	18,95 €	1.287,13 €
3-2	45	97	56	198	196	394	109,1	13,90	229	-31	165	44	273	18,95 €	1.868,87 €
3-3	45	115	55	215	126	341	104,2	13,90	219	-4	122	42	260	18,95 €	1.759,47 €
3-4	45	114	59	218	105	323	94,0	13,90	197	21	126	38	235	18,95 €	1.562,28 €
3-5	45	97	47	189	118	307	84,6	13,90	178	11	129	34	211	18,95 €	1.414,73 €

Tabelle 61: Versuchsergebnisse und Kennzahlen auf dem Schlag Hammchesberg im Jahr 2020 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)

Hammchesberg 2020	N1/N2/N3			Düngung kg N/ha	Nmin kg N/ha	Nges. kg N/ha	Ertrag dt/ha	Protein %	Entzug HEP kg N/ha	Dünge- bilanz kg N/ha	N-Bilanz kg N/ha	Entzug NEP kg N/ha	Entzug ges. kg N/ha	Preis dt	Nkfl/ha
	56	55	60												
Homogen	56	55	60	171	18	189	79,8	11,34	136	35	53	32	168	17,34 €	1.213,23 €
1-1	56	55	60	171	35	206	114,2	11,50	198	-27	8	46	243	17,50 €	1.827,62 €
1-2	56	55	60	171	16	187	84,1	11,14	141	30	46	34	175	17,14 €	1.271,50 €
1-3	56	55	60	171	12	183	67,7	11,39	116	55	67	27	143	17,39 €	1.006,08 €
Landwirt	56	62	73	191	18	209	79,2	11,58	137	54	71	32	169	17,58 €	1.200,56 €
1-1	56	55	65	176	35	211	117,6	11,17	198	-22	13	47	245	17,17 €	1.844,62 €
1-2	56	63	70	189	16	205	70,0	11,30	119	70	86	28	147	17,30 €	1.021,64 €
1-3	56	65	78	198	12	210	70,0	11,90	125	73	85	28	153	17,90 €	1.054,13 €
Drohne	56	61	71	187	18	205	79,1	11,57	137	50	68	32	169	17,57 €	1.202,66 €
1-1	56	52	68	176	35	211	117,3	11,32	200	-24	11	47	247	17,32 €	1.855,72 €
1-2	56	63	68	187	16	203	74,0	11,33	126	60	76	30	156	17,33 €	1.095,78 €
1-3	56	63	75	193	12	205	66,3	11,92	119	74	86	27	146	17,92 €	995,49 €
NDVI	56	53	64	173	18	191	86,7	11,04	144	30	47	35	178	17,04 €	1.305,11 €
1-1	56	49	74	179	35	214	115,1	11,03	191	-12	23	46	237	17,03 €	1.780,69 €
1-2	56	56	69	181	16	197	88,4	10,60	141	40	56	35	176	16,60 €	1.286,97 €
1-3	56	51	51	158	12	170	66,1	11,47	114	44	56	26	140	17,47 €	995,65 €

Tabelle 62: Versuchsergebnisse und Kennzahlen auf dem Schlag Hinterm Hof im Jahr 2020 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)

Hinterm Hof 2020	N1/N2/N3			Düngung kg N/ha	Nmin kg N/ha	Nges. kg N/ha	Ertrag dt/ha	Protein %	Entzug HEP kg N/ha	Dünge- bilanz kg N/ha	N-Bilanz kg N/ha	Entzug NEP kg N/ha	Entzug ges. kg N/ha	Preis dt	Nkfl/ha
	49	50	0												
Homogen	49	50	0	99	41	140	94,6	10,52	150	-51	-10	38	188	16,52 €	1.463,83 €
2-1	49	50	0	99	44	143	85,5	10,30	133	-34	10	34	167	16,30 €	1.294,57 €
2-2	49	50	0	99	32	131	90,9	10,90	150	-51	-19	36	186	16,90 €	1.436,76 €
2-3	49	50	0	99	44	143	114,2	10,60	183	-84	-40	46	228	16,60 €	1.796,66 €
Landwirt	49	52	0	101	41	142	89,1	10,28	139	-38	3	36	174	16,28 €	1.349,44 €
2-1	49	52	0	101	44	145	82,0	10,00	124	-23	21	33	157	16,00 €	1.210,63 €
2-2	49	53	0	102	32	134	92,0	10,40	144	-42	-10	37	181	16,40 €	1.406,44 €
2-3	49	50	0	99	44	143	97,4	10,60	156	-57	-13	39	195	16,60 €	1.517,71 €
Drohne	49	53	0	102	41	143	84,7	10,30	132	-30	12	34	165	16,30 €	1.279,89 €
2-1	49	54	0	103	44	147	75,0	10,50	119	-16	28	30	149	16,50 €	1.134,23 €
2-2	49	52	0	101	32	133	92,2	10,41	145	-44	-12	37	182	16,41 €	1.412,03 €
2-3	49	51	0	100	44	144	93,7	9,80	139	-39	6	37	176	16,00 €	1.399,45 €
NDVI	49	51	0	100	41	140	86,2	10,06	131	-31	9	34	166	16,06 €	1.284,46 €
2-1	49	54	0	103	44	147	73,8	9,90	110	-8	36	30	140	16,00 €	1.077,87 €
2-2	49	50	0	99	32	131	97,8	10,30	152	-53	-21	39	191	16,30 €	1.495,09 €
2-3	49	48	0	97	44	141	93,3	10,10	142	-45	-1	37	180	16,10 €	1.405,38 €

Tabelle 63: Versuchsergebnisse und Kennzahlen auf dem Schlag 24-Morgen im Jahr 2020 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)

24-Morgen 2020	N1/N2/N3			Düngung kg N/ha	Nmin kg N/ha	Nges. kg N/ha	Ertrag dt/ha	Protein %	Entzug HEP kg N/ha	Dünge- bilanz kg N/ha	N-Bilanz kg N/ha	Entzug NEP kg N/ha	Entzug ges. kg N/ha	Preis dt	Nkfl/ha
	45	100	60												
Homogen	45	100	60	205	32	237	95,8	11,36	164	41	73	38	203	17,36 €	1.457,25 €
3-1	45	100	60	205	38	243	98,5	11,50	171	34	72	39	210	17,50 €	1.518,21 €
3-2	45	100	60	205	31	236	104,6	10,83	171	34	65	42	213	16,83 €	1.554,86 €
3-3	45	100	60	205	31	236	91,8	11,50	159	46	77	37	196	17,50 €	1.401,82 €
3-4	45	100	60	205	15	220	81,6	11,10	137	68	83	33	169	17,10 €	1.190,24 €
Landwirt	45	99	60	204	32	236	94,8	11,11	159	45	77	38	197	17,11 €	1.417,54 €
3-1	45	100	57	202	38	240	95,5	11,19	161	41	79	38	200	17,19 €	1.440,44 €
3-2	45	80	72	197	31	228	103,8	10,70	168	29	60	42	209	16,70 €	1.536,97 €
3-3	45	107	58	209	31	240	91,3	11,30	156	54	85	37	192	17,30 €	1.370,08 €
3-4	45	100	60	205	15	220	89,3	10,70	144	61	76	36	180	16,70 €	1.286,94 €
Drohne	45	96	57	198	32	230	94,5	11,15	159	39	71	38	197	17,15 €	1.421,58 €
3-1	45	102	58	205	38	243	101,1	11,20	171	34	72	40	211	17,20 €	1.534,01 €
3-2	45	89	60	194	31	225	93,9	10,91	155	40	71	38	192	16,91 €	1.394,22 €
3-3	45	95	57	197	31	228	91,7	11,30	156	40	71	37	193	17,30 €	1.389,20 €
3-4	45	100	51	196	15	211	88,1	11,10	148	49	64	35	183	17,10 €	1.310,80 €
NDVI	45	103	61	208	32	240	93,2	11,38	160	48	80	37	198	17,38 €	1.411,42 €
3-1	45	101	65	210	38	248	100,4	11,67	177	33	71	40	217	17,67 €	1.563,74 €
3-2	45	97	62	205	31	236	97,0	11,50	169	36	67	39	207	17,50 €	1.493,39 €
3-3	45	105	59	209	31	240	90,3	10,90	149	60	91	36	185	16,90 €	1.317,09 €
3-4	45	110	55	211	15	226	79,4	11,90	143	68	83	32	175	17,90 €	1.211,46 €

Tabelle 64: Versuchsergebnisse und Kennzahlen auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2021 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)

Kleeplatz 2021	N1/N2/N3			Düngung kg N/ha	Nmin kg N/ha	Nges. kg N/ha	Ertrag dt/ha	Protein %	Entzug HEP kg N/ha	Dünge- bilanz kg N/ha	N-Bilanz kg N/ha	Entzug NEP kg N/ha	Entzug ges. kg N/ha	Preis dt	Nkfl/ha
Homogen	60	60	70	190	40	230	76,8	12,87	148	42	81	31	179	18,44 €	1.225,67 €
1-1	60	60	70	190	55	245	83,4	12,29	154	36	91	33	187	18,14 €	1.322,28 €
1-2	60	60	70	190	45	235	82,9	12,90	161	29	74	33	194	18,45 €	1.338,61 €
1-3	60	60	70	190	53	243	81,8	12,50	154	36	89	33	187	18,25 €	1.303,32 €
1-4	60	60	70	190	27	217	68,5	13,20	136	54	81	27	163	18,60 €	1.083,77 €
Landwirt	60	64	67	191	40	231	75,6	12,46	142	50	89	30	172	18,23 €	1.187,42 €
1-1	60	59	73	192	55	247	83,4	12,21	153	38	93	33	187	18,11 €	1.317,53 €
1-2	60	65	66	191	45	236	78,6	12,10	143	48	93	31	175	18,05 €	1.226,96 €
1-3	60	60	70	190	53	243	81,2	12,50	153	37	90	32	185	18,25 €	1.291,55 €
1-4	60	67	65	191	27	218	72,0	12,80	139	53	80	29	167	18,40 €	1.133,46 €
Drohne	60	62	67	189	40	229	75,4	12,80	145	44	84	30	175	18,40 €	1.198,67 €
1-1	60	57	76	193	55	248	83,4	12,70	159	34	89	33	193	18,35 €	1.336,29 €
1-2	60	64	66	190	45	235	78,4	12,20	144	46	91	31	175	18,10 €	1.229,66 €
1-3	60	56	74	190	53	243	74,7	12,40	139	51	104	30	169	18,20 €	1.169,26 €
1-4	60	64	62	187	27	214	71,5	13,30	143	44	71	29	172	18,65 €	1.146,50 €
NDVI	60	61	69	190	40	230	76,7	12,71	147	43	83	31	177	18,35 €	1.217,97 €
1-1	60	57	71	188	55	243	83,4	12,15	152	36	91	33	186	18,08 €	1.318,73 €
1-2	60	61	68	189	45	234	78,3	12,50	147	42	87	31	179	18,25 €	1.240,31 €
1-3	60	61	74	195	53	248	78,9	12,40	147	48	101	32	179	18,20 €	1.240,70 €
1-4	60	63	67	190	27	217	73,1	13,40	148	43	70	29	177	18,70 €	1.177,31 €

Tabelle 65: Versuchsergebnisse und Kennzahlen auf dem Schlag Winkelfeld im Jahr 2021 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)

Winkelfeld 2021	N1/N2/N3			Düngung kg N/ha	Nmin kg N/ha	Nges. kg N/ha	Ertrag dt/ha	Protein %	Entzug HEP kg N/ha	Dünge- bilanz kg N/ha	N-Bilanz kg N/ha	Entzug NEP kg N/ha	Entzug ges. kg N/ha	Preis dt	Nkfl/ha
	80	50	0												
Homogen	80	50	0	130	85	216	107,6	11,95	194	-64	22	43	237	17,95 €	1.801,40 €
2-1	80	50	0	130	72	202	101,0	11,60	176	-46	26	40	217	17,60 €	1.648,23 €
2-2	80	50	0	130	89	219	109,9	11,90	197	-67	22	44	241	17,90 €	1.836,88 €
2-3	80	50	0	130	77	207	110,6	12,10	201	-71	6	44	246	18,05 €	1.865,89 €
2-4	80	50	0	130	97	227	105,9	12,00	191	-61	36	42	234	18,00 €	1.776,88 €
Landwirt	80	50	0	130	85	215	113,6	11,84	203	-72	13	45	248	17,84 €	1.896,22 €
2-1	80	47	0	127	72	199	117,5	12,00	212	-85	-13	47	259	18,00 €	1.987,07 €
2-2	80	45	0	125	89	214	115,8	11,60	202	-77	12	46	249	17,60 €	1.913,06 €
2-3	80	50	0	130	77	207	115,7	12,20	213	-83	-6	46	259	18,10 €	1.965,42 €
2-4	80	55	0	135	97	232	108,4	11,50	188	-53	44	43	231	17,50 €	1.761,32 €
Drohne	80	50	0	130	85	215	107,0	11,69	188	-58	27	43	231	17,69 €	1.762,33 €
2-1	80	46	0	126	72	198	105,5	11,00	175	-48	24	42	217	17,00 €	1.667,59 €
2-2	80	46	0	126	89	215	107,6	11,70	190	-64	25	43	233	17,70 €	1.779,06 €
2-3	80	50	0	130	77	207	108,4	12,20	199	-69	8	43	242	18,10 €	1.831,73 €
2-4	80	54	0	134	97	231	105,6	11,40	181	-47	50	42	223	17,40 €	1.703,26 €
NDVI	80	49	0	129	85	214	118,0	11,73	209	-79	5	47	256	17,73 €	1.963,24 €
2-1	80	50	0	130	72	202	104,7	11,10	175	-45	27	42	217	17,10 €	1.660,27 €
2-2	80	47	0	127	89	216	114,9	11,60	201	-74	15	46	247	17,60 €	1.895,51 €
2-3	80	49	0	129	77	206	124,7	11,90	223	-94	-17	50	273	17,90 €	2.102,98 €
2-4	80	51	0	131	97	228	119,6	12,00	216	-85	12	48	264	18,00 €	2.021,86 €

Tabelle 66: Versuchsergebnisse und Kennzahlen auf dem Schlag Waldacker im Jahr 2021 differenziert nach Teilflächen und untersuchten PF-Verfahren pro ha (eigene Berechnungen)

Waldacker 2021	N1/N2/N3			Düngung kg N/ha	Nmin kg N/ha	Nges. kg N/ha	Ertrag dt/ha	Protein %	Entzug HEP kg N/ha	Dünge- bilanz kg N/ha	N-Bilanz kg N/ha	Entzug NEP kg N/ha	Entzug ges. kg N/ha	Preis dt	Nkfl/ha
	45	100	65												
Homogen	45	100	65	210	71	281	95,1	13,04	186	24	95	38	224	18,52 €	1.551,04 €
3-1	45	100	65	210	83	293	77,6	13,40	157	53	136	31	188	18,70 €	1.241,59 €
3-2	45	100	65	210	75	285	115,0	12,82	222	-12	63	46	268	18,41 €	1.906,97 €
3-3	45	100	65	210	64	274	72,2	13,40	146	64	128	29	175	18,70 €	1.140,35 €
3-4	45	100	65	210	65	275	101,7	13,00	199	11	76	41	240	18,50 €	1.671,88 €
3-5	45	100	65	210	48	258	95,6	12,50	180	30	78	38	218	18,25 €	1.534,00 €
Landwirt	45	98	63	206	71	277	94,4	13,20	188	18	89	38	225	18,60 €	1.550,76 €
3-1	45	96	65	206	83	289	89,5	13,60	183	23	106	36	219	18,80 €	1.476,38 €
3-2	45	84	67	196	75	271	114,4	13,20	227	-31	44	46	273	18,60 €	1.932,73 €
3-3	45	111	56	212	64	276	69,6	12,90	135	77	141	28	163	18,45 €	1.072,41 €
3-4	45	99	60	204	65	269	97,0	13,00	190	14	79	39	229	18,50 €	1.589,88 €
3-5	45	110	65	220	48	268	91,5	12,80	176	44	92	37	213	18,40 €	1.463,93 €
Drohne	45	96	66	208	71	279	99,9	13,00	195	12	83	40	235	18,50 €	1.641,11 €
3-1	45	96	67	208	83	291	96,8	13,10	191	17	100	39	230	18,55 €	1.587,35 €
3-2	45	85	71	200	75	275	117,6	12,90	228	-28	47	47	275	18,45 €	1.969,90 €
3-3	45	104	57	206	64	270	75,2	13,16	149	57	121	30	179	18,58 €	1.191,76 €
3-4	45	102	65	212	65	277	98,2	12,60	186	25	90	39	226	18,30 €	1.586,08 €
3-5	45	107	65	217	48	265	93,2	13,60	191	26	74	37	228	18,80 €	1.534,21 €
NDVI	45	103	62	210	71	281	94,5	13,04	185	25	96	38	223	18,52 €	1.539,07 €
3-1	45	102	62	209	83	292	95,4	13,10	188	21	104	38	226	18,55 €	1.561,17 €
3-2	45	106	62	212	75	287	114,8	12,90	223	-11	64	46	269	18,45 €	1.905,25 €
3-3	45	112	59	216	64	280	59,5	13,10	117	98	162	24	141	18,55 €	887,76 €
3-4	45	98	65	208	65	273	95,7	13,01	187	20	85	38	226	18,51 €	1.562,95 €
3-5	45	100	65	210	48	258	64,5	13,30	129	81	129	26	155	18,65 €	992,93 €

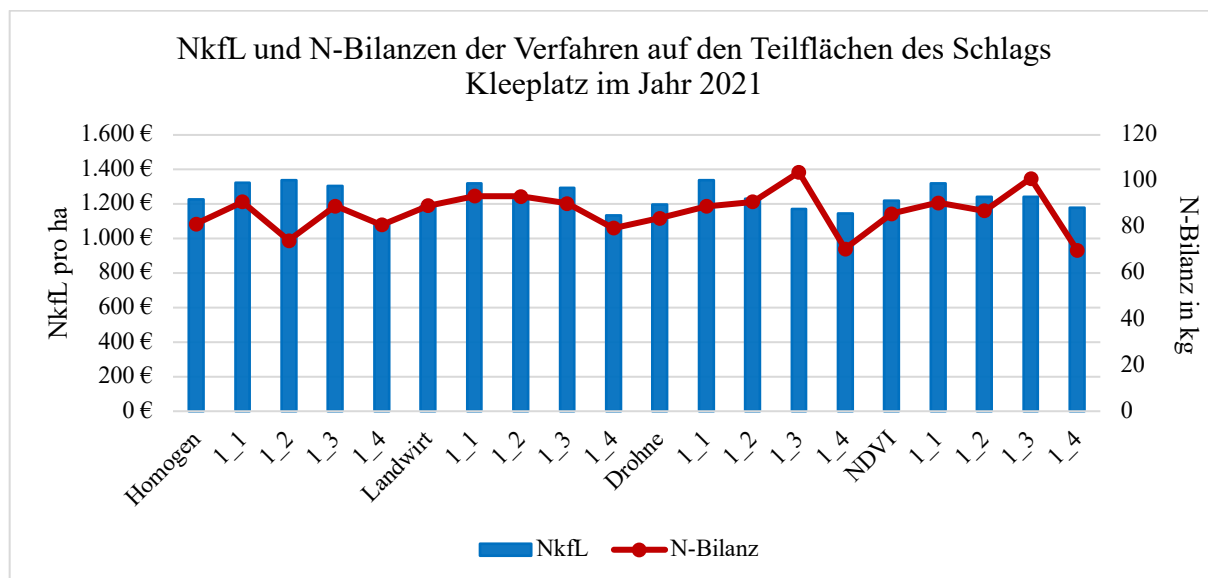


Abbildung 44: Nkfl und N-Bilanzen der untersuchten PF-Verfahren, getrennt nach Teilflächen und des Gesamtschlags Kleeplatz im Jahr 2021 (eigene Darstellung und Berechnungen)

Abbildung 44 stellt exemplarisch die auf dem Schlag Kleeplatz (2021) errechneten Nkfl und N-Bilanzen getrennt nach PF-Verfahren und Teilflächen dar (in Anhang 13 finden sich die zugehörigen Abbildungen der übrigen Versuchsschläge). Zudem sind die Werte für den Gesamtschlag aufgeführt. Es zeigt sich, dass die N-Bilanzen teilweise dem Trend der Nkfl folgen. Ob diese Beobachtung auch für die anderen Schläge bzw. den Gesamtversuch gilt, wird u.a. in der Varianzanalyse der Ergebnisse untersucht. Demnach würden die ökonomisch besten Verfahren die schlechtesten N-Bilanzen ergeben. Über alle Jahre hinweg zeigt sich, dass die Rangfolge der Standorte hinsichtlich der Erträge gleich ist. Standort 2 weist gefolgt von Standort 3 die höchste Ertragsfähigkeit auf. Vor dem Hintergrund einer niedrigeren N-Düngung aufgrund unterbliebener N3 ist diese Erkenntnis besonders hervorzuheben, unterstreicht sie doch die hohe Ertragsfähigkeit des Standorts. Ergänzend zur hohen bodenbedingten Ertragsfähigkeit begünstigt auf Standort 2 die langjährige organische Düngung mit Schweinegülle durch den verhältnismäßig hohen Viehbesatz des Betriebs im Vergleich zu den anderen beiden Betrieben das N-Nachlieferungsvermögen zusätzlich. Auffällig ist zudem, dass der N-Entzug einer größeren Schwankung unterliegt als die N-Düngung inkl. Nmin-Gehalt. Die Unterschiede des Proteingehalts, die einen entsprechenden Hebel für den N-Entzug darstellen, sind eine mögliche Begründung dafür. Dieser wird neben der N-Menge bei N3 außerdem durch die N-Mineralisation der (Teil-)Fläche beeinflusst, die über die aNMR geschätzt werden kann. Mit einer Varianzanalyse wird anschließend der Einfluss der PF-Verfahren auf die berechneten Kennzahlen untersucht. Die N-Bilanzen werden üblicherweise nur mit dem Entzug des HEP berechnet. Da auf den Versuchsschlägen in allen Jahren kein Stroh abgefahren wurde,

entspricht dies auch der N-Bilanz des Schlages. Es ist zu beachten, dass der geerntete Ertrag nur durch eine entsprechend vorhandene Biomasse der Weizenpflanze erzielt werden konnte (Assimilationsfläche) (siehe hierzu vergleichend Christen 2009, 54ff). Daher sagt die N-Bilanz zwar etwas über die Zufuhr oder Abfuhr von Stickstoff aus dem Boden-Pflanze-System aus, der im Stroh enthaltene Stickstoff hat jedoch eine ebenso große Bedeutung für die Ertragsfähigkeit. Die aNMR gibt einen Hinweis auf die Nettomineralisation und ist in den Tabellen 67 und 68 für die Jahre 2020 und 2021 aufgeführt. Im Jahr 2019 wurde keine Nmin-Untersuchung unmittelbar nach der Ernte durchgeführt, weshalb eine Berechnung der aNMR nicht möglich ist.

Tabelle 67: Berechnete aNMR für die Teilflächen der Versuchsschläge im Jahr 2020 in kg N/ha (eigene Berechnungen)

Schlag/TF	Nmin	N-Düngung	Nmin _{NE}	N-Entzug	aNMR
Hamchesberg					
1 1	35	177	45	230	64
1 2	16	183	45	161	7
1 3	12	182	81	146	33
Hinterm Hof					
2 1	44	101	17	157	29
2 2	32	100	22	171	61
2 3	44	99	24	194	76
24-Morgen					
3 1	38	205	27	204	-12
3 2	31	200	52	205	26
3 3	31	205	34	192	-10
3 4	15	205	40	166	-14

Tabelle 68: Berechnete aNMR für die Teilflächen der Versuchsschläge im Jahr 2021 in kg N/ha (eigene Berechnungen)

Schlag/TF	Nmin	N-Düngung	Nmin _{NE}	N-Entzug	aNMR
Kleeplatz					
1 1	55	191	47	213	14
1 2	45	190	49	213	26
1 3	53	192	61	211	27
1 4	27	190	55	198	37
Winkelfeld					
2 1	89	128	27	270	80
2 2	72	127	26	288	115
2 3	97	130	27	301	102
2 4	77	133	34	280	104
Waldacker					
3 1	83	208	73	252	33
3 2	75	205	96	318	133
3 3	64	212	60	189	-27
3 4	65	208	37	271	35
3 5	48	215	58	254	49

Nach Beisecker et al. (2015) müsste die aNMR bei Böden mit einem hohen N-Nachlieferungsvermögen (bspw. mit höherem Ton-Gehalt) höher sein als auf Standorten, die

über eine geringere N-Mineralisation verfügen. Eine Einschränkung ist hier die N-Zufuhr über die Düngung. Insbesondere bei unangepasster N-Düngung sind auch negative Werte für die aNMR möglich. Dies ist bspw. auf Standort 3 festzustellen. Die niedrigere N-Düngung auf Standort 2 aufgrund unterbliebener N₃ bewirkt höhere Werte. Damit werden auch die Ergebnisse von Beisecker et al. (2015) bestätigt, die bei geringerer N-Düngung höherer aNMR-Werte errechneten. Die Autoren stellten außerdem fest, dass der N-Saldo (hier Düngebilanz) ebenfalls einen großen Einfluss (60%) auf die Höhe der aNMR hat. Inwiefern hier ein Zusammenhang zwischen der Ertragsfähigkeit der Teilfläche und der daraus abgeleiteten N-Düngung besteht, kann nicht festgestellt werden. Allerdings können die teilflächenspezifischen und damit bodenabhängigen Unterschiede innerhalb eines Schlags durch die Boden- und Pflanzenuntersuchungen, Biomassekarten, Ertragskartierungen und ECa-Messungen nachgewiesen werden und bestätigen somit den Ansatz von Beisecker et al. (2015) hinsichtlich der aNMR. So ist bspw. die Differenz zwischen Minimum und Maximum auf dem Schlag Waldacker im Jahr 2021 bei 160 kg N/ha, die Standardabweichung kann mit 57,51 kg N/ha berechnet werden. Im Vergleich dazu liegt sie auf dem Schlag Kleeplatz im selben Jahr bei 9,22 kg N/ha. Dies bestätigt die Relevanz einer teilflächenspezifischen Betrachtung der N-Mineralisation. Der Zusammenhang zwischen den Teilflächen und den aNMR wurde nicht empirisch untersucht. Dagegen wurden die gemessenen Erträge, Kornqualitäten (mit Ausnahme von 2019) und Düngermengen sowie die sich daraus ableitenden N-Bilanzen und N-Entzüge einer zweifaktoriellen Varianzanalyse unterzogen, die nachfolgend vorgestellt und diskutiert wird.

8.4.2 Einfluss der Verfahren und Teilflächen auf die Ergebnisse des Feldversuchs – Varianzanalyse

Während für die Regressionsanalyse, die für die Schätzung der Ertrags- und Proteinfunktion herangezogen wurde, intervallskalierte Variablen notwendig sind, eignet sich die Varianzanalyse (ANOVA⁴³) auch bei nominalskalierten unabhängigen Variablen (UV). Sie untersucht demnach „die Wirkung einer (oder mehrerer) UV auf eine (oder mehrere) abhängiger Variablen (AV)“ (Backhaus et al. 2018, S. 164). Backhaus et al. (2018, S. 164) geben als Beispiel für eine ANOVA u.a. die Untersuchung der Wirksamkeit unterschiedlicher Düngemittel auf den Getreideertrag auf Feldern mit verschiedener Bodenbeschaffenheit an. Im Feldversuch wurde statt der Art der Düngemittel verschiedene Verfahren der Anpassung an

⁴³ ANOVA = engl. für Analysis of Variance

Bodenunterschiede als UV untersucht (in der ANOVA als „Varianten“ bezeichnet). Ergänzend kamen als UV die Bodenunterschiede selbst hinzu, die von den Teilflächen beschrieben werden. Als zu untersuchende AV wurden neben dem Kornertrag der Rohproteingehalt, die Höhe der N-Düngung, die Düngebilanz und N-Bilanz unter Berücksichtigung des Nmin-Werts sowie der N-Entzug (als Funktion aus Proteingehalt und Kornertrag) festgelegt. Da es zeitlich effizienter und für einen Vergleich übersichtlicher ist, bei mehr als einer UV gleichzeitig alle zu untersuchen, kann die ANOVA auf eine zweifaktorielle ANOVA erweitert werden. Mit dem verwendeten Statistik-Programm *SPSS* können so weitere Vorteile, wie bspw. Wechselwirkungen zwischen beiden UV oder die Verringerung nicht erklärter Varianz, erzielt werden (Backhaus et al. 2018, S. 175). Als Nullhypothese wurde definiert, dass die jeweilige PF-Variante bzw. die Teilfläche keinen Einfluss auf die Ausprägung der berücksichtigten AV haben. Bei einer Ablehnung der Nullhypothese unterscheiden sich die Ergebnisse abhängig vom eingesetzten PF-Verfahren oder der zugrundeliegenden Teilfläche. Die Stichprobe beinhaltet sämtliche punktuellen Ertragsdatensätze, denen mittels Spatial-Join die jeweilige N-Düngung und Kornqualität zugeordnet wurde. Anhand dessen konnten die N-Bilanzen, N-Entzüge und Nkfl berechnet und der Teilfläche bzw. der Variante zugeordnet werden. Die ANOVA wurde getrennt nach Versuchsschlag, für jedes Jahr und abschließend für den gesamten dreijährigen Feldversuch durchgeführt. Die Ergebnisse zwischen den Schlägen unterliegen starken Schwankungen. So konnten sowohl hohe Signifikanzwerte für die PF-Verfahren (Varianten) bei geringen Abweichungen des Mittelwerts als auch niedrige Signifikanzniveaus auf den Schlägen ermittelt werden (siehe Tabellen 65-68). Gleichzeitig zeigen sich auf anderen Schlägen große Unterschiede zwischen den PF-Verfahren. Die ANOVA des Gesamtversuchs zeigt durchweg hohe Signifikanzniveaus für alle untersuchten AV sowohl für die UV des Verfahrens als auch für die Teilflächen. Dabei ist das Erklärungsniveau (Eta-Quadrat⁴⁴) für die Teilflächen höher als für die Varianten, womit der Faktor Teilfläche einen höheren Varianzerklärungsanteil aufweist als der Faktor Variante. Die ökonomische Bedeutsamkeit der Ergebnisse wird dadurch unterstrichen, dass PF im untersuchten Modell keine Vorteile bringt. Vor allem die Annahme, dass für die Umsetzung von PF zusätzlich Investitionskosten beachtet werden müssten, unterstreicht die höhere Nkfl der homogenen Düngung zusätzlich, auch wenn der Unterschied zu Verfahren N mit 2,21 €/ha im Gesamtversuch ökonomisch vernachlässigbar wäre. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des

⁴⁴ Die Eta-Statistik gibt die Effektgröße bzw. Erklärungskraft der Faktoren im Hinblick auf die AV an. So hat bspw. eine UV bei einem partiellen Eta-Quadrat von 0,6 einen Varianzerklärungsanteil von 60%.

Levene-Tests⁴⁵ auf Gleichheit der Fehlervarianzen wird bei allen getesteten AV die Nullhypothese bestätigt. Somit ist mit der Varianzhomogenität eine Grundvoraussetzung der ANOVA nicht erfüllt (Backhaus et al. 2018, S. 195). Demgegenüber verweisen Schwarz et al. (2022) darauf, dass die ANOVA bei in etwa gleich großen Gruppen gegen diese Verletzung robust ist. Dies ist für den Faktor Variante der Fall. Da die Teilflächen unterschiedlich groß sind, sind auch die Gruppengrößen in diesem Fall unterschiedlich. Aus diesem Grund muss die Bewertung der ANOVA unter Berücksichtigung dieser Einschränkung erfolgen. Die Ergebnisse der ANOVA des Gesamtversuchs sind in Tabelle 69 aufgeführt, die der Versuchsjahre in den Tabellen 70-72. Die Ergebnisse der ANOVAs der Einzelschläge finden sich in Anhang 14. Abbildung 45 zeigt die dargestellten geschätzten Randmittel des Ertrags als AV für die beiden Faktorstufen Teilfläche und Variante auf der x-Achse für den Schlag Kleeplatz im Jahr 2021. Als Randmittel werden die Mittelwerte der Faktorstufen bezeichnet. Deren Darstellung ist eine einfache Methode, um mögliche Interaktionen zu prüfen. Verlaufen die Linien parallel, kann darauf geschlossen werden, dass keine Interaktionen vorliegen (Backhaus et al. 2018, 176f). Die in den Abbildungen dargestellten Linien verlaufen nicht parallel, weshalb zumindest auf eine schwache Interaktion zwischen den Teilflächen und den untersuchten Varianten (PF-Verfahren) geschlossen werden kann. Eine mögliche Begründung dafür ist, dass die PF-Verfahren zum Ziel haben, die Bestandsheterogenität, die sich u.a. aus der von den Teilflächen repräsentierten Standortheterogenität ergibt, zu berücksichtigen.

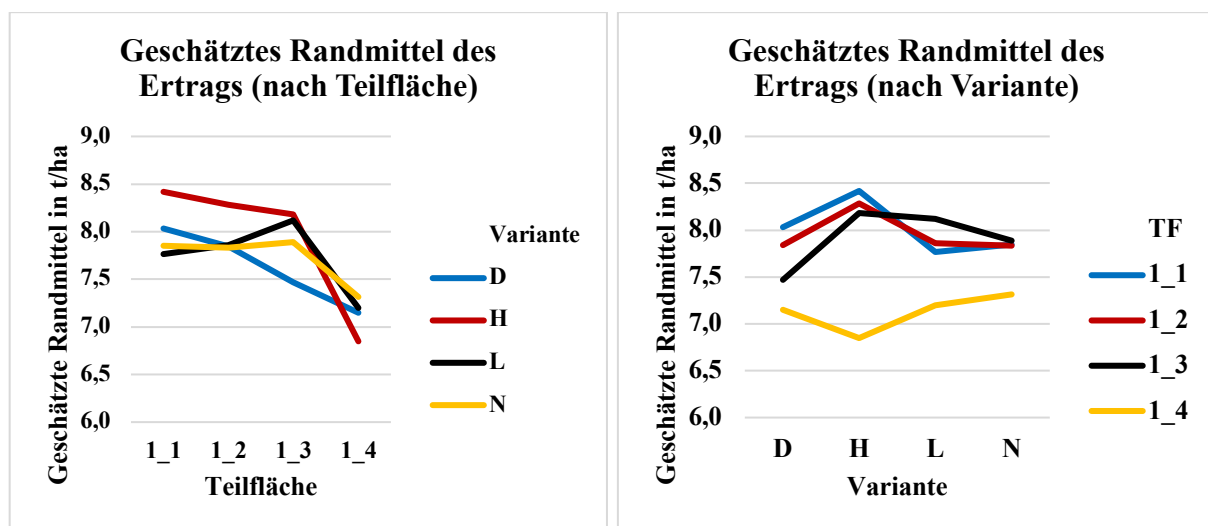


Abbildung 45: Geschätzte Randmittel für die Faktorstufen Teilfläche und Variante für den Ertrag in Tonnen t/ha als abhängige Variable auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2021 (bearbeiteter Auszug aus SPSS)

⁴⁵ Eine ANOVA setzt Varianzgleichheit bzw. Varianzhomogenität in den Faktorstufen (Gruppen) voraus. Dies kann über den Levene-Test überprüft werden, bei dem im Fall der Varianzhomogenität die Nullhypothese nicht abgelehnt wird (Backhaus et al. 2018, S. 195).

Tabelle 69: Ergebnisse der ANOVA des Gesamtversuchs und deskriptive Statistik des Faktors Variante mit n = 3.789 (eigene Darstellung der Analyseergebnisse aus SPSS)

Gesamt- Versuch 2019-2021	R ²	Levene- Test	Teilfläche		Variante		Variante* Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			p	Eta ²	P	Eta ²	P	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,667	0,000	0,000**	0,648	0,061	0,002	0,000**	0,116	90,31 (20,85)	89,73 (20,81)	88,00 (18,43)	91,19 (22,35)	89,83 (20,70)
Protein %	0,995	0,000	0,000**	0,995	0,000**	0,082	0,000**	0,908	11,94 (1,03)	11,87 (0,98)	11,94 (1,02)	11,76 (1,10)	11,88 (1,03)
N-Entzug kg N/ha	0,678	0,000	0,000**	0,657	0,004**	0,004	0,000**	0,130	162 (40)	160 (39)	158 (33)	161 (41)	160 (38)
N-Düngung kg N/ha	0,988	0,000	0,000**	0,986	0,000**	0,071	0,000**	0,714	171 (37)	176 (37)	176 (34)	173 (37)	174 (36)
Düngebilanz kg N/ha	0,825	0,000	0,000**	0,814	0,000**	0,005	0,000**	0,179	11 (50)	18 (56)	20 (50)	13 (54)	15 (53)
N-Bilanz kg N/ha	0,811	0,000	0,000**	0,794	0,001**	0,005	0,000**	0,180	56 (51)	62 (52)	65 (47)	58 (52)	60 (51)
NkFL €	0,481	0,000	0,000**	0,470	0,025*	0,002	0,000**	0,035	1.433,40 € (379,49 €)	1.412,22 € (380,80 €)	1.384,47 € (330,75 €)	1.431,19 € (400,82 €)	1.415,76 € (374,73 €)

Signifikanzniveaus der ANOVA: p≤0,05*, p≤0,01**

Tabelle 70: Ergebnisse der ANOVA des Feldversuchs im Jahr 2019 und deskriptive Statistik des Faktors Variante mit n = 450 (eigene Darstellung der Analyseergebnisse aus SPSS)

2019	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante* Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			p	Eta ²	p	Eta ²	P	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,521	0,000	0,000**	0,475	0,808	0,002	0,000**	0,139	88,31 (24,49)	86,90 (24,84)	84,77 (18,48)	85,44 (19,40)	86,36 (21,90)
N-Entzug kg N/ha	0,614	0,000	0,000**	0,576	0,643	0,004	0,000**	0,144	163 (58)	160 (53)	157 (40)	151 (39)	158 (48)
N-Düngung kg N/ha	0,988	0,000	0,000**	0,987	0,000**	0,260	0,000**	0,532	155 (52)	164 (54)	163 (51)	145 (54)	157 (53)
Düngebilanz kg N/ha	0,641	0,000	0,000**	0,611	0,187	0,012	0,000**	0,152	-8 (50)	4 (54)	6 (50)	-7 (49)	-1 (51)
N-Bilanz kg N/ha	0,856	0,000	0,000**	0,848	0,296	0,009	0,000**	0,154	75 (74)	84 (83)	91 (84)	66 (83)	79 (81)
Nkfl €	0,502	0,000	0,000**	0,450	0,776	0,003	0,000**	0,140	1.420,32 (459,29)	1.385,76 (443,21)	1.354,47 (331,00)	1.353,12 (330,79)	1.378,49 (394,50)

Signifikanzniveaus der ANOVA: p≤0,05*, p≤0,01**

Tabelle 71: Ergebnisse der ANOVA des Feldversuchs im Jahr 2020 und deskriptive Statistik des Faktors Variante mit n = 1.655 (eigene Darstellung der Analyseergebnisse aus SPSS)

2020	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante* Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			p	Eta ²	p	Eta ²	P	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,639	0,000	0,000**	0,619	0,001**	0,011	0,000**	0,097	88,00 (21,68)	85,99 (19,01)	85,23 (18,29)	89,11 (18,32)	87,10 (19,44)
Protein %	0,956	0,000	0,000**	0,936	0,000**	0,180	0,000**	0,857	11,23 (0,36)	11,25 (0,52)	11,33 (0,47)	11,06 (0,52)	11,22 (0,48)
N-Entzug kg N/ha	0,625	0,000	0,000**	0,607	0,000**	0,017	0,000**	0,097	149 (37)	145 (31)	145 (30)	148 (31)	147 (32)
N-Düngung kg N/ha	0,982	0,000	0,000**	0,979	0,000**	0,094	0,000**	0,792	174 (34)	184 (34)	186 (27)	179 (31)	181 (32)
Düngebilanz kg N/ha	0,690	0,000	0,000**	0,645	0,000**	0,034	0,000**	0,190	31 (38)	44 (37)	44 (35)	35 (28)	38 (35)
N-Bilanz kg N/ha	0,802	0,000	0,000**	0,772	0,000**	0,034	0,000**	0,190	48 (51)	60 (47)	62 (39)	53 (36)	55 (44)
Nkfl €	0,624	0,000	0,000**	0,604	0,000**	0,015	0,000**	0,091	1.341,95 € (370,94 €)	1.295,04 € (317,33 €)	1.288,18 € (306,81 €)	1.339,90 € (299,16 €)	1.316,52 € (325,84 €)

Signifikanzniveaus der ANOVA: p≤0,05*, p≤0,01**

Tabelle 72: Ergebnisse der ANOVA des Feldversuchs im Jahr 2021 und deskriptive Statistik des Faktors Variante mit n = 1.682 (eigene Darstellung der Analyseergebnisse aus SPSS)

2021	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante* Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			p	Eta ²	p	Eta ²	P	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,714	0,000	0,000**	0,699	0,221	0,003	0,000**	0,111	93,08 (18,57)	93,94 (20,72)	91,66 (17,95)	95,05 (26,06)	93,44 (21,02)
Protein %	0,996	0,000	0,000**	0,995	0,000**	0,389	0,000**	0,965	12,55 (0,56)	12,38 (0,59)	12,40 (0,72)	12,45 (0,66)	12,44 (0,64)
N-Entzug kg N/ha	0,659	0,000	0,000**	0,631	0,223	0,003	0,000**	0,137	175 (31)	174 (37)	170 (30)	177 (45)	174 (36)
N-Düngung kg N/ha	0,990	0,000	0,000**	0,990	0,000**	0,013	0,000**	0,334	171 (34)	171 (33)	169 (32)	174 (34)	171 (33)
Düngebilanz kg N/ha	0,863	0,000	0,000**	0,857	0,089	0,004	0,000**	0,156	-4 (54)	-3 (61)	-1 (52)	-3 (67)	-3 (59)
N-Bilanz kg N/ha	0,770	0,000	0,000**	0,755	0,089	0,004	0,000**	0,156	61 (40)	60 (47)	61 (37)	61 (55)	61 (45)
Nkfl €	0,718	0,000	0,000**	0,702	0,192	0,003	0,000**	0,125	1.524,83 € (341,23 €)	1.530,50 € (386,20 €)	1.487,89 € (323,72 €)	1.548,95 € (475,34 €)	1.523,40 € (385,44 €)

Signifikanzniveaus der ANOVA: p≤0,05*, p≤0,01**

Insgesamt zeigt sich eine hohe Modellgüte (R^2). Zwar ist diese für den Gesamtversuch niedriger als in den Einzeljahren. Dies kann aber mit der fehlenden Berücksichtigung der Einzeljahre als UV im Gesamtmodell begründet werden. Gleichzeitig schwankt die Modellgüte auch abhängig von der jeweils betrachteten AV. So liegt sie bei den direkt der N-Düngung unterliegenden AV höher als bspw. für den Ertrag und die Nkfl, die den Ertrag als Multiplikator enthält. Im Gesamtversuch liegt das Maximum der Modellgüte bei der ANOVA für den Proteingehalt als AV (Protein %) bei 99,5 %, während das geringste R^2 für die ANOVA der Nkfl mit 48,1 % angegeben wird.

Abgesehen von einigen Ausnahmen weist das Verfahren der homogenen N-Düngung sowohl für die ökologischen Kennzahlen (N-Bilanzen, Düngebilanzen, N-Düngung und N-Entzug) als auch für Ertrag, Proteingehalt und Nkfl die höchsten Mittelwerte auf. Zudem fällt auf, dass auch für das Verfahren N ähnliche Mittelwerte festzustellen sind. Demgegenüber fallen die beiden Verfahren L und D hinsichtlich der Mittelwerte ab. Insgesamt wird von einem nur geringen Einfluss der jeweiligen Verfahrensvarianten ausgegangen. Die Vermutung, wonach eine höhere N-Bilanz mit höheren Nkfl einhergeht, kann durch die Eta²-Werte nicht bestätigt werden. Für die Varianten im Gesamtversuch über alle drei Jahre sind hohe Signifikanzen zu erkennen. Dieser Trend kann nicht für alle Versuchsjahre bestätigt werden. Während im Versuchsjahr 2020 die Varianten hohe Signifikanzwerte aufweisen, ist in den Jahren 2019 und 2021 genau das Gegenteil der Fall. Dennoch eignen sich die Ergebnisse für den Gesamtversuch eine Rangfolge der Verfahrensvarianten bezüglich der untersuchten AV anzufertigen. Während für Ertrag, Protein, N-Entzug und Nkfl höhere Werte als positiv zu bewerten sind, ist dies für die N-Düngung und die Bilanzen genau gegensätzlich. Hier stellen möglichst niedrige Werte ein gutes Ergebnis dar und sind daher in der Rangfolge höher einzustufen.

Ertrag:	N	>	H	>	L	>	D
Protein:	H	=	D	>	L	>	N
N-Entzug:	H	>	N	>	L	>	D
N-Düngung:	H	>	N	>	L	=	D
Düngebilanz:	H	>	N	>	L	>	D
N-Bilanz:	H	>	N	>	L	>	D
Nkfl:	H	>	N	>	L	>	D

Bei der Varianzanalyse zum Proteingehalt zeigt sich der Verdünnungseffekt bei höheren Erträgen. So fällt der Proteingehalt im Verfahren N am niedrigsten aus, obwohl der Ertrag dort am höchsten ist. Umgekehrt ist der Proteingehalt bei Verfahren D am höchsten, obwohl der Ertrag am niedrigsten ist. Interessant ist, dass die Ergebnisse in Verfahren H nicht dieser Logik folgen, zumal hier auch die N-Düngung am niedrigsten ausfällt. Die in hohen Ertragsbereichen niedriger ausfallenden Proteingehalte werden durch eine unangepasste N-Düngung im niedrigen Ertragsbereich überkompensiert, wodurch es zu höheren Proteingehalten kommt. Die Verfahren der teilflächenspezifischen N-Düngung (L, D, N) bewirken weder eine niedrigere N-Düngung noch niedrigere N-Bilanzen (was für eine verbesserte N-Bilanz gesprochen hätte). Es können lediglich höhere Erträge durch die Nutzung von Biomassekarten auf Basis des NDVI (Variante N) erzielt werden, die sich aufgrund des niedriger ausfallenden Proteingehalts nicht in gleichem Maß auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens auswirken. Auffällig ist hingegen, dass die Verfahren, bei denen der Landwirt neben der Entscheidung über den Düngezeitpunkt, die durchschnittliche N-Menge und die Düngerform auch die räumliche Verteilung maßgeblich bestimmt (Verfahren L und D), schlechter abschneiden. Dies gilt sowohl für die ökologischen als auch die ökonomischen Kennzahlen des Gesamtversuchs. Der Nutzen von heuristischen Verfahren bezüglich einer teilflächenspezifischen N-Düngung kann somit durch den Verfahrensvergleich nicht bestätigt werden. Sie eignen sich nicht dazu, Bestandsheterogenität abzubilden und entsprechende Schlussfolgerungen für die räumliche Verteilung der N-Düngung zu treffen. Die homogene N-Düngung stellt ebenfalls einen heuristischen Ansatz der N-Düngung dar, auch wenn sie Bestandsheterogenität ignoriert. Die Annahmen über mögliche Einsparungen bei der N-Düngung oder eine höhere Wirtschaftlichkeit der N-Düngung durch einen teilflächenspezifischen Ansatz konnten durch den Versuch nicht bestätigt werden.

Während der Einfluss der Varianten auf die Varianz der untersuchten Stichprobe trotz der beschriebenen Tendenz zu Ungunsten der vom Landwirt beeinflussten Verfahren insgesamt als eher gering einzuschätzen ist, liegt das Signifikanzniveau der Teilflächen deutlich höher. Dies zeigen auch die Eta²-Werte, sowohl im Gesamtergebnis als auch in den einzelnen Versuchsjahren. Daraus wird geschlossen, dass die Teilflächen einen großen Einfluss auf die ökologischen Kennzahlen, wie bspw. die N-Bilanzen und die Wirtschaftlichkeit des Weizenanbaus haben. Dies zeigt sich u.a. hinsichtlich der Erträge aber auch bei den Nkfl. Gleiches gilt für die Kombination der beiden UV (Variante*Teilfläche), wobei die Eta²-Werte hier deutlich gegenüber der Teilfläche als UV abfallen. Dies bestätigt u.a. die Theorie der heterogenen Ertragsbedingungen und die entsprechende Gliederung der Teilflächen auf den Versuchsschlägen durch die Landwirte.

8.4.3 Optimale spezielle Intensität der N-Düngung

Aus der Kalibrierung der Produktionsfunktionen konnten für jede der Teilflächen und die Versuchsschläge Ertrags- und Proteinfunktionen bestimmt werden. Diese sind in den Tabellen 45-47 aufgeführt. Unter Berücksichtigung der Kosten für N-Dünger und des jeweiligen Weizenpreises kann für jede Funktion neben dem Ertragsoptimum auch die optimale spezielle Intensität berechnet werden. Da es sich um eine ex-post-Betrachtung handelt, sind die genauen Ertragsbedingungen auf dem Schlag bzw. der Teilfläche bekannt, eine langfristige Düngeempfehlung für den Landwirt kann aus der optimalen speziellen Intensität nicht abgeleitet werden. Dies gilt auch für einen risikoneutralen Landwirt, da dieser ebenfalls vorab Annahmen über die Ausprägung der Zufallsvariablen in seiner Entscheidung berücksichtigt. Die ex-post-Funktionen enthalten jedoch keine Unsicherheit über die Ausprägung der Umweltzustände, vielmehr führen diese zur dargestellten Input-Output-Beziehung zwischen Stickstoff und Weizenertrag. Für den Landwirt besteht nach Abschluss der Ernte lediglich Marktrisiko, sollte der abschließende Weizenpreis noch nicht abgesichert sein oder Lagerrisiko, wenn er einen Teil der Ernte einlagert (Vorratsschutz als Maßnahme, um Lagerrisiko zu senken). Hiervon wird an dieser Stelle nicht ausgegangen. Zudem enthalten die Funktionen auch die übrigen pflanzenbaulichen Entscheidungen des Landwirts, die die Ertragsfähigkeit beeinflussen (Pflanzenschutz, Sortenwahl, Bodenbearbeitung, Aussaat usw.). Eine zukünftige ex-ante-Betrachtung, bei der Unsicherheit über den Ertrag und die Marktsituation wiederum eine Rolle spielt, würde die Ausprägungen der dargestellten ex-post-Funktionen berücksichtigen und die angenommene Ertragsfähigkeit langfristig beeinflussen. Hintergrund ist, dass die Ertragssituation eines jeden Jahres in die durchschnittliche mehrjährigen Ertragserwartung des Landwirts für seinen Standort einfließt. Die Tabellen 69-71 geben neben den Optima auch die durchschnittlichen Erträge und Proteingehalte sowie die sich daraus ergebenden Nkfl an. Die Differenzen zwischen ökonomisch und physiologisch optimaler N-Düngung, die Heyn (2010) bzw. Beisecker et al. (2015) auf im Mittel ca. 25-30 kg N/ha beziffern, sind ebenfalls aufgeführt.

Tabelle 73: Vergleich zwischen der optimalen speziellen Intensität der N-Düngung, dem Ertragsoptimum und den Versuchsergebnissen für das Jahr 2019 sowie die Differenz zwischen Ertragsoptimum und optimaler spezieller Intensität (eigene Erhebungen und Berechnungen)

pro Hektar ha	Versuchsergebnisse				Optimale spezielle Intensität (osI)				Ertragsoptimum				ΔErtragsoptimum/ osI			
	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl
Kleeplatz	247	13,10	66,70	1.066,64 €	311	13,88	70,24	1.095,86 €	345	14,36	70,71	1.075,18 €	34	0,49	0,47	-20,68 €
1_1	272	13,10	66,56	1.094,76 €	314	14,00	69,01	1.099,62 €	379	14,90	70,47	1.061,71 €	66	0,90	1,46	-37,92 €
1_2	234	13,10	72,06	1.174,38 €	298	13,33	75,91	1.181,97 €	326	13,71	76,30	1.175,52 €	28	0,38	0,39	-6,46 €
1_3	252	13,10	67,36	1.108,12 €	317	13,92	70,80	1.108,87 €	352	14,42	71,29	1.085,94 €	35	0,50	0,49	-22,92 €
1_4	233	13,10	62,61	1.014,26 €	293	13,90	65,87	1.016,10 €	325	14,39	66,31	995,88 €	32	0,49	0,45	-20,22 €
Siedlung	202	9,50	96,64	1.522,75 €	300	10,66	102,30	1.519,78 €	282	10,41	102,56	1.516,44 €	-17	-0,24	0,27	-3,34 €
2_1	214	9,50	98,53	1.571,03 €	317	10,83	104,02	1.559,93 €	298	10,56	104,31	1.556,26 €	-19	-0,26	0,29	-3,67 €
2_2	180	9,50	93,00	1.400,69 €	222	9,76	97,55	1.431,35 €	252	10,14	98,46	1.430,45 €	29	0,38	0,91	-0,90 €
Waldacker	345	13,90	94,00	1.579,06 €	393	14,31	97,60	1.599,32 €	481	15,23	99,91	1.555,34 €	88	0,91	2,31	-43,98 €
3_1	343	13,90	88,65	1.474,78 €	385	14,53	91,38	1.484,09 €	478	15,55	93,82	1.437,73 €	93	1,02	2,44	-46,36 €
3_2	400	13,90	103,99	1.771,43 €	450	14,52	107,26	1.783,55 €	558	15,53	110,10	1.729,63 €	108	1,01	2,84	-53,92 €
3_3	335	13,90	95,17	1.599,31 €	385	14,17	98,69	1.616,38 €	467	15,02	100,86	1.575,18 €	82	0,85	2,17	-41,20 €
3_4	315	13,90	99,57	1.682,07 €	393	14,00	104,64	1.700,52 €	439	14,48	105,46	1.669,57 €	46	0,48	0,81	-30,95 €
3_5	320	13,90	85,64	1.424,82 €	363	14,40	88,48	1.436,21 €	447	15,36	90,69	1.394,28 €	84	0,96	2,21	-41,93 €

In den N-Mengen sind auch die jeweiligen Nmin-Werte enthalten.

Tabelle 74: Vergleich zwischen der optimalen speziellen Intensität der N-Düngung, dem Ertragsoptimum und den Versuchsergebnissen für das Jahr 2020 sowie die Differenz zwischen Ertragsoptimum und optimaler spezieller Intensität (eigene Erhebungen und Berechnungen)

pro Hektar ha	Versuchsergebnisse				Optimale spezielle Intensität (osI)				Ertragsoptimum				ΔErtragsoptimum/ osI			
	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl
Hammchesb.	198	11,38	81,30	1.233,96 €	235	12,04	83,10	1.281,18 €	242	12,17	83,13	1.280,62 €	7	0,13	0,04	-0,56 €
1_1	210	11,19	110,53	1.724,99 €	258	12,01	112,62	1.804,74 €	256	11,98	112,62	1.803,72 €	-2	-0,03	0,00	-1,02 €
1_2	196	11,09	77,38	1.142,93 €	238	13,09	78,88	1.240,49 €	239	13,10	78,88	1.240,49 €	1	0,02	0,00	0,00 €
1_3	193	11,68	67,13	1.005,91 €	229	13,24	68,54	1.059,06 €	236	13,40	68,57	1.058,58 €	7	0,16	0,03	-0,48 €
Hinterm Hof	139	10,32	89,17	1.356,00 €	201	11,95	89,24	1.440,43 €	170	11,05	90,89	1.419,53 €	-31	-0,90	1,65	-20,89 €
2_1	144	10,18	81,32	1.216,16 €	204	11,68	81,63	1.283,43 €	175	10,90	82,82	1.268,51 €	-28	-0,78	1,19	-14,92 €
2_2	131	10,54	85,89	1.321,45 €	183	12,00	86,47	1.405,10 €	160	11,29	87,48	1.384,19 €	-23	-0,71	1,01	-20,92 €
2_3	143	10,37	98,83	1.518,95 €	206	12,00	98,86	1.617,43 €	175	11,11	100,66	1.591,35 €	-31	-0,89	1,80	-26,07 €
24-Morgen	238	11,25	92,00	1.380,23 €	288	12,00	93,78	1.431,37 €	290	12,04	93,79	1.430,83 €	3	0,04	0,00	-0,54 €
3_1	243	11,38	96,50	1.472,21 €	287	12,03	98,24	1.520,79 €	297	12,19	98,30	1.519,81 €	10	0,16	0,06	-0,98 €
3_2	233	11,04	99,01	1.484,83 €	295	12,00	100,79	1.549,84 €	285	11,82	100,87	1.543,79 €	-10	-0,18	0,08	-6,04 €
3_3	236	11,25	91,33	1.370,50 €	285	12,00	93,04	1.420,28 €	288	12,05	93,04	1.419,72 €	3	0,05	0,01	-0,57 €
3_4	220	11,25	78,89	1.155,99 €	266	12,00	80,34	1.195,32 €	269	12,05	80,34	1.194,62 €	3	0,05	0,00	-0,70 €

Tabelle 75: Vergleich zwischen der optimalen speziellen Intensität der N-Düngung, dem Ertragsoptimum und den Versuchsergebnissen für das Jahr 2021 sowie die Differenz zwischen Ertragsoptimum und optimaler speziellen Intensität (eigene Erhebungen und Berechnungen)

pro Hektar ha	Versuchsergebnisse				Optimale spezielle Intensität (osI)				Ertragsoptimum				ΔErtragsoptimum/ osI			
	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl	kg N	Protein %	Ertrag dt	Nkfl
Kleeplatz	209	12,71	78,40	1.269,98 €	203	12,63	78,62	1.280,26 €	220	12,81	78,90	1.275,53 €	17	0,18	0,27	-4,72 €
1_1	221	12,33	83,47	1.343,80 €	206	12,18	83,18	1.353,72 €	223	12,35	83,47	1.348,89 €	17	0,17	0,28	-4,83 €
1_2	211	12,42	81,25	1.311,58 €	206	12,37	81,12	1.313,95 €	223	12,55	81,40	1.309,21 €	17	0,18	0,28	-4,74 €
1_3	243	12,44	76,09	1.178,80 €	200	11,99	77,39	1.245,87 €	208	12,07	77,46	1.242,16 €	8	0,07	0,07	-3,71 €
1_4	217	13,15	73,38	1.162,28 €	190	12,85	73,22	1.186,09 €	207	13,03	73,50	1.181,16 €	17	0,18	0,28	-4,93 €
Winkelfeld	215	11,81	107,47	1.815,59 €	261	12,21	110,66	1.826,92 €	277	12,36	110,86	1.823,42 €	15	0,15	0,21	-3,50 €
2_1	218	11,42	102,84	1.701,88 €	263	11,81	104,57	1.688,51 €	263	11,81	104,57	1.688,51 €	0	0,00	0,00	0,00 €
2_2	200	11,72	109,64	1.868,72 €	284	12,43	117,27	1.923,95 €	299	12,58	117,45	1.920,92 €	15	0,15	0,18	-3,03 €
2_3	227	12,11	111,56	1.900,26 €	260	12,39	113,37	1.900,46 €	274	12,53	113,57	1.897,16 €	15	0,14	0,19	-3,30 €
2_4	208	11,71	105,29	1.772,96 €	262	12,17	109,22	1.790,23 €	278	12,32	109,43	1.786,68 €	16	0,15	0,21	-3,56 €
Waldacker	274	13,07	93,14	1.495,70 €	215	12,50	95,33	1.594,77 €	231	12,63	95,60	1.590,12 €	16	0,13	0,27	-4,64 €
3_1	288	13,31	85,98	1.364,79 €	206	12,52	90,60	1.531,23 €	222	12,64	90,89	1.526,12 €	16	0,13	0,29	-5,10 €
3_2	279	12,95	107,75	1.764,09 €	233	12,54	108,56	1.825,31 €	248	12,66	108,79	1.821,32 €	15	0,12	0,23	-3,99 €
3_3	271	13,12	76,29	1.178,58 €	192	12,33	80,10	1.327,17 €	209	12,46	80,42	1.321,62 €	17	0,14	0,32	-5,55 €
3_4	270	12,94	98,53	1.592,41 €	221	12,49	99,45	1.658,17 €	237	12,62	99,70	1.653,82 €	15	0,13	0,25	-4,35 €
3_5	253	12,87	85,77	1.355,38 €	204	12,39	86,66	1.420,28 €	221	12,54	86,94	1.415,40 €	16	0,15	0,28	-4,88 €

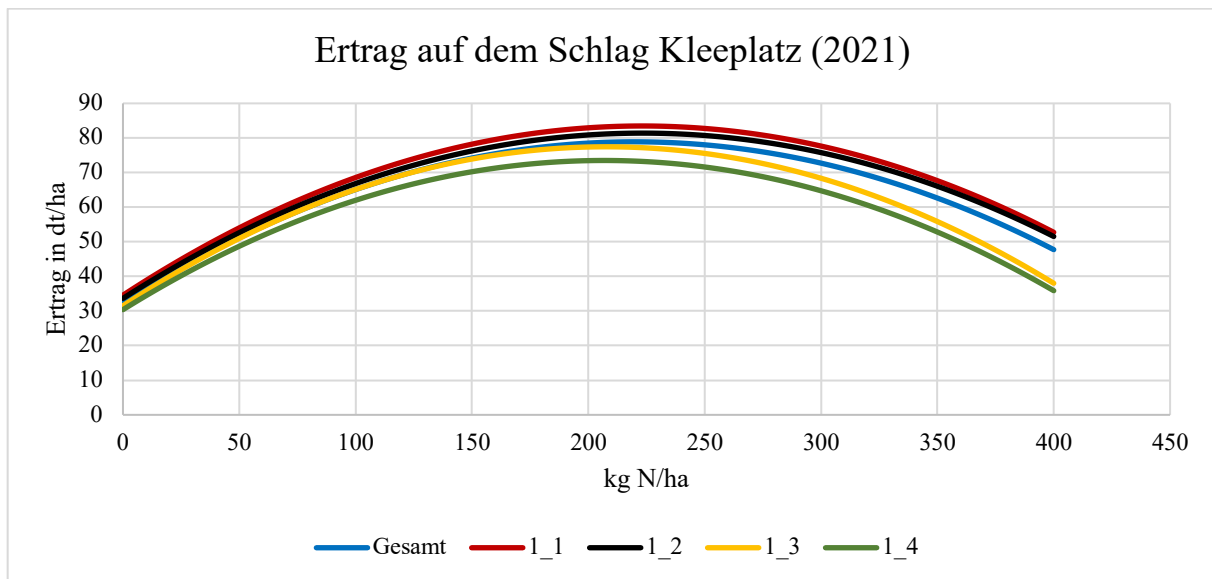


Abbildung 46: Grafischer Verlauf der ex-post-Ertragsfunktionen der Teilflächen auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2021 in Abhängigkeit der N-Düngung (eigene Darstellung und Berechnungen)

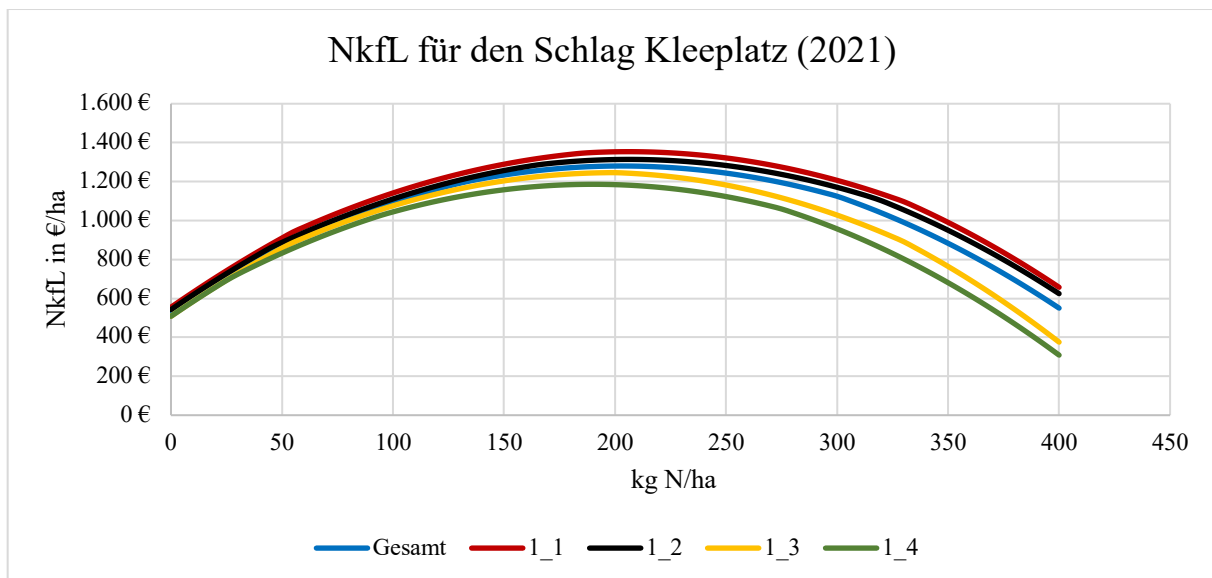


Abbildung 47: Grafischer Verlauf der ex-post Funktionen der N-kostenfreien-Leistung der Teilflächen auf dem Schlag Kleeplatz im Jahr 2021 mit linearem Verlauf des Weizenpreises (eigene Darstellung und Berechnungen)

Für den Versuchsschlag Kleeplatz im Jahr 2021 sind in Abbildung 46 die Kurven der Ertragsfunktionen der Teilflächen und des Gesamtschlags dargestellt. Abbildung 47 zeigt hierzu die unter der vorliegenden Preiskonstellation ermittelten Kurven der Nkfl, ebenfalls nach Teilflächen differenziert. Die Abbildungen der übrigen Schläge sind in Anhang 15 hinterlegt.

Im Mittel aller Versuchsjahre und aller Versuchsfelder hat sich gezeigt, dass die Erkenntnisse von Heyn (2010) und Beisecker et al. (2015) im Kern bestätigt wurden. So führt die ertragsoptimale N-Düngung zu einer im Mittel 19 kg N/ha höheren N-Düngung als die optimale spezielle Intensität. Allerdings sind hier Unterschiede vor allem zwischen den Versuchsjahren

und den drei Standorten aber auch innerhalb eines Schlages zwischen den Teilflächen festzustellen. So wäre auf der Teilfläche 2_2 des Schlages *Siedlung* eine um 29 kg N/ha höhere N-Düngung für eine ertragsmaximale Düngung nötig gewesen, während auf der anderen Teilfläche 2_1 sogar eine niedrigere N-Düngung (-19 kg N/ha) zum Ertragsoptimum geführt hätte (siehe hierzu Tabelle 73). Dies spricht für die Notwendigkeit einer differenzierten und teilflächenspezifischen Betrachtungsweise.

Es zeigt sich, dass überall dort, wo die ertragsoptimale N-Düngung unter der optimalen speziellen Intensität liegt, auch der Proteingehalt niedriger ist. Daraus wird geschlossen, dass die Berücksichtigung der Kornqualität (ausgedrückt durch den Proteingehalt) und deren Einfluss auf den Auszahlungspreis, auch über die ökonomisch optimale N-Düngung entscheidet. Kann bspw. ein höherer Auszahlungspreis erzielt und damit eine höhere Nkfl realisiert werden, so können die höheren Düngerkosten u.U. ausgeglichen werden. Die Berücksichtigung des Proteingehalts und dessen Einfluss auf den Auszahlungspreis trägt maßgeblich zur Optimierung der N-Düngung bei. An dieser Stelle sei nochmals auf die Annahme einer linearen Preisentwicklung verwiesen, die auch kleine Veränderungen des Proteingehalts in der Nkfl berücksichtigt und einpreist. Insbesondere die Schwelle zwischen Futter- und B-Weizen (12 % Proteingehalt) stellt in der Realität einen entscheidenden Preissprung (2,00 €/dt) dar, der in einer ex-ante-Betrachtung berücksichtigt werden würde. Im Jahr 2020 zeigt sich dies auch für die angenommene lineare Preisentwicklung. So erfordert die ökonomisch optimale N-Düngung hier für Standort 2 und in Teilen für Standort 3 eine höhere N-Düngung, die sich in einem höheren Proteingehalt äußert. Die ex-post-Betrachtung erlaubt keine Aussage über die zeitliche Verteilung der N-Düngung. So würde das Ziel eines höheren Proteingehalts nach Christen (2009, S. 118) eine erhöhte N3 verlangen, die zudem einen späteren Zeitpunkt als eine ertragsbetonte N3 erfordert. Eine Entscheidung hinsichtlich der zeitlichen Verteilung kann folglich aus den Ergebnissen nur bedingt abgeleitet werden. Zudem ergeben sich die jeweiligen Funktionen erst aus dem zeitlichen Verlauf der Witterungsbedingungen und der (Dünge-) Entscheidungen des Landwirts. Auffällig ist die verhältnismäßig geringe Ertragswirkung einer höheren N-Düngung mit Blick auf die Ertragsmaximierung. Dies spricht allgemein für einen flachen Kurvenverlauf der Ertragsfunktionen und beschreibt den abnehmenden Ertragszuwachs im Bereich der höheren N-Düngung. Keine Berücksichtigung fanden rechtliche Einschränkungen hinsichtlich der erlaubten N-Düngung nach der DüV, die die errechneten hohen N-Mengen im Optimum zum Teil nicht zulassen würde.

8.4.4 Ex-Ante-Produktionsfunktionen und Vergleich der statisch-naiven mit der risikobehafteten Betrachtungsweise

Ähnlich den ex-post-Funktionen der Teilflächen, wurde über das in Kapitel 8.2.6 vorgestellte Kalibrierungsverfahren für jeden Standort eine mittlere Ertrags- und Proteinfunktion ermittelt. Diese stellt die ex-ante angenommene Beziehung zwischen N-Düngung und Weizenertrag bzw. Proteingehalt dar. Aus der Bestimmung der mathematischen Optimierung der Funktionen kann unter Berücksichtigung des Preises für Stickstoff und dem qualitätsabhängigen Weizenpreis die optimale spezielle Intensität der N-Düngung ermittelt werden. Hierbei handelt es sich um eine mehrjährige Betrachtungsweise. Da für den Feldversuch nur die Jahre 2019-2021 betrachtet wurden, können auch nur diese Jahre in die mehrjährige Betrachtung eines ex-ante-Optimums eingebracht werden. Berücksichtigt man nun die Mittelwerte der Preise, ergibt sich eine statische Optimierung, die unterschiedliche Ausprägungen der Ertragsbedingungen und Marktsituationen ignoriert. Dieser Betrachtungsweise kann Naivität unterstellt werden, weshalb nachfolgend von einer statisch-naiven Betrachtungsweise gesprochen wird. Anders verhält es sich, wenn den Ausprägungen zu Erträgen, Proteingehalten sowie Weizenpreisen und Stickstoffkosten eine Zufallsverteilung unterstellt wird. Diese berücksichtigt explizit Unsicherheit über die konkrete Ausprägung der Zufallsvariablen und beeinflusst dahingehend auch die optimale spezielle Intensität der N-Düngung für den jeweiligen Standort. Für alle Zufallsvariablen wurde eine Normalverteilung unterstellt. Tabelle 76 führt hierzu die definierten Erwartungswerte μ und Standardabweichungen σ auf. Die Erwartungswerte ergeben sich aus den bisher verwendeten Mittelwerten der Preise, dem Durchschnitt der N_{\min} -Werte eines Standorts, sowie dem additiven Charakter des Faktors ε . Letzterer dient dazu, die mit einer Normalverteilung beschriebenen möglichen Abweichungen von der angenommenen Ertrags- und Proteinfunktion ex-ante zu berücksichtigen. Die Funktionen selbst entstammen den Annahmen über eine mittlere Funktion unter den untersuchten Versuchsjahren für jeden Standort. Die Marktsituation ergibt sich ebenfalls als Mittel der drei Versuchsjahre 2019-2021 und einer unterstellten Normalverteilung für Preise und Kosten.

Tabelle 76: Erwartungswerte und Standardabweichungen der Zufallsvariablen (eigene Erhebungen und Berechnungen)

	Standort 1			Standort 2			Standort 3			Marktsituation			
	N_{\min}	ε_Y	ε_P	N_{\min}	ε_Y	ε_P	N_{\min}	ε_Y	ε_P	q_N	p_{FW}	Δp_B	Δp_Q
μ	46	0	0	80	0	0	80	0	0	1,00	16,00	2,00	0,50
σ	29	11,72	0,73	38	10,23	2,87	54	1,97	1,23	0,20	2,00	0,20	0,20

N_{\min} in kg N/ha, ε_Y in dt/ha, ε_P in %, q_N in €/kg, p in €/dt

Anders als zuvor, wird für die ex-ante-Perspektive keine lineare Preisfunktion unterstellt. Stattdessen soll die stufenweise Preisfindung gelten, die auch in der Praxis besteht. Als Zufallsvariablen wurden für die höheren Qualitätsstufen (B-, A-, E-Weizen) nicht die Preise, sondern die jeweiligen Zuschläge Δp_B für B-Weizen und Δp_Q für A- und E-Weizen gewählt. Es gilt weiterhin die Annahme, dass die Zuschläge für A- und E-Weizen gleich sind. Der Preis für Futterweizen gilt bis zu einem Proteingehalt von 12 %. Ein Sonderfall stellt der Nmin-Wert dar. Steht für den Landwirt eine direkte Entscheidung über die N-Düngung bevor, so ist ihm der Nmin-Wert meistens durch Bodenproben oder veröffentlichte Daten der Officialberatung (LLH, Landwirtschaftskammern o.ä.) bekannt⁴⁶. Für eine mehrjährige Betrachtung können jedoch keine diskreten Nmin-Werte bestimmt werden, da dieser wesentlich von der Bewirtschaftung und den Ertragsbedingungen des Vorjahres sowie den aktuellen Witterungsverhältnissen beeinflusst wird. Zwar beeinflusst die vorliegende Bodenart die N-Mineralisation aufgrund des vorliegenden N-Pools, die absolute Höhe ist dennoch unsicher. Daher wird auch der Nmin-Gehalt einer Normalverteilung unterstellt.

Die Risikosimulation mit *@RISK* soll außerdem ermitteln, ob ein risikoaverser Entscheider anders entscheidet. Damit wird die Hypothese überprüft, dass risikoaverses Verhalten zu einer höheren bzw. überschüssigen N-Düngung und somit negativen Umweltwirkungen beiträgt. Hierzu wurden fünf verschiedene Niveaus der Risikoaversion untersucht: $c_1 = 0,001$, $c_2 = 0,005$, $c_3 = 0,01$, $c_4 = 0,02$, $c_5 = 0,035$. Monjardino et al. (2015) verweisen darauf, dass ein Risikoeffizient von $c \leq 0,035$ eine lediglich theoretische Option darstellt. Für einen risikoneutralen Entscheider liegt eine lineare Nutzenfunktion vor. Der Erwartungswert des Nutzens ändert sich nicht bei höherem Risiko, wenn der erwartete monetäre Gewinn gleichbleibt. Für ihn ist der Erwartungswert des Gewinns, in diesem Fall der Nkfl, die Zielgröße. Nachfolgend sind zunächst für die drei Standorte die statisch-naive, die risikoneutrale und die risikoaverse (in allen fünf Ausführungen) Optimierung tabellarisch dargestellt. Die Simulation erfolgt über mit *@RISK* über einen genetischen Approximationsprozess mit 5.000 Iterationen⁴⁷ und 500 Trials⁴⁸, was zu einer Gesamtheit von 2.500.000 Rechenoperationen für jede Zielgröße führt.

⁴⁶ Die DüV sieht vor dem Ausbringen wesentlicher Nährstoffmengen eine vorherige Ermittlung der im Boden verfügbaren Stickstoffmengen vor (siehe hierzu DüV).

⁴⁷ Eine Iteration beschreibt den Prozess des durch mehrfaches Wiederholen einer Operation Annähern an eine Lösung. In einer Risikosimulation wird eine Rechenoperation immer wieder ausgeführt und auf ein mögliches Optimum getestet (Vgl. Monte-Carlo-Simulation bei Churchman et al. 1971, S. 166ff).

⁴⁸ Ein Trial ist eine Rechenoperation innerhalb einer Iteration, die nach zuvor festgelegten Regeln wiederholt wird.

Tabelle 77: Ergebnisse der ex-ante-Optimierung unter Risiko für Standort 1 unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten)

1	risikoavers						
	statisch-naiv	risikoneutral	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
kg N	216	250	244	244	244	244	244
Y(N) dt	78,94	79,99	79,92	79,92	79,92	79,92	79,92
P(N) %	12,15	12,47	12,41	12,41	12,41	12,41	12,41
E(Preis)	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €
E(Nkfl)	1.250,80 €	1.202,05 €	1.199,77 €	1.198,78 €	1.199,51 €	1.200,54 €	1.199,54 €
σ Nkfl		246,62 €	241,60 €	242,76 €	242,34 €	242,44 €	242,39 €
E(U)			0,689970	0,995160	0,999931	0,999999	1,000000

Tabelle 78: Ergebnisse der ex-ante-Optimierung unter Risiko für Standort 2 unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten)

2	risikoavers						
	statisch-naiv	risikoneutral	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
kg N	249	249	248	248	248	248	248
Y(N) dt	108,36	108,36	108,36	108,36	108,36	108,36	108,36
P(N) %	12,00	12,00	11,98	11,98	11,98	11,98	11,98
E/Preis)	18,00 €	18,00 €	16,00 €	16,00 €	16,00 €	16,00 €	16,00 €
E(Nkfl)	1.781,68 €	1.706,62 €	1.709,27 €	1.706,35 €	1.706,64 €	1.707,90 €	1.705,06 €
σ Nkfl		300,36 €	293,51 €	306,87 €	305,42 €	309,79 €	302,43 €
E(U)			0,811180	0,999482	0,999999	1,000000	1,000000

Tabelle 79: Ergebnisse der ex-ante-Optimierung unter Risiko für Standort 3 unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten)

3	risikoavers						
	statisch-naiv	risikoneutral	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
N	274	308	308	308	308	308	308
Y(N) dt	96,57	97,85	97,85	97,85	97,85	97,85	97,85
P(N) %	12,23	12,49	12,49	12,49	12,49	12,49	12,49
E(Preis)	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €
E(Nkfl)	1.544,36 €	1.487,51 €	1.486,81 €	1.486,95 €	1.487,25 €	1.485,80 €	1.486,82 €
σ Nkfl		233,00 €	229,82 €	231,67 €	231,34 €	229,07 €	235,01 €
E(U)			0,767950	0,998900	0,999996	1,000000	1,000000

Die Ergebnisse der Simulation sind im Zielwert hinreichend stabil. Allerdings zeigt sich, dass es nicht nur einen Weg zu geben scheint, das Maximum zu erreichen. So schwankt die

simulierte N-Menge insbesondere bei höherer Risikoaversion teilweise bis zu 10 kg N/ha. Dies ist u.a. auf den Trade-Off zwischen einem höheren Ernteertrag und im Gegensatz dazu höheren Kosten durch die N-Düngung zurückzuführen. Da jedoch eine geringe Anzahl an Trials durchgeführt wurde, ist es sehr wahrscheinlich, dass die Abweichungen rein zufällig sind. Dafür sprechen auch die unplausiblen Ergebnisse der Simulation, wonach die Standardabweichung und der Erwartungswert der Nkfl für einen (zunehmend) risikoaversen Entscheider teilweise höher sind als für einen risikoneutralen Entscheider. Ob der Startwert der Simulation ebenfalls einen Einfluss auf die N-Menge hat, kann nicht festgestellt werden. Wichtig ist festzuhalten, dass das absolute Niveau der Ergebnisse plausibel ist, die Variation hinsichtlich der Risikopräferenz aber zufällig zustande kamen. Ein plausibler Unterschied hinsichtlich der optimalen N-Düngung abhängig von der Risikopräferenz des Entscheiders kann nicht festgestellt werden.

Auf allen Standorten zeigt sich, dass die Theorie einer höheren N-Düngung aufgrund von Risikoaversion nicht aufrechterhalten werden kann. Die Erwartungswerte der Nkfl sind insgesamt auf einem ähnlichen Niveau. Dies spricht nicht für einen beachtenswerten Unterschied. Vielmehr führt eine etwas niedrigere N-Düngung bei einem risikoaversen Entscheider zu einer um ca. 4 €/ha geringeren Standardabweichung der Nkfl. Dies bedeutet, dass eine niedrigere N-Düngung dem Entscheider eine höhere Ergebnissicherheit bietet. Zurückzuführen ist das u.a. auf die höhere Varianz des Ertrags und somit der Nkfl, die sich aus der höheren N-Düngung ergibt. Dies wird durch die Standardabweichung ausgedrückt. Unterschiede hinsichtlich des Grads der Risikoaversion bestehen hingegen nicht. Wenn auch die Art der Risikopräferenz keine Auswirkung auf die N-Düngung hat, so zeigt sich doch, dass die Berücksichtigung von Risiko zu einer veränderten Entscheidungssituation führt. Mit Ausnahme von Standort 2 führt die Berücksichtigung von variablen Preisen und Ertragssituationen zu einer höheren N-Düngung. Der Erwartungswert der Nkfl liegt unter dem Maximum einer statisch-naiven Betrachtungsweise. Auf Standort 2 unterscheidet sich die optimale N-Düngung der statisch-naiven nicht von der N-Düngung unter einer risikobewussten Betrachtungsweise. Lediglich der Erwartungswert der Nkfl liegt um ca. 75,00 €/ha niedriger als die statisch-naive Nkfl. Dies spricht dafür, dass das Marktrisiko auf diesem Standort ausschlaggebend für veränderliche Gewinne ist und das Produktionsrisiko einen geringen Teil der Unsicherheit ausmacht. Das zeigt sich u.a. auch an den relativ hohen gemessenen Erträgen bei vergleichsweise geringer N-Düngung während des Feldversuchs. Da es sich um eine Simulation von Zufallsvariablen handelt, sind bei gleichem Input (in diesem Fall N-Düngung) die Erwartungswerte der Zielgrößen selten exakt gleich. Gleiches gilt somit auch für die

Standardabweichung. Für den nur theoretisch existierenden Risikokoeffizienten c_5 zeigt sich, dass eine Veränderung des Inputs im Vergleich zu c_4 auch bei größerer Unsicherheit keinen veränderten Nutzen erwarten lässt, da das Nutzenniveau sich bereits zuvor $E(U) = 1$ annähert. Ein Unterschied ist nicht mehr mathematisch festzustellen. Die Beantwortung der Fragen zur anzustrebenden N-Düngung ergibt für eine statisch-naive Betrachtungsweise für Standort 1 216 kg N/ha, auf Standort 2 249 kg N/ha und auf Standort 3 274 kg N/ha. Während auf Standort 2 eine Berücksichtigung von Risiko die angestrebte N-Düngung nicht verändert, würde ein risikoneutraler Entscheider auf Standort 1 250 kg N/ha düngen. Ein risikoaverser Entscheider würde auf diesem Standort zwar eine um 6 kg N/ha geringere N-Düngung durchführen, was zu einer vernachlässigbaren Veränderung der Nkfl führen würde. Auf Standort 3 ist die anzustrebende N-Düngung eines risikoneutralen und -aversen Entscheiders mit 308 kg N/ha am höchsten. Die Differenz zwischen naiver und risikobewusster N-Düngung lässt auf ein höheres Produktionsrisiko für die Standorte 1 und 3 schließen. Dies ist neben den zeitlich variablen Umweltbedingungen u.U. auch auf die Standortheterogenität (räumlich variable Umweltbedingungen) zurückzuführen. Hier setzt üblicherweise PF an, um die räumlich variablen Umweltbedingungen im Entscheidungsprozess zur N-Düngung berücksichtigen zu können. Meist handelt es sich bei PF-Techniken um die Erfassung des Status-quo (Bestandsheterogenität) oder von Bodenbedingungen (Standortheterogenität) mit verschiedener technischer Ausgestaltung. Eine Aussage bezüglich der ex-ante optimalen speziellen Intensität kann daraus nicht direkt abgeleitet werden. Hierzu ist eine Trennung der erstellten ex-ante-Ertrags- und Proteinfunktionen in unterschiedliche Teilflächen auf dem jeweiligen Standort notwendig. Für den Standort 1 wird nachfolgend versucht, ex-ante-Funktionen für repräsentative Teilflächen auf dem Standort herzuleiten.

Zunächst ist eine Einteilung der im Versuch beteiligten Teilflächen erforderlich. Es gilt die Annahme, dass eine Teilfläche nur für ein Jahr gilt, auch wenn sie in zwei verschiedenen Versuchsjahren (Kleeplatz 2019 und 2021) beteiligt ist. Vereinfacht wird lediglich zwischen hoher und niedriger Ertragsfähigkeit der Teilflächen unterschieden, folglich werden jeweils zwei ex-ante-Funktionen für Ertrag und Proteingehalt ermittelt. Die Entscheidung über die Zuteilung der Teilfläche erfolgt über den Mittelwert der Erträge getrennt nach Versuchsjahr. Die Teilflächen, deren Ertragsmaximum größer-gleich dem Mittelwert sind, werden für die Herleitung der Funktion hohen Ertragsfähigkeit herangezogen, alle mit kleinerem Ertrag für die niedrige Ertragsfähigkeit. Aus der Zuteilung ergeben sich zwei Datensätze der Ertragsmesspunkte und Düngermengen die als Referenz für die ex-ante-Funktionen gelten. Die Kalibrierung erfolgt wiederum äquivalent der Vorgehensweise für die standortspezifischen ex-

ante-Funktionen. Als Ausgangssituation dient jeweils die die Ertrags- und Proteinfunktion des Jahres 2021, das als mittleres für den Standort beschrieben wurde. Aus der Kalibrierung ergeben sich die in Tabelle 80 aufgeführten ex-ante-Teilflächenfunktionen, verglichen mit der einheitlichen ex-ante-Standortfunktion. Die Grafen der drei Funktionen sind in Abbildung 48 dargestellt, die Funktion der Nkfl, welche sich aus der bestehenden Preiskonstellation ergibt, in Abbildung 49. Für die Standorte 2 und 3 sind die ex-ante-Funktionen und die zugehörigen Grafen in Anhang 16 aufgeführt (eine Optimierung unter Risiko wurde für die beiden weiteren Standorte nicht durchgeführt).

Tabelle 80: ex-ante-Ertrags- und Proteinfunktionen für Teilflächen mit hoher und niedriger Ertragsfähigkeit im Vergleich zu den standorteinheitlichen Funktionen (eigene Berechnungen)

	ex-ante-Ertragsfunktion			ex-ante-Proteinfunktion	
	a	b	c	α	β
Standort gesamt	33,27352297	0,366496995	-0,000718502	9,831172481	0,846078697
hoher Ertrag	39,01872162	0,455938253	-0,001017268	9,804131614	0,948337431
niedriger Ertrag	30,34636443	0,355693534	-0,000735176	9,959853146	0,675315927

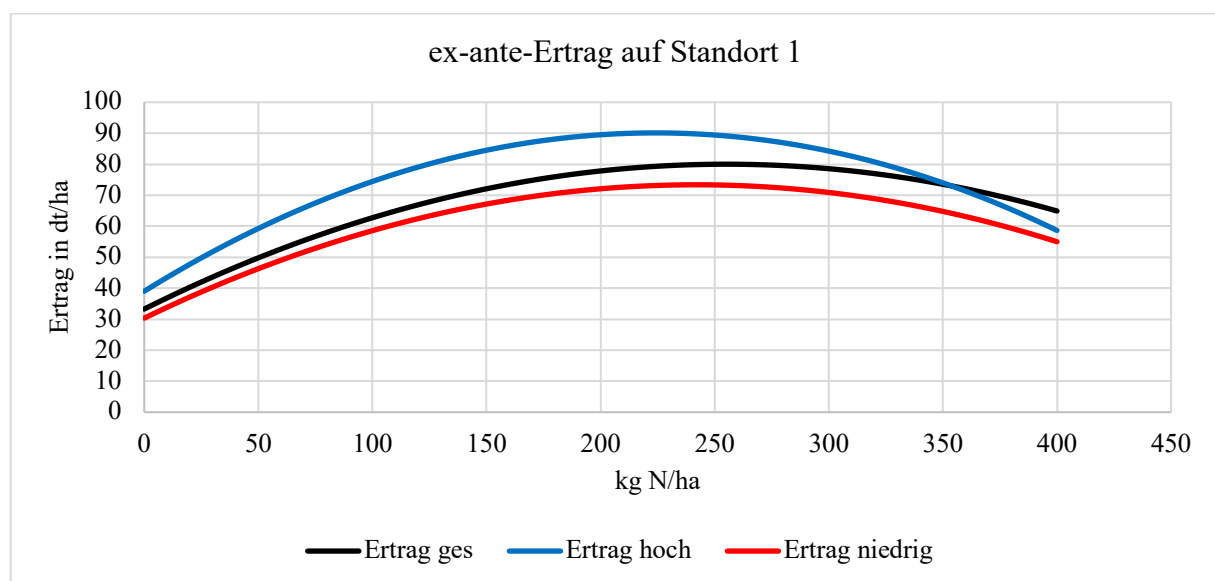


Abbildung 48: Grafischer Verlauf der ex-ante-Ertragsfunktionen auf Standort 1, differenziert nach Ertragsfähigkeit, und ertragsmaximale N-Düngung bei statisch-naiver Betrachtungsweise (eigene Darstellung und Berechnungen)

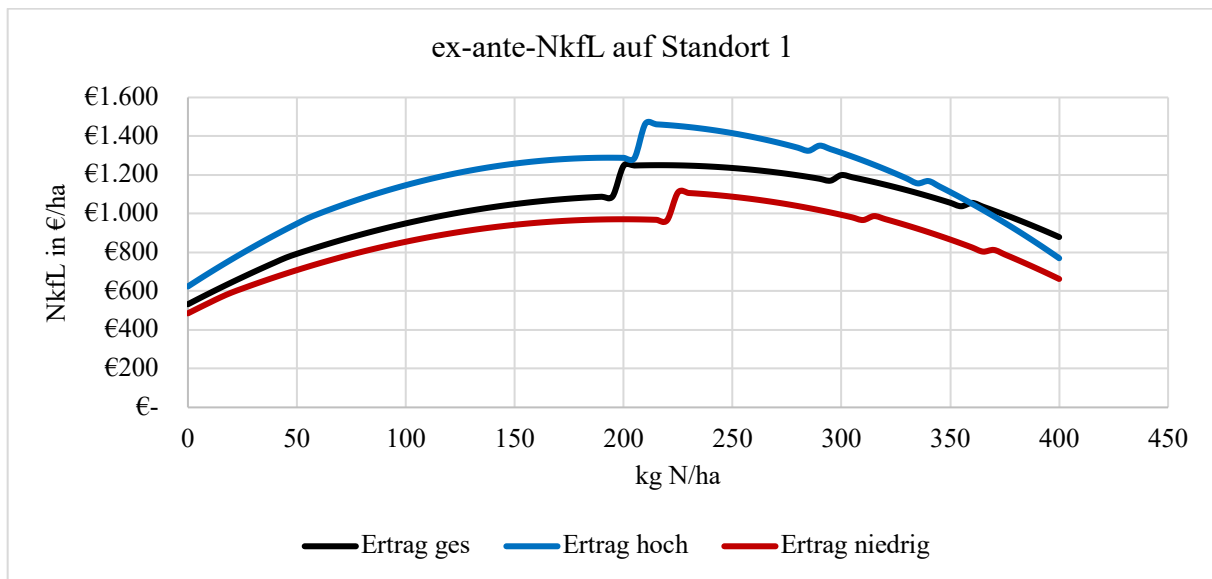


Abbildung 49: Grafischer Verlauf der ex-ante-Funktionen der N-kostenfreien-Leistung auf Standort 1, differenziert nach Ertragsfähigkeit, und optimale spezielle Intensität der N-Düngung bei statisch-naiver Betrachtungsweise (eigene Darstellung und Berechnungen)

Wie bereits für die drei Versuchsstandorte, können auch für die Teilflächen optimale spezielle Intensitäten hinsichtlich einer statisch-naiven und einer risikobewussten Betrachtungsweise errechnet werden. Während das Marktrisiko unverändert bleibt, ergeben sich bezüglich des Produktionsrisikos Veränderungen. Für den additiven Faktor ε der Normalverteilung bei Ertrag und Proteingehalt ist der Erwartungswert weiterhin $\mu = 0$, die Standardabweichung σ wird aus den Ertragsoptima der Teilflächen abgeleitet, die der hohen bzw. niedrigen Ertragsfähigkeit zugeordnet wurden. Gleiches gilt für den N_{min} -Wert, dessen Erwartungswert und Standardabweichung sich aus den Messwerten der Teilflächen ergibt. Auch hier sei darauf verwiesen, dass durch Bodenproben der jahresindividuelle N_{min} -Wert vorab ermittelt und in den Entscheidungsprozess integriert werden kann. Daher ist der normalverteilte N_{min} -Wert auch hier für einen langfristigen Entscheidungshorizont gedacht. Alle übrigen Annahmen und Voraussetzungen, wie bspw. die Preisermittlung und der Grad der Risikoaversion, bleiben auch für die teilflächenspezifische ex-ante-Optimierung bestehen.

Tabelle 81: Erwartungswerte und Standardabweichungen der Zufallsvariablen für die teilflächenspezifische ex-ante-Betrachtung (eigene Berechnungen)

	Standort 1 gesamt			hohe Ertragsfähigkeit			niedrige Ertragsfähigkeit		
	N_{min}	ε_Y	ε_P	N_{min}	ε_Y	ε_P	N_{min}	ε_Y	ε_P
μ	46	0	0	56	0	0	45	0	0
σ	29	11,72	0,73	18	16,32	0,82	34	5,22	0,74

N_{min} in kg N/ha, ε_Y in dt/ha, ε_P in %

Tabelle 82: Ergebnisse der ex-ante-Optimierung unter Risiko für die Teilflächen auf Standort 1 mit hohem Ertragspotenzial unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten)

hoher Ertrag	risikoavers						
	statisch-naiv	risikoneutral	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
N	208	228	224	218	218	211	211
Y(N)	89,84	90,09	90,11	90,07	90,07	89,94	89,94
P(N)	12,00	12,20	12,16	12,10	12,10	12,03	12,03
E(Preis)	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €
E(Nkfl)	1.465,36 €	1.386,49 €	1.384,92 €	1.381,33 €	1.379,25 €	1.376,36 €	1.380,48 €
σ Nkfl		308,56 €	307,62 €	312,96 €	306,76 €	314,71 €	310,93 €
E(U)			0,73783	0,99707	0,999973	0,999999	1,000000

Tabelle 83: Ergebnisse der ex-ante-Optimierung unter Risiko für die Teilflächen auf Standort 1 mit niedrigem Ertragspotenzial unter Berücksichtigung eines risikoneutralen und risikoaversen Entscheiders (mit verschiedenen Risikokoeffizienten) im Vergleich zur statisch-naiven Optimierung (mit @RISK errechnete Daten)

niedriger Ertrag	risikoavers						
	statisch-naiv	risikoneutral	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
N	242	231	230	230	222	213	206
Y(N)	73,37	73,29	73,27	73,27	73,09	72,74	72,41
P(N)	12,19	12,09	12,08	12,08	12,01	11,93	11,88
E(Preis)	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	18,00 €	16,00 €	16,00 €
E(Nkfl)	1.123,90 €	1.073,22 €	1.071,77 €	1.071,00 €	1.070,57 €	1.066,70 €	1.063,66 €
σ Nkfl		177,73 €	164,56 €	169,76 €	179,20 €	166,62 €	169,15 €
E(U)			0,652980	0,993349	0,999913	0,999999	1,000000

Auch hier zeigt sich, äquivalent zur Simulation der Gesamtstandorte, dass zwar die Zielwerte stabil sind, jedoch die N-Menge zur Erzielung der Erwartungswerte schwankt. Sowohl für die hohe als auch die niedrige Ertragsfähigkeit der Teilflächen gilt, dass die optimale N-Menge bei zunehmender Risikoaversion sinkt. Das entspricht auch der standorteinheitlichen Betrachtung. Außerdem fällt auf, dass die optimale N-Düngung für einen risikoneutralen Entscheider in beiden Fällen niedriger ist als auf dem gesamten Standort (228 kg N/ha und 231 kg N/ha im Vergleich zu 245 kg N/ha). Dies spricht für die Theorie einer geringeren Informationslücke hinsichtlich des Inferenzproblems des Pflanzenbaus. Die Unterteilung in Teilflächen mit unterschiedlicher Ertragsfähigkeit würde somit auf dem Standort 1 das Produktionsrisiko durch die Berücksichtigung räumlich variabler Umweltfaktoren bzw. der Standortheterogenität verringern. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass die Erwartungswerte der Nkfl auf einem vergleichbaren Niveau liegen. Zwar sinken sie leicht im realistischen Bereich der Risikoaversion, die Standardabweichung folgt jedoch nicht diesem Trend. Dies spricht für ein

zufälliges Zustandekommen der Differenzen von Erwartungswert und Standardabweichung der Nkfl und für ein einheitliches Niveau für die betrachteten Risikopräferenzen. Daraus folgt, dass, wie auch bei der ex-ante-Betrachtung der Standorte keine Unterschiede für eine optimale N-Düngung aufgrund der Risikopräferenz des Landwirts bestehen.

Es fällt weiterhin auf, dass sich die Proteingehalte und damit auch die Auszahlungspreise für beide Fälle im Bereich der Stufe zu B-Weizen (18,00 €/dt ab 12 % Proteingehalt) bewegen. Bei hoher Risikoaversion liegen sie sogar darunter, was sich jedoch nur unwesentlich auf den E(Nkfl) auszuwirken scheint. Dies widerspricht zunächst einem risikoaversen Verhalten des Entscheiders. Er müsste einen größeren Anreiz für das Erreichen des höheren Auszahlungspreises haben, da sich dies deutlich auf die Nkfl und deren Erwartungswert auswirken würde. Eine Erklärung für diesen Widerspruch könnte sein, dass das Marktrisiko von höheren Kosten der N-Düngung überwiegt. Eine Beispielrechnung für den Standort mit niedrigem Ertragspotenzial bietet Formel 22 mit zwei Düngeneiveaus. Während Formel 22a) zu einem Proteingehalt knapp unterhalb der Schwelle zu B-Weizen führt, zeigt Formel 22b) den Sprung der Nkfl bei einem Proteingehalt knapp oberhalb der Schwelle zu B-Weizen.

Formel 22: Beispielrechnung der Nkfl zweier Düngeneiveaus für eine Teilfläche mit niedrigem Ertragspotenzial auf Standort A in der ex-ante-Perspektive (eigene Herleitung)

Formel 22a) mit $N = 220$: $Y(200) = 73,02 \text{ dt/ha}$; $P(200) = 11,99 \%$; $N_{\min} = 45 \text{ kg N/ha}$

$$\text{Nkfl} = 16,00 \left[\frac{\text{€}}{\text{dt}} \right] \times 73,02 \left[\frac{\text{dt}}{\text{ha}} \right] - 175 \left[\frac{\text{kg N}}{\text{ha}} \right] \times 1,00 \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] = \underline{993,43} \left[\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right]$$

Formel 22b) mit $N = 225$: $Y(225) = 73,16 \text{ dt/ha}$; $P(225) = 12,04 \%$; $N_{\min} = 45 \text{ kg N/ha}$

$$\text{Nkfl} = 18,00 \left[\frac{\text{€}}{\text{dt}} \right] \times 73,16 \left[\frac{\text{dt}}{\text{ha}} \right] - 180 \text{ kg} \left[\frac{\text{N}}{\text{ha}} \right] \times 1,00 \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] = \underline{1.137,03} \left[\frac{\text{€}}{\text{ha}} \right]$$

Es zeigt sich, dass bei einer statisch-naiven Betrachtungsweise an diesem Punkt eine Erhöhung der N-Düngung um 5 kg N/ha zu einer um 143,60 €/ha höheren Nkfl führen würde, obwohl nur Mehrkosten von 5,00 €/ha entstehen. Eine Risikosimulation (gleiche Bedingungen wie für die Optimierung unter Risiko) gibt für $N = 220 \text{ kg N/ha}$ einen Erwartungswert der Nkfl von $E(\text{Nkfl}) = 1.068,61 \text{ €/ha}$ ($\sigma = 173,93 \text{ €/ha}$) und für $N = 225 \text{ kg N/ha}$ entsprechend $E(\text{Nkfl}) = 1.069,80 \text{ €/ha}$ ($\sigma = 173,65 \text{ €/ha}$) aus. Damit kann die Differenz zwischen den beiden Düngeneiveaus nicht bestätigt werden. Daher wird abschließend davon ausgegangen, dass für das beschriebene Optimierungsproblem kein Unterschied zwischen einem risikoneutralen und einem risikoaversen Entscheider besteht.

Ob eine Unterteilung in zwei Gruppen unterschiedlicher Ertragsfähigkeit ausreicht, um die Standortheterogenität hinreichend gut abzubilden, kann nicht abschließend festgestellt werden. Risikobewusste Entscheider (egal ob risikoneutral oder -avers) düngen unter den definierten Voraussetzungen *ceteris paribus* niedriger, wenn vorab unterschiedliche Ertragsfähigkeiten berücksichtigt werden, als wenn eine standorteinheitliche Betrachtungsweise gilt. Führt die Berücksichtigung von Risiko bei Teilflächen mit niedriger Ertragsfähigkeit zu einer geringeren N-Düngung als bei einer statisch-naiven Betrachtungsweise. Besonders interessant ist auch, dass die optimale spezielle Intensität der N-Düngung eines risikoneutralen Landwirts bei niedriger Ertragsfähigkeit nur um 3 kg N/ha unterhalb der N-Düngung bei hoher Ertragsfähigkeit liegt. Neben der Feststellung, dass bei geringerer Ertragsfähigkeit für das ökonomische Optimum eine höhere N-Düngung benötigt wird, ist sie dennoch vergleichbar. Es stellt sich daher die Frage, ob eine teilflächenspezifische N-Düngung überhaupt nötig ist und mögliche Investitionskosten für entsprechende Technik tatsächlich wirtschaftlich sind. Es drängt sich vielmehr die Theorie auf, dass eine teilflächenspezifische N-Düngung unter Berücksichtigung des N_{min} -Werts auch zu einer schlageinheitlichen N-Versorgung im Optimum führen kann, obwohl die Ertragsbedingungen gänzlich verschieden sind. Demnach unterscheidet sich die Begründung für eine Düngeentscheidung und ggf. deren zeitliche Verteilung. Die N-Summe hingegen bleibt gleich.

8.5 Diskussion der Ergebnisse und des Versuchs

Aus der Wirtschaftlichkeitsberechnung in Kapitel 7 konnten für unterschiedliche Betriebsgrößen unter den getroffenen Annahmen hinsichtlich N-Einsparungen und Ertrags- bzw. Qualitätssteigerungen *ceteris paribus* optimale Verfahren abgeleitet werden. Es hat sich bspw. gezeigt, dass ein heuristisches Verfahren unter Berücksichtigung der Erfahrungen des Landwirts bei der Anpassung an räumliche Variabilität technisch optimierten Verfahren auf kleinen Betrieben überlegen ist. Die angenommenen Einspareffekte oder Ertrags- und Qualitätssteigerungen konnten jedoch durch den Verfahrenvergleich des dreijährigen Feldversuchs nicht bestätigt werden. Vielmehr schnitten die Verfahren unter aktiver Teilnahme des Landwirts schlechter ab als die Verfahren, bei denen der Landwirt die räumliche Verteilung der N-Düngung nicht beeinflusst. Dies gilt sowohl für die ökonomischen Kennzahlen (Ertrag und Nkfl) als auch für die N-Effizienz (N-Bilanzen und N-Entzüge). Da N-Bilanzen die potenziell auswaschungsgefährdete N-Menge abschätzen können, geben sie eine Aussage über die Auswirkungen auf das Grundwasser. Niedrige N-Bilanzen, häufig auch N-Salden genannt, sind somit vorteilhaft. Auch aus ökonomischen Gründen sind niedrige N-Bilanzen anzustreben,

da sie die Ausnutzung von appliziertem N-Dünger abschätzen. Die homogene Düngung und die Düngung nach Applikationskarte ohne Beeinflussung durch den Landwirt sind somit als vorteilhaft für den Grundwasserschutz einzuordnen. Die besten Ergebnisse zeigte die homogene N-Düngung, die streng genommen auch eine Heuristik hinsichtlich der räumlich verteilten N-Düngung darstellt. Dennoch bestehen teilweise teilflächenspezifisch große Unterschiede innerhalb der Schläge. Dies zeigt sich sowohl hinsichtlich der Bodenuntersuchung auf Grundnährstoffe (P, K, Mg, pH) als auch an den Nmin-Werten zu Vegetationsbeginn und den Nährstoffgehalten der Pflanze während der Vegetationsperiode. Auch bezüglich der Erträge, der NkFL und der N-Bilanzen bestätigen die Varianzanalysen einen signifikanten Zusammenhang mit der jeweiligen Teilfläche. Dies gilt sowohl für die Einzelschläge als auch für die Versuchsjahre und den Gesamtversuch. Daraus kann grundsätzlich die Notwendigkeit einer teilflächenspezifischen Betrachtungsweise abgeleitet werden, auch wenn die untersuchten Verfahren einen Vorteil bezüglich der Nutzung von PF nicht bestätigen konnten. Das kann mehrere Gründe haben. Zunächst ist nicht auszuschließen, dass es aufgrund von vereinzelt Bewirtschaftungsfehlern zu Verzerrungen der Ergebnisse gekommen ist oder, dass ertragsrelevante Effekte nur stellenweise wirkten. Zwar konnten solche Effekte nicht beobachtet werden, auszuschließen ist dies jedoch nicht. Als wahrscheinlichere Ursache für den geringen Nutzen von PF im Verfahrenvergleich kann die Unterscheidung zwischen Standort- und Bestandsheterogenität aufgefasst werden. Während die vom Landwirt festgelegten Teilflächen die Standortheterogenität beschreibt, sollten die PF-Verfahren die Bestandsheterogenität abbilden. Offenbar vermischt der Landwirt hier sein Wissen über langfristige Standortheterogenität mit den aktuellen Ertragsbedingungen, bzw. ist nicht dazu in der Lage diese in entsprechende räumliche Entscheidungen zur N-Düngung zu überführen. Dies würde u.U. auf eine kognitive Überlastung im Sinne der cognitive load theory (Plass et al. 2010) hindeuten. Demnach kennen die Landwirte zwar ihre Flächen sehr gut, was auch die Qualität der von ihnen identifizierten Teilflächen belegt. Jedoch sind sie nicht dazu in der Lage daraus die richtigen Schlüsse für ihre N-Düngung unter Berücksichtigung der Bestandsheterogenität zu treffen. Dafür sprechen auch die ex-ante-Produktionsfunktionen der Teilflächen, die trotz unterschiedlicher Ertragspotenziale approximativ die gleiche Höhe zur N-Düngung (inkl. Nmin) empfiehlt. Dies sagt jedoch nichts über die optimale zeitliche Verteilung der N-Düngung aus, die trotz gleicher Gesamtmengen unterschiedlich sein könnten.

Mit Blick auf die zeitlich variablen Umweltfaktoren zeigt sich, dass deren Berücksichtigung die Qualität von Entscheidungsunterstützungssystemen verbessern würde. Die Ertrags- und Proteinfunktionen gehen nur von der gesamten N-Menge (inkl. Nmin) aus, ohne deren zeitliche

Verteilung zu berücksichtigen. Diese wird ausschließlich vom Landwirt bestimmt. Das Produktionsrisiko besteht neben den räumlich variablen Umweltfaktoren vor allem aufgrund der zeitlichen Variation von bspw. Niederschlagsmengen. Diese sind jedoch entscheidend für die Wirkung einer Düngemaßnahme. So sagt die Höhe der N-Düngung zunächst nichts über deren Wirkung auf die Qualität des Ernteguts aus, wenn die Höhe der N₃ nicht explizit berücksichtigt würde. An dieser Stelle weist der Versuch Schwächen auf, die nachträglich identifiziert wurden. Räumlich variable Umweltfaktoren in Form der Standortheterogenität können gut durch den Landwirt bestimmt werden. Eine Berücksichtigung zeitlich variabler Umweltfaktoren bei der Entscheidung über die Höhe und den Zeitpunkt der N-Düngung konnte über das vorliegende Versuchsdesign nicht bewertet werden. Die Analyse der Versuchsergebnisse lässt jedoch den Schluss zu, dass diese entscheidend für die Ausprägung der optimalen speziellen Intensität der N-Düngung ist. Dies geht u.a. auf die Unterscheidung von ex-ante und ex-post optimalen Bewirtschaftungsentscheidungen zurück. Demnach eignet sich eine risikobewusste Betrachtungsweise zwar dafür, mögliche Unsicherheiten über die Ausprägung der Ertragssituation zu berücksichtigen. Jedoch führt dies u.U. ex-post zu einer ineffizienten N-Düngung. Somit kann das Inferenzproblem des Pflanzenbaus durch PF nur bedingt gelöst werden. Für kleine und kleinstrukturierte Betriebe zeigt sich jedoch, dass das Wissen des Landwirts über die Standortheterogenität seiner Flächen auch bei der Ermittlung begleitender Daten (N_{min}, Grundnährstoffe, Nährstoffversorgung der Pflanzen) und zur Identifizierung von teilflächenspezifischen Produktionsfunktionen durchaus einen wertvollen Beitrag zu Optimierung von pflanzenbaulichen Produktionsprozessen leisten kann. Dies gilt nicht für die Berücksichtigung von Bestandsheterogenität bei der teilflächenspezifischen N-Düngung. Hier ist nach der Auswertung des Versuchs die homogene N-Düngung die vorteilhafte Alternative, insbesondere bei der Berücksichtigung von Implementierungskosten von PF. Berücksichtigt man die Bestandsheterogenität über satellitengestützte Applikationskarten (Verfahren N), können ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden. Allerdings müssen hierbei die höheren Verfahrenskosten berücksichtigt werden.

Neben den inhaltlichen Ergebnissen verbleiben auch für das methodische Vorgehen im Nachgang offene Diskussionspunkte. Von Bedeutung ist vor allem die geringe Heterogenität der N-Düngung, die eine plausible Herleitung von Ertrags- und Proteinfunktionen erschwert. Mit Hilfe von Annahmen über den Zusammenhang zwischen N-Düngung und Ertrag bzw. Proteingehalt außerhalb der tatsächlich durchgeführten Düngung wurden Funktionen geschätzt. Die Richtigkeit und Plausibilität dieser Funktionen voraussetzend wurden anschließend die Ergebnisse des Feldversuchs untersucht und bewertet und u.a. auch ex-ante-Funktionen

abgeleitet. Somit hängen auch alle Aussagen über den Nutzen von PF durch den Verfahrensvergleich und die Bewertung der Entscheidungen von der Richtigkeit dieser Annahme ab. Dennoch ist das vorgestellte Kalibrierungsverfahren für reale in der Praxis bestehende Optimierungsfragen eine Option, wenn ein N-Steigerungsversuch aus verschiedenen Gründen nicht durchgeführt wurde. Dies ist üblicherweise bei alltäglichen Bewirtschaftungsentscheidungen der Fall. Dennoch ist für eine optimale N-Düngung der Zusammenhang mit dem Ertrag von Belang und muss bspw. für die Integration in ein Entscheidungsstützungssystem zumindest heuristisch, bestenfalls mathematisch, abgebildet werden. Somit bietet das Verfahren eine Möglichkeit für jeden Standort bei geringer Datenbasis eine Schätzung der Ertrags- und Proteinfunktion mit dem Ziel einer ökonomischen Optimierung der Bewirtschaftung.

Für die Berücksichtigung eines normalverteilten Ertrags wurden für jeden Standort in der ex-ante-Perspektive ein additiver Zufallsfaktor berücksichtigt, der mögliche Abweichungen von der langjährigen mittleren Ertrags- und Proteinfunktion berücksichtigt. Dieser adressiert mathematisch aufgrund des additiven Charakters lediglich die Konstante der quadratischen Ertragsfunktion, nicht aber den (abnehmenden) Ertragszuwachs bei steigender N-Düngung. Eine Alternative zum additiven Faktor wäre ein multiplikativer Faktor gewesen, mit dem neben der Konstante auch der lineare, bei der Ertragsfunktion auch der quadratische, Funktionsparameter verändert worden wäre. Da im Ergebnis jedoch die mögliche Veränderung des Gesamtertrags und somit die optimale gesamte N-Düngung steht, reicht ein additiver Faktor hier aus. Bei einer berücksichtigten zeitlichen Verteilung der N-Düngung könnte ein multiplikativer Faktor möglicherweise zu genaueren Ergebnissen in der ex-ante-Perspektive beitragen.

9. Fazit

9.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Vor allem die Expertenbefragung I und II zielten auf die Beantwortung der ersten Forschungsfrage ab. Hierbei wurde untersucht, welche Rolle der Landwirt bei der Umsetzung von PF in seinem Betrieb spielt. Zudem wurden mit dem Praxisversuch Fragen nach dem ökonomischen und ökologischen Nutzen auch im Sinne einer grundwasserschutzorientierten N-Düngung behandelt.

- 1) Wieso setzen vor allem kleine und kleinstrukturierte Betriebe teilflächenspezifische Bewirtschaftung bzw. Düngung nur in geringem Maße ein?

Zur Beantwortung dieser Frage wurden zunächst Landwirte in einer kleinstrukturierten Ackerbauregion nach deren Einschätzungen zu PF befragt und wie bzw. ob sie gegebenenfalls PF auf ihrem Betrieb umsetzen. Aus den Antworten kann geschlossen werden, dass die Landwirte sich möglicher Heterogenität ihrer Flächen durchaus bewusst sind und diese in unterschiedlicher Weise berücksichtigen. Während vor allem innerhalb der Schläge eine Anpassung von Düngung, Aussaat und Bodenbearbeitung nur in geringem Umfang erfolgt, ist das Bild zwischen den Schlägen ein gegensätzliches. Aufgrund der geringen durchschnittlichen Schlaggröße wird daher auf eine Art strukturbedingtes PF geschlossen. Somit würde die Standortheterogenität durch die Schlaggrenzen hinreichend genau beschrieben und Entscheidungen der Bewirtschaftung nicht auf Teilflächen, sondern Schlägen angepasst werden. Innerhalb der Schläge wenden die Landwirte vereinfachte Entscheidungsregeln und Anpassungsmaßnahmen an, die nicht einer technischen Ermittlung der Heterogenität und Applikationssteuerung folgen. Solche Heuristiken werden vor allem bei der Bodenbearbeitung aber auch beim Einsatz von Wachstumsreglern und der N-Düngung genutzt. Als Grund für eine geringe Implementierung technisch aufwendiger Systeme des PF wird vor allem die Höhe möglicher Investitionskosten als Hindernis genannt. Pflanzenbaulicher und ökonomischer Nutzen von PF wird dennoch wahrgenommen. Vielmehr würde die Affinität der Landwirte zu technischen Innovationen eine Implementierung von PF begünstigen, wenn Investitionskosten amortisiert werden könnten. Vor allem Betriebe mit Fokus auf den Ackerbau haben eine positive Wahrnehmung von PF und nutzen bereits Heuristiken, um wahrgenommene Heterogenität zu berücksichtigen.

Die Expertenbefragung II zeigt, dass das Wissen des Landwirts als Heuristik zur Identifikation von Teilflächen vergleichbare Ergebnisse mit technischen Alternativen bietet. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Potenziale von Heuristiken für die Umsetzung von PF grundsätzlich vorhanden sind. Auch die Annahmen-basierte Rentabilitätsabschätzung kommt zu dem Schluss, dass unter bestimmten Voraussetzungen ein heuristisches Verfahren technisch aufwendigeren Systemen überlegen ist. Dies gilt insbesondere für geringere Betriebsgrößen, unabhängig vom erwarteten Reduktionspotenzial der N-Düngung. Umso erstaunlicher ist, dass die Ergebnisse durch den Praxisversuch nicht bestätigt werden konnten. Eine homogene N-Düngung hatte im Vergleich mit heuristischen Verfahren und einer angepassten Düngung mit einer Applikationskarte sowohl ökonomisch als auch ökologisch den größten Nutzen. Zwar kann die homogene N-Düngung auch als eine Art heuristisches Bewirtschaftungsverfahren

betrachtet werden (Heterogenität bleibt unberücksichtigt), jedoch stellt sie im untersuchten Verfahrensvergleich lediglich die Kontrollgruppe dar. Die Applikationskarte brachte ähnliche Ergebnisse, jedoch muss deren Anschaffung auf der Kostenseite berücksichtigt werden. Mit den Ergebnissen wird auch die zweite Forschungsfrage adressiert, die damit auch zum Teil beantwortet wird.

- 2) Welchen Beitrag leistet die Berücksichtigung von Heterogenität im Hinblick auf eine möglichst optimale N-Düngung aus ökonomischer und pflanzenbaulicher Sicht?

Der Zusammenhang zwischen der N-Düngung und dem Weizenertrag bzw. dem Proteingehalt kann mit mathematischen Funktionen dargestellt werden. Unter Berücksichtigung der qualitätsabhängigen Auszahlungspreise kann zudem die optimale spezielle Intensität der N-Düngung errechnet werden. Somit ergibt sich ein pflanzenbauliches Ertragsoptimum und ein ökonomisches Optimum. Die ex-post-Betrachtung erlaubt es, eine Funktion auf der Grundlage der tatsächlich eingetroffenen Ertragsbedingungen zu schätzen. Daraus können die ex-post-Optima für jede Teilfläche abgeleitet werden. Es wird deutlich, dass sich die optimale N-Düngung auf einem Schlag teilweise erheblich unterscheidet. Dies gilt sowohl für die ökonomische als auch die pflanzenbauliche Optimierung. Eine teilflächenspezifische Betrachtungsweise ist somit auch unter praktischen Bedingungen sinnvoll.

Die ex-post-Betrachtung lässt keine Aussage darüber zu, wie in der konkreten Entscheidungssituation optimal gehandelt werden soll, da sich das Optimum erst durch die jeweilige Ertragsfunktion und somit den tatsächlichen Ertragsbedingungen ergibt. Somit muss eine ex-ante-Funktion ermittelt werden, die unter Berücksichtigung von vorhandenem Wissen und Annahmen über die Ausprägungen der Zufallsvariablen während der Vegetationsperiode, eine optimale Entscheidung ergibt. Die optimale N-Menge unterscheidet sich dabei insbesondere hinsichtlich der Annahmen über Risiko. Während die statisch-naive Betrachtungsweise eine Abweichung von den getroffenen Annahmen ignoriert, berücksichtigt dies die risikobewusste Perspektive explizit. Das Resultat ist eine höhere N-Düngung, die u.U. ineffizient, weil zu hoch, sein kann. Dennoch ist die Intensität der N-Düngung zum Entscheidungszeitpunkt optimal. Bei höherer Ertragsfähigkeit des Standorts ist die Differenz zwischen den beiden Perspektiven auf die optimale N-Düngung geringer. Man kann daher auch von einer höheren Ertragssicherheit aufgrund günstiger klimatischer oder standortspezifischer Ertragsbedingungen (nFK, Bodenart, Nährstoffversorgung etc.) sprechen. Die Erkenntnisse der ex-ante-Betrachtungsweise kann auch auf die Berücksichtigung von typischen Teilflächen eines Standorts angewendet werden. Hier zeigt sich jedoch, dass trotz unterschiedlicher

Ertragsfähigkeit die optimale N-Düngung auch identisch sein kann. Daraus lässt sich ableiten, dass neben einer Berücksichtigung von räumlich variablen Umweltbedingungen auch die zeitliche Abfolge während der Vegetationsperiode von Belang für eine optimale N-Düngung ist. Da die absolute Höhe der N-Düngung nichts über deren zeitlicher Verteilung aussagt, kann darin eine entscheidende Fehlerquelle für die Entscheidung für ein optimales Verfahren liegen.

9.2 Diskussion und Schlussfolgerung

Neben quantitativen Ergebnissen aus dem Praxisversuch und der Expertenbefragung II liefert die Arbeit vor allem einen qualitativen Überblick über PF im kleinstrukturierten Ackerbau. Seither wird mit PF vor allem die technisch gestützte Anpassung der Applikationsmenge oder Bearbeitungsintensität an die Standort- bzw. Bestandsheterogenität. Es zeigt sich jedoch, dass der Landwirt als zentraler Entscheider unentbehrlich für die erfolgreiche Implementierung entsprechender Systeme ist. Damit wird die Einschätzung von Lindblom et al. (2017) hinsichtlich der Notwendigkeit der Integration des Landwirts in PF bestätigt. Darin wird ein wesentlicher Grund gesehen, weshalb die PF-Systeme vor allem auf kleinen Betrieben nur unwesentlich verbreitet ist (Paustian und Theuvsen 2016). Insbesondere der Ansatz eines strukturbedingten PF könnte die Sichtweise auf PF verändern. Die Ergebnisse des Feldversuchs können hingegen den Nutzen von PF nicht bestätigen. Vor allem heuristische Verfahren zur Erkennung von Bestandsheterogenität und daraus abgeleitete Entscheidungen zur N-Düngung konnten den erwarteten Nutzen nicht bestätigen. Der betriebswirtschaftliche Wert, der aus der Annahmen-basierten Rentabilitätsabschätzung hervorgeht, konnte somit nicht erreicht werden. Hierfür könnten mehrere Ursachen in Frage kommen. Die Vermutung liegt nahe, dass die getroffenen Annahmen über N-Einsparungen und Ertragssteigerungen unrealistisch waren, was die Annahmen von Gandorfer und Meyer-Aurich (2017) bezüglich einer problematischen Nutzenabschätzung von PF bestätigt. Dies kann auch in der Intension begründet sein, ein analoges biologisches System zu digitalisieren (Breunig et al. 2022). Eine andere wahrscheinliche Begründung könnte nicht in der Rentabilitätsabschätzung, sondern mit einer fehlerhaften Anlage des Praxisversuchs begründet sein.

- Verzerrung durch geringe räumliche Nähe des Entscheiders mit dem Autor (soziale Komponente)
- fehlerhafte oder ungenaue Teilflächen
- zeitversetzte Messpunkte des Ertrags oder Applikationssteuerung der Düngung
- Wechselwirkungen zwischen benachbarten Parzellen (bspw. Überlappungen)

Alle möglichen Ursachen können zu geringen Ungenauigkeiten bei der Zuordnung der Datenpunkte zu den verglichenen Verfahren führen, die sich in Summe deutlicher auf die Ergebnisse auswirken. Dennoch ist das Ergebnis der Varianzanalyse signifikant gegensätzlich zur ursprünglichen Hypothese der Vorzüglichkeit von PF. Die Unterscheidung zwischen Standort- und Bestandsheterogenität ist eine entscheidende Erklärung für diese Ergebnisse. Dies wird auch bei der Diskussion der Versuchsergebnisse in Kapitel 8 deutlich. Insgesamt zeigt sich, dass der Landwirt als Informationsquelle zwar entscheidend für die Identifikation von Standortheterogenität sein kann. Eine in-season Erfassung potenzieller Ertragsfähigkeit des Bestands und dahingehend optimale Entscheidungen aufgrund seiner Beobachtungen sind aber offenbar fehleranfällig und ungenau. Insgesamt spricht viel dafür, dass die Heterogenität der Flächen nur einen geringen Teil des Inferenzproblem des Pflanzenbaus ausmacht. Es wird deutlich, dass sowohl der Praxisversuch als auch die Rentabilitätsabschätzung dieser Komplexität nicht gerecht werden.

Ein Argument für einen stärkeren Fokus auf zeitlich variable Umweltfaktoren sind die unterschiedlichen optimalen N-Mengen einer ex-ante-Betrachtung im Vergleich zur ex-post-Perspektive. Wird zudem Risiko aufgrund einer unsicheren Marktsituation und Wachstumsbedingungen berücksichtigt, kann es ex-post zu einer Überdüngung kommen, was durch höhere N-Bilanzen die Auswaschungsgefährdung erhöht. Die Begründung einer Überdüngung aufgrund einer Orientierung am Ertragsoptimum, wie sie Beisecker et al. (2015) vermutet, hat demnach keine Berechtigung, da sie sich lediglich einer ex-post-Betrachtung bedient. Vielmehr müssten zeitlich variable Umweltfaktoren ebenfalls in Entscheidungssysteme integriert werden, um Düngezeitpunkte und -höhen zu optimieren und N-Bilanzen zu senken. Die Zufallsvariablen und deren Wechselwirkungen können aufgrund ihrer Komplexität nicht durch den Entscheider berücksichtigt werden. Aus diesem Grund müsste ein Entscheidungshilfesystem diese beinhalten, um dem Anspruch der Digitalisierung eines analogen und biologischen Prozesses gerecht zu werden. Dies ist durch die marktüblichen Verfahren bisher nicht möglich, weshalb über den Nutzen von PF seit Jahrzehnten kontroverse Diskussionen geführt werden. Folgende Attribute sollte ein solches System aufweisen:

- auf den Landwirt und dessen Kenntnisse und Anforderungen abgestimmtes System
- Einbeziehen und gegebenenfalls Digitalisierung von vorhandener Information
- Anspruch einer verbreiteten Implementierung
- Unterscheidung zwischen langfristiger Standort- und kurzfristiger Bestandsheterogenität auch im Hinblick auf die zugrundeliegenden Quellen
- stärkere Berücksichtigung erklärender Information und Ursachen von Heterogenität
- Integration von Sensoren und Messwerten von aktuellen und daraus abgeleitet erwartete kurz- und mittelfristiger Ausprägungen von Ertragsfaktoren (Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Niederschlagsmengen, Mikroklima, Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung etc.)
- Laufende Ermittlung des N-Bedarfs und teilflächenspezifische Betrachtungsweise und Applikationsmengen
- Adressierung von ökologischen Anforderungen durch den Anspruch von besseren N-Bilanzen durch eine genauere Ertragsabschätzung und daran orientierte N-Düngung

Das Ziel ist somit eine Weiterentwicklung von PF zu einer dynamischen N-Bedarfsermittlung unter Berücksichtigung aller relevanten Zufallsvariablen, in diesem Fall auch von räumlicher Variabilität differenziert nach Standort- und Bestandsheterogenität. Einen zugrundeliegenden mathematisch modellierten Zusammenhang zwischen Inputfaktoren und Ertrag können die kalibrierten Ertrags- und Proteinfunktionen beitragen. Somit ergibt sich standort- und teilflächenspezifisch zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt während der Vegetationsperiode für verschiedene Inputfaktoren, in diesem Fall für Stickstoff, eine mathematische Funktion. Diese kann auf Basis einer Referenzfläche und eines Referenzzeitraums mit dem vorgestellten Kalibrierungsverfahren hergeleitet werden. Dies leistet einen Lösungsbeitrag zum Inferenzproblem des Pflanzenbaus und der kontrovers diskutierte und unsicher abzuschätzende Nutzen von PF kann konkretisiert werden.

Zusammenfassung

Die vorgelegte Arbeit zeigt, dass der Landwirt als Entscheidungsträger tatsächlich eine wesentliche Rolle bei der Implementierung von PF auf den Betrieben ist. Da der Ackerbau auf den befragten Betrieben in Südhessen ganz unterschiedliche Rollen einnimmt, ist der Fokus der Landwirte darauf auch betriebsindividuell. Widererwartend spielen sozioökonomische Faktoren dabei nur eine untergeordnete Rolle und auch die Betriebsgröße hat einen geringeren Einfluss als die Annahme von Skaleneffekten bei der Investition in PF-Systeme aufgrund eines größeren Einsatzumfangs erwarten lässt. Insgesamt wird in der untersuchten Region PF kaum auf technischem Niveau umgesetzt, obwohl eine hohe Technologieaffinität besteht und die Bereitschaft zur Implementierung entsprechender Systeme unter der Voraussetzung von ökonomischem und pflanzenbaulichem Nutzen vorhanden ist. Als größtes Hindernis sehen die Teilnehmer der Umfrage vor allem hohe Investitionskosten. Die Expertenbefragung II bestätigt den Ansatz von Lorenz und Münchhoff (2015), die den Landwirt zusätzlich als Quelle wichtiger Hintergrundinformationen sehen. Damit treffen die Erkenntnisse von Heijting et al. (2011) und Fleming et al. (2000) hinsichtlich *farmer defined management zones* auch für die untersuchten Standorte in Südhessen zu. Der dreijährige Praxisversuch beschränkt den Landwirt als zuverlässige Informationsquelle auf die Wahrnehmung von Standortheterogenität. Geeignete Handlungsempfehlung für eine angepasste N-Düngung können durch die Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden. Als Ursache wird eine mögliche Vermischung von Wahrnehmung und Wissen in Betracht gezogen. Es zeigt sich, dass eine Weiterentwicklung von PF unter Einbezug von zeitlich variablen Umweltbedingungen zu besseren Ergebnissen führen würde. Dies geht auch aus dem Vergleich der Perspektiven auf die N-Düngung zwischen ex-ante- und ex-post-Betrachtung hervor. Den tatsächlichen Ertrags- und Proteinfunktionen in der ex-post-Betrachtung steht die ex-ante-Perspektive gegenüber, die sich aus Erfahrungen der Vergangenheit speist. Es zeigt sich, dass im Entscheidungsprozess die explizite Berücksichtigung von Risiko über Produktions- und Marktbedingungen die sinnvollere Bewertungsgrundlage für die N-Düngung darstellt, da nur dieses Wissen dem Landwirt zur Verfügung steht. Um seine Entscheidungen zu verbessern und das Inferenzproblem des Pflanzenbaus zu adressieren müssen Informationslücken geschlossen werden, die die Berücksichtigung von Heterogenität allein nicht vermögen. Dies gilt unabhängig vom eingesetzten Verfahren. Zwar kann der Landwirt mit der Aufteilung der N-Düngung in Gaben zu bestimmten Vegetationszeitpunkten der Entwicklung des Pflanzenbestands und dessen Ertragsfähigkeit begegnen und gegebenenfalls Anpassungen vornehmen, optimale Zeitpunkte und Höhen können jedoch nur zufällig ermittelt werden.

Summary

It turns out that the farmer, as a decision-maker, does indeed play a significant role in the implementation of precision farming (PF) on farms. In South Hesse, the farmer's focus on PF is very individual for each farm, depending on the context and extent of its use. Contrary to expectations, socio-economic factors play a minor role, and the size of the farm has less influence on the investment in PF systems than one would expect from economies of scale. Overall, the technical implementation of PF in the survey region is at a low level, despite of a generally high affinity to technology and willingness to implement such systems once economic and agronomic benefits can be expected. The participants of the survey see high investment costs as a major challenge. The expert survey II confirms the approach of Lorenz and Münchhoff (2015), who see the farmer as an additional source of important background information. Hence, the findings of Heijting et al. (2011) and Fleming et al. (2000) regarding management zones defined by farmers also apply to the study sites in South Hesse. The three-year on-farm experiment limits the farmer as a reliable source of information to the perception of site heterogeneity. Positive effects of a farmer's concrete recommendation in terms of site-specific nitrogen fertilization, resulting from his specific knowledge of the management zones, cannot be confirmed by the experimental results. One reason given for this circumstance is a potential mixture of perception and knowledge. It turns out that further development of PF involving temporally variable environmental conditions would lead to better results. These findings are supported by the results of the comparison of perspectives on nitrogen fertilization between ex-ante and ex-post considerations. The actual yield and protein functions in the ex-post perspective stand in contrast with the ex-ante perspective, which is based on past experiences and specific knowledge. It turns out that in the decision-making process the explicit consideration of risk through production and market conditions provides a more meaningful basis for evaluating nitrogen fertilization, as only this knowledge is available to the farmer. In order to improve his decisions and address the inference problem of plant cultivation, information gaps must be closed, which a site-specific approach alone cannot accomplish. This applies regardless of the method used. Although the farmer can address the development of the crop and its yield potential with the division of nitrogen fertilization into doses at certain vegetation stages and make adjustments if necessary, optimal timing and amounts can only be determined randomly.

Literaturverzeichnis

- Albers, H.-J.; May, H. (2008): Handbuch zur ökonomischen Bildung. 9. Aufl. München: Oldenbourg.
- Amberger, A. (1976): Die Verrottung von Getreide- und Maisstroh. Österreichischen Gesellschaft für Land- und Forstwirtschaftspolitik. Wien, 1976.
- Amelung, W.; Blume, H.-P.; Fleige, H.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I. et al. (2018): Scheffer/ Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Aufl. Berlin: Springer-Verlag.
- Aulbur, W.; Henske, R.; Uffelmann, W.; Schelfi, G. (2019): Farming 4.0: How precision agriculture might save the world. Precision farming improves farmer livelihoods and ensures sustainable food production. Hg. v. Roland Berger GmbH.
- Backhaus, K.; Erichson, B.; Plink, W.; Weiber, R. (2018): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 15. Aufl. Berlin: Springer Gabler.
- Baghdadi, N.; Mallet, C.; Zribi, M. (Hg.) (2018): QGIS and applications in agriculture and forest. 2. Aufl. London, Hoboken: ISTE; Wiley.
- Bamberg, G.; Coenenberg, A. G.; Krapp, M. (2008): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. 14. Aufl. München: Verlag Franz Vahlen.
- Barnes, A. P.; Soto, I.; Eory, V.; Beck, B.; Balafoutis, A.; Sanchez, B. et al. (2019): Exploring the adoption of precision agricultural technologies: a cross regional study of EU farmers. In: *Land Use Policy* 80, S. 163–174.
- Baumgärtel, G.; Scharpf, H.-C. (2002): Gute fachliche Praxis der Stickstoffdüngung. Bonn: AID.
- Bayrisches Landesamt für Steuern (2009): Merkblatt über den Aufbau der Bodenschätzung.
- Beisecker, R.; Piegholdt, C.; Seith, T.; Helbing, F. (2015): Abschätzung der standortspezifischen Stickstoffnachlieferung zur Optimierung der gewässerschonenden Stickstoffdüngung. Band 1: Kurzfassung. Hg. v. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V. IfÖL. Bonn.
- Berg, E. (2012): Der zustandsabhängige Ansatz in der mathematischen Optimierung. In: *German Journal of Agricultural Economics* 61 (1), S. 13–29.
- Berg, E.; Starp, M. (2006): Farm level risk assessment using downside risk measures. In: *Contributed paper prepared for presentation at the 26th international conference of the IAAE*.
- Beven, K. J.; Kirkby, M. J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. In: *Hydrological Sciences Bulletin* 24 (1), S. 43–69.
- Bischoff, W.-A.; Schwarz, A.; Puschner, C. (2017): Nitratbelastung in 5 Wasserschutzgebieten. Ableitung von Critical Loads und Handlungsoptionen mit statistischer Analyse von Bewirtschaftung und Naturraum. In: *Jahrestagung der DBG*.

- Bitkom e.V. (2016): Digitalisierung in der Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/Bitkom-Positionspapier-Digitalisierung-in-der-Landwirtschaft.pdf>.
- BMEL (2019): Ernte 2019. Mengen und Preise. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Berlin.
- BMEL (2020): Erntebericht 2020. Mengen und Preise. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Berlin.
- BMEL (2021): Erntebericht 2021. Mengen und Preise. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Berlin.
- Boenecke, E.; Lueck, E.; Rühlmann, J.; Gründling, R.; Franko, U. (2018): Determining the within-field yield variability from seasonally changing soil conditions. In: *Precision Agriculture* 19 (4), S. 750–769.
- Bohnenkamp, D.; Behmann, J.; Mahlein, A.-K. (2019): Felddetektion von Pflanzenkrankheiten des Weizens mit Hyperspektralsensoren. In: Leibniz-Institut für Agrartechnik und Biökonomie (Hg.): 25. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft. Bonn, 17.04.2019: Bornimer Agrartechnische Berichte, S. 39–43.
- Bongiovanni, R.; Lowenberg-Deboer, J. (2004): Precision Agriculture and Sustainability. In: *Precision Agriculture* 5 (4), S. 359–387.
- Borchardt, I.; Lubkowitz, C.; Kock, C.; Schäfer, B.; Müller, M. (2018): Abschlussbericht On-Farm-Research-Projekt (2007-2017). in Zusammenarbeit mit der Gutsverwaltung Helmstorf. Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein. Rendsburg.
- Bovensiepen, G.; Hombach, R.; Raimund, S. (2016): Quo vadis, agricola? Smart Farming: Nachhaltigkeit und Effizienz durch den Einsatz digitaler Technologien. Hg. v. PricewaterhouseCoopers AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (PwC).
- Breunig, P. (2022): Der Wirtschaftlichkeit auf der Spur. In: *DLG-Mitteilungen*, 2022 (7/2022), S. 18–20.
- Bundesamt für Justiz (1934): Bodenschätzungsgesetz - Gesetz zur Schätzung des landwirtschaftlichen Kulturbodens. BodSchätzG. Fundstelle: 610-8-5. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bodsch_tzg_2008/.
- Bundesministerium für Justiz (2017): Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV). DüV. Fundstelle: 7820-15-3.
- Christen, O. (2009): Winterweizen. Das Handbuch für Profis. 1. Aufl. Frankfurt: DLG-Verlag.
- Churchman, C. W.; Ackoff, R. L.; Arnoff, E. L. (1971): Operations Research. Eine Einführung in die Unternehmensforschung. Wien: R. Oldenbourg München.
- Claas (2021): CropView: 365Farmnet.
- Dammer, K.-H.; Ehlert, D. (2006): Variable-rate fungicide spraying in cereals using a plant cover sensor. In: *Precision Agriculture* 7 (2), S. 137–148

- DeLange, N. (Hg.) (2020): Geoinformatik in Theorie und Praxis. Grundlagen von Geoinformationssystemen, Fernerkundung und digitaler Bildbearbeitung. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Diepenbrock, W.; Ellmer, F.; Léon, J. (2016): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. 4. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.
- Dodel, H.; Häupler, D. (2010): Satellitennavigation. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag.
- Drücker, H. (2016): Precision Farming. Sensorgestützte Stickstoffdüngung. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- Eisenführ, F.; Weber, M. (2003): Rationales Entscheiden. 4. Aufl. Berlin: Springer-Verlag.
- Ewald, J.; Maart-Nölck, S. C.; Mußhoff, O. (2012): Messung der subjektiven Risikoeinstellung von Entscheidern: existieren Methoden- und Personengruppenunterschiede? In: *German Journal of Agricultural Economics* 61 (3), S. 148–161.
- Filippi, P.; Jones, E. J.; Wimalathunge, N. S.; Somarathna, P. D. S. N.; Pozza, Liana E.; Ugbaje, S. U. et al. (2019): An approach to forecast grain crop yield using multi-layered, multi-farm data sets and machine learning. In: *Precision Agriculture* 20 (5), S. 1015–1029. DOI: 10.1007/s11119-018-09628-4.
- Fleming, K. L.; Westfall, D. G.; Wiens, D. W.; Brodahl, M. C. (2000): Evaluating Farmer Defined Management Zone Maps for Variable Rate Fertilizer Application. In: *Precision Agriculture* 2 (2), S. 201–215. DOI: 10.1023/A:1011481832064.
- Frambach, H. (2019): Basiswissen Mikroökonomie. 5. Aufl. München: UVK Verlag.
- Franz, S. (2004): Grundlagen des ökonomischen Ansatzes: Das Erklärungskonzept des Homo Oeconomicus. Working Paper. Universität Potsdam, Potsdam. Institut für Makroökonomie.
- Gandorfer, M.; Meyer-Aurich, A. (2017): Economic potential of site-specific fertiliser application and harvest management. In: S. M. Pedersen und K. M. Lind (Hg.): *Precision Agriculture: Technology and economic perspectives*. 1. Aufl. Cham: Springer, S. 79–92.
- Gebauer, W.-G.; Pfister, P.; Schaaf, H.; Homm-Belzer, A.; Fischer, S. (2019): Humus - Chancen und Risiken für den Grundwasserschutz (Ergebnisse aus der Praxis). In: VDLUFA (Hg.): *Verbraucherschutz als Herausforderung für die landwirtschaftliche Produktion*. 131. VDLUFA-Konkress. Gießen, S. 56–67.
- Gigerenzer, G.; Gaissmaier, W. (2011): Heuristic decision making. In: *Annual Review of Psychology* 62, S. 451–482.
- Gittelsohn, A. A.; Kaufman, Y. J.; Stark, R.; Rundquist, D. (2002): Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. In: *Remote Sensing of Environment* 80, S. 76–87.
- Grenzdörffer, G. (2022): Drohnen in der Landwirtschaft - Übersicht und Potenzial. KTBL-Schrift 527. Darmstadt: KTBL.
- Hardaker, B.; Lien, G.; Anderson, J. R.; Huirne, R. B. M. (Hg.) (2015): Coping with risk in agriculture. Applied decision analysis. 3. Aufl. Wallingford: CABI.

- Heijting, S.; Bruin, S. de; Bregt, A. K. (2011): The arable farmer as the assessor of within-field soil variation. In: *Precision Agriculture* 12 (4), S. 488–507. DOI: 10.1007/s11119-010-9197-y.
- Henke, J.; Breustedt, G.; Sieling, K.; Kage, H. (2007): Impact of uncertainty on the optimum nitrogen fertilization rate and agronomic, ecological and economic factors in an oilseed rape based crop rotation. In: *The Journal of Agricultural Science* 145 (5), S. 455–468.
- Heumann, S.; Ringe, H.; Böttcher, J. (2011a): Field-specific simulations of net N mineralisation based on digitally available soil and weather data: II, pedotransfer functions for the pool sizes. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91 (3), S. 339–350.
- Heumann, S.; Ringe, H.; Böttcher, J. (2011b): Field-specific simulations of net N mineralization based on digitally available soil and weather data: I. temperature and soil water dependency of the rate coefficients. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 91 (2), S. 219–234.
- Heyn, J. (2010): Feldversuche zur Frage der optimalen N-Düngermenge zu den wichtigsten Ackerfrüchten. Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH).
- Hinck, S.; Kloepfer, F.; Schuchmann, G. (2016): Precision Farming. Bodeneigenschaften erfassen. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- Hirschauer, N.; Mußhoff, O. (2012): Risikomanagement in der Landwirtschaft. Clenze: Agrimedia Verlag.
- Huete, A. R. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI) 25 (3), S. 295–309.
- Jacox, E. H.; Samet, H. (2007): Spatial join techniques. In: *Transactions on Database Systems* 32 (1), S. 7.
- Jiang, Z.; Huete, A. R.; Didan, K.; Miura, T. (2008): Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. In: *Remote Sensing of Environment* 112 (10), S. 3833–3845.
- Johnson-Laird, P. N. (2010): Mental models and human reasoning. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (43), S. 18243–18250.
- Jones, N. A.; Ross, H.; Lynam, T.; Perez, P.; Leitch, A. (2011): Mental models: an interdisciplinary synthesis of theory and methods. In: *Ecology and Society* 16 (1), Artikel 46.
- Julius-Kühn-Institut (2022): Topographischer Feuchteindex. Online verfügbar unter <https://flf.julius-kuehn.de/webdienste/webdienste-des-flf/topographischer-feuchteindex.html#:~:text=WMS%2DService%20zum%20topographischen%20Feuchteindex,der%20Neigung%20und%20des%20Wassereinzugsgebietes.,> zuletzt geprüft am 28.02.2022.
- Karatay, Y. N.; Meyer-Aurich, A. (2019): Standortangepasstes N-Düngemanagement im Weizenanbau als Klimaanpassungsmaßnahme bei zunehmend variierender N-Versorgung aus dem Bodenvorrat. In: *Gesellschaft für Informatik 2019*, S. 101–106.

- Karatay, Y. N.; Meyer-Aurich, A. (2020): Profitability and downside risk implications of site-specific nitrogen management with respect to wheat grain quality. In: *Precision Agriculture* 21, S. 449–472. DOI: 10.1007/s11119-019-09677-3.
- Karatay, Y. N.; Meyer-Aurich, A.; Gandorfer, M. (2018): Ökonomik der teilflächenspezifischen N-Düngung von Weizen unter Berücksichtigung von Qualität, Risiko und Düngerrestriktionen. In: *Digitale Marktplätze und Plattformen*. Bonn, S. 135–138.
- Karatay, Y. N.; Meyer-Aurich, A.; Hunstock, U.; Stella, T.; Nendel, C. (2019a): Kosteneffiziente Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch Düngereduktion. Standortsspezifische Analyse mit simulierten Ertragsfunktionen. In: *Gesellschaft für Informatik 2019*, S. 107–112.
- Karatay, Y. N.; Meyer-Aurich, A.; Kirschke, D. (2019b): Cost- and risk-efficient nitrogen fertilizer application for cereals considering farmers' risk aversion. In: *59. Jahrestagung der GEWISOLA*. Braunschweig.
- Kersebaum, K. C. (1995): Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. In: *Ecological Modelling* 81, S. 145–156.
- Kopecky, M.; Macek, M.; Wild, J. (2021): Topographic Wetness Index calculations guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. In: *Science of the total environment* 757, Artikel 143785.
- Kosfeld, R.; Dreger, C. (2022): *Ökonometrie. Grundlagen-Methoden-Beispiele*. 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Krienke, B.; Ferguson, R. B.; Schlemmer, M.; Holland, K.; Marx, D.; Eskridge, K. (2017): Using an unmanned aerial vehicle to evaluate nitrogen variability and height effect with an active crop canopy sensor. In: *Precision Agriculture* 18, S. 900–915.
- KTBL (2022): Auszug aus MaKost - Maschinen- und Reparaturkosten. Darmstadt. Online verfügbar unter <https://daten.ktbl.de/makost/#search?language=de-DE>, zuletzt geprüft am 09.05.2022.
- Kuckenberger, J.; Tartachnyk, I.; Noga, G. (2009): Temporal and spatial changes of chlorophyll fluorescence as a basis for early and precise detection of leaf rust and powdery mildew infections in wheat leaves. In: *Precision Agriculture* 10, S. 33–34.
- Kühl, R.; Müller, J.; Kruse, J.; Monath, J.; Paul, L.-M. (2021): Green Deal - Wie und zu welchem Preis können die Ziele von der deutschen Agrar- und Ernährungswirtschaft erreicht werden? In: *Edmund-Rehwinkel-Stiftung der Landwirtschaftlichen Rentenbank* (Hg.): *Green Deal - Was kommt auf die Land- und Ernährungswirtschaft zu?* Frankfurt (Schriftenreihe der Rentenbank, 37), S. 7–53.
- Kuhlmann, F.; Neumann, S. (2011): Ein entscheidungstheoretischer Ansatz zur Bewertung des praktischen Nutzens der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Getreide. In: *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 89 (2), S. 232–266.
- Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) (2022): Daten der N-Steigerungsversuche des LLH in den Jahren 2019, 2020 und 2021. Kassel, März 2022 an J. Monath.

- Leroux, C.; Tisseyre, B. (2019): How to measure and report within-field variability: a review of common indicators and their sensitivity. In: *Precision Agriculture* 20 (3), S. 562–590.
- LfL Bayern (2013): Basisdaten 2013. LfL, Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Lilienthal, H. (2014): Optische Sensoren in der Landwirtschaft. Grundlagen und Konzepte. In: *Journal für Kulturpflanzen* 66 (2), S. 34–41.
- Lindblom, J.; Lundström, C.; Ljung, M.; Jonsson, A. (2017): Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. In: *Precision Agriculture* 18 (3), S. 309–331.
- Lorenz, F.; Münchhoff, K. (2015): Teilflächen bewirtschaften. Schritt für Schritt. 1. Aufl. Frankfurt: DLG-Verlag.
- Lowenberg-Deboer, J. (1999): Risk management potential of precision farming technologies. In: *Journal of Agricultural and Applied Economics* 31 (2), S. 275–285.
- Markowitz, H. (1952): Portfolio selection. In: *The Journal of Finance* 7 (1), S. 77–91.
- Martini, D.; Kloepfer, F.; Spietz, C.; Schmitz, M. (2008): agroXML- ein standardisiertes Datenformat für den Datenverkehr zwischen Akteuren in der Informationsgeleiteten Pflanzenproduktion am Beispiel des Systems Precision Farming. In: pre Agro II - Abschlussbericht. Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung. Unter Mitarbeit von A. Werner, F. Dreger und J. Schwarz. Müncheberg, S. 311–326.
- Mayus, M.; Paeßens, B. (2022): Deutschlandkarte Boden-Klima-Räume. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg. Online verfügbar unter <https://www.sojafaerdderring.de/anbauratgeber/sortenratgeber/sojadatabanksuche/bkr/>.
- McNairn, H.; Brisco, B. (2004): The application of C-band polarimetric SAR for agriculture: a review. In: *Canadian Journal of remote sensing* 30 (3), S. 525–542.
- Meier, U. (2018): Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. BBCH Monografie. Quedlinburg.
- Meteostat (2022): Wetterdaten der Station Schaaflheim-Schlierbach.
- Meyer-Aurich, A.; Karatay, Y. N. (2019): Effects of uncertainty and farmers' risk aversion on optimal N fertilizer supply in wheat production in Germany. In: *Agricultural Systems* 173, S. 130–139.
- Michels, M.; Fecke, W.; Feil, J.-H.; Musshoff, O.; Pigisch, J.; Krone, S. (2019): Smartphone adoption and use in agriculture: empirical evidence from Germany. In: *Precision Agriculture* 14 (1), S. 16. DOI: 10.1007/s11119-019-09675-5.
- Michels, M.; Hobe, C.-F. von; Musshoff, O. (2020): A trans-theoretical model for the adoption of drones by large-scale german farmers. In: *Journal of Rural Studies* 75, S. 80-88.

- Mohr, S.; Kühl, R. (2021): Acceptance of artificial intelligence in German agriculture: an application of the technology acceptance model and the theory of planned behaviour. In: *Precision Agriculture* 22, S. 1816–1844.
- Monath, J. (2019): Befragungen der Betriebsleiter für den Versuch. Groß-Umstadt, 2019. Interview.
- Monath, J. (2021): Einschätzungen und spezifisches Wissen von Landwirten in Südhessen hinsichtlich Precision Farming im kleinstrukturierten Ackerbau. In: GEWISOLA (Hg.): Herausforderungen für die ländliche Entwicklung: Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Perspektiven. Unter Mitarbeit von C. Gotter, L. Götz, M. Graubner, T. Herzfeld, N. Hirschauer, E. Kashtanova et al. 60. Jahrestagung der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V. Halle/Saale, 23.-25.09.2020. GEWISOLA. Münster: Landwirtschaftsverlag, S. 417–420.
- Monjardino, M.; McBeath, T.; Brennan, L.; Llewellyn, R. (2013): Are farmers in low-rainfall cropping regions under-fertilising with nitrogen? A risk analysis. In: *Agricultural Systems* 116, S. 37–51.
- Monjardino, M.; McBeath, T.; Ouzman, J.; Llewellyn, R.; Jones, B. (2015): Farmer risk-aversion limits closure of yield and profit gaps: a study of nitrogen management in the southern Australian wheatbelt. In: *Agricultural Systems* 137, S. 108–118.
- Müller, J. (2017): Entscheidungsverhalten bei komplexen Problemen: Die Sortenwahl bei Winterweizen. Gießen.
- Nawrocki, D. (1999): A brief history of downside risk measures. In: *The Journal of Investing* 8 (3), S. 9–25.
- Nordmayer, H.; Richter, J. (1985): Incubation experiments on nitrogen mineralization in loess and sandy soils. In: *Plant and Soil* 83, S. 433–445.
- Oetzel, K. (2008): Konzepte und Schnittstellen bei der Standardisierung von Office-Software zur Integration von Prozessdokumentation bei Precision Farming. In: pre Agro II - Abschlussbericht. Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung. Unter Mitarbeit von A. Werner, F. Dreger und J. Schwarz. Müncheberg, S. 379–397.
- Okabe, A.; Boots, B.; Sugihara, K.; Chiu, S. (2000): Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams. 2. Aufl. New York: Wiley.
- Ostheim, K.-U. (2000): Prüfung der ökonomischen und ökologischen Vorzüglichkeit einer GPS-gestützten teilflächenspezifischen Landbewirtschaftung. Münster: Landwirtschaftsverlag.
- Pannell, D. J. (2006): Flat earth economics: the far-reaching consequences of flat payoff functions in economic decision making. In: *Review of Agricultural Economics* 28 (4), S. 553–566.
- Pannell, D. J. (2017): Economic perspectives on nitrogen in farming systems: Managing trade-offs between production, risk and the environment. In: *Soil Research* 55 (5), S. 473–478.

- Paustian, M.; Theuvsen, L. (2016): Einfluss von betrieblichen und soziodemografischen Faktoren auf die Nutzung von IT-basierten Planungshilfen durch landwirtschaftliche Unternehmer. Online verfügbar unter <https://dl.gi.de/handle/20.500.12116/795>.
- Paustian, M.; Theuvsen, L. (2017): Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. In: *Precision Agriculture* 18 (5), S. 701–716. DOI: 10.1007/s11119-016-9482-5.
- Payne, J. W.; Bettman, J. R.; Johnson, E. J. (1993): *The adaptive decision maker*. 1. Aufl. New York: Cambridge University Press.
- Pedersen, S. M.; Lind, K. M. (2017): Precision Agriculture - from mapping to site-specific application. In: S. M. Pedersen und K. M. Lind (Hg.): *Precision Agriculture: Technology and economic perspectives*. 1. Aufl. Cham: Springer, S. 1–20.
- Plass, J. L.; Moreno, R.; Brünken, R. (2010): *Cognitive Load Theory*. 1. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press. Online verfügbar unter doi:10.1017/CBO9780511844744.
- Pößneck, J. (2011): Analysen und Trends, Thema: Precision Farming im Pflanzenbau. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen.
- Preuße, T. (2022): Warum Landwirtschaft ein Sonderfall ist. In: *DLG-Mitteilungen*, 2022 (7/2022), S. 16–17.
- Putra, B. T. W.; Soni, P. (2019): Improving nitrogen assessment with an RGB camera across uncertain natural light from above-canopy measurements. In: *Precision Agriculture* 108 (1), S. 245. DOI: 10.1007/s11119-019-09656-8.
- Reckleben, Y. (2014): Sensoren für die Stickstoffdüngung. Erfahrungen in 12 Jahren praktischem Einsatz. In: *Journal für Kulturpflanzen* 66 (2), S. 42–47.
- Reichardt, M.; Jürgens, C. (2008): Precision Farming in Deutschland - bestehende Akzeptanzmuster und zukünftige Perspektiven einer Technologie. The adoption of precision agriculture among farmers, advisers, instructors and agri-technological industries in Germany. In: pre Agro II - Abschlussbericht. Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung. Unter Mitarbeit von A. Werner, F. Dreger und J. Schwarz. Müncheberg, S. 577–606.
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W.; Harlan, J. C. (1973): Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. Texas A&M University Remote Sensing Center.
- Saake, G.; Sattler, K.-U.; Heuer, A.s (Hg.) (2013): *Datenbanken - Konzepte und Sprachen*. 5. Aufl. Heidelberg: mitp.
- Schimmelpfennig, D.; Lowenberg-Deboer, J. (2020): Farm types and precision agriculture adoption: crops, regions, soil variability and farm size. working paper. Harper Adams University, Newport. Global Institute for Agri-Tech Economics.
- Schmitz, P. M.; Hesse, J. W.; Garvert, H. (2013): Cross Compliance und Greening - Gibt es Vorteile für landwirtschaftliche Betriebe bei Verzicht auf Direktzahlungen? Institut für Agribusiness. Gießen.

- Schneider, M.; Wagner, P. (2008): Ökonomische Effekte der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung auf betrieblicher Ebene. In: pre Agro II - Abschlussbericht. Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung. Unter Mitarbeit von A. Werner, F. Dreger und J. Schwarz. Müncheberg, S. 401–436.
- Schneider, M.; Weigert, G.; Wagner, P. (2006): Teilflächenspezifische N-Düngung nach datenbankgestützten Entscheidungsregeln. In: GIL (Hg.): Aufgaben und Herausforderungen für die Agrar- und Umweltinformatik. 26. GIL-Jahrestagung. Unter Mitarbeit von K.-O. Wenkel, P. Wagner, M. Morgenstern, K. Luzi und P. Eisermann. Potsdam. Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e.V.
- Schubert, S. (2011): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor. 2. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.
- Schwarz, A.; Bischoff, W.-A. (2009): Einfluss von Witterung und Standorteigenschaften auf die Nitratbelastung des Grundwassers in einem Wasserschutzgebiet. In: *Jahrestagung der DBG*.
- Schwarz, J.; Käch, W.; Bruderer Enzler, H. (2022): Methodenberatung. Hg. v. J. Schwarz. Universität Zürich UZH. Zürich. Online verfügbar unter https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss.html, zuletzt aktualisiert am März 2022, zuletzt geprüft am 28.09.2022.
- Shah, A. K.; Oppenheimer, D. M. (2008): Heuristics made easy: an effort-reduction framework. In: *Psychological Bulletin* 134 (2), S. 207–222.
- Shaner, D. L.; Khosla, R.; Brodahi, M. K.; Buchleiter, G. W.; Farahani, H. J. (2008): How well does zone sampling based on soil electrical conductivity maps represent soil variability? In: *Agronomy Journal* 100 (5), S. 1472–1480.
- Shepard, D. (1968): A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: Association for Computer Machinery (Hg.): Proceedings of 1968 23rd ACM national conference. New York, S. 517–524.
- Sieling, K.; Böttcher, U.; Kage, H. (2011): Ertragsentwicklung von Winterweizen bei variierter N-Düngung. In: *Journal für Kulturpflanzen* 63 (6), S. 169–178.
- Simon, H. A. (1956): Rational choice and the structure of the environment. In: *Psychological Review* 63 (2), S. 129–138.
- Simon, H. A. (1959): Theories of decision-making in economics and behavioural science. In: *The American Economic Review* 49 (3), S. 253–283.
- Simon, H. A. (1990): Invariants of human behaviour. In: *Annual Review of Psychology* 41, S. 1–20.
- Stalljohann, G.; Schneider, S.; Spiekers, H.; Kampf, D. (2019): Leitfaden zur nachvollziehbaren Umsetzung stark N-/P-reduzierter Fütterungsverfahren bei Schweinen. DLG-Merkblatt 418. 4. Aufl. Hg. v. DLG-Arbeitskreis Futter und Fütterung. DLG e.V. Frankfurt.

- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2017): Landwirtschaftliche Betriebe—Statistisches Bundesamt (destatis.de) Arbeitskräfte und Berufsbildung der Betriebsleiter/Geschäftsführer—Agrarstrukturerhebung. Fachserie 3 Reihe 2.1.8. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021): Landwirtschaftszählung 2020. Fachserie 3 Reihe 2.1.8. Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022): Bodennutzungshaupterhebung. Statistisches Bundesamt (Destatis).
- Steinberger, G.; Rothmund, M.; Auernhammer, H. (2008): Integration der automatischen Prozessdatenerfassung in die Informationsflüsse der Landwirtschaft. In: pre Agro II - Abschlussbericht. Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung. Unter Mitarbeit von A. Werner, F. Dreger und J. Schwarz. Müncheberg, S. 327–349.
- Sylvester-Bradley, R.; Kindred, D. R. (2009): Analysing nitrogen responses of cereals to prioritize routes to the improvement of nitrogen use efficiency. In: *Journal of Experimental Botany* 60 (7), S. 1939–1951.
- Techen, A.-K. (2018): Reduzierung von landwirtschaftlichen Stickstoffeinträgen in Gewässer: die Wirksamkeit von Beratung am Beispiel der hessischen WRRL-Beratung. Thünen Report 58. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. Braunschweig.
- Todd, P. M.; Gigerenzer, G. (2012): *Ecological Rationality. Intelligence in the world*. New York: Oxford University Press.
- Wagner, P. (1995): Überlegungen zur Modellierung von Produktionsfunktionen. In: GIL-Jahrestagung. 16. Aufl. Kiel, S. 306–312.
- Wagner, P. (1999): Produktionsfunktionen und Precision Farming. Universität Halle-Wittenberg. Online verfügbar unter <https://lb.landw.uni-halle.de/publikationen/pfupf/pfupf.htm>, zuletzt geprüft am 12.03.2021.
- Weigert, G. (2006): Data Mining und Wissensentdeckung im Precision Farming. Entwicklung von ökonomisch optimierten Entscheidungsregeln zur kleinräumigen Stickstoff-Ausbringung. München.
- Weinberger, H.; Bender, M.; Steinicke, C. (2017): Bodenviewer Hessen. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG). Online verfügbar unter <http://bodenviewer.hessen.de/mapapps/resources/apps/bodenviewer/index.html?lang=de>, zuletzt geprüft am 03.02.2021.
- Wendland, M.; Offenberger, K.; Euba, M. (2010): N-Düngungssysteme zu Winterweizen (Sensortechnik). Versuchsergebnisse aus Bayern 2006 bis 2010. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.lfl.bayern.de/iab/duengung/074342/index.php>.

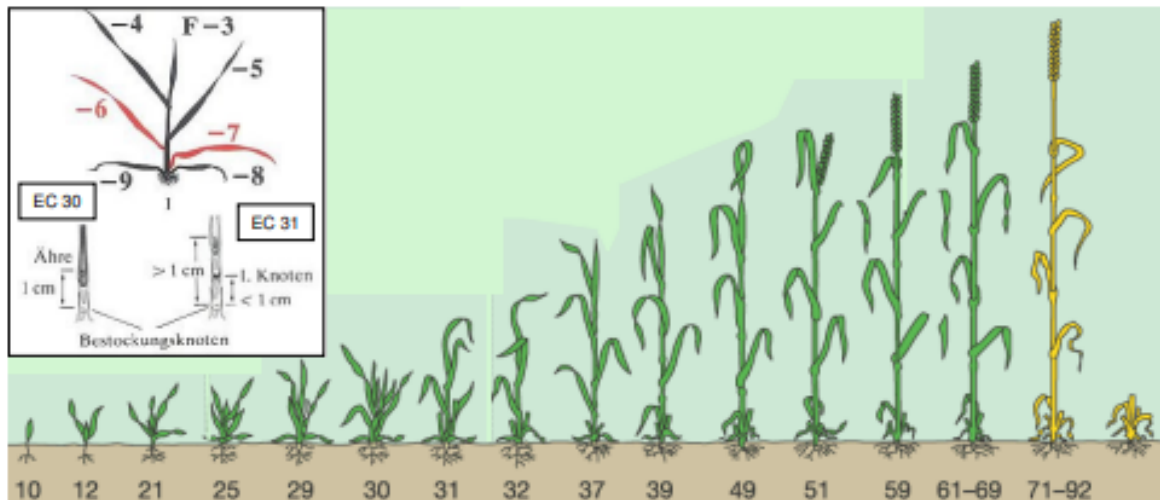
- Werhan, M.; Kühn, J.; Brenning, A.; Rogasik, H.; Sommer, M. (2008): Methoden zur integrativen, nicht-invasiven Standortanalyse zur Charakterisierung der pflanzenbaulich relevanten Eigenschaften standortheterogener Ackerflächen. In: pre Agro II - Abschlussbericht. Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung. Unter Mitarbeit von A. Werner, F. Dreger und J. Schwarz. Müncheberg, S. 65–92.
- Whelan, B. M.; McBratney, A. B. (2000): The "null hypothesis" of precision agriculture management. In: *Precision Agriculture 2*, S. 265–279.
- Yuzugullu, O.; Lorenz, F.; Fröhlich, P.; Liebisch, F. (2020): Understanding fields by remote sensing: Soil zoning and property mapping. In: *Remote Sensing 12* (7), Artikel 1116.
- Zovko, M.; Žibrat, U.; Knapič, M.; Kovačić, M. Bubalo; Romić, D. (2019): Hyperspectral remote sensing of grapevine drought stress. In: *Precision Agriculture 17* (1), S. 85.

Anhang der Dissertation

- 1.) Schematischer Verlauf der Entwicklungsstadien des Weizens in der BBCH-Skala
- 2.) Ackerschätzrahmen mit Darstellung der möglichen Bodenzahl nach Bodenart, Entstehungsart und Zustandsstufe
- 3.) Fragebogen der Expertenbefragung I (Kapitel 5)
- 4.) Teilflächen und Schläge der Expertenbefragung II mit Darstellung der Biomassekarten
- 5.) Maschinen- und Reparaturkosten der technischen Komponenten für die Umsetzung von Precision Farming
- 6.) Tabellenkalkulation für die Wirtschaftlichkeitsabschätzung in Kapitel 7
- 7.) Verfahrenseffizienz im Hinblick auf angenommene Stickstoffeinsparungen und Ertragssteigerungen im Rahmen der Rentabilitätsabschätzung
- 8.) Topografischer Feuchte Index (TWI) der drei Versuchsstandorte mit den Schlaggrenzen der jeweiligen Versuchsschläge
- 9.) Aufzeichnung über die durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Versuchsschlägen während des jeweiligen Versuchsjahrs
- 10.) Ergebnisse der Pflanzenuntersuchungen hinsichtlich Nährstoffversorgung für die Versuchsjahre 2019 und 2020
- 11.) Ergebnisse der Saftstrommessung hinsichtlich Nitratgehalt in der Pflanze mit dem System Nitrameck für die Versuchsjahre 2019 und 2020
- 12.) Ergebnisse des N-Steigerungsversuchs des LLH auf den Standorten Leeheim (2020) und Nieder-Weisel (2019 - 2021)
- 13.) NkfL und N-Bilanzen der untersuchten PF-Verfahren, getrennt nach Teilflächen für alle Versuchsschläge außer Kleeplatz 2021, der schon im Textteil dargestellt wurde
- 14.) Ergebnisse der ANOVA bezüglich des Einflusses von Teilfläche und Versuchsvariante auf ökologische und ökonomische Kennzahlen für die einzelnen Versuchsschläge
- 15.) Grafischer Verlauf der ex-post-Ertrags- und NkfL-Funktionen nach Teilflächen in Abhängigkeit der N-Düngung für alle Versuchsschläge, außer Kleeplatz 2021, der bereits im Textteil dargestellt ist
- 16.) Grafischer Verlauf der ex-ante-Ertrags- und NkfL-Funktionen in Abhängigkeit der N-Düngung für die Standorte 2 und 3

Anhang 1: Schematischer Verlauf der Entwicklungsstadien des Weizens in der BBCH-Skala (Lehrermann, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen)

Entwicklungsstadien im Getreide



Code	EC Stadium	Beschreibung	Bemerkung
0 Keimung	0-9	Keimung bis Auflaufen	
1 Blattentwicklung	10	Blatt spitzen	Blattspitzen des nächsten Blattes jeweils sichtbar
	11	1. Blatt entfaltet	
	12 - 19	2. Laubblatt entfaltet usw.	
2 Bestockung	21	1. Bestockungstrieb sichtbar	Bestockung kann ab Stadium 13 erfolgen
	22	2. Bestockungstrieb sichtbar	
	23	3.. Bestockungstrieb sichtbar usw.	
3 Schossen (Haupttrieb)	30	Haupttriebe beginnen sich zu strecken	Ähre min. 1 cm vom Bestockungsknoten entfernt
	31	1-Knoten-Stadium	1. Knoten min. 1 cm vom Bestockungsknoten entfernt
	32 - 34	2-Knoten-Stadium usw.	2. Knoten min. 2 cm vom 1. Knoten entfernt
	37	Erscheinen des letzten Blattes (Fahnenblatt)	letztes Blatt noch eingerollt
	39	Fahnenblatt voll entwickelt	Blatthäutchen sichtbar
4 Ährenscheiden	45	Blattscheide geschwollen	
	49	Grannenspitzen	
5 Ährenschieben	51	Beginn Ährenschieben	
	55	Mitte Ährenschieben	
	59	Ende Ährenschieben	Ähre vollständig sichtbar
6 Blüte	61	Beginn der Blüte	
	65	Mitte der Blüte	
	69	Ende der Blüte	
7 Fruchtbildung	71	Beginn Kornbildung	Korninhalt wässrig
	75	Mitte Milchreife	Korninhalt milchig
8 Reife	85	Teigreife	Korninhalt weich und trocken
	87	Gelbreife	Fingernageleindruck bleibt
	89	Vollreife	Korn hart; kaum zu brechen
9 Absterben	92	Totreife	Körner nicht mehr zu brechen
	97	Pflanzen abgestorben	Halme brechen zusammen
	99	Erntegut	

Anhang 2 – Ackerschätzrahmen mit Darstellung der möglichen Bodenzahl nach Bodenart, Entstehungsart und Zustandsstufe (Bayrisches Landesamt für Steuern 2009)

Bodenart	Entstehungsart	Zustandsstufe						
		1	2	3	4	5	6	7
S Sand	D		41-34	33-27	26-41	20-16	15-12	11-7
	Al		44-37	36-30	29-24	23-19	18-14	13-9
	V		41-34	33-27	26-21	20-16	15-12	11-7
SI Schwach lehmiger Sand	D		51-43	42-35	34-28	27-22	21-17	16-11
	Al		53-46	45-38	37-31	30-24	23-19	18-13
	V		49-43	42-36	35-29	28-23	22-18	17-12
IS lehmiger Sand	D	68-60	59-51	50-44	43-37	36-30	29-23	22-16
	Lö	71-63	62-54	53-46	45-39	38-32	31-25	24-18
	Al	71-63	62-54	53-46	45-39	38-32	31-25	24-18
	V		57-51	50-44	43-37	36-30	29-24	23-17
	Vg			47-41	40-34	33-27	26-20	19-12
SL Stark lehmiger Sand	D	75-68	67-60	59-52	51-45	44-38	37-31	30-23
	Lö	81-73	72-64	63-55	54-47	46-40	39-33	32-25
	Al	80-72	71-63	62-55	54-47	46-40	39-33	32-25
	V	75-68	67-60	59-52	51-44	43-37	36-30	29-22
	Vg			55-48	47-40	39-32	31-24	23-16
sL sandiger Lehm	D	84-76	75-68	67-60	59-53	52-46	45-39	38-30
	Lö	92-83	82-74	73-65	64-56	55-48	47-41	40-32
	Al	90-81	80-72	71-64	63-56	55-45	47-41	40-32
	V	85-77	76-68	67-59	58-51	50-44	43-36	35-27
	Vg			64-55	54-45	44-36	35-27	26-18
L Lehm	D	90-82	81-74	73-66	65-58	57-50	49-43	42-34
	Lö	100-92	91-83	82-74	73-65	64-56	55-46	45-36
	Al	100-90	89-80	79-71	70-62	61-54	53-45	44-35
	V	91-83	82-74	73-65	64-56	55-47	46-39	38-30
	Vg			70-61	60-51	50-41	40-30	29-19
LT toniger Lehm	D	87-79	78-70	69-62	61-54	53-46	45-38	37-28
	Al	91-83	82-74	73-65	64-57	56-49	48-40	39-29
	V	87-79	78-70	69-61	60-52	51-43	42-34	33-24
	Vg			67-58	57-48	47-38	37-28	27-17
T Ton	D		71-64	63-56	55-48	47-40	39-30	29-18
	Al		74-66	65-58	57-50	49-41	40-31	30-10
	V		71-63	62-54	53-45	44-36	35-26	25-14
	Vg			59-51	50-42	41-33	32-24	23-14
Moor			54-46	45-37	36-29	28-22	21-16	15-10

mit D = Diluvium, Lö = Löß, Al = Alluvium, V = Verwitterungsböden, Vg = Verwitterungsböden gesteinhaltig

Anhang 3 – Fragebogen der Expertenbefragung I (Kapitel 5) (eigene Erstellung in Zusammenarbeit mit Svenja Mohr)

Liebe Landwirtinnen, liebe Landwirte,

vielen Dank, dass Sie sich die Zeit nehmen, um an unserer Umfrage teilzunehmen.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts der Justus-Liebig-Universität untersuchen wir Potenziale der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung und der Digitalisierung.

Das Beantworten der Fragen dauert etwa 20 Minuten. Bitte beachten Sie, dass es bei der Beantwortung des Fragebogens **keine richtigen oder falschen Antworten** gibt. Alle Angaben werden absolut vertraulich behandelt.

Unter allen Teilnehmern werden **7 Engelbert-Strauss-Gutscheine** (im Wert von insgesamt **400 €**) verlost. Um an der Verlosung teilzunehmen, geben Sie bitte am Ende der Befragung Ihre **E-Mail-Adresse** an.

Bitte beachten Sie, dass nur vollständig ausgefüllte Fragebögen in die Verlosung eingehen. Ein Rückschluss auf Ihre Person durch die Angabe Ihrer E-Mail-Adresse ist für uns nicht möglich, da diese von Ihren Antworten getrennt wird.

Vielen Dank für Ihre Unterstützung!

Mit freundlichen Grüßen

Svenja Mohr und Johannes Monath

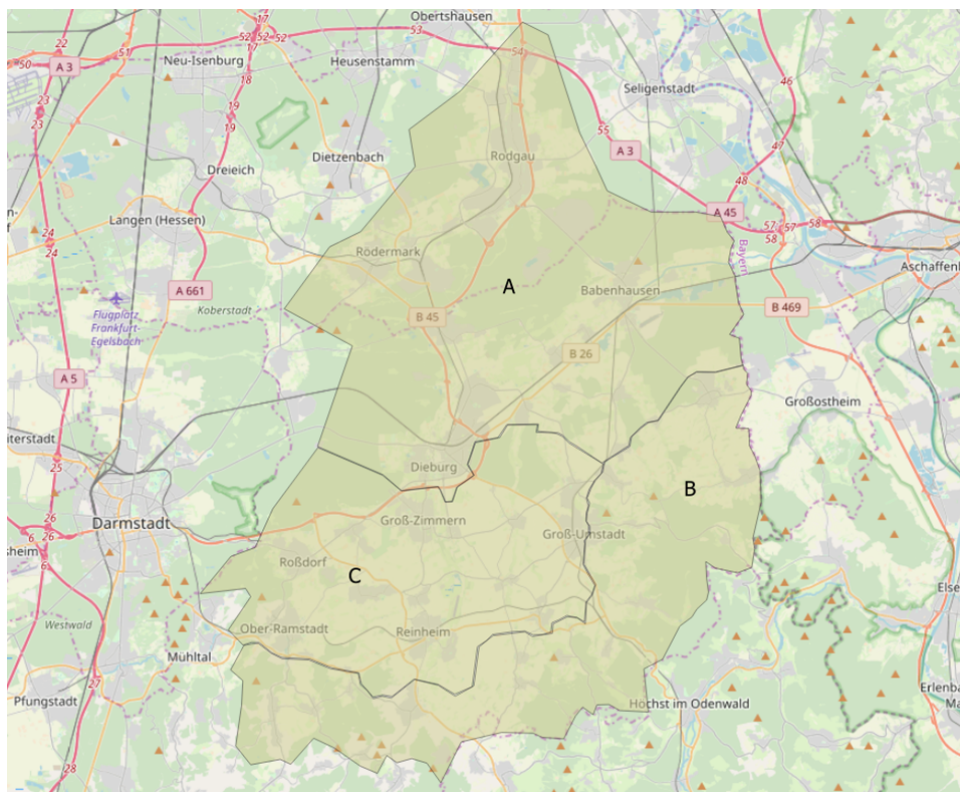
Bitte senden Sie den ausgefüllten Fragebogen bis zum **29.02.2020** mit dem beigelegten, bereits frankierten Briefumschlag **zurück**.

1) Inwieweit treffen folgende Aussagen zu Anwendungen mit neuen Technologien* grundsätzlich auf Sie zu? (*Lautsprecher mit Spracherkennung, Drohnen, GPS-Geräte und mehr)

[Bitte kreuzen Sie pro Frage das entsprechende Feld an]

	Trifft nicht zu (1)	Trifft überwiegend nicht zu (2)	Trifft eher nicht zu (3)	Trifft eher zu (4)	Trifft überwiegend zu (5)	Trifft voll und ganz zu (6)
„Ich bin sehr neugierig, wie Anwendungen mit neuen Technologien funktionieren.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
„Ich probiere gerne Anwendungen mit neuen Technologien aus.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
„Ich schätze mich selbst als risikofreudig ein.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
„Ich bin gerne mit Menschen zusammen, die neue Technologien ausprobieren.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
„Ich suche häufig nach Informationen über neu entwickelte Technologien.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2) In welcher geographischen Zone der unten gezeigten Karte würden Sie Ihren Betrieb einordnen (wo liegen die meisten Flächen)?



A:

B:

C:

3) Bitte beurteilen Sie den Nutzen digitaler Anwendungen für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
Geringer Nutzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hoher Nutzen

4) Welche Größe hat die bewirtschaftete landwirtschaftliche Nutzfläche (Ackerbau und Grünland, ohne Lohnarbeit) Ihres Betriebs in Hektar? _____ ha

5) Wie groß ist der Anteil von Grünland an Ihrer insgesamt bewirtschafteten Fläche (in %) ? _____ %

6) Wie viele Kulturen (inkl. Ackerfutter) bauen Sie auf Ihrer Ackerfläche an? _____

7) Benennen Sie die Hauptbetriebszweige/ den Hauptbetriebszweig, in dem Ihr Betrieb wirtschaftet.

Ackerbau	<input type="checkbox"/>	Tierhaltung	<input type="checkbox"/>	Sonderkulturen	<input type="checkbox"/>
Direktvermarktung	<input type="checkbox"/>	Sonstiges: _____	<input type="checkbox"/>		

8) Sofern Sie Tierhaltung als einen Ihrer Hauptbetriebszweige angegeben haben, welche Tierhaltung betreiben Sie?

Milchviehhaltung	<input type="checkbox"/>	Schweinemast	<input type="checkbox"/>	Sauenhaltung	<input type="checkbox"/>
Rindermast	<input type="checkbox"/>	(Pensions-) Pferde	<input type="checkbox"/>	Geflügelmast	<input type="checkbox"/>
Legehennenhaltung	<input type="checkbox"/>	Mutterkuhhaltung	<input type="checkbox"/>	Sonstiges: _____	<input type="checkbox"/>
Keine Tierhaltung als Hauptbetriebszweig <input type="checkbox"/>					

9) Wie viele Großvieheinheiten befinden sich in etwa im Betrieb? _____ GVE

10) Setzen Sie zugekauften bzw. betriebsfremden Wirtschaftsdünger ein, ohne Nährstoffkooperation mit Biogasanlagen o.ä. (Klärschlamm, Kompost, etc.):

ja nein

11) Ich orientiere meinen Pflanzenbau überwiegend an... (bitte wählen Sie nur eine Antwort)

... einer Diversifizierung der Fruchtfolge	<input type="checkbox"/>	... wirtschaftlichen Kulturen	<input type="checkbox"/>
... arbeitswirtschaftlichen Überlegungen	<input type="checkbox"/>	... dem Anbau von Feldfutter	<input type="checkbox"/>
... sonstigen Anforderungen	<input type="checkbox"/>		

19) Passen Sie Ihre Bewirtschaftung an die Unterschiede ...

	Nie					Immer
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
...zwischen den Schlägen an?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...innerhalb der Schläge an?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

20) Falls Sie eine Anpassung innerhalb der Schläge vornehmen, in welcher Form nehmen Sie diese vor?

Raum für Anmerkungen:

Bodenbearbeitung	<input type="checkbox"/>	
N-Düngung	<input type="checkbox"/>	
Grunddüngung	<input type="checkbox"/>	
Aussaat	<input type="checkbox"/>	
Pflanzenschutz/ Pflege	<input type="checkbox"/>	
Sonstiges	<input type="checkbox"/>	

21) Denken Sie, dass eine Berücksichtigung vorhandener Unterschiede ...

	Gar nicht sinnvoll					Sehr sinnvoll
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
...aus ackerbaulichen Gründen sinnvoll ist?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...aus ökonomischen Gründen sinnvoll ist?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

22) Unter welchen Voraussetzungen würden Sie die angepasste Bewirtschaftung auf Ihrem Betrieb einführen? (mehrfache Antworten möglich)

besseres Erfüllen gesetzlicher Anforderungen (Düngeverordnung etc.)	<input type="checkbox"/>
pflanzenbauliche Vorteile	<input type="checkbox"/>
ökonomische Vorteile durch Ertragssteigerungen	<input type="checkbox"/>
ökonomische Vorteile durch Kostensenkung	<input type="checkbox"/>
ökologische Vorteile durch effizienteren Betriebsmitteleinsatz	<input type="checkbox"/>
politische Anreize zur Nutzung der Technik (Förderung o.ä.)	<input type="checkbox"/>
arbeitswirtschaftliche Vorteile	<input type="checkbox"/>
Schritthalten mit technischem Fortschritt	<input type="checkbox"/>
gesellschaftliche Anreize (Akzeptanz durch Bevölkerung)	<input type="checkbox"/>
Sonstige, und zwar: _____	<input type="checkbox"/>

23) Was würde Sie an der Anschaffung bzw. Nutzung entsprechender Techniken und Methoden hindern? (mehrfache Antworten möglich)

Höhe der Anschaffungskosten	<input type="checkbox"/>
Fehlender ökonomischer Nutzen	<input type="checkbox"/>
Fehlender ackerbaulicher Nutzen	<input type="checkbox"/>
Fehlende Bereitschaft zur Aneignung und Umsetzung von Wissen	<input type="checkbox"/>
Sonstiges, und zwar: _____	<input type="checkbox"/>

29) Inwieweit stimmen Sie folgenden Aussagen zu?

	Stimme nicht zu (1)	Stimme überwiegend nicht zu (2)	Stimme eher nicht zu (3)	Stimme eher zu (4)	Stimme überwiegend zu (5)	Stimme voll und ganz zu (6)
„Ich habe ein Interesse daran, neue Technologie-Entwicklungen für die Landwirtschaft auszuprobieren.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
„Ich kann mir vorstellen, meine derzeitigen landwirtschaftlichen Maschinen durch selbstlernende Maschinen zu ergänzen.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
„Für mich wird es schwierig sein, selbstlernende Maschinen anstelle der derzeitigen Maschinen zu nutzen.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
„Über den Einsatz von selbstlernenden Maschinen in dem landwirtschaftlichen Betrieb, in dem ich arbeite, entscheide nur ich.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
„Ich denke, es ist sehr wichtig selbstlernende Maschinen in landwirtschaftlichen Betrieben einzusetzen.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

30) Inwieweit stimmen Sie den folgenden Aussagen zu?

„Ich denke, dass...“	Stimme nicht zu (1)	Stimme überwiegend nicht zu (2)	Stimme eher nicht zu (3)	Stimme eher zu (4)	Stimme überwiegend zu (5)	Stimme voll und ganz zu (6)
...die Mehrheit der Landwirte selbstlernende Maschinen bis 2025 benutzen wird.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...mein Interesse an selbstlernenden Maschinen bis 2025 zunehmen wird.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...ich selbstlernende Maschinen nie benutzen werde.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
...Landwirte sich gegenseitig den Einsatz von selbstlernenden Maschinen empfehlen werden.“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

31) Bitte geben Sie an, in welchem Bereich Sie die größten Schwierigkeiten bei der Einführung von selbstlernenden Maschinen in der Landwirtschaft erwarten.

32) Welcher Betriebsform ist Ihr Betrieb zuzuordnen? Konventionell Ökologisch

33) Welcher Erwerbsform ist Ihr Betrieb zuzuordnen? Haupterwerb Nebenerwerb

34) Wie viele Personen arbeiten insgesamt in Ihrem Betrieb? _____ Personen

35) Bitte geben Sie Ihren höchsten landwirtschaftlichen Ausbildungsabschluss an.

Keine landwirtschaftliche Ausbildung Ausgebildeter Landwirt Techniker

Meister Fachhochschulabschluss Universitätsabschluss

Sonstiges, und zwar: _____

36) Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an: männlich weiblich

37) Wie alt sind Sie? _____ Jahre

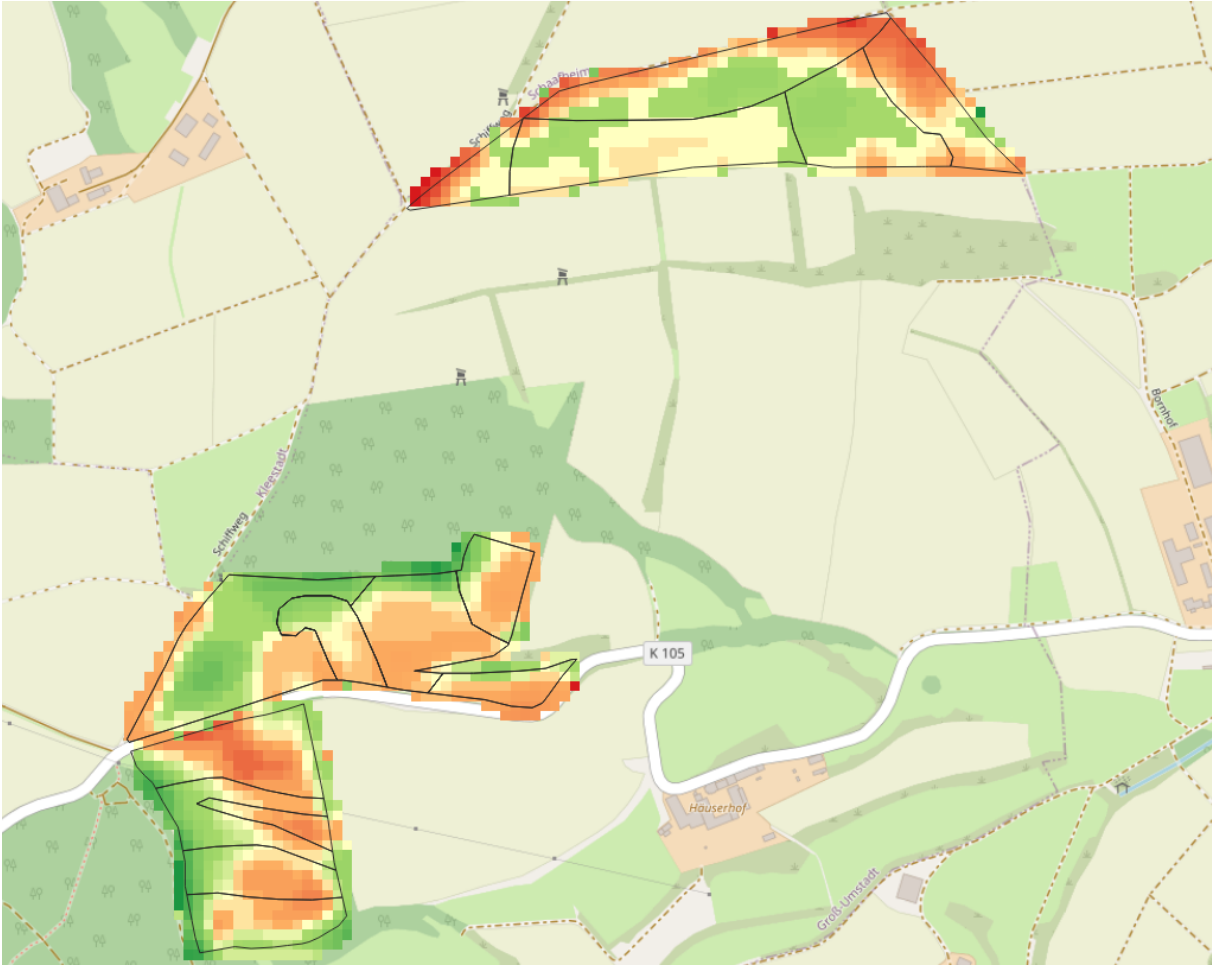
Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

<p>Wenn Sie an der Verlosung der Engelbert-Strauss-Gutscheine im Wert von insgesamt 400 € (1x 100 €, 6x 50 €) teilnehmen möchten, geben Sie bitte Ihre E-Mail-Adresse in das nachfolgende Textfeld ein.</p> <p>Wenn Sie an der Verlosung der Engelbert-Strauss-Gutscheine im Wert von insgesamt 400 € (1x 100 €, 6x 50 €)</p>

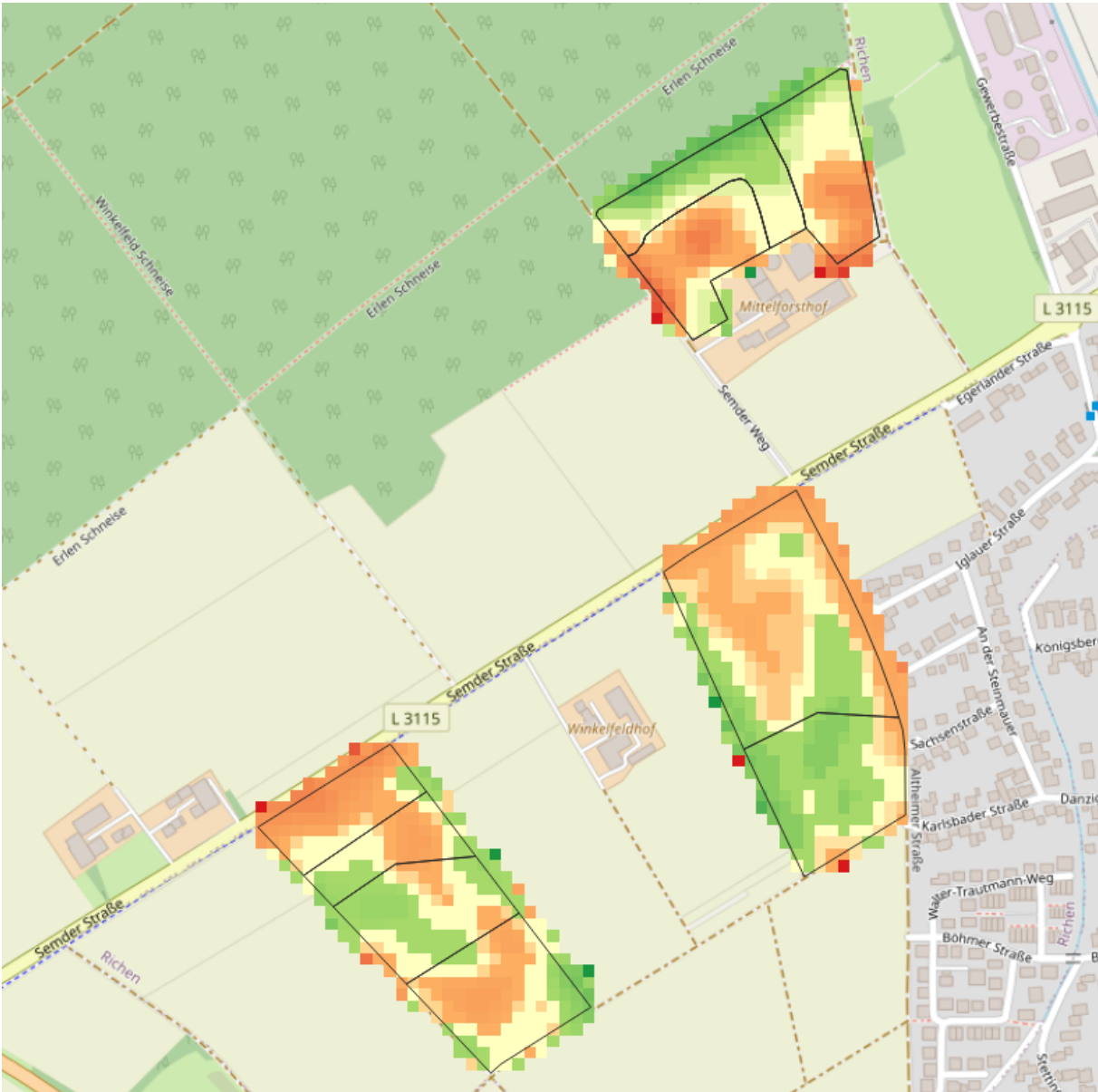
[Bitte beachten Sie, dass nur vollständig ausgefüllte Fragebögen zum Gewinnspiel zugelassen werden]

E-Mail-Adresse:

Standort B



Standort C



Anhang 5: Maschinen- und Reparaturkosten der technischen Komponenten für die Umsetzung von Precision Farming (Auszug aus KTBL MaKost-Rechner (17.03.2022))



MaKost - Maschinen- und Reparaturkosten

Maschine	Bedienterminal (ISOBUS), zum Traktoreinbau	Betriebssoftware, GIS für Hof-PC, hohes Preisniveau	GPS-Empfänger, einfach, Zusatzausrüstung	Jobrechner für Geräte, ISOBUS	Mobile Datenspeicherung, Datenlogger zur georeferenzierten Datenspeicherung (mit GPS)	Referenzsignal, DGPS
Anschaffungspreis	2.500 €	3.800 €	450 €	1.800 €	300 €	250 €
Nutzungspotential nach Leistung	5.000 h 6 a	1.500 h 5 a	10.000 h 12 a	5.000 h 6 a	5.000 h 6 a	5.000 h 6 a
Nutzungspotential nach Zeit	833 h/a	300 h/a	833 h/a	833 h/a	833 h/a	833 h/a
Auslastungsschwelle	833 h/a	300 h/a	833 h/a	833 h/a	833 h/a	833 h/a
Geplanter Einsatzumfang	6 a	5 a	12 a	6 a	6 a	6 a
Geplante Nutzungsdauer	500 €	760 €	90 €	360 €	80 €	50 €
Restwert						
Kosten	€/a €/h	€/a €/h	€/a €/h	€/a €/h	€/a €/h	€/a €/h
Abschreibung	333 0,40	608 2,03	30 0,04	240 0,28	40 0,05	33 0,04
Zinskosten	45 0,05	68 0,23	8 0,01	32 0,04	5 0,01	5 0,01
Unterbringung	-	-	-	-	-	-
Abgaben	-	-	-	-	-	-
Summe fixe Kosten	378 0,45	676 2,26	38 0,05	272 0,33	45 0,06	38 0,05
Betriebsstoffe / Betriebsmittel						
Reparaturkosten	208 0,25	75 0,25	0 0,00	0 0,00	0 0,00	208 0,25
Summe variable Kosten	208 0,25	75 0,25	0 0,00	0 0,00	0 0,00	208 0,25
Gesamtkosten	587 0,70	751 2,51	38 0,05	272 0,33	45 0,06	246 0,30
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ MJ/h	MJ MJ/h	MJ MJ/h	MJ MJ/h	MJ MJ/h	MJ MJ/h
Maschine	203 0,04	1.356 0,90	68 0,01	68 0,01	34 0,01	271 0,05
Grunddaten						
Zinssatz	3,00 %	3,00 %	3,00 %	3,00 %	3,00 %	3,00 %
Unterbringungsart	einseitig offen, Verbundpflasterboden, klein	einseitig offen, Verbundpflasterboden, klein	einseitig offen, Verbundpflasterboden, klein	einseitig offen, Verbundpflasterboden, klein	einseitig offen, Verbundpflasterboden, klein	einseitig offen, Verbundpflasterboden, klein
Abgaben	Häufigkeit/a Preis [€]	Häufigkeit/a Preis [€]	Häufigkeit/a Preis [€]	Häufigkeit/a Preis [€]	Häufigkeit/a Preis [€]	Häufigkeit/a Preis [€]
Betriebsstoffe / Betriebsmittel	Bedarf Preis	Bedarf Preis	Bedarf Preis	Bedarf Preis	Bedarf Preis	Bedarf Preis
Technische Daten						
Arbeitsbreite						

MaKost - Maschinen- und Reparaturkosten



Technische Daten						
Maximale Straßengeschwindigkeit	-	-	-	-	-	-
Zulässiges Gesamtgewicht Leergewicht	3 kg	-	-	-	-	-
Stützlast leer	-	20 kg	1 kg	1 kg	0 kg	4 kg
Stützlast maximal	-	-	-	-	-	-
Abstellmaß Länge	-	-	-	-	-	-
Abstellmaß Breite	-	-	-	-	-	-
Abstellmaß Höhe	-	-	-	-	-	-

Haftungsausschluss

Das KTBL übernimmt keine Haftung und Gewähr für die Inhalte und die Richtigkeit der Daten innerhalb des Angebots und der darin enthaltenen Abfragemöglichkeiten und Online-Anwendungen. Die Inhalte des Angebots begründen keine Verantwortung des KTBL für die dort bereit gehaltenen Daten und Informationen. Für rechtswidrige, fehlerhafte oder unvollständige Inhalte und für Schäden, die aufgrund der Nutzung des Angebots verursacht worden sind, haftet das KTBL daher nicht.

© 2016-2018 KTBL, Darmstadt

MaKost - Maschinen- und Reparaturkosten



Maschine	Stickstoff-Sensor, Yara-N-Sensor ALS® für Traktoren, SFA
Anschaffungspreis	39.000 €
Nutzungspotential nach Leistung	3.000 h
Nutzungspotential nach Zeit	10 a
Auslastungsschwelle	300 h/a
Geplanter Einsatzumfang	300 h/a
Geplante Nutzungsdauer	10 a
Restwert	7.800 €

Kosten	€/a	€/h
Abschreibung	3.120	10,40
Zinskosten	702	2,34
Unterbringung	-	-
Abgaben	-	-
Summe fixe Kosten	3.822	12,74
Betriebsstoffe / Betriebsmittel	-	-
Reparaturkosten	90	0,30
Summe variable Kosten	90	0,30
Gesamtkosten	3.912	13,04

Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	MJ/h
Maschine	1.356	0,45

Grunddaten	
Zinssatz	3,00 %
Unterbringungsart	einseitig offen, Verbundpflasterboden, klein
Abgaben	Häufigkeit/a
Betriebsstoffe / Betriebsmittel	Preis [€] Bedarf

Technische Daten	
Arbeitsbreite	-
Maximale Straßengeschwindigkeit	-
Zulässiges Gesamtgewicht	-

Anhang 6: Tabellenkalkulation für die Wirtschaftlichkeitsabschätzung in Kapitel 7 (eigene Darstellung und Berechnung mit MS Excel)

Erlöskalkulation für Winterweizen im Gesamtbetrieb bei homogener N-Düngung und den getroffenen Annahmen für den Weizenanteil (25,5 %) und Anteil der gesamten PF-fähigen Fläche (59,2 %, Getreide und Raps) in der Fruchtfolge aus Kühl et al. (2021)

Betriebsfläche in ha	Weizenfläche in ha	PF-Fläche ohne WW in ha	PF-Fläche ges. in ha	WW Ertrag bei homogener N-Düngung	WW Erlös bei homogener N-Düngung	WW Erlös pro ha bei homogener N-Düngung
100	25,5	33,7	59,2	1886,2 dt	34.763,46 €	1.363,27 €
200	51,0	67,4	118,4	3772,5 dt	69.526,93 €	1.363,27 €
500	127,6	168,4	296,1	9431,2 dt	173.817,32 €	1.363,27 €
1000	255,2	336,9	592,1	18862,4 dt	347.634,64 €	1.363,27 €

Erlöskalkulation für Winterweizen pro Hektar bei teilflächenspezifischer N-Düngung unter den getroffenen Annahmen zu den Ertrags- und Qualitätswirkungen der Intensitätsstufen und Einsparniveaus

Erlöse und Erlösveränderung pro ha	Landwirt	Landwirt ISOBUS	Karte	Satellit	Sensor	Map-Overlay
Ertrag dt Ø	74,7	74,7	74,7	75,5	75,5	75,5
Veränderung dt	0,8	0,8	0,8	1,6	1,6	1,6
Produktpreis Ø	18,83 €	18,83 €	18,83 €	18,90 €	18,90 €	18,90 €
Veränderung	0,40 €	0,40 €	0,40 €	0,47 €	0,47 €	0,47 €
Erlös	1.406,66 €	1.406,66 €	1.406,66 €	1.427,28 €	1.427,28 €	1.427,28 €
Veränderung	44,69 €	44,69 €	44,69 €	65,32 €	65,32 €	65,32 €
Einsparung Dünger N Niveau 1 in kg N	0	3	3	5	5	8
Einsparung Düngerkosten N Niveau 1	- €	3,00 €	3,00 €	5,00 €	5,00 €	8,00 €
Einsparung Dünger N Niveau 2 in kg N	3	5	8	8	8	10
Einsparung Düngerkosten N Niveau 2	3,00 €	5,00 €	8,00 €	8,00 €	8,00 €	10,00 €
Einsparung Dünger N Niveau 3 in kg N	5	8	10	10	10	18
Einsparung Düngerkosten N Niveau 3	5,00 €	8,00 €	10,00 €	10,00 €	10,00 €	18,00 €

Kosten und Betriebswirtschaftlicher Wert für einen Betrieb mit 25,5 ha Winterweizen (100 ha LF)

Kostenkalkulation 100 ha	Landwirt	Landwirt ISOBUS	Karte	Satellit	Sensor	Map-Overlay
Lohnkosten PF/a	106,35 €	106,35 €	212,70 €	212,70 €	106,35 €	212,70 €
Datenkosten PF/a	- €	- €	110,61 €	306,29 €	- €	416,90 €
Kosten Nmin-Proben	382,87 €	382,87 €	382,87 €	382,87 €	382,87 €	382,87 €
Kosten Grundnährstoff-Proben	127,62 €	127,62 €	127,62 €	127,62 €	127,62 €	127,62 €
Summe Variable Kosten PF	616,84 €	616,84 €	833,80 €	1.029,49 €	616,84 €	1.140,09 €
Variable Kosten PF/ ha	24,17 €	24,17 €	32,67 €	40,33 €	24,17 €	44,67 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 1	616,84 €	540,27 €	757,23 €	901,86 €	489,22 €	935,90 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 2	540,27 €	489,22 €	629,60 €	825,29 €	412,65 €	884,85 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 3	489,22 €	412,65 €	578,55 €	774,24 €	361,60 €	680,65 €
allgemeine Technik	155,19 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €
PF-Technik allg	- €	114,95 €	114,95 €	114,95 €	114,95 €	114,95 €
PF-Technik spezifisch	- €	- €	- €	- €	2.689,89 €	- €
Zinskosten	24,50 €	67,27 €	67,27 €	67,27 €	403,51 €	67,27 €
fixe Daten- und Lizenzkosten (z.B RTK)	- €	63,81 €	63,81 €	63,81 €	63,81 €	63,81 €
fixe Lohnkosten	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €
Lernkosten	62,51 €	62,51 €	62,51 €	62,51 €	62,51 €	62,51 €
Servicegebühren					900,94 €	
Wartungskosten Technik	72,74 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €
Summe Fixe Kosten PF	334,09 €	823,62 €	823,62 €	823,62 €	4.750,69 €	823,62 €
Fixe Kosten PF/ ha	13,09 €	32,27 €	32,27 €	32,27 €	186,12 €	32,27 €
Technologiekosten PF	950,93 €	1.440,46 €	1.657,42 €	1.853,11 €	5.367,53 €	1.963,71 €
Technologiekosten PF/ ha	37,26 €	56,43 €	64,93 €	72,60 €	210,29 €	76,93 €
DAKfL ohne N	35.287,31 €	35.287,31 €	35.070,35 €	35.401,15 €	35.813,79 €	35.290,54 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 1	189,76 €	- 223,21 €	- 440,17 €	- 58,31 €	- 3.572,73 €	- 92,35 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 1	7,43 €	- 8,74 €	- 17,24 €	- 2,28 €	- 139,97 €	- 3,62 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 2	266,33 €	- 172,16 €	- 312,54 €	18,26 €	- 3.496,16 €	- 41,30 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 2	10,43 €	- 6,74 €	- 12,24 €	0,72 €	- 136,97 €	- 1,62 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 3	317,38 €	- 95,59 €	- 261,50 €	69,31 €	- 3.445,11 €	162,90 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 3	12,43 €	- 3,74 €	- 10,24 €	2,72 €	- 134,97 €	6,38 €

Kosten und Betriebswirtschaftlicher Wert für einen Betrieb mit 51,0 ha Winterweizen (200 ha LF)

Kostenkalkulation 200 ha	Landwirt	Landwirt ISOBUS	Karte	Satellit	Sensor	Map-Overlay
Lohnkosten PF/a	106,35 €	106,35 €	212,70 €	212,70 €	106,35 €	212,70 €
Datenkosten PF/a	- €	- €	291,96 €	808,49 €	- €	1.100,45 €
Kosten Nmin-Proben	765,73 €	765,73 €	765,73 €	765,73 €	765,73 €	765,73 €
Kosten Grundnährstoff-Proben	255,24 €	255,24 €	255,24 €	255,24 €	255,24 €	255,24 €
Summe Variable Kosten PF	1.127,33 €	1.127,33 €	1.525,64 €	2.042,17 €	1.127,33 €	2.334,13 €
Variable Kosten PF/ ha	22,08 €	22,08 €	29,89 €	40,00 €	22,08 €	45,72 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 1	1.127,33 €	974,18 €	1.372,49 €	1.786,93 €	872,09 €	1.925,74 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 2	974,18 €	872,09 €	1.117,25 €	1.633,78 €	718,94 €	1.823,64 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 3	872,09 €	718,94 €	1.015,15 €	1.531,68 €	616,84 €	1.415,25 €
allgemeine Technik	155,19 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €
PF-Technik allg	- €	114,95 €	114,95 €	114,95 €	114,95 €	114,95 €
PF-Technik spezifisch					2.689,89 €	
Zinskosten	24,50 €	67,27 €	67,27 €	67,27 €	403,51 €	67,27 €
fixe Daten- und Lizenzkosten (z.B RTK)	- €	63,81 €	63,81 €	63,81 €	63,81 €	63,81 €
fixe Lohnkosten	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €
Lernkosten	62,51 €	62,51 €	62,51 €	62,51 €	62,51 €	62,51 €
Servicegebühren					900,94 €	
Wartungskosten Technik	72,74 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €
Summe Fixe Kosten PF	334,09 €	823,62 €	823,62 €	823,62 €	4.750,69 €	823,62 €
Fixe Kosten PF/ ha	6,54 €	16,13 €	16,13 €	16,13 €	93,06 €	16,13 €
Technologiekosten PF	1.461,41 €	1.950,95 €	2.349,26 €	2.865,80 €	5.878,02 €	3.157,75 €
Technologiekosten PF/ ha	28,63 €	38,22 €	46,02 €	56,14 €	115,14 €	61,86 €
DAKfL ohne N	70.680,96 €	70.680,96 €	70.282,65 €	70.819,10 €	71.733,94 €	70.527,14 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 1	819,95 €	483,56 €	85,25 €	723,79 €	- 2.288,43 €	584,98 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 1	16,06 €	9,47 €	1,67 €	14,18 €	- 4,83 €	11,46 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 2	973,10 €	585,66 €	340,49 €	876,94 €	- 2.135,28 €	687,08 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 2	19,06 €	11,47 €	6,67 €	17,18 €	- 41,83 €	13,46 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 3	1.075,19 €	738,80 €	442,59 €	979,04 €	- 2.033,18 €	1.095,47 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 3	21,06 €	14,47 €	8,67 €	19,18 €	- 9,83 €	21,46 €

Kosten und Betriebswirtschaftlicher Wert für einen Betrieb mit 127,6 ha Winterweizen (500 ha LF)

Kostenkalkulation 500 ha	Landwirt	Landwirt ISOBUS	Karte	Satellit	Sensor	Map-Overlay
Lohnkosten PF/a	132,94 €	132,94 €	265,88 €	265,88 €	132,94 €	265,88 €
Datenkosten PF/a	- €	- €	729,89 €	2.021,23 €	- €	2.751,12 €
Kosten Nmin-Proben	957,17 €	957,17 €	957,17 €	957,17 €	957,17 €	957,17 €
Kosten Grundnährstoff-Proben	319,06 €	319,06 €	319,06 €	319,06 €	319,06 €	319,06 €
Summe Variable Kosten PF	1.409,16 €	1.409,16 €	2.271,99 €	3.563,33 €	1.409,16 €	4.293,22 €
Variable Kosten PF/ ha	11,04 €	11,04 €	17,80 €	27,92 €	11,04 €	33,64 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 1	1.409,16 €	1.026,30 €	1.889,12 €	2.925,22 €	771,05 €	3.272,24 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 2	1.026,30 €	771,05 €	1.251,01 €	2.542,35 €	388,18 €	3.017,00 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 3	771,05 €	388,18 €	995,77 €	2.287,11 €	132,94 €	1.996,02 €
allgemeine Technik	359,38 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €
PF-Technik allg	114,95 €	114,95 €	114,95 €	114,95 €	114,95 €	114,95 €
PF-Technik spezifisch				2.689,89 €		
Zinskosten	67,27 €	67,27 €	67,27 €	403,51 €	67,27 €	67,27 €
fixe Daten- und Lizenzkosten (z.B RTK)	63,81 €	63,81 €	63,81 €	63,81 €	63,81 €	63,81 €
fixe Lohnkosten	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €
Lernkosten	125,01 €	125,01 €	125,01 €	125,01 €	125,01 €	125,01 €
Servicegebühren				900,94 €		
Wartungskosten Technik	136,56 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €
Summe Fixe Kosten PF	886,13 €	886,13 €	886,13 €	4.813,19 €	886,13 €	886,13 €
Fixe Kosten PF/ ha	3,11 €	6,94 €	6,94 €	6,94 €	37,71 €	6,94 €
Technologiekosten PF	2.295,29 €	3.158,12 €	4.449,46 €	6.222,35 €	5.179,35 €	2.295,29 €
Technologiekosten PF/ ha	14,15 €	17,99 €	24,75 €	34,86 €	48,76 €	40,58 €
DAKfL ohne N	178.111,57 €	178.111,57 €	177.248,74 €	178.589,85 €	180.744,02 €	177.859,96 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 1	3.897,66 €	3.790,98 €	2.928,16 €	4.524,51 €	2.751,62 €	4.177,49 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 1	30,54 €	29,70 €	22,94 €	35,45 €	21,56 €	32,73 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 2	4.280,52 €	4.046,23 €	3.566,27 €	4.907,38 €	3.134,48 €	4.432,73 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 2	33,54 €	31,70 €	27,94 €	38,45 €	24,56 €	34,73 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 3	4.535,77 €	4.429,10 €	3.821,51 €	5.162,62 €	3.389,73 €	5.453,71 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 3	35,54 €	34,70 €	29,94 €	40,45 €	26,56 €	42,73 €

Kosten und Betriebswirtschaftlicher Wert für einen Betrieb mit 255,2 ha Winterweizen (1.000 ha LF)

Kostenkalkulation 1.000 ha	Landwirt	Landwirt ISOBUS	Karte	Satellit	Sensor	Map-Overlay
Lohnkosten PF/a	132,94 €	132,94 €	265,88 €	265,88 €	132,94 €	132,94 €
Datenkosten PF/a	- €	- €	1.459,78 €	4.042,46 €	- €	1.459,78 €
Kosten Nmin-Proben	1.914,33 €	1.914,33 €	1.914,33 €	1.914,33 €	1.914,33 €	1.914,33 €
Kosten Grundnährstoff-Proben	638,11 €	638,11 €	638,11 €	638,11 €	638,11 €	638,11 €
Summe Variable Kosten PF	2.685,38 €	2.685,38 €	4.278,10 €	6.860,78 €	2.685,38 €	4.145,16 €
Variable Kosten PF/ ha	10,52 €	10,52 €	16,76 €	26,88 €	10,52 €	16,24 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 1	2.685,38 €	1.919,65 €	3.512,37 €	5.584,56 €	1.409,16 €	2.103,20 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 2	1.919,65 €	1.409,16 €	2.236,14 €	4.818,83 €	643,43 €	1.592,72 €
Veränderung Variable Kosten Niveau 3	1.409,16 €	643,43 €	1.725,66 €	4.308,34 €	132,94 €	- 449,24 €
allgemeine Technik	155,19 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €	359,38 €
PF-Technik allg	- €	114,95 €	114,95 €	114,95 €	114,95 €	114,95 €
PF-Technik spezifisch					2.689,89 €	2.689,89 €
Zinskosten	24,50 €	67,27 €	67,27 €	67,27 €	403,51 €	403,51 €
fixe Daten- und Lizenzkosten (z.B RTK)	- €	63,81 €	63,81 €	63,81 €	63,81 €	63,81 €
fixe Lohnkosten	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €	19,14 €
Lernkosten	187,52 €	187,52 €	187,52 €	187,52 €	187,52 €	187,52 €
Servicegebühren					900,94 €	900,94 €
Wartungskosten Technik	72,74 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €	136,56 €
Summe Fixe Kosten PF	459,10 €	948,63 €	948,63 €	948,63 €	4.875,70 €	4.875,70 €
Fixe Kosten PF/ ha	1,80 €	3,72 €	3,72 €	3,72 €	19,10 €	19,10 €
Technologiekosten PF	3.144,48 €	3.634,02 €	5.226,73 €	7.809,41 €	7.561,08 €	9.020,86 €
Technologiekosten PF/ ha	12,32 €	14,24 €	20,48 €	30,60 €	29,62 €	35,34 €
DAKfL ohne N	356.356,07 €	356.356,07 €	354.763,36 €	357.445,58 €	361.620,97 €	360.161,20 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 1	8.262,34 €	8.538,53 €	6.945,82 €	10.138,52 €	10.386,86 €	9.692,81 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 1	32,37 €	33,45 €	27,21 €	39,72 €	40,69 €	37,97 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 2	9.028,07 €	9.049,02 €	8.222,04 €	10.904,26 €	11.152,59 €	10.203,30 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 2	35,37 €	35,45 €	32,21 €	42,72 €	43,69 €	39,97 €
Betriebswirtschaftlicher Wert Niveau 3	9.538,56 €	9.814,75 €	8.732,53 €	11.414,75 €	11.663,08 €	12.245,26 €
Betriebswirtschaftlicher Wert/ha Niveau 3	37,37 €	38,45 €	34,21 €	44,72 €	45,69 €	47,97 €

Anhang 7: Verfahrenseffizienz im Hinblick auf angenommene Stickstoffeinsparungen und Ertragssteigerungen im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsabschätzung (eigene Berechnungen)

Ökologische Technologieeffizienz in €/kg N für die PF-Verfahren 1-5 gegliedert nach Betriebsgröße und N-Reduktionsniveau

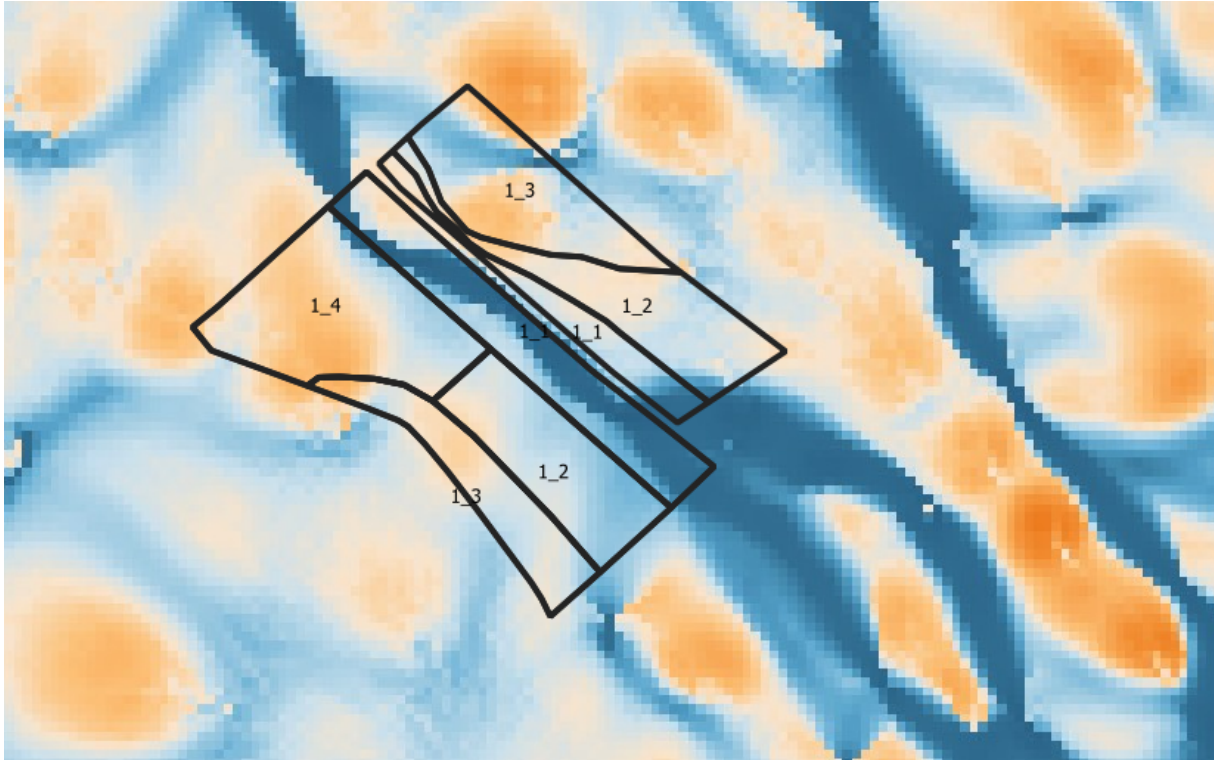
Niveau	Betriebsgröße	Verfahren					
		1	2	3	4a	4b	5
1	100 ha	Keine N- Reduktion	18,81 €	21,64 €	14,52 €	42,06 €	9,62 €
	200 ha		12,74 €	15,34 €	11,23 €	23,03 €	7,73 €
	500 ha		6,00 €	8,25 €	6,97 €	9,75 €	5,07 €
	1.000 ha		4,75 €	6,83 €	6,12 €	5,92 €	4,42 €
2	100 ha	12,42 €	11,29 €	8,12 €	9,08 €	26,29 €	7,69 €
	200 ha	9,54 €	7,64 €	5,75 €	7,02 €	14,39 €	6,19 €
	500 ha	4,72 €	3,60 €	3,09 €	4,36 €	6,09 €	4,06 €
	1.000 ha	4,11 €	2,85 €	2,56 €	3,82 €	3,70 €	3,53 €
3	100 ha	7,45 €	7,05 €	6,49 €	7,26 €	21,03 €	4,27 €
	200 ha	5,73 €	4,78 €	4,60 €	5,61 €	11,51 €	3,44 €
	500 ha	2,83 €	2,25 €	2,47 €	3,49 €	4,88 €	2,25 €
	1.000 ha	2,46 €	1,78 €	2,05 €	3,06 €	2,96 €	1,96 €

Ertragsbezogene Technologieeffizienz in €/dt für die PF-Verfahren 1-5 gegliedert nach der Betriebsgröße

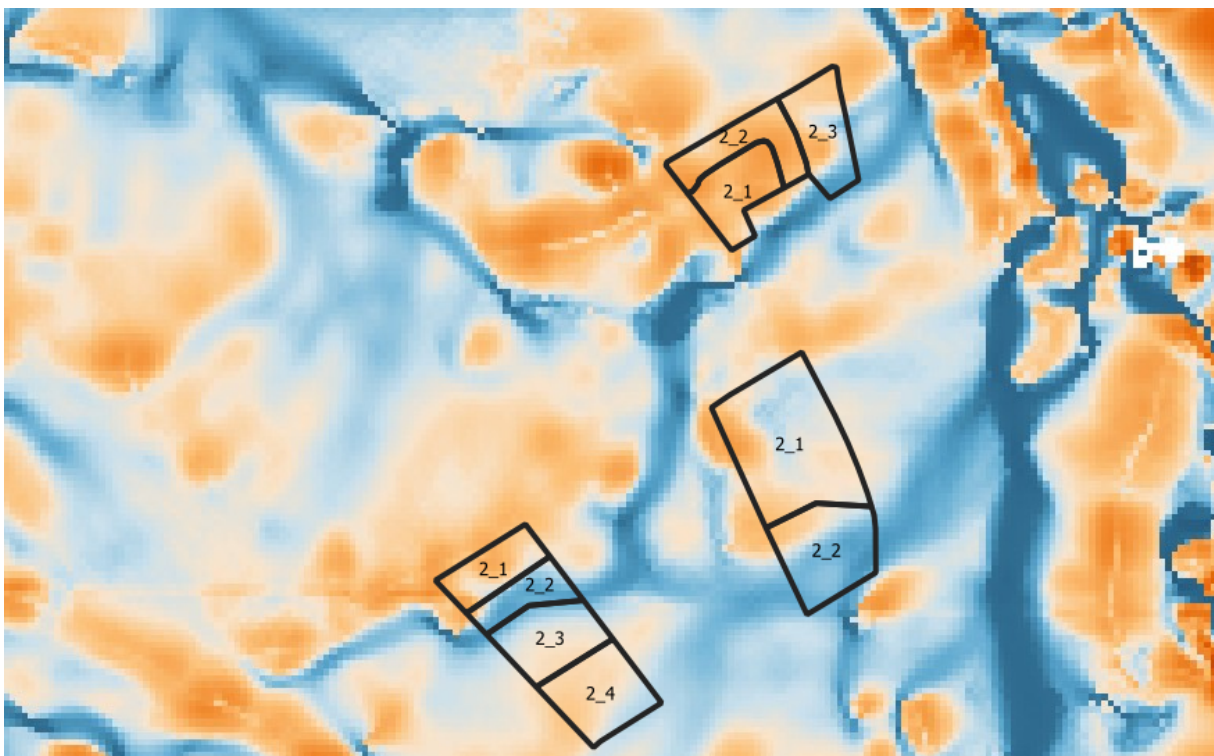
Betriebsgröße	Verfahren					
	1	2	3	4a	4b	5
100 ha	45,83 €	69,42 €	79,88 €	44,66 €	129,35 €	47,32 €
200 ha	35,22 €	47,01 €	56,61 €	34,53 €	70,82 €	38,05 €
500 ha	17,41 €	22,12 €	30,44 €	21,44 €	29,99 €	24,96 €
1.000 ha	15,16 €	17,51 €	25,19 €	18,82 €	18,22 €	21,74 €

Anhang 8: Topografischer Feuchte Index (TWI) der drei Versuchsstandorte mit den Schlaggrenzen der jeweiligen Versuchsschläge (eigene Darstellung mit QGIS unter Verwendung des Layers des Julius-Kühn-Instituts)

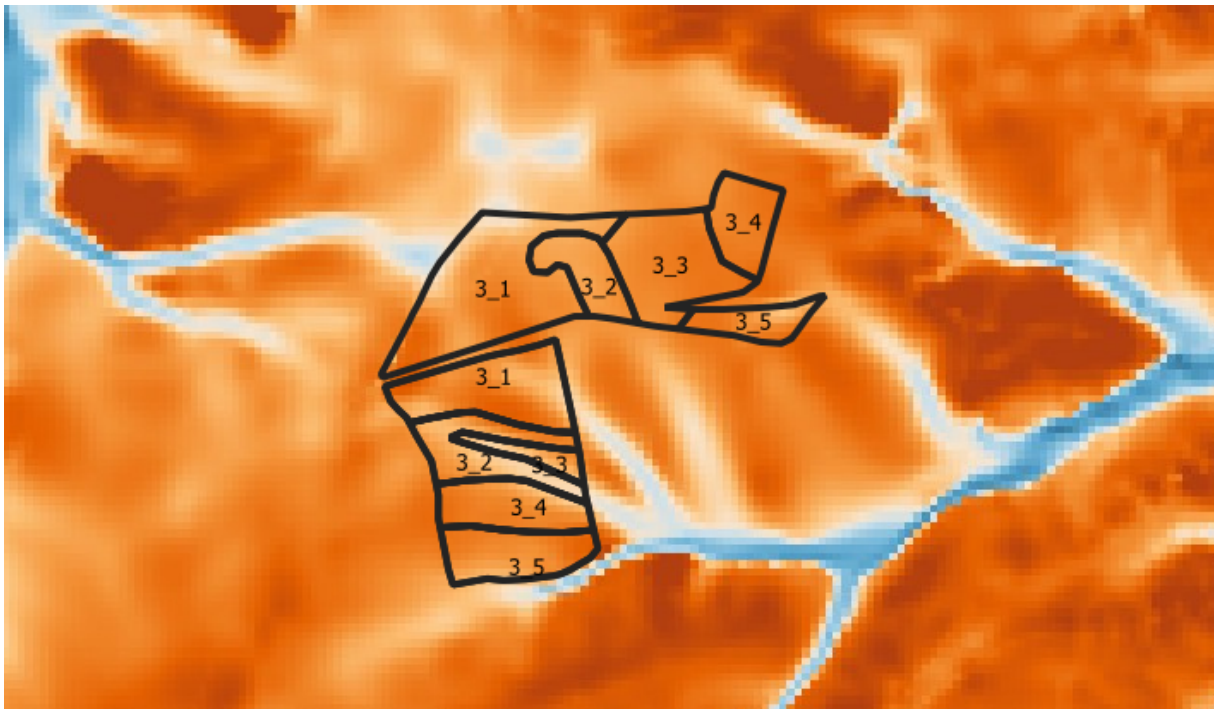
Standort A (Betrieb 1): mit den Schlägen Kleeplatz (links) und Hammchesberg (rechts)



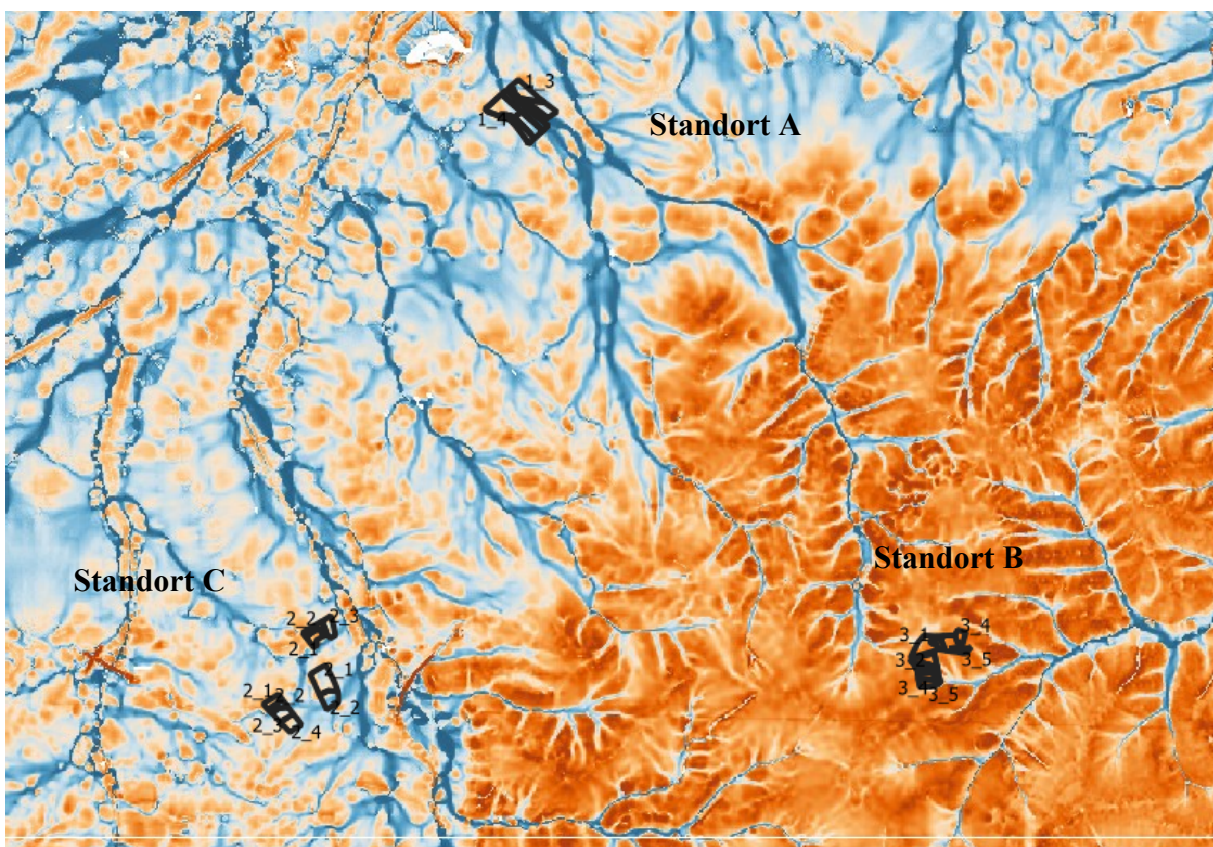
Standort C (Betrieb 2): die Schläge Hinterm Hof, Siedlung und Winkelfeld im Uhrzeigersinn



Standort B (Betrieb 3): mit den Schlägen 24-Morgen (oben) und Waldacker (unten)



Größerer Ausschnitt der Versuchsregion mit den drei untersuchten Standorten



Legende: Farbspektrum rot-blau, mit rot = niedrige topografisch bedingte Wasserführung, blau = hohe topografisch bedingte Wasserführung

Anhang 9: Aufzeichnung über die durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Versuchsschlägen während des jeweiligen Versuchsjahrs (Auszug aus der Ackerschlagkartei 365farmnet)

Report Schlagkarte	ICMag 1-00 Kleeplatz	Jahr 2019					
Berater Günther Monath	Fläche 10,55ha	Frucht Winterweichweizen		Geplante Ernte/ha k.A.			
Fruchtfolge Zwischenfrucht: Vorfrucht: Vor-Vorfrucht:	ICMag/Informations Bodenart keine Angabe	Ackerzahl		Wasserschutzgebiet kein WSG			
Bodenproben		Datum		P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	pH

Sorten							
	Staudenke (Stauden/ha)	Korn/Mägl (t)	TKM (g)	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	
<input checked="" type="checkbox"/> Ambello (WW)	347,20	92,00	36,00	15.10.18	10,55	135,90 kg	

Düngemittel	Nährstoffe	Zufuhr kg/ha							Nachlieferungen								
		N _{syn}	N _{nat}	P ₂ O ₅	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N _{syn}	N _{nat}	MH	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	
								Herbst	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> AHL 24/3 (Mineralisch)	g/kg	240,00	240,00	0,00	25.02.19	10,55	204,00 l		49	49	0	0	0	0	0	0	0,60
<input checked="" type="checkbox"/> Ammoniumnitratstoffsäurelösung 38 (AHL) (Mineralisch)	g/kg	356,40	356,40	0,00	15.04.19	10,55	144,00 l		52	52	0	0	0	0	0	0	0,60
<input checked="" type="checkbox"/> Ammoniumnitratstoffsäurelösung 38 (AHL) (Mineralisch)	g/kg	356,40	356,40	0,00	02.06.19	10,55	162,00 l		58	58	0	0	0	0	0	0	0,60
								Frühjahr	159	159	0	0	0	0	0	0	0,00

Pflanzenschutzmittel			
	Datum	Fläche (ha)	Menge
<input checked="" type="checkbox"/> Atlantis Wg (025094-00)	22.03.19	10,55	0,260 l
<input checked="" type="checkbox"/> Pointer Plus (007727-00)	22.03.19	10,55	30,000 kg
<input checked="" type="checkbox"/> Starchen Fha (008159-00)	22.03.19	10,55	72,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Coc720 (034046-00)	20.04.19	10,55	0,500 l
<input checked="" type="checkbox"/> Input Classic (025625-00)	20.04.19	10,55	0,600 l
<input checked="" type="checkbox"/> Modius (...212-00/046)	20.04.19	10,55	0,250 l
<input checked="" type="checkbox"/> Aecra Xpro (008219-00)	06.05.19	10,55	1,500 l
<input checked="" type="checkbox"/> Pinodol 50 (...328-00/011)	16.05.19	10,55	1,200 l

Arbeitsgänge			
	Datum	Fläche (ha)	Menge
<input checked="" type="checkbox"/> Bodenbearbeitung	14.10.18	-	-
Grubber		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Aussaat	15.10.18	-	-
Johannes Monath		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	25.02.19	-	-
Johannes Monath		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	22.03.19	-	-
Johannes Monath		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	15.04.19	-	-
Günther Monath		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	20.04.19	-	-
Johannes Monath		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	06.05.19	-	-
Johannes Monath		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	16.05.19	-	-
Johannes Monath		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	02.06.19	-	-
Günther Monath		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Ernte	01.08.19	-	-

Ernte										
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B
<input checked="" type="checkbox"/> Winterweichweizen (Korn/Frucht)	01.08.19	10,55 ha	64,70 dt	-136	-53	-40	0	0	0	0

Report Schlagkarte	Schlag 2-00 An der Siedlung	Jahr 2019		
Betrieb Frank Reith	Fläche 5,63ha	Frucht Winterweichweizen		Geplanter Ertrag/ha k.A.
Fruchtfolge Zwischen-Frucht: Vorfrucht: Vor-Vorfrucht:	Schlaginformationen Bodenart keine Angabe	Ackerzahl Wasserschutzgebiet Kein WSG		Bodengruben Datum P ₂ O ₅ K ₂ O MgO pH

Sorten							
	Saatstärke (Körner/m²)	Körndichtigk. (%)	TDM (g)	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	
<input checked="" type="checkbox"/> Chevignon (WW)	0,00	0,00	0,00	07.11.18	5,60	160,00 kg	

Düngemittel	Nährstoffe	Zufuhr kg/ha																			
		N _{ges}	N _{tot}	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	Na	Si										
<input checked="" type="checkbox"/> RWZ Power Alzon 37 + 8,5% S gran. Mischdünger (Mineralisch)	g/kg	370,00	370,00	0,00	27.03.19	5,63	100,00 kg														
<input checked="" type="checkbox"/> YaraBela® SULFAN® 24 + 4 (TET) (Mineralisch)	g/kg	240,00	240,00	0,00	06.05.19	5,60	210,00 kg														
<input checked="" type="checkbox"/> Kali EPSO Microtop® (Bittersalz) (Mineralisch)	g/kg	0,00	0,00	0,00	23.05.19	5,63	3,00 kg														
								Nachlieferungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
								Herbst	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
									37	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0,00
									50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0,00	
									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	
								Frühjahr	87	87	0	0	0	0	0	0	0	21	0,00		










Pflanzenschutzmittel			
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> Atlantis Od (005938-00)	08.04.19	5,63	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Coc720 (034046-60)	08.04.19	5,63	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Husar (024727-00)	08.04.19	5,63	0,080 l
<input checked="" type="checkbox"/> U 46 M-Fluid (050939-00)	08.04.19	5,63	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Aacro Xpro (008219-00)	23.05.19	5,63	1,310 l
<input checked="" type="checkbox"/> Carone 660 (006285-00)	23.05.19	5,63	0,190 l
<input checked="" type="checkbox"/> Moddus (...212-00/046)	23.05.19	5,63	0,300 l
<input checked="" type="checkbox"/> Karate Zeon (004675-60)	14.06.19	5,63	0,120 l
<input checked="" type="checkbox"/> Skyway Xpro (006998-00)	14.06.19	5,63	1,500 l









Arbeitsgänge			
	Datum	Fläche (ha)	Menge
<input checked="" type="checkbox"/> Bodenbearbeitung	03.11.18	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Aussaat	07.11.18	-	-
Frank Reith		5,60 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	27.03.19	-	-
Frank Reith		5,63 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	08.04.19	-	-
Frank Reith		5,63 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	06.05.19	-	-
Frank Reith		5,60 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	23.05.19	-	-
Frank Reith		5,63 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	14.06.19	-	-
Frank Reith		5,63 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Ernte	01.06.19	-	-







Ernte										
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	Entzug kg/ha						
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B
<input checked="" type="checkbox"/> Winterweichweizen (Korn/Frucht)	01.06.19	5,63 ha	95,00 dt	-194	-76	-57	0	0	0	0


Report Schlagkarte	Schlag 3-00 Waldacker	Jahr 2019	
Betrieb Paul-Dirk Hell	Fläche 5,58ha	Frucht: Winterweichweizen	
Fruchtfolge	Schlaginformationen		Bodenproben
Zwischen-frucht: Vorfrucht: Vor-Vorfrucht:	Bodenart keine Angabe	Ackerzahl	Wasserschutzgebiet Kein WSG
			Datum P ₂ O ₅ K ₂ O MgO pH

Sorten							
	Saatstärke (Stromer/ha)	Kornbligkeit (%)	Trock (g)	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	
 RGT Reform (WW)	280,00	97,00	50,00	05.10.18	5,58	144,33 kg	

Düngemittel	Nährstoffe	Zufuhr kg/ha																																																																																																	
		N _{gen}	N _{verf}	P ₂ O ₅	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N _{gen}	N _{verf}	NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B																																																																																			
		<table border="1"> <tr> <td>Nachlieferungen</td> <td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0,00</td> </tr> <tr> <td>Herbst</td> <td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0,00</td> </tr> <tr> <td> Ammoniumnitratstamstofflösung 28 (AHL) (Mineralisch) g/kg</td> <td>358,40</td><td>358,40</td><td>0,00</td><td>20.02.19</td><td>5,58</td><td>111,00 l</td> <td>40</td><td>40</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0,00</td> </tr> <tr> <td> ALZONB 40-5 SKW Pflanzlich (x) (Mineralisch) g/kg</td> <td>400,00</td><td>400,00</td><td>0,00</td><td>02.04.19</td><td>5,58</td><td>275,00 kg</td> <td>110</td><td>110</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>17</td><td>0,00</td> </tr> <tr> <td> Ammoniumnitratstamstofflösung 28 (AHL) (Mineralisch) g/kg</td> <td>358,40</td><td>358,40</td><td>0,00</td><td>04.06.19</td><td>5,58</td><td>140,00 l</td> <td>50</td><td>50</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0,00</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Frühjahr</td> <td>200</td><td>200</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>17</td><td>0,00</td> </tr> </table>										Nachlieferungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	Herbst	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	 Ammoniumnitratstamstofflösung 28 (AHL) (Mineralisch) g/kg	358,40	358,40	0,00	20.02.19	5,58	111,00 l	40	40	0	0	0	0	0	0	0,00	 ALZONB 40-5 SKW Pflanzlich (x) (Mineralisch) g/kg	400,00	400,00	0,00	02.04.19	5,58	275,00 kg	110	110	0	0	0	0	0	17	0,00	 Ammoniumnitratstamstofflösung 28 (AHL) (Mineralisch) g/kg	358,40	358,40	0,00	04.06.19	5,58	140,00 l	50	50	0	0	0	0	0	0	0,00								Frühjahr	200	200	0	0	0	0	17	0,00
Nachlieferungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00																																																																																								
Herbst	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00																																																																																								
 Ammoniumnitratstamstofflösung 28 (AHL) (Mineralisch) g/kg	358,40	358,40	0,00	20.02.19	5,58	111,00 l	40	40	0	0	0	0	0	0	0,00																																																																																				
 ALZONB 40-5 SKW Pflanzlich (x) (Mineralisch) g/kg	400,00	400,00	0,00	02.04.19	5,58	275,00 kg	110	110	0	0	0	0	0	17	0,00																																																																																				
 Ammoniumnitratstamstofflösung 28 (AHL) (Mineralisch) g/kg	358,40	358,40	0,00	04.06.19	5,58	140,00 l	50	50	0	0	0	0	0	0	0,00																																																																																				
							Frühjahr	200	200	0	0	0	0	17	0,00																																																																																				

Pflanzenschutzmittel			
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
 Artus (004620-00)	10.04.19	5,58	0,050 kg
 Atlantis Flex (...188-00/003)	10.04.19	5,58	0,200 kg
 Elopower (007661-00)	10.04.19	5,58	0,600 l
 Primus (034622-00)	10.04.19	5,58	0,050 l
 Occ720 (004046-60)	24.04.19	5,58	0,600 l
 Modus (...213-00/046)	24.04.19	5,58	0,400 l
 Orlus (006341-00)	17.05.19	5,58	0,600 l
 Rubric (007469-00)	17.05.19	5,58	0,600 l

Arbeitsgänge			
	Datum	Fläche (ha)	Menge
 Bodenbearbeitung	05.10.18	-	-
Grubber		5,58 ha	0,00 std.
 Aussaat	05.10.18	-	-
Paul-Dirk Hell		5,58 ha	0,00 std.
 Düngung	20.02.19	-	-
 Düngung	02.04.19	-	-
Paul-Dirk Hell		5,58 ha	0,00 std.
 Pflanzenschutz	10.04.19	-	-
Paul-Dirk Hell		5,58 ha	0,00 std.
 Pflanzenschutz	24.04.19	-	-
Paul-Dirk Hell		5,58 ha	0,00 std.
 Pflanzenschutz	17.05.19	-	-
Paul-Dirk Hell		5,58 ha	0,00 std.
 Düngung	04.06.19	-	-
Paul-Dirk Hell		5,58 ha	0,00 std.
 Ernte	31.07.19	-	-

Ernte		Entzug kg/ha									
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	
 Winterweichweizen (Korn/Frucht)	31.07.19	5,58 ha	92,00 dt	-188	-74	-55	0	0	0	0	

Report Schlagkarte	Schlag 7-00 Hammchesberg	Jahr 2020		
Betreib Günther Monath	Fläche 5,65ha	Frucht Winterweichweizen		Geplanter Ertrag/ha k.A.
Fruchtlage Zwischen-frucht: Vorfrucht: Vor-Vorfrucht:	Schlaginformationen Bodenart keine Angabe Ackerzahl Wasserschutzgebiet Kein WSG			Bodenproben Datum P ₂ O ₅ K ₂ O MgO pH

Sorten							
	Sortenname (Körnung)	Kornlänge (N)	Tktl (g)	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	
<input checked="" type="checkbox"/>	Chervignon (WW)	0,00	0,00	0,00	15.10.19	5,65	137,00 kg

Düngemittel	Nährstoffe	Zufuhr kg/ha															
		N _{ges}	N _{tot}	P ₂ O ₅	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N _{ges}	N _{tot}	NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	
<input checked="" type="checkbox"/> Libosol-Mangantriat (Minerallach)	g/kg	119,25	119,25	0,00	21.11.19	5,65	1,00 l	Nachlieferungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> AHL 25/6 (Minerallach)	g/kg	320,00	320,00	0,00	16.03.20	5,65	165,00 l	Herbst	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> AHL 25/6 (Minerallach)	g/kg	320,00	320,00	0,00	08.04.20	5,65	0,00 l		53	53	0	0	0	0	0	13	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Ammoniumnitrat-harnstofflösung 28 (AHL) (Minerallach)	g/kg	358,40	358,40	0,00	14.05.20	5,65	0,00 l		0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
								Frühjahr	53	53	0	0	0	0	0	13	0,00

Pflanzenschutzmittel			
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> Bacara Forte (005369-00)	21.11.19	5,65	0,890 l
<input checked="" type="checkbox"/> Reflex (006787-00)	21.11.19	5,65	0,470 l
<input checked="" type="checkbox"/> Coc720 (004046-60)	05.04.20	5,65	0,460 l
<input checked="" type="checkbox"/> Moddus (...212-00/046)	05.04.20	5,65	0,230 l
<input checked="" type="checkbox"/> Omnera Lqm (...271-00/001)	05.04.20	5,65	0,890 l
<input checked="" type="checkbox"/> Axial 50 (006026-00)	16.04.20	5,65	0,900 l
<input checked="" type="checkbox"/> Folcur (...028-00/166)	16.04.20	5,65	0,810 l
<input checked="" type="checkbox"/> Aicra Xpro (008219-00)	16.05.20	5,65	1,290 l

Arbeitgänge			
	Datum	Fläche (ha)	Menge
<input checked="" type="checkbox"/> Bodenbearbeitung	14.10.19	-	-
Grubber		5,65 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Aussaat	15.10.19	-	-
Aussaat		5,65 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	21.11.19	-	-
Pflanzenschutz		5,65 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	16.03.20	-	-
Düngung		5,65 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	05.04.20	-	-
Pflanzenschutz		5,65 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	08.04.20	-	-
Pflanzenschutz		5,65 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	14.05.20	-	-
Pflanzenschutz		5,65 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	16.05.20	-	-
Pflanzenschutz		5,65 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Ernte	22.07.20	-	-

Ernte		Entzug kg/ha									
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	
<input checked="" type="checkbox"/> Winterweichweizen (Korn/Frucht)	22.07.20	5,65 ha	80,96 dt	-165	-65	-49	0	0	0	0	

Report Schlagkarte	Schlag 4-00 Hinterm Hof	Jahr 2020	
Betrieb Frank Reith	Fläche 3,96ha	Frucht Winterweichweizen	
Fruchtfolge Zwischen-frucht: Vorfrucht: Vor-Vorfrucht:	Schlaginformationen Bodenart keine Angabe	Ackerzahl	Wasserschutzgebiet Kein WSG
			Bodenproben Datum P ₂ O ₅ K ₂ O MgO pH

Sorten						
	Saatstärke (Stromer/ha)	Kornabfuhr (t)	Trock (g)	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> Chevignon (WW)	0,00	0,00	0,00	31.10.19	3,96	163,00 kg

Düngemittel	Nährstoffe	Zufuhr kg/ha																																																																					
		N _{ges}	N _{net}	P ₂ O ₅	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N _{ges}	N _{net}	KH	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B																																																							
		<table border="1"> <tr><td>Nachlieferungen</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Herbst</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0,00</td></tr> <tr><td></td><td>60</td><td>60</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0,00</td></tr> <tr><td></td><td>50</td><td>50</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Frühjahr</td><td>110</td><td>110</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0,00</td></tr> </table>										Nachlieferungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	Herbst	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00		60	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00		50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	Frühjahr	110	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Nachlieferungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00																																																												
Herbst	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00																																																												
	60	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00																																																												
	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00																																																												
Frühjahr	110	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00																																																												
<input checked="" type="checkbox"/> Harnstoff 46%N gepri. EG-Ware (Mineralisch)	g/kg	460,00	460,00	0,00	20.03.20	3,96	130,00 kg																																																																
<input checked="" type="checkbox"/> Kalkammonsalpeter 27%N prills GEMLIK (TR) (Mineralisch)	g/kg	270,00	270,00	0,00	16.05.20	3,96	185,00 kg																																																																

Pflanzenschutzmittel			
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> Atlantis Od (005938-00)	19.03.20	3,96	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Coc720 (034046-60)	19.03.20	3,96	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Husar (024727-00)	19.03.20	3,96	0,080 l
<input checked="" type="checkbox"/> Skyway Xpro (006998-00)	08.06.20	3,96	1,200 l

Arbeitsgänge			
	Datum	Fläche (ha)	Menge
<input checked="" type="checkbox"/> Pflege	17.10.19	-	-
Maistoppel mulchen		3,96 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Bodenbearbeitung	20.10.19	-	-
Grubber		3,96 ha	0,00 std.
Frank Reith		3,96 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Aussaat	21.10.19	-	-
Aussaat		3,96 ha	0,00 std.
Frank Reith		3,96 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	19.03.20	-	-
Frank Reith		3,96 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	20.03.20	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	16.05.20	-	-
Düngung		3,96 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	08.06.20	-	-
Pflanzenschutz		3,96 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Ernte	22.07.20	-	-

Ernte		Entzug kg/ha									
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	
<input checked="" type="checkbox"/> Winterweichweizen (Korn/Frucht)	22.07.20	3,96 ha	81,94 dt	-171	-67	-50	0	0	0	0	

Report Schlagkarte	Schlag 6-00 24-Morgen	Jahr 2020	
Betrieb Paul-Dirk Heil	Fläche 6,84ha	Frucht Winterweichweizen	
Fruchtfolge Zwischen-frucht: Vorfrucht: Vor-Vorfrucht:	Schlaginformationen Bodenart keine Angabe	Ackerzahl Wasserschutzgebiet Kein WSG	Bodenproben Datum P ₂ O ₅ K ₂ O MgO pH

Sorten

	Saatstärke (Körner/m ²)	Kornfähigkeit (%)	TKM (g)	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> RGT Reform (WW)	0,00	0,00	0,00	22.10.19	6,84	145,00 kg

Düngemittel	Nährstoffe			Zufuhr kg/ha																							
	N _{ges}	N _{tot}	P ₂ O ₅	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N _{ges}	N _{tot}	NH	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B												
<input checked="" type="checkbox"/> Ammoniumnitratamstofflösung 28 (AHL) (Mineralisch)	g/kg	358,40	358,40	0,00	15.02.20	6,84	125,00 l	Nachlieferungen									0	0	0	0	0	0	0	0	0,00		
<input checked="" type="checkbox"/> ALZONB 40-S SKW Plesteritz (x) (Mineralisch)	g/kg	400,00	400,00	0,00	02.04.20	6,84	250,00 kg	Herbst									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Ammoniumnitratamstofflösung 28 (AHL) (Mineralisch)	g/kg	358,40	358,40	0,00	29.05.20	6,84	168,00 l	Frühjahr									45	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
																	100	100	0	0	0	0	0	0	15	0,00	
																	60	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
																	205	205	0	0	0	0	0	0	15	0,00	

Pflanzenschutzmittel

	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> Avoxa (008178-00)	07.04.20	6,84	1,800 l
<input checked="" type="checkbox"/> Ccc720 (034046-00)	07.04.20	6,84	0,600 l
<input checked="" type="checkbox"/> Moddus (...212-00/040)	29.04.20	6,84	0,400 l
<input checked="" type="checkbox"/> Alliance (006366-00)	14.05.20	6,84	0,100 kg
<input checked="" type="checkbox"/> Metador (024206-00)	14.05.20	6,84	1,500 l
<input checked="" type="checkbox"/> Elexa Itra (...406-00/010)	03.06.20	6,84	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Neddo (025631-00)	03.06.20	6,84	0,080 l

Arbeitstage

	Datum	Fläche (ha)	Menge
<input checked="" type="checkbox"/> Bodenbearbeitung	21.10.19	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Aussaat	22.10.19	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	15.02.20	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	02.04.20	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	07.04.20	-	-
Pflanzenschutz		6,84 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	29.04.20	-	-
Pflanzenschutz		6,84 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	14.05.20	-	-
Pflanzenschutz		6,84 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	29.05.20	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	03.06.20	-	-
Pflanzenschutz		6,84 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Ernte	23.07.20	-	-

Ernte	Ertrag kg/ha				-181	-71	-53	0	0	0	0
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	
<input checked="" type="checkbox"/> Winterweichweizen (Korn/Frucht)	23.07.20	6,84 ha	81,76 dt	-181	-71	-53	0	0	0	0	

Report Schlagkarte	Schlag 1-00 Kleeplatz	Jahr 2021		
Betrieb Günther Monath	Fläche 10,55ha	Frucht Winterweichweizen		Geplante Ertrag/ha k.A.
Fruchtfolge Zwischen-frucht: Vorfrucht: Vor-Vorfrucht:	Schlaginformationen Bodenart keine Angabe	Ackerzahl Wasserschutzgebiet Kein WSG		Bodenproben Datum P ₂ O ₅ K ₂ O MgO pH

Sorten							
	Sortenstärke (Böwe/m²)	Kornfähigkeit (%)	Trock (g)	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	
<input checked="" type="checkbox"/> Chevignon (WW)	0,00	0,00	0,00	19.10.20	10,55	137,00 kg	

Düngemittel	Nährstoffe	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	Zufuhr kg/ha											
					N _{ges}	N _{tot}	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	Si	Zn		
					Nachlieferungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
					Herbst	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Rindergülle (Organisch)	kg/m³	3,62	1,01	0,00	02.03.21	10,55	17,00 m³	62	31	31	0	0	0	0	0	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> AHL 25/6 (Mineralisch)	g/kg	320,00	320,00	0,00	10.04.21	10,55	186,00 l	60	60	0	0	0	0	0	14	0,00
<input checked="" type="checkbox"/> Ammoniumnitratthamstofflösung 28 (AHL) (Mineralisch)	g/kg	356,40	356,40	0,00	26.05.21	10,55	200,00 l	72	72	0	0	0	0	0	0	0,00
					Frühjahr	193	162	31	0	0	0	0	0	14	0,00	

Pflanzenschutzmittel			
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> Herold (...878-00/028)	10.11.20	10,55	0,600 l
<input checked="" type="checkbox"/> Saracen (027767-00)	10.11.20	10,55	0,075 l
<input checked="" type="checkbox"/> Countdown Nt (...334-00/014)	25.04.21	10,55	0,250 l
<input checked="" type="checkbox"/> Ompera Lqm (...271-00/001)	25.04.21	10,55	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Azbany (008947-00)	30.05.21	10,55	0,625 l
<input checked="" type="checkbox"/> Ravylex (00A272-00)	30.05.21	10,55	1,000 l

Arbeitsgänge			
	Datum	Fläche (ha)	Menge
<input checked="" type="checkbox"/> Bodenbearbeitung	17.10.20	-	-
Grubber		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Aussaat	19.10.20	-	-
Aussaat		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	10.11.20	-	-
Pflanzenschutz		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	02.03.21	-	-
Düngung		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	10.04.21	-	-
Düngung		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	25.04.21	-	-
Pflanzenschutz		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	26.05.21	-	-
Düngung		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	30.05.21	-	-
Pflanzenschutz		10,55 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Ernte	22.07.21	-	-

	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	Entzug kg/ha						
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B
<input checked="" type="checkbox"/> Winterweichweizen (Korn/Frucht)	22.07.21	10,55 ha	0,00 dt	0	0	0	0	0	0	0

Report Schlagkarte	Schlag 12-00 Winkelfeld	Jahr 2021	
Betrieb Frank Reith	Fläche 5,10ha	Frucht Winterweichweizen	
Fruchfolge Zwischen-frucht: Vorfrucht: Vor-Vorfrucht:	Schlaginformationen Bodenart keine Angabe Ackerzahl Wasserschutzgebiet Kein WSG		Bodenproben Datum P ₂ O ₅ K ₂ O MgO pH

Sorten						
	Saatstärke (Körner/m²)	Keimfähigkeit (%)	Trock (g)	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> Chevignon (WW)	0,00	0,00	0,00	24.10.20	5,10	150,00 kg

Düngemittel	Nährstoffe	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	Zufuhr kg/ha															
					N _{ges}	N _{net}	NH	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B							
<input checked="" type="checkbox"/> Schweinegülle (Organisch)	kg/m³	3,07	1,54	0,00	01.04.21	5,10	25,00 m³													
<input checked="" type="checkbox"/> Kalkammonsalpeter 27%N prills GEMILK (TR) (Minerälsalz)	g/kg	270,00	270,00	0,00	14.05.21	5,10	185,00 kg													
					Nachlieferungen		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
					Herbst		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
					Frühjahr		130	90	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00

Pflanzenschutzmittel			
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> Boxer (033835-00)	11.11.20	5,10	2,500 l
<input checked="" type="checkbox"/> Herold (...879-00/028)	11.11.20	5,10	0,600 l
<input checked="" type="checkbox"/> Coc720 (034046-60)	30.04.21	5,10	0,510 l
<input checked="" type="checkbox"/> Modus (...213-00/046)	30.04.21	5,10	0,260 l
<input checked="" type="checkbox"/> Pointer Sz (005890-00)	30.04.21	5,10	0,400 kg
<input checked="" type="checkbox"/> Prosero (025662-00)	08.06.21	5,10	1,000 l

Arbeitsgänge			
	Datum	Fläche (ha)	Menge
<input checked="" type="checkbox"/> Bodenbearbeitung	23.10.20	-	-
Grubber		5,10 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Aussaat	24.10.20	-	-
Aussaat		5,10 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	11.11.20	-	-
Pflanzenschutz		5,10 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	01.04.21	-	-
Düngung		5,10 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	30.04.21	-	-
Pflanzenschutz		5,10 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	14.05.21	-	-
Düngung		5,10 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	08.06.21	-	-
Pflanzenschutz		5,10 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Ernte	22.07.21	-	-

Ernte		Entzug kg/ha									
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	
<input checked="" type="checkbox"/> Winterweichweizen (Korn/Frucht)	22.07.21	5,10 ha	0,00 dt	0	0	0	0	0	0	0	

Report Schlagkarte	Schlag 3-00 Waldacker	Jahr 2021		
Betrieb Paul-Dirk Heil	Fläche 5,58ha	Frucht Winterweichweizen		Gepflanzte Ertrags/ha k.A.
Fruchtfolge Zwischen-frucht: Vorfrucht: Vor-Vorfrucht:	Schlaginformationen Bodenart keine Angabe			Ackerzahl
		Wasserschutzgebiet Kein WSG	Bodenproben Datum P ₂ O ₅ K ₂ O MgO pH	

Sorten							
	Sortenstärke (Böwe/m ²)	Keimfähigkeit (%)	Tübel (g)	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	
<input checked="" type="checkbox"/> RGT Reform (WW)	0,00	0,00	0,00	10.10.20	5,58	150,00 kg	

Düngemittel	Nährstoffe	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	Zufuhr kg/ha															
					N _{ges}	N _{verf}	NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B							
<input checked="" type="checkbox"/> Ammoniumnitratamstofflösung 20 (AHL) (Mineralisch)	g/kg	258,40	258,40	0,00	28.02.21	5,58	125,00 l													
<input checked="" type="checkbox"/> ALZONB 40-5 SKW Plesteritz (x) (Mineralisch)	g/kg	400,00	400,00	0,00	02.04.21	5,58	250,00 kg													
<input checked="" type="checkbox"/> Ammoniumnitratamstofflösung 20 (AHL) (Mineralisch)	g/kg	258,40	258,40	0,00	10.06.21	5,58	180,00 l													
								Nachlieferungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	
								Herbst	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	
								Frühjahr	209	209	0	0	0	0	0	0	15	0,00		

Pflanzenschutzmittel			
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha
<input checked="" type="checkbox"/> Alliance (006366-00)	21.04.21	5,58	0,050 kg
<input checked="" type="checkbox"/> Avoxa (008178-00)	21.04.21	5,58	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Moddus (-_213-00/D46)	21.04.21	5,58	0,200 l
<input checked="" type="checkbox"/> Matador (024208-00)	26.05.21	5,58	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Moddus (-_213-00/D46)	26.05.21	5,58	0,200 l
<input checked="" type="checkbox"/> Elexa Itra (...406-00/010)	09.06.21	5,58	1,000 l
<input checked="" type="checkbox"/> Neddo (025631-00)	09.06.21	5,58	0,080 l

Arbeitsgänge			
	Datum	Fläche (ha)	Menge
<input checked="" type="checkbox"/> Bodenbearbeitung	10.10.20	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Aussaat	10.10.20	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	28.02.21	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	02.04.21	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	21.04.21	-	-
Pflanzenschutz		5,58 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	26.05.21	-	-
Pflanzenschutz		5,58 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Pflanzenschutz	09.06.21	-	-
Pflanzenschutz		5,58 ha	0,00 std.
<input checked="" type="checkbox"/> Düngung	10.06.21	-	-
<input checked="" type="checkbox"/> Ernte	30.07.21	-	-

Ernte		Entzug kg/ha									
	Datum	Fläche (ha)	Menge/ha	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	B	
<input checked="" type="checkbox"/> Winterweichweizen (Kom/Frucht)	30.07.21	5,58 ha	0,00 dt	0	0	0	0	0	0	0	

Anhang 10: Ergebnisse der Pflanzenuntersuchungen hinsichtlich Nährstoffversorgung für die Versuchsjahre 2019 und 2020 (eigene Darstellung der Laborergebnisse)

2019	N	P	K
Kleeplatz			
1_1	34,3	4,1	32,4
1_2	34,4	4,1	31,6
1_3	37,6	4,6	37,4
1_4	33,2	4,0	31,9
Siedlung			
2_1	36,2	5,1	44,9
2_2	41,1	5,2	44,3
Waldacker			
3_1	43,0	2,9	33,6
3_2	44,9	3,1	42,8
3_3	42,3	2,4	29,7
3_4	44,7	3,0	34,5
3_5	23,5	3,1	32,3

2020	N	P	K
Hammchesberg			
1_1	33,2	5,25	40,11
1_2	27,2	4,52	33,74
1_3	26,2	4,72	36,39
Hinterm Hof			
2_1	23,8	3,7	30,71
2_2	23,8	3,76	32,3
2_3	24,6	3,51	31,28
24-Morgen			
3_1	35,6	4,46	30,56
3_2	37,4	4,18	33,24
3_3	34,9	4,08	32,46
3_4	34,6	4,07	30,48

Anhang 11: Ergebnisse der Saftstrommessung hinsichtlich Nitratgehalt in der Pflanze mit dem System Nitracheck für die Versuchsjahre 2019 und 2020 (eigene Darstellung)

2019	Homogen	Landwirt	Drohne	NDVI
Kleeplatz				
1_1	460	180	200	330
1_2	300	150	160	150
1_3	220	290	130	150
1_4	270	450	250	410
Siedlung				
2_1	1100	1100	1300	1000
2_2	670	1200	830	530
Waldacker				
3_1	970	1100	640	960
3_2	2100	2300	1600	1300
3_3	450	1500	570	440
3_4	650	550	1100	1100
3_5	420	880	990	420

2019	Homogen	Landwirt	Drohne	NDVI
Hammchesberg				
1_1	870	690	700	450
1_2	340	560	690	470
1_3	310	380	750	950
Hinterm Hof				
2_1	380			
2_2	270			
2_3	490			
24-Morgen				
3_1	330	750	970	910
3_2	560	640	420	1100
3_3	450	410	540	690
3_4	480	450	570	790

Anhang 12: Ergebnisse des N-Steigerungsversuchs des LLH auf den Standorten Leeheim (2020) und Nieder-Weisel (2019 - 2021) (eigene Darstellung der Daten des LLH)

Nieder-Weisel 2019

N-Düngung	Nmin	N gesamt	Ertrag dt/ha	kg N/dt	Protein %
0	70	70	55,83	1,25	10,25
130	70	200	86,90	2,30	12,30
160	70	230	89,95	2,56	12,2
190	70	260	94,08	2,76	12,60
160	70	230	93,20	2,47	12,60

Nieder-Weisel 2020

N-Düngung	Nmin	N gesamt	Ertrag dt/ha	kg N/dt	Protein %
0	50	50	69,33	0,72	8,88
150	50	200	76,93	2,60	12,30
180	50	230	87,20	2,64	12,35
210	50	260	97,85	2,66	13,05
180	50	230	98,23	2,34	12,10

Nieder-Weisel 2021

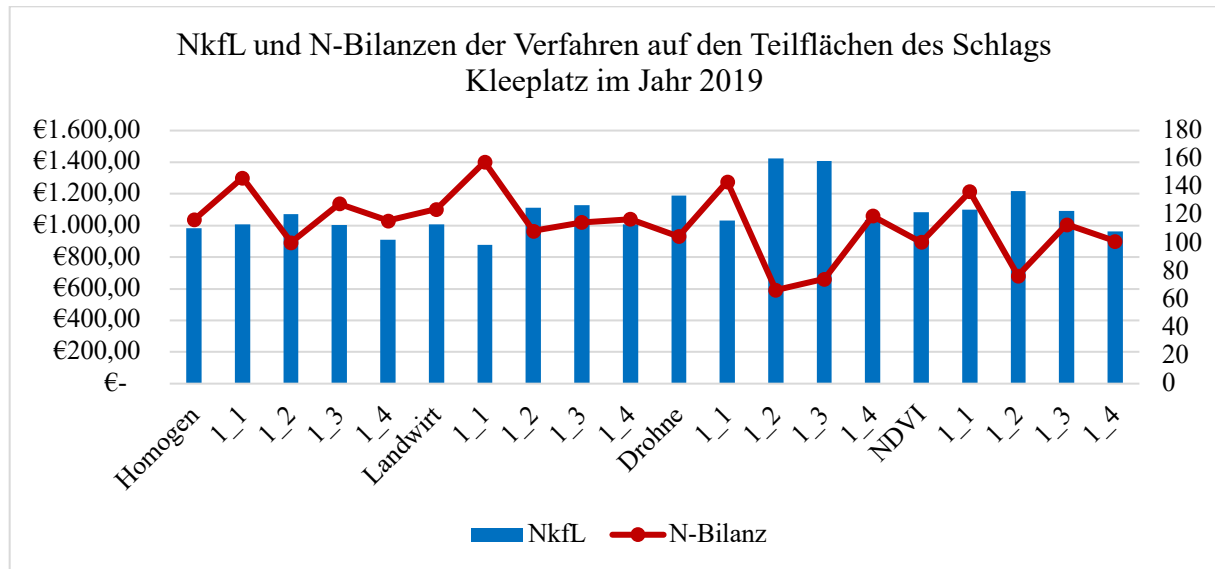
N-Düngung	Nmin	N gesamt	Ertrag dt/ha	kg N/dt	Protein %
0	30	30	9,48	0,61	9,37
160	30	190	86,40	2,20	10,95
160	30	190	83,93	2,26	11,70
200	30	230	90,08	2,55	11,60
200	30	230	91,15	2,52	11,60
230	30	260	96,15	2,70	12,80
230	30	260	76,38	3,40	11,20
200	30	230	93,40	2,46	11,50

Leeheim 2020

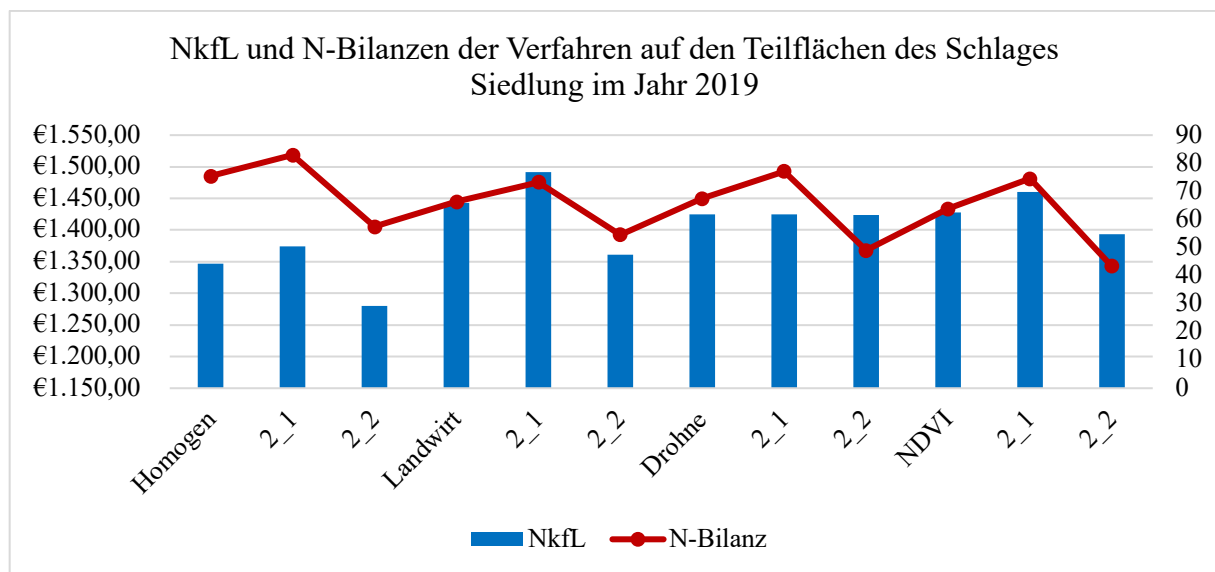
N-Düngung	Nmin	N gesamt	Ertrag dt/ha	kg N/dt	Protein %
0	59	59	61,20	0,96	-
141	59	200	87,73	2,28	-
151	59	210	97,81	2,15	-
171	59	230	88,98	2,60	-
181	59	240	99,11	2,42	-
201	59	260	94,13	2,76	-

Anhang 13: Nkfl und N-Bilanzen der untersuchten PF-Verfahren, getrennt nach Teilflächen für alle Versuchsschläge außer Kleeplatz 2021, der schon im Textteil dargestellt wurde (eigene Darstellungen und Berechnungen)

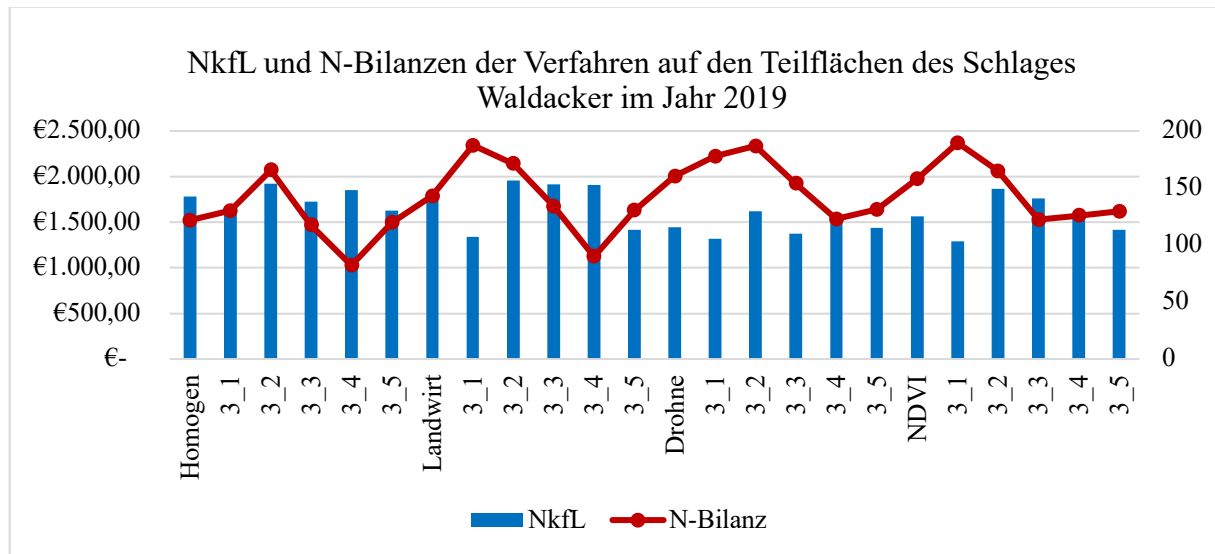
Kleeplatz 2019



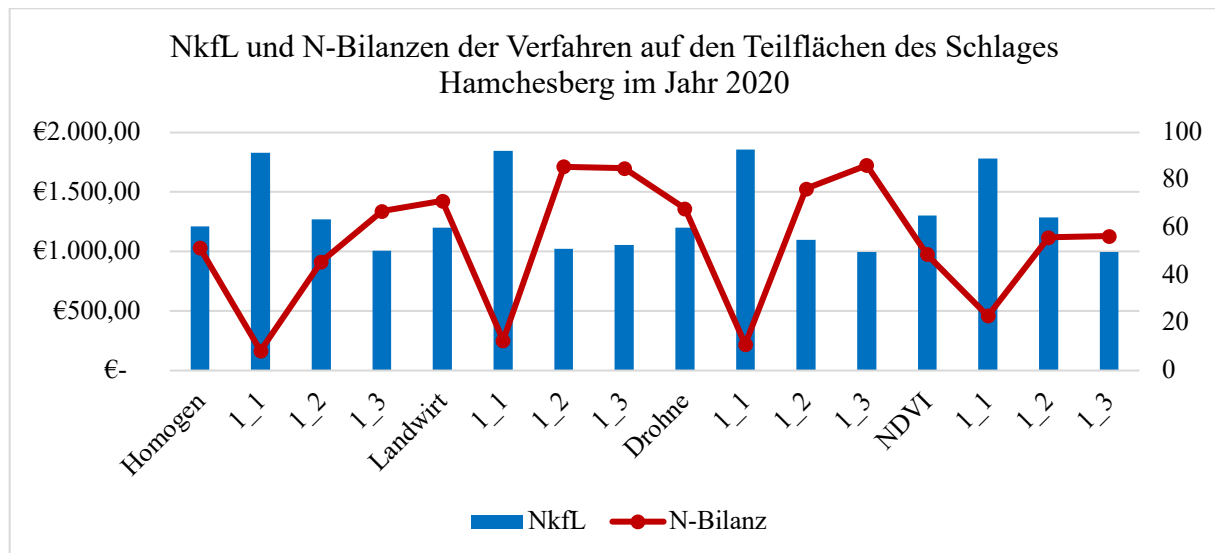
Siedlung 2019



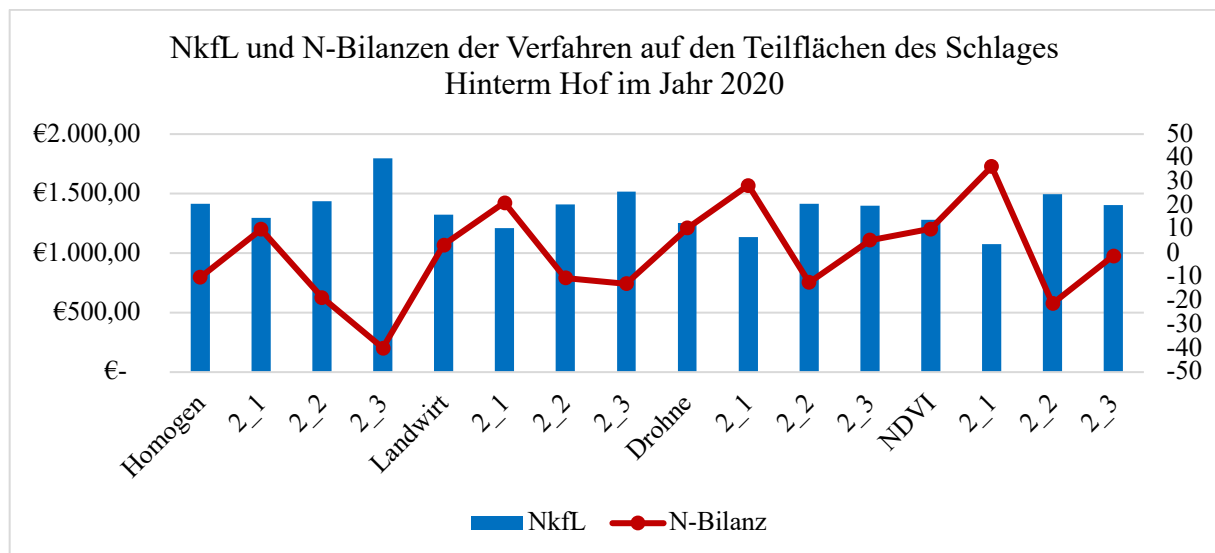
Waldacker 2019



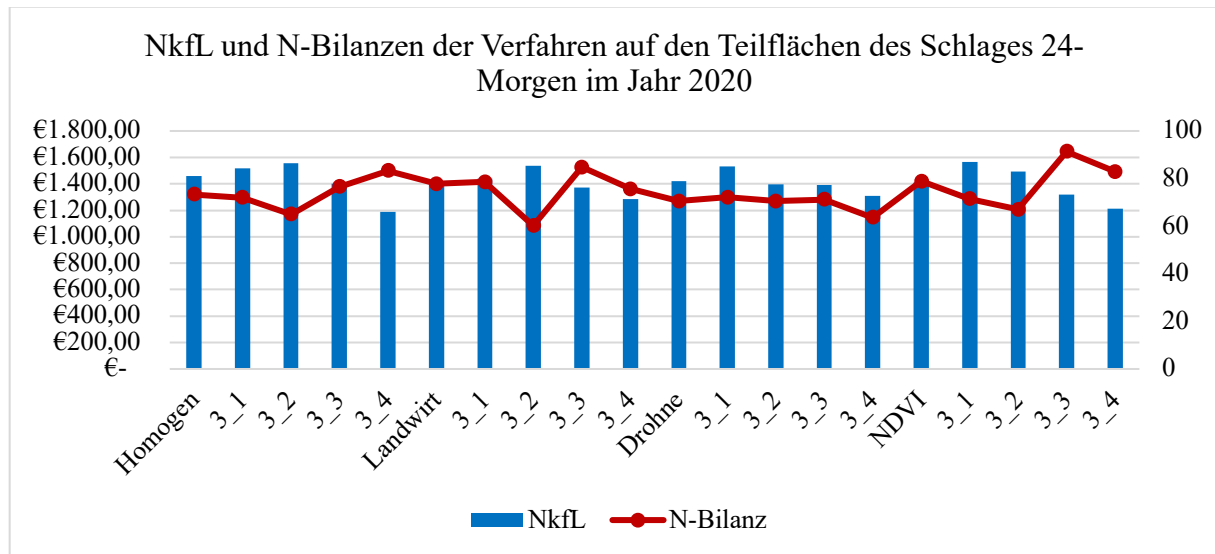
Hammchesberg 2020



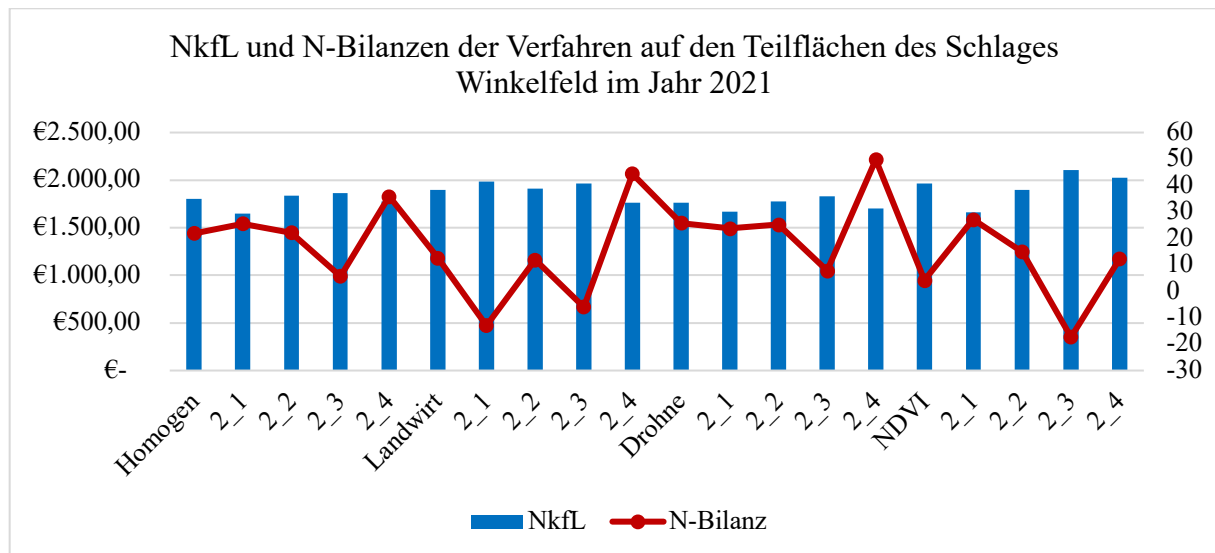
Hinterm Hof 2020



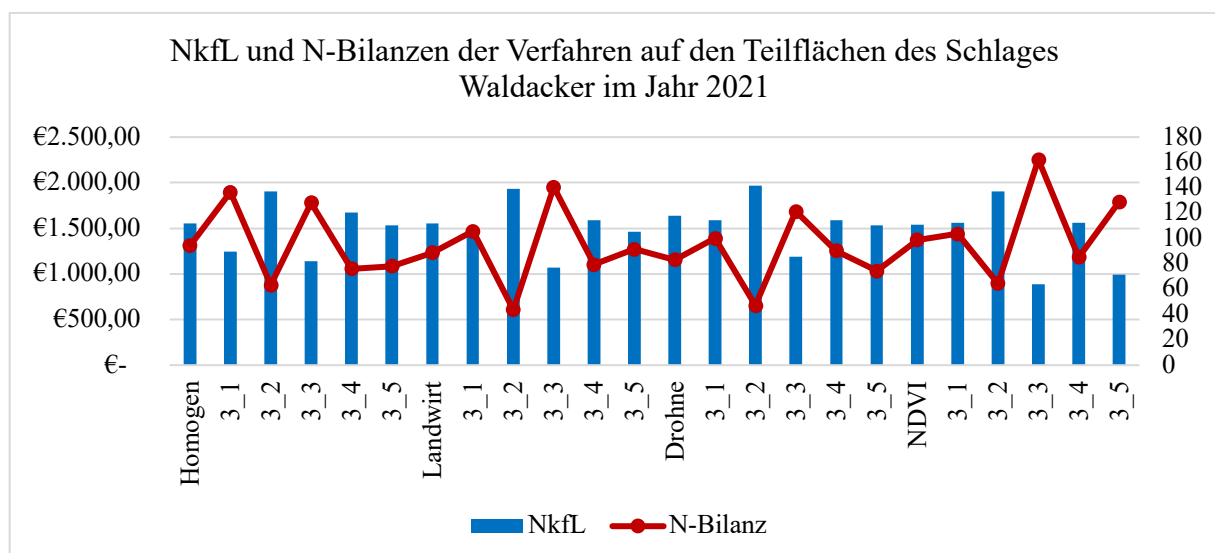
24-Morgen 2020



Winkelfeld 2021



Waldacker 2021



Anhang 14: Ergebnisse der ANOVA bezüglich des Einflusses von Teilfläche und Versuchsvariante auf ökologische und ökonomische Kennzahlen für die einzelnen Versuchsschläge (eigene Darstellung der mit SPSS berechneten Daten)

Kleeplatz 2019 (n = 140)

Kleeplatz 2019	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante/ Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,471	0,002	0,000**	0,285	0,061	0,228	0,005**	0,167	62,23 (7,98)	63,8 (9,88)	73,71 (13,90)	67,23 (10,68)	66,97 (11,69)
N-Entzug	0,471	0,002	0,000**	0,285	0,004**	0,228	0,005**	0,167	123 (16)	126 (20)	146 (28)	133 (21)	132 (23)
Dünge- bilanz	0,549	0,002	0,000**	0,340	0,000**	0,275	0,000**	0,241	47 (16)	53 (17)	31 (32)	29 (21)	40 (21)
N-Bilanz	0,683	0,002	0,000**	0,588	0,001**	0,275	0,000**	0,241	117 (21)	124 (25)	105 (37)	101 (27)	111 (30)
Nkfl €	0,481	0,000	0,000**	0,470	0,025*	0,002	0,000**	0,035	984,41 € (148,12 €)	1.005,54 € (179,25 €)	1.190,78 € (261,09 €)	1.084,76 € (197,57 €)	1.070,29 € (216,57 €)

Siedlung 2019 (n = 151)

Siedlung 2019	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante/ Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,085	0,003	0,032*	0,031	0,078	0,046	0,588	0,013	89,60 (11,00)	95,78 (17,03)	94,51 (7,39)	94,90 (11,43)	93,57 (12,19)
N-Entzug	0,085	0,003	0,032*	0,031	0,078	0,046	0,588	0,013	129 (16)	137 (24)	136 (11)	136 (16)	134 (17)
Dünge- bilanz	0,102	0,002	0,007**	0,050	0,043*	0,055	0,486	0,017	-42 (16)	-48 (25)	-48 (11)	-51 (16)	-47 (18)
N-Bilanz	0,356	0,001	0,000**	0,297	0,014*	0,071	0,375	0,021	-9 (24)	-23 (26)	-20 (20)	-23 (21)	-19 (23)
Nkfl €	0,481	0,000	0,000**	0,470	0,025*	0,002	0,000**	0,035	1.346,61 € (176,07 €)	1.443,03 € (273,20 €)	1.424,40 € (117,56 €)	1.433,51 € (182,49 €)	1.410,15 € (195,08 €)

Waldacker 2019 (n = 157)

Siedlung 2019	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante/ Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,246	0,608	0,000**	0,144	0,014*	0,074	0,899	0,043	104,74 (25,76)	102,47 (24,50)	86,97 (22,53)	92,37 (22,00)	96,71 (24,79)
N-Entzug	0,246	0,608	0,000**	0,144	0,014*	0,074	0,899	0,043	220 (54)	215 (51)	183 (47)	194 (46)	203 (52)
Dünge- bilanz	0,273	0,624	0,000**	0,183	0,032*	0,062	0,792	0,054	-15 (54)	2 (52)	24 (51)	17 (52)	7 (54)
N-Bilanz	0,355	0,624	0,000**	0,273	0,032*	0,062	0,792	0,054	122 (60)	140 (59)	160 (53)	154 (50)	143 (58)
Nkfl €	0,481	0,000	0,000**	0,470	0,025*	0,002	0,000**	0,035	1.779,80 € (488,19 €)	1.724,47 € (462,50 €)	1.441,25 € (428,88 €)	1.539,50 € (419,87 €)	1.623,07 € (470,28 €)

Hammchesberg 2020 (n = 862)

Hammchesberg 2020	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante/ Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,719	0,000	0,000**	0,701	0,009**	0,013	0,899	0,103	79,83 (24,04)	79,08 (21,62)	78,86 (19,99)	86,91 (20,78)	81,29 (21,85)
Protein %	0,891	0,000	0,000**	0,791	0,000**	0,700	0,000**	0,482	11,34 (0,15)	11,57 (0,32)	11,62 (0,33)	11,01 (0,41)	11,38 (0,40)
N-Entzug	0,246	0,608	0,000**	0,144	0,014*	0,074	0,899	0,043	136 (42)	137 (35)	137 (33)	143 (32)	139 (36)
Düngebilanz	0,750	0,000	0,000**	0,713	0,000**	0,137	0,000**	0,190	35 (42)	53 (42)	53 (41)	29 (25)	43 (39)
N-Bilanz	0,639	0,000	0,000**	0,565	0,000**	0,137	0,000**	0,190	52 (36)	71 (35)	71 (33)	49 (18)	61 (33)
Nkfl €	0,707	0,000	0,000**	0,693	0,019*	0,012	0,000**	0,098	1.213,86 € (420,62 €)	1.195,61 € (369,55 €)	1.195,86 € (345,96 €)	1.301,19 € (328,37 €)	1.228,06 € (368,44 €)

Hinterm Hof 2020 (n = 180)

Hinterm Hof 2020	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante/ Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,440	0,000	0,000**	0,348	0,001**	0,087	0,005**	0,104	94,62 (21,80)	89,08 (10,78)	84,74 (10,84)	86,20 (14,04)	89,52 (16,05)
Protein %	0,999	0,000	0,000**	0,997	0,000**	0,998	0,000**	0,999	10,52 (0,24)	10,28 (0,27)	10,30 (0,29)	10,06 (0,15)	10,32 (0,29)
N-Entzug	0,499	0,000	0,000**	0,377	0,000**	0,160	0,004**	0,107	150 (35)	139 (19)	132 (15)	131 (23)	140 (27)
Düngebilanz	0,519	0,000	0,000**	0,402	0,000**	0,177	0,006**	0,101	-51 (35)	-38 (20)	-30 (17)	-31 (25)	-40 (28)
N-Bilanz	0,558	0,000	0,000**	0,469	0,000**	0,177	0,000**	0,101	-10 (36)	3 (21)	11 (20)	10 (28)	2 (29)
Nkfl €	0,476	0,000	0,000**	0,371	0,000**	0,128	0,007	0,098	1.464,94 € (365,01 €)	1.351,29 € (193,55 €)	1.282,67 € (168,46 €)	1.288,99 € (234,51 €)	1.363,50 € (272,71 €)

24-Morgen 2020 (n = 611)

24-Morgen 2020	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante/ Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,185	0,000	0,000**	0,155	0,195	0,008	0,000**	0,050	95,76 (13,41)	94,77 (12,32)	94,46 (12,23)	93,20 (13,96)	94,58 (13,00)
Protein %	0,972	0,000	0,000**	0,890	0,000**	0,919	0,000**	0,957	11,36 (0,26)	11,11 (0,24)	11,15 (0,16)	11,38 (0,38)	11,25 (0,30)
N-Entzug	0,200	0,000	0,000**	0,162	0,762	0,002	0,000**	0,055	164 (23)	159 (20)	159 (21)	160 (25)	161 (22)
Düngebilanz	0,226	0,000	0,000**	0,173	0,008**	0,020	0,000**	0,054	41 (23)	45 (21)	39 (20)	48 (25)	43 (23)
N-Bilanz	0,134	0,000	0,000**	0,070	0,008**	0,020	0,000**	0,054	73 (21)	78 (20)	70 (20)	79 (24)	75 (21)
Nkfl €	0,189	0,000	0,000**	0,159	0,901	0,001	0,001**	0,046	1.456,84 € (229,73 €)	1.416,97 € (206,71 €)	1.421,58 € (207,54 €)	1.411,74 € (248,52 €)	1.427,36 € (223,95 €)

Kleeplatz 2021 (n = 698)

Kleeplatz 2021	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante/ Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,386	0,006	0,000**	0,336	0,001**	0,024	0,000**	0,103	76,79 (9,39)	75,62 (6,73)	75,42 (7,03)	76,72 (6,24)	76,11 (7,42)
Protein %	0,982	0,000	0,000**	0,976	0,000**	0,723	0,000**	0,899	12,87 (0,36)	12,47 (0,32)	12,81 (0,47)	12,71 (0,51)	12,71 (0,45)
N-Entzug	0,263	0,009	0,000**	0,096	0,000**	0,041	0,000**	0,166	148 (16)	142 (12)	145 (12)	147 (11)	145 (13)
Dünge- bilanz	0,257	0,005	0,000**	0,072	0,000**	0,047	0,000**	0,166	42 (16)	50 (12)	44 (12)	44 (11)	45 (13)
N-Bilanz	0,472	0,005	0,000**	0,379	0,000**	0,047	0,000**	0,166	81 (13)	89 (15)	84 (17)	86 (17)	85 (16)
Nkfl €	0,326	0,005	0,000**	0,248	0,000**	0,028	0,000**	0,120	1.224,58 € (164,55 €)	1.186,98 € (117,91 €)	1.197,98 € (121,58 €)	1.217,04 € (108,77 €)	1.205,91 € (129,94 €)

Winkelfeld 2021 (n = 634)

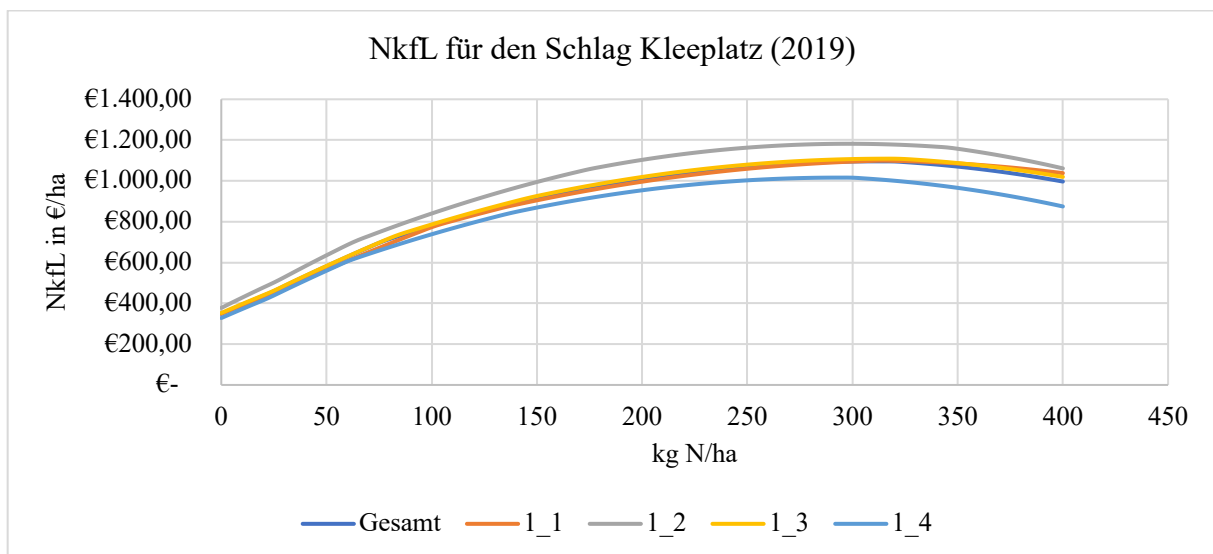
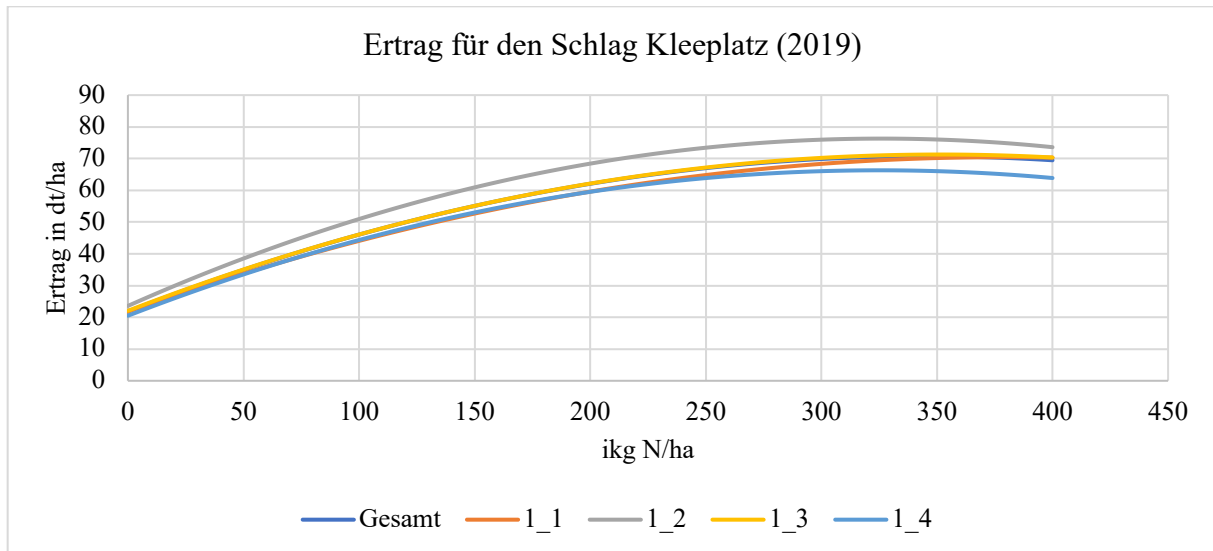
Winkelfeld 2021	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante/ Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,190	0,000	0,000**	0,045	0,000**	0,088	0,000**	0,059	107,59 (7,85)	113,59 (9,98)	106,96 (6,76)	118,03 (23,89)	111,32 (14,02)
Protein %	1,000			1,000		1,000		1,000	11,95 (0,16)	11,84 (0,31)	11,69 (0,45)	11,73 (0,32)	11,81 (0,34)
N-Entzug	0,279	0,000	0,000**	0,129	0,000**	0,90	0,000**	0,104	194 (15)	203 (20)	188 (15)	209 (44)	198 (27)
Dünge- bilanz	0,302	0,000	0,000**	0,136	0,000**	0,091	0,000**	0,124	-64 (15)	-72 (22)	-58 (15)	-79 (45)	-68 (27)
N-Bilanz	0,433	0,000	0,000**	0,314	0,000**	0,091	0,000**	0,124	22 (18)	13 (29)	26 (21)	4 (45)	16 (30)
Nkfl €	0,244	0,000	0,000**	0,091	0,000**	0,089	0,000**	0,088	1.800,10 € (145,76 €)	1.892,85 € (190,15 €)	1.758,73 € (133,17 €)	1.965,33 € (438,32 €)	1.850,98 € (258,97 €)

Waldacker 2021 (n = 348)

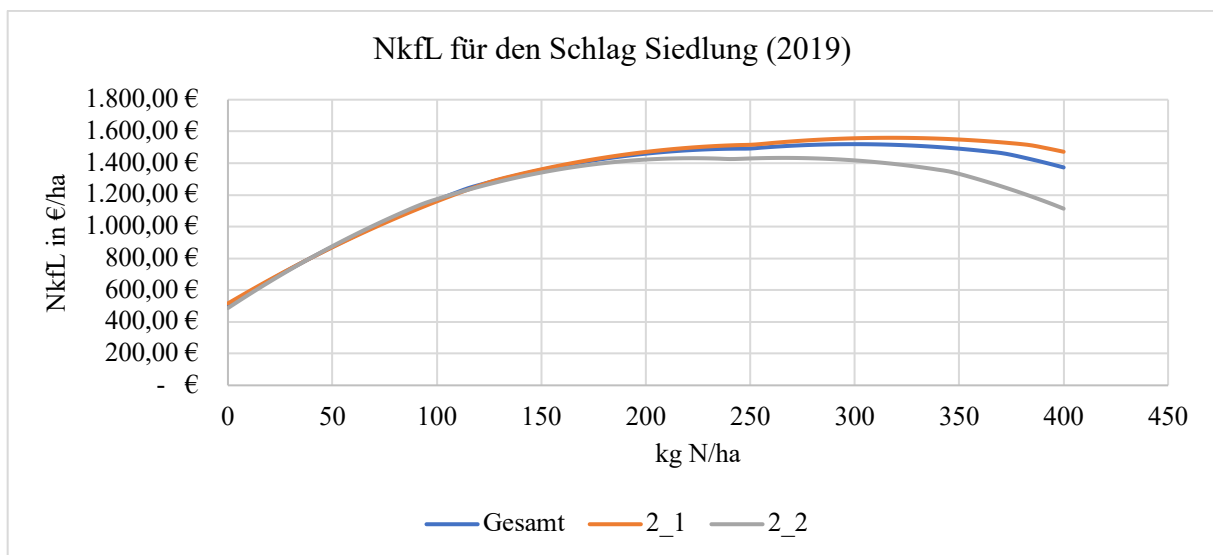
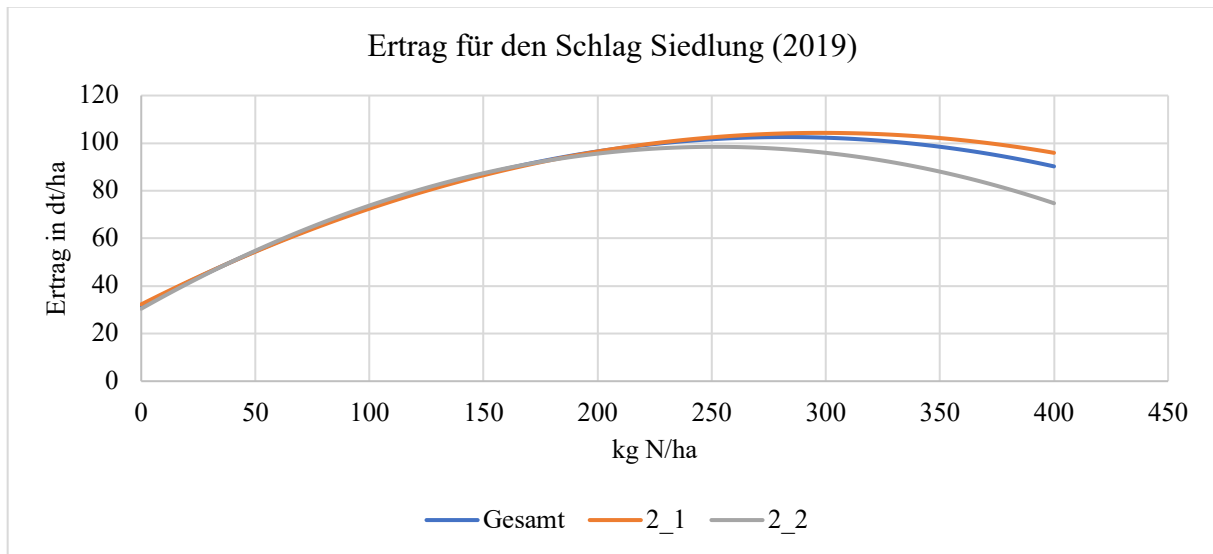
Waldacker 2021	R ²	Levene-Test	Teilfläche		Variante		Variante/ Teilflächen		Mittelwerte (Standardabweichungen) der Varianten				
			Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	Sig.	Eta ²	H	L	D	N	Ges.
Ertrag dt	0,469	0,003	0,000**	0,422	0,112	0,018	0,004**	0,084	95,10 (21,24)	94,43 (20,56)	99,91 (19,62)	94,48 (24,83)	95,63 (21,79)
Protein %	0,981	0,000	0,000**	0,946	0,000**	0,322	0,000**	0,963	13,04 (0,32)	13,20 (0,30)	13,01 (0,29)	13,04 (0,09)	13,07 (0,28)
N-Entzug	0,448	0,003	0,000**	0,400	0,106	0,018	0,007**	0,078	186 (39)	188 (41)	195 (38)	185 (48)	188 (42)
Dünge- bilanz	0,467	0,001	0,000**	0,412	0,064	0,022	0,001**	0,091	24 (39)	18 (46)	12 (43)	25 (50)	21 (45)
N-Bilanz	0,455	0,001	0,000**	0,395	0,064	0,022	0,001**	0,091	94 (42)	89 (44)	83 (42)	99 (48)	92 (44)
Nkfl €	0,463	0,003	0,000**	0,416	0,107	0,018	0,005**	0,081	1.549,06 € (384,59 €)	1.550,89 € (387,41 €)	1.640,35 € (364,40 €)	1.538,52 € (459,23 €)	1.563,28 € (402,67 €)

Anhang 15: Grafischer Verlauf der ex-post-Ertrags- und Nkfl-Funktionen nach Teilflächen in Abhängigkeit der N-Düngung für alle Versuchsschläge, außer Kleeplatz 2021, der bereits im Textteil dargestellt ist (eigene Darstellung und Berechnungen)

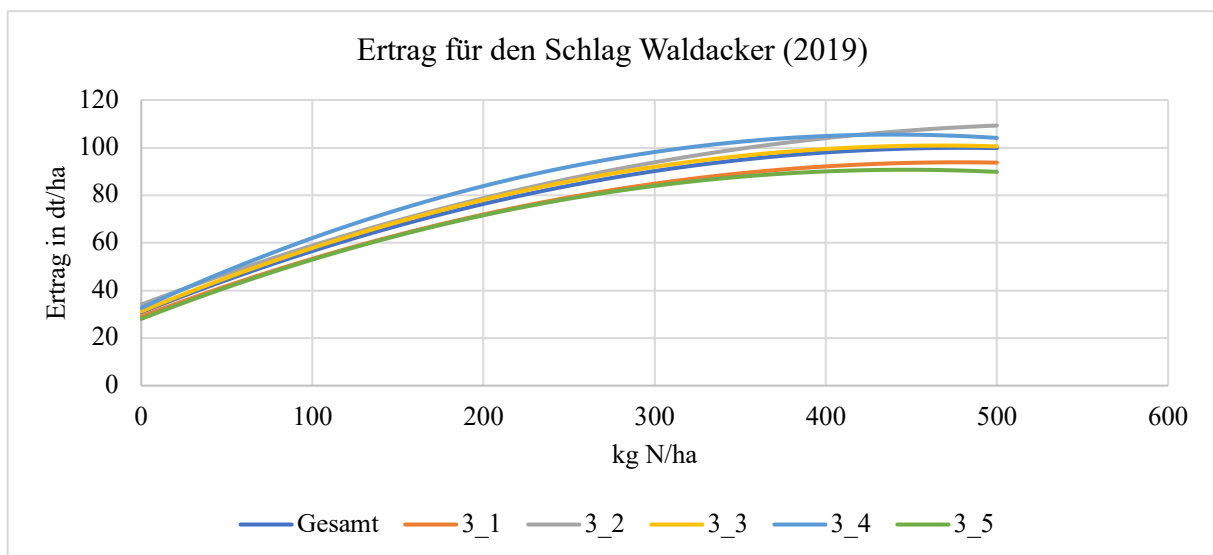
Kleeplatz 2019

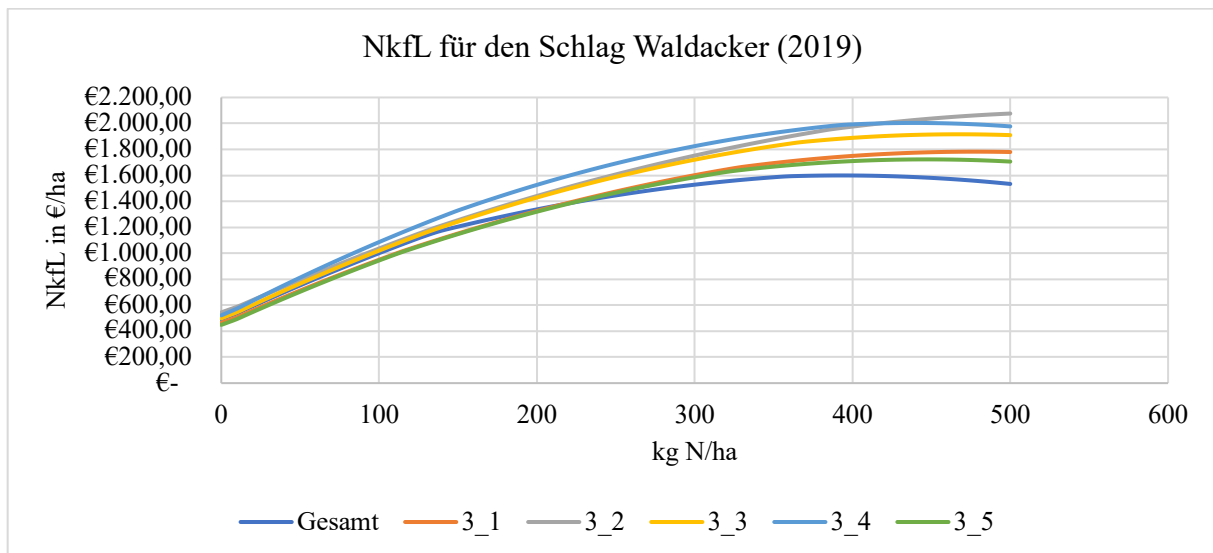


Siedlung 2019

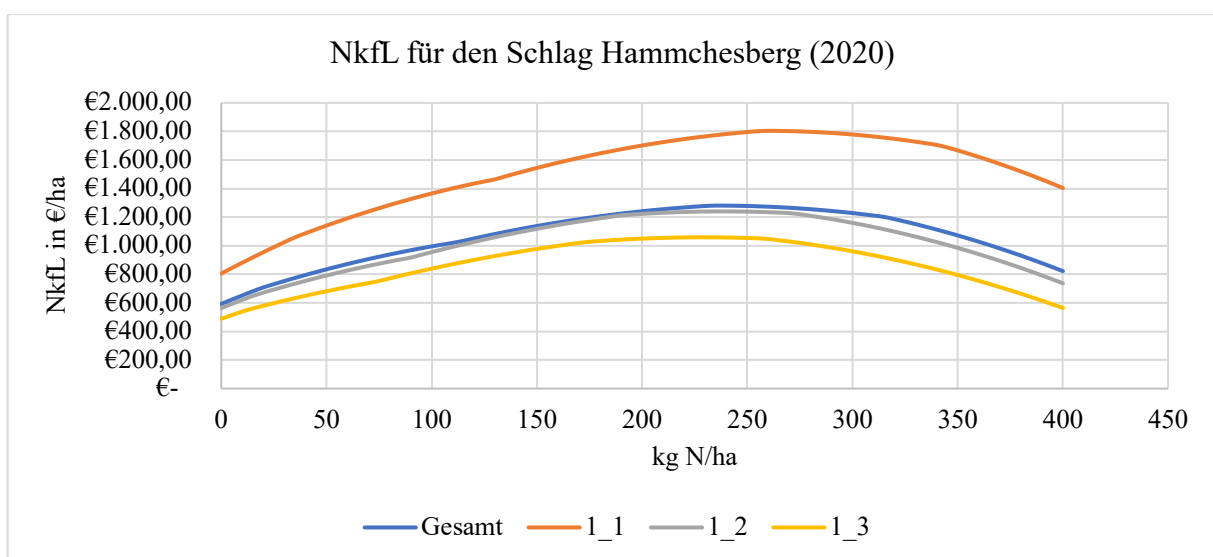
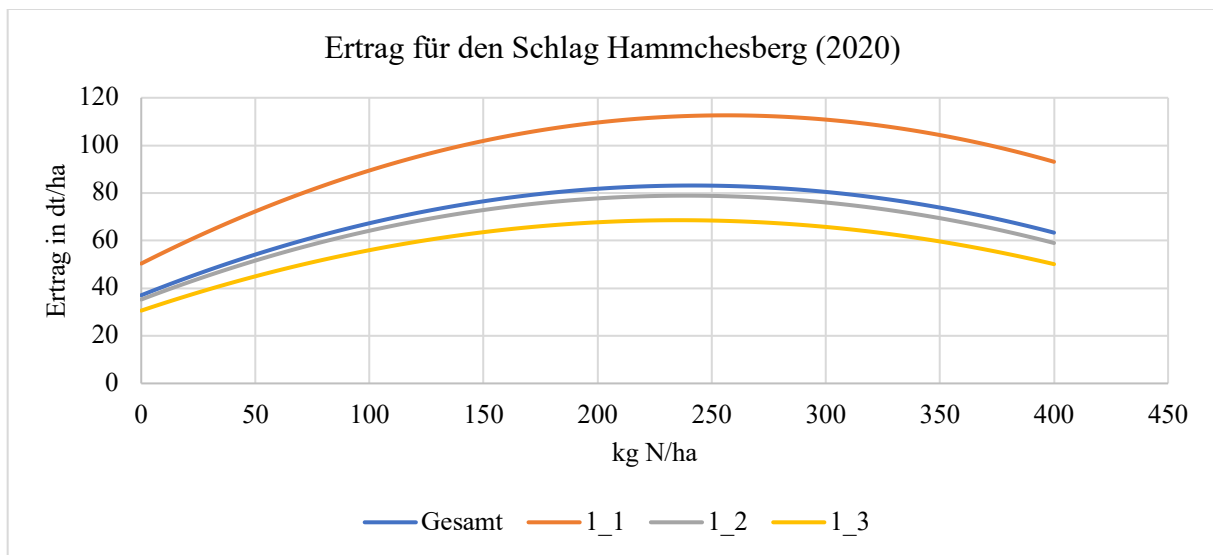


Waldacker 2019

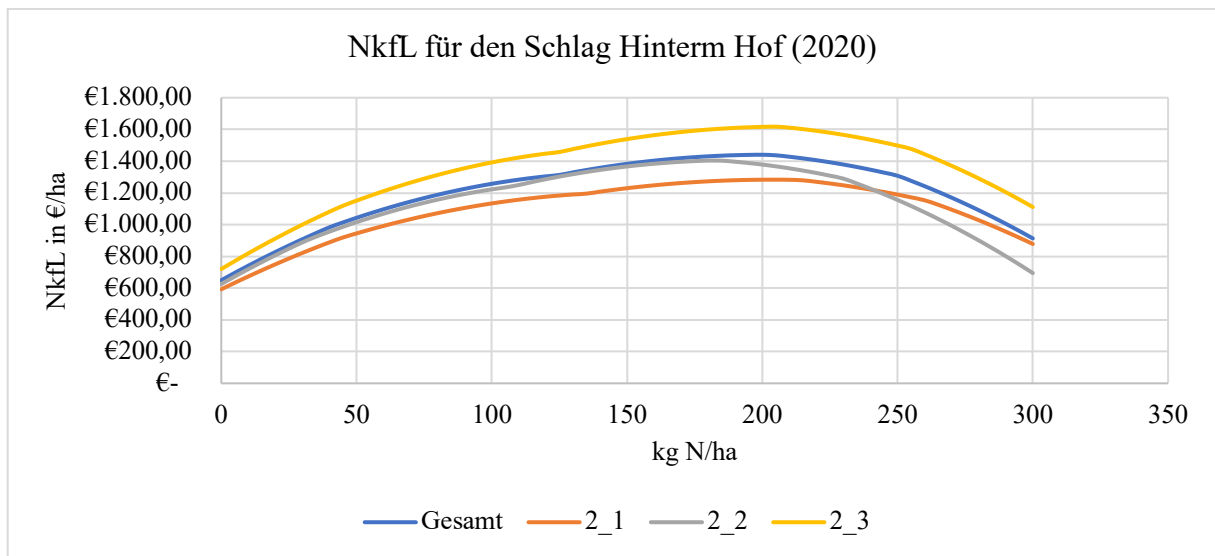
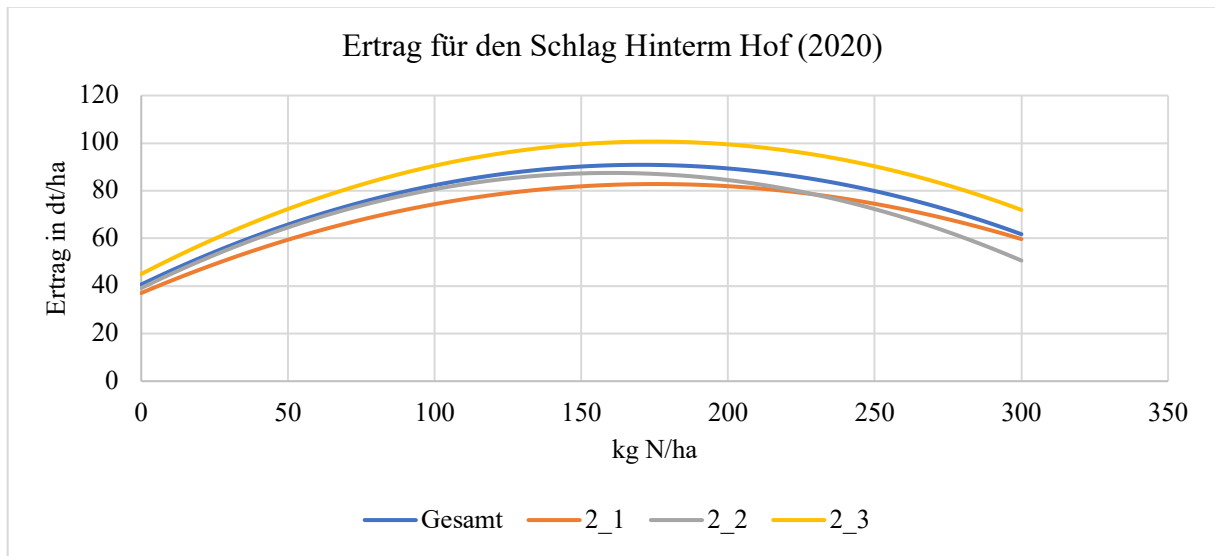




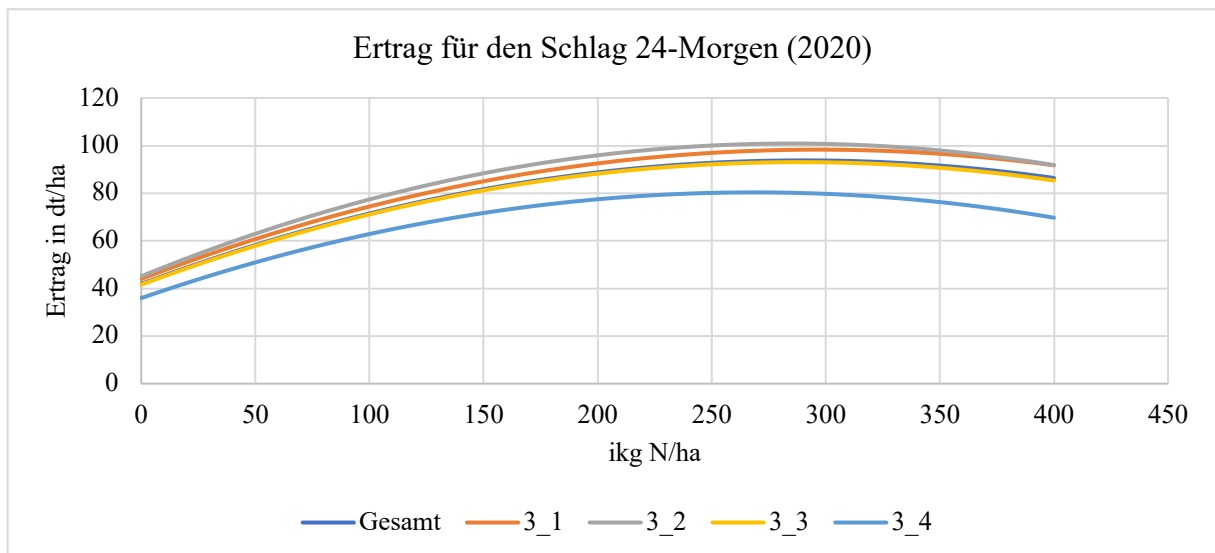
Hammchesberg 2020

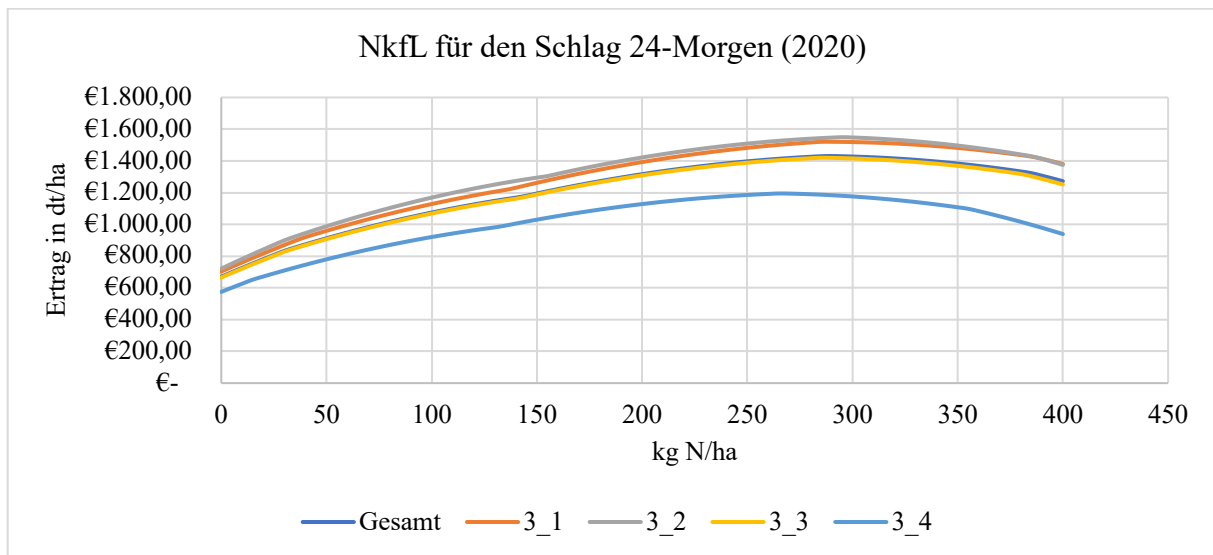


Hinterm Hof 2020

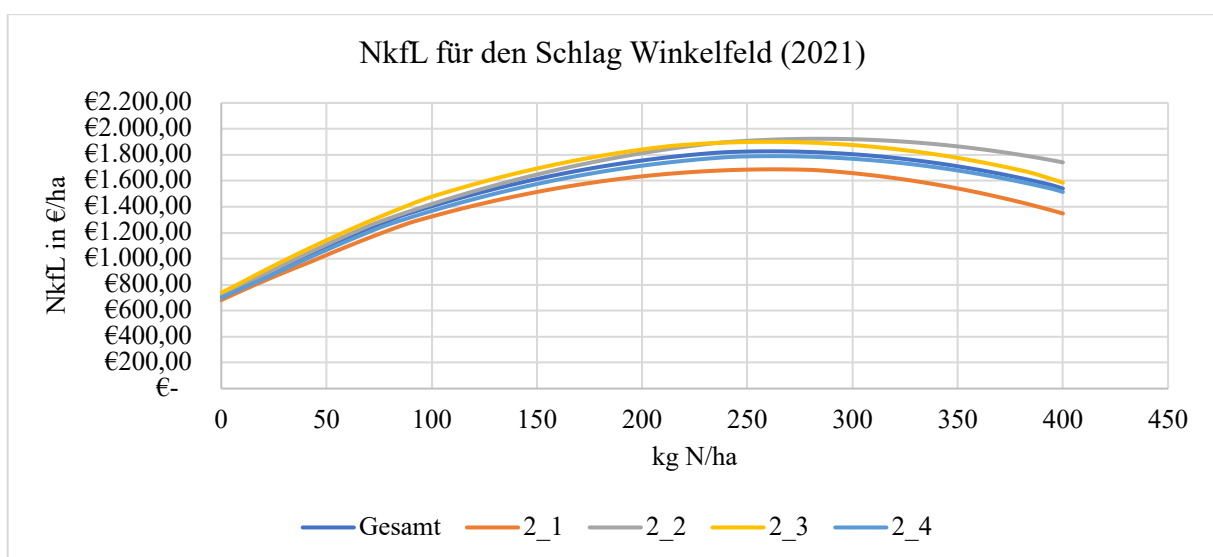
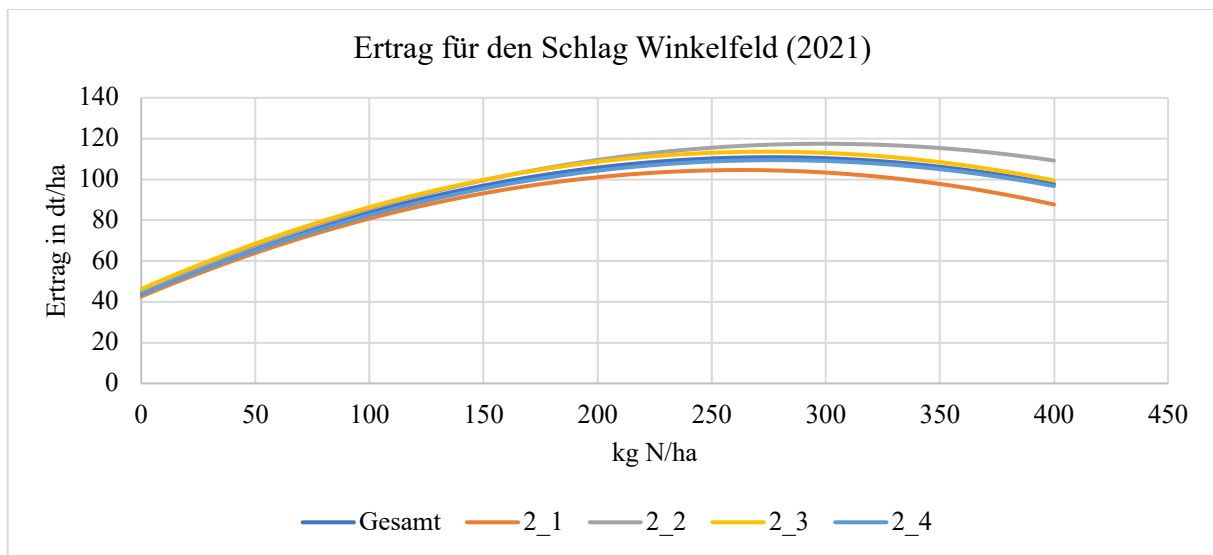


24-Morgen 2020

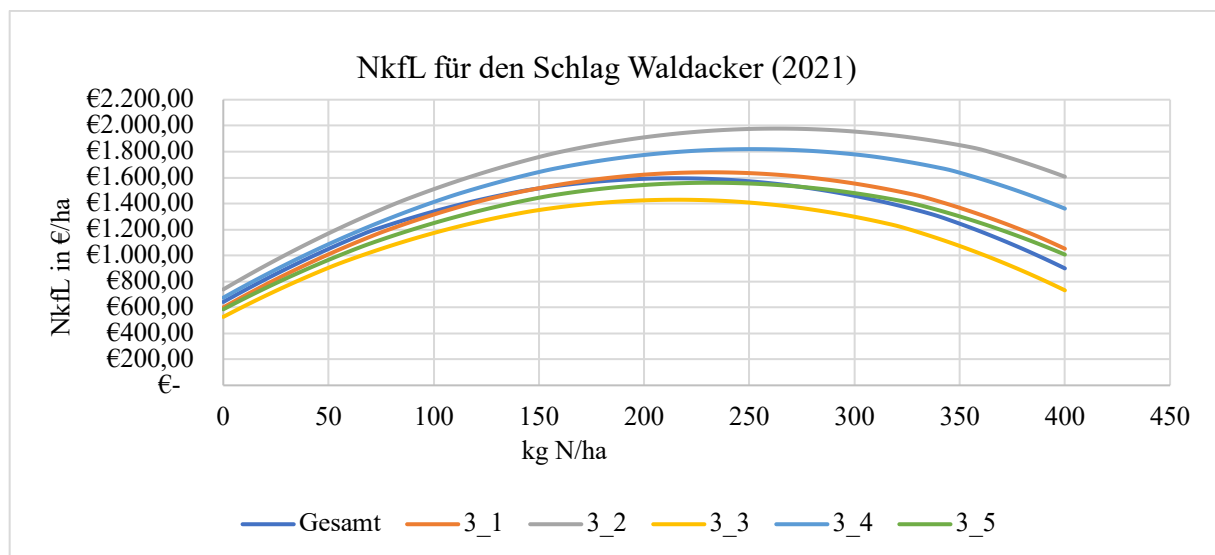
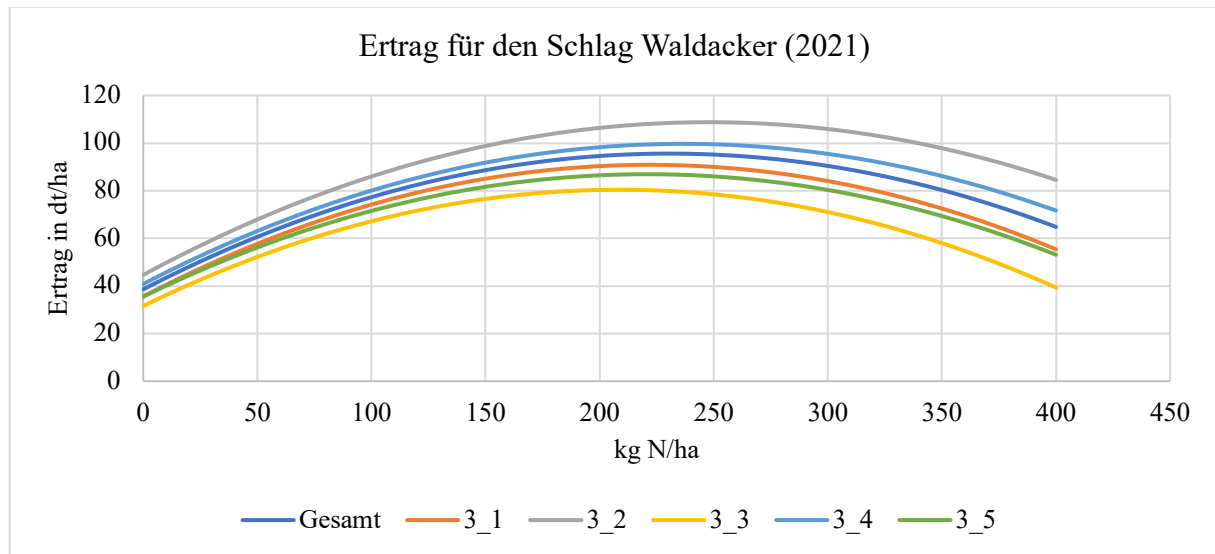




Winkelfeld 2021



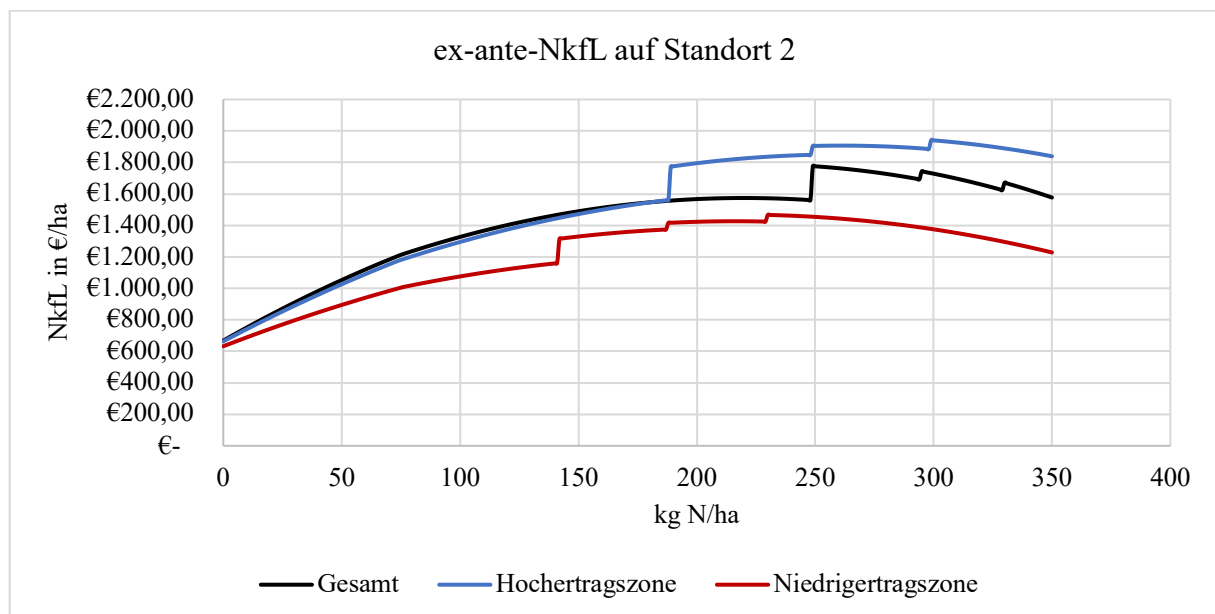
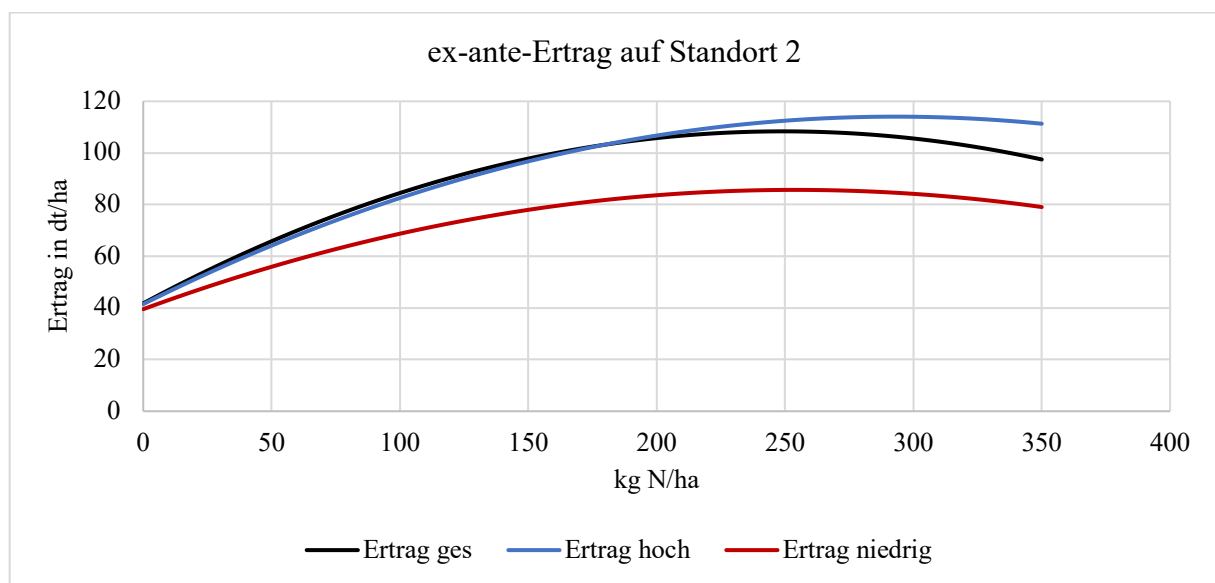
Waldacker 2021



Anhang 16: Grafischer Verlauf der ex-ante-Ertrags- und NkfL-Funktionen in Abhängigkeit der N-Düngung für die Standorte 2 und 3 (eigene Darstellung und Berechnungen)

Standort 2

	ex-ante-Ertragsfunktion			ex-ante-Proteinfunktion	
	a	b	c	α	β
Standort gesamt	41,7715752	0,53435768	-0,0010720	7,13886165	2,11689924
hoher Ertrag	41,4781514	0,49520751	-0,0008447	7,59741524	2,44668744
niedriger Ertrag	39,5156023	0,36396532	-0,0007171	7,62441448	2,36638833



Standort 3

	ex-ante-Ertragsfunktion			ex-ante-Proteinfunktion	
	a	b	c	α	β
Standort gesamt	42,1832326	0,3420917	-0,0005238	9,92822893	0,81349639
hoher Ertrag	46,4272841	0,4245976	-0,0006758	9,92988923	0,85082263
niedriger Ertrag	35,4122984	0,2907267	-0,0004738	10,15334576	0,75987223

