

Til Feike¹, Ludwig Riedesel Freiherr zu Eisenbach¹, Robin Lieb¹, Doreen Gabriel², Dima Sabboura¹, Ashifur Rahman Shawon¹, Max Wetzel¹, Bettina Klocke¹, Sandra Krengel-Horney¹, Jürgen Schwarz¹

Einfluss von Pflanzenschutzstrategie und Bodenbearbeitung auf den CO₂-Fußabdruck von Weizen

Impact of plant protection strategy and soil tillage on the carbon footprint of wheat

311

Zusammenfassung

Der Klimaschutz liegt aufgrund der zunehmenden negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die pflanzliche Produktion im Eigeninteresse der Landwirtschaft. Welche Auswirkungen unterschiedliche Pflanzenschutzstrategien, der Verzicht auf Fungizide sowie eine reduzierte Bodenbearbeitung auf die Klimawirkung der Weizenproduktion haben wurde aufbauend auf einem Dauerfeldversuch in Dahnsdorf in 2008–2019 untersucht. Die Bewertung wurde mittels partieller Lebenszyklus (LCA) durchgeführt. Im Durchschnitt über sämtliche Versuchsvarianten und Jahre lagen die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bei 3002 kg CO₂eq ha⁻¹ und der CO₂-Fußabdruck (CFP) bei 0,53 kg CO₂eq kg⁻¹. Obwohl die Varianten mit wendender Bodenbearbeitung signifikant höhere THG-Emissionen je ha aufwiesen, waren ihre CFPs nicht signifikant höher als die der nicht-wendenden Varianten. Die ertragssichernde Wirkung der Fungizide führte zu verringerten CFPs. Signifikante Jahresunterschiede zeigten sich bei allen drei untersuchten Parametern. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer Bewertung über längere Zeitreihen und den besonderen Wert von Langzeitversuchen.

Stichwörter: Klimaschutz, THG-Emissionen, LCA, Fungizid, integrierter Pflanzenschutz, Pflug

Abstract

Climate protection is in the self-interest of agriculture due to the increasing negative effects of climate change on crop production. The effects of different crop protection strategies, the non-usage of fungicides, and reduced tillage were assessed regarding climate impact of wheat production based on a long-term field trial in Dahnsdorf in 2008–2019. The assessment was carried out using a partial life cycle assessment (LCA). On average across all treatments and years, greenhouse gas (GHG) emissions were 3002 kg CO₂eq ha⁻¹ and carbon footprint (CFP) was 0.53 kg CO₂eq kg⁻¹. Although the treatments with plow caused significantly higher GHG emissions per hectare, their CFPs were not significantly higher than those of the non-plowed treatments. The yield-securing effects of fungicides led to reduced CFPs. Significant differences between years were evident for all three parameters examined. This underlines the need for an evaluation over longer time series and the special value of long-term field trials.

Key words: climate protection, GHG emissions, LCA, fungicide, integrated pest management, plow

Affiliationen

Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Kleinmachnow¹

Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig²

Kontaktanschrift

Dr. Til Feike, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow, E-Mail: til.feike@julius-kuehn.de

Zur Veröffentlichung angenommen

9. Juni 2020

Einleitung

Der fortschreitende Klimawandel bildet eine der größten Herausforderungen für die landwirtschaftliche Produktion in Deutschland. Gleichzeitig trägt die Landwirtschaft substantiell zum Klimawandel bei. Zehn bis zwölf Prozent der globalen anthropogenen THG-Emissionen stammen aus der Landwirtschaft (SMITH et al., 2014). Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion sind bereits jetzt spürbar. Für Weizen, die wichtigste Getreideart in Deutschland und Europa, sind eine Verschiebung der phänologischen Phasen sowie negative Ertragsauswirkungen durch Extremwetterereignisse zu beobachten (BÖNECKE et al., 2020). Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen haben in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen (LÜTTGER & FEIKE, 2018), und werden im Zuge des fortschreitenden Klimawandels auch zukünftig weiter zunehmen (SENAPATI et al., 2019), mit negativen Auswirkungen auf den Ackerbau. Ein Beitrag der landwirtschaftlichen Produktion zum Klimaschutz und eine entsprechende Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) ist daher dringend erforderlich.

Integrierte (bzw. konventionelle) Anbausysteme, die bei Weitem den größten Teil der landwirtschaftlichen Produktion und Landnutzung in Deutschland ausmachen, sind auf eine optimierte bedarfsgerechte Nährstoffversorgung sowie den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zum Schutz gegen pilzliche und tierische Schaderreger sowie Unkräuter ausgelegt. Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln wird in breiten Teilen der Öffentlichkeit jedoch zunehmend kritisch gesehen. Das Julius Kühn-Institut (JKI) forscht seit Jahren an Maßnahmen und Möglichkeiten zur Reduzierung des Risikos durch den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, unter anderem im Rahmen des Nationalen Aktionsplans zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (NAP) (BMEL, 2017). Neue Initiativen wie „Towards a chemical Pesticide-free Agriculture“ sollen die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich auf europäischer Ebene besser integrieren und die Forschung hierzu weiter voranbringen (INRAE, 2020).

Im Rahmen der angestrebten Reduzierung des Einsatzes chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel ist es essentiell Zielkonflikte möglichst gering zu halten. So kann der Verzicht auf den Einsatz von Totalherbiziden, wie den sehr kritisch diskutierten glyphosathaltigen Mitteln, zu einer erhöhten Intensität der Bodenbearbeitung führen. Dies wiederum kann einen erhöhten Energiebedarf der Pflanzenproduktion mit sich bringen (SCHWARZ, 2013) und zudem zu einem erhöhten Erosionsrisiko führen (PRAGER et al., 2010).

Um nachhaltige Pflanzenschutzstrategien zu entwickeln und mögliche Zielkonflikte über lange Zeitreihen evaluieren zu können werden am Versuchsstandort Dahnsdorf seit 1995 Dauerfeldversuche durchgeführt. Da sich die Effekte einer Reduzierung bzw. eines Verzichts auf bestimmte Pflanzenschutzmittel, sowie eine Umstellung der Bodenbearbeitung erst nach Jahren ein-

stellen, und sich die Effekte auch jahres- bzw. witterungsbedingt unterschiedlich darstellen können, ist eine Betrachtung über lange Zeiträume für eine robuste Bewertung essentiell.

Ziel der vorliegenden Studie ist es daher, basierend auf Produktionsdaten und Ertragsdaten eines Dauerfeldversuchs die Auswirkungen unterschiedlicher Pflanzenschutzstrategien, Fungizidvarianten und Bodenbearbeitungsvarianten auf die Klimawirkung der Weizenproduktion zu bewerten.

Material und Methoden

Versuchsbeschreibung

Die seit 1995 etablierten Dauerfeldversuche am Versuchsstandort Dahnsdorf im Südwesten Brandenburgs befassen sich vorrangig mit den langfristigen Auswirkungen verschiedener Pflanzenschutzstrategien. Der Standort weist einen lehmigen Sandboden mit einer mittleren Bodenwertzahl von 48 Punkten auf, sowie eine Jahresdurchschnittstemperatur von 9,6°C und einen mittleren Jahresniederschlag von 578 mm (1997–2019). Im Zuge einer Neuausrichtung wird im Versuch BS1 seit Herbst 2007 der Einfluss der Bodenbearbeitung als zusätzlicher Versuchsfaktor untersucht. Die in der vorliegenden Studie betrachteten Versuchsdaten des BS1 zum Winterweizen umfassen den Zeitraum der Ertragsjahre 2008–2019 und drei Versuchsfaktoren mit jeweils zwei Stufen:

1. Pflanzenschutzstrategie: GfP vs. IPS
2. Fungizidvariante: mit Fungizidanwendung vs. ohne Fungizidanwendung
3. Bodenbearbeitungsvariante: nicht-wendend (pfluglos) vs. wendend (Pflug)

Bei den Pflanzenschutzstrategien wird zwischen „GfP“ (bis 2013 als „Gute fachliche Praxis, seit 2014 als „Allgemeinen Grundsätze des Integrierten Pflanzenschutzes“ betitelt) und „IPS“ (bis 2013 als „Integrierter Pflanzenschutz“, seit 2014 als „Sektor- und kulturartenspezifische Leitlinien des Integrierten Pflanzenschutzes“ betitelt) unterschieden. Bis 2013 wurde in der GfP Strategie der Pflanzenschutz nach praxisüblichen Gegebenheiten unter Einbeziehung der Hinweise der amtlichen Pflanzenschutzdienste durchgeführt. Seit Herbst 2013 wurden in GfP die Pflanzenschutzmittel nach den Grundsätzen des integrierten Pflanzenschutzes angewandt. Die Pflanzenschutzanwendungen erfolgen in beiden Strategien unter Berücksichtigung des Schwellenwertkonzeptes. In IPS wurde stets eine noch dezidiere und stärker situationsbezogene Dosierung nach Schwellenwerten sowie ein- bzw. mehrfache Anwendung reduzierter Aufwandmengen (Splitting) angewendet. Zudem werden seit Herbst 2013 in IPS Sorten mit einem höheren Resistenzniveau gewählt, während in GfP vorrangig auf praxisübliche Sorten mit hohem Ertragsniveau gesetzt wird. In beiden Varianten wurde im Weizen in 2008–2010 die

Sorte Brilliant und 2011–2013 die Sorte JB Asano angebaut. Seit 2014 wurde in GfP weiterhin die Sorte JB Asano und in IPS die Sorte Julius angebaut.

Der Weizen steht im Versuch in einer sechsgliedrigen Fruchtfolge aus Wintertraps – Winterweizen – Winterroggen – Mais – Erbse – Triticale. Beim Versuchsdesign handelt es sich um eine randomisierte Spaltanlage mit fünf Wiederholungen. Bodenbearbeitung bildet den Hauptteilstückfaktor, während die anderen Versuchsfaktoren die Kleinteilstückfaktoren bilden.

Ein vierter Versuchsfaktor, der die Vorgeschichte des Dauerfeldversuchs vor 2007 hinsichtlich der damals im Getreide praktizierten vier Varianten „unbehandelte Kontrolle“, „mit Herbizid & ohne Fungizid“, „ohne Herbizid & mit Fungizid“, sowie „mit Herbizid & mit Fungizid“ abbildet, wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt. Somit stehen zehn Wiederholungen je Versuchsvariante zur Verfügung. Der Einfluss des vierten Versuchsfaktors auf die Ziele der Untersuchung wird als vernachlässigbar angesehen, da es hier seit 2008 keinerlei Unterscheidung im Input-Management (Düngung, PS, etc.) gibt. Eine Berücksichtigung würde die Ergebnisdarstellung unnötig verkomplizieren. Eine umfassendere Beschreibung der Versuchsvarianten finden sich u.a. in KLOCKE et al. (2020), PALLUTT et al. (2010) und SCHWARZ (2013). Ein Überblick über die wesentlichen Parameter von Aussaat, Düngung und Pflanzenschutz in den acht Versuchsvarianten ist in Tab. S1 gegeben.

Treibhausgasbilanzierung

Die THG-Emissionen und der CO₂-Fußabdruck (Carbon Footprint; CFP) beschreiben die Klimawirkung der pflanzlichen Produktion pro Landnutzungseinheit (in kg CO₂eq ha⁻¹) bzw. pro Einheit Erntegut (in kg CO₂eq kg⁻¹). Das (relative) Treibhauspotential (global warming potential, GWP) über einen 100 Jahreszeitraum wird für die drei relevanten Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) mit dem Faktor 1, 34 und 289 berücksichtigt, und entsprechend in CO₂-Äquivalente (CO₂eq) umgerechnet (MYHRE et al., 2013).

Die Studie nutzt eine partielle Lebenszyklusanalyse (life cycle assessment; LCA), d.h., die THG-Emissionen werden von der ursprünglichen Ressourcengewinnung bis zum Hof (farm gate), entsprechend DIN EN ISO 14040 umfänglich ermittelt (DIN, 2006). Die Kalkulationen erfolgten mittels eines selbsterstellten Bilanzierungsmodells in MS Excel. Die Systemgrenzen sind in Abbildung 1 dargestellt.

Zur Bewertung der THG-Emissionen in den verschiedenen Versuchsvarianten wurden die tatsächlichen Überfahrten bzw. Arbeitsschritte, d.h., Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung, Pflanzenschutz und Ernte, wie sie im Feldversuch erfolgten, parzellen- und jahresspezifisch herangezogen. Ebenso wurden die tatsächlichen Aufwendungen an Saatgut, Pflanzenschutzmittel und Düngemittel je Hektar berücksichtigt, sowie die tatsächlichen Erntemengen beim Drusch und Abtransport des Ernteguts zum Hof. THG Emissionen im Zusammenhang mit einer möglichen Trocknung und Lagerung wurden nicht berücksichtigt, und die Bilanz endet am Hof.

Um die Plausibilität und Praxisrelevanz der Bewertung zu erhöhen wurde ein Beispielbetrieb konstruiert (Tab. 1), auf dem die Weizenproduktion entsprechend der Arbeitsschritte und Aufwandmengen im Versuch angenommen wurde.

Sämtliche Dieserverbräuche wurden arbeitsgang- und parzellenspezifisch unter Berücksichtigung der wesentlichen Einflussfaktoren auf den Kraftstoffverbrauch gemäß SCHREIBER (2006) kalkuliert. Dies umfasst die Berücksichtigung von Gewichtskraft, Zugkraft, und Schlupf. Hieraus wurden Nebenleistung, Fahrleistung und Motorleistung berechnet. Hierauf aufbauend konnte der spezifische Kraftstoffverbrauch individuell für die Fahrt auf der Straße und Arbeiten auf dem Feld kalkuliert werden. Bei Aussaat, Düngung, Pflanzenschutz und Ernte wurden die tatsächlichen Aufwand-, Ausbringungs- bzw. Erntemengen des Versuchs herangezogen und für die Bestimmung der Gewichtskräfte, Motorleistung inklusive Nebenleistungen und Anzahl Fahrten zwischen Hof und Feld kalkulatorisch berücksichtigt. Hier-

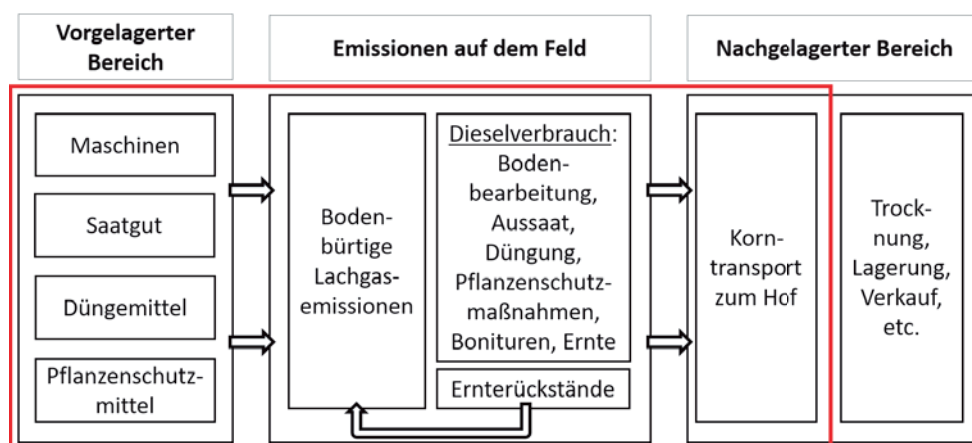


Abb. 1. Beschreibung der für die Treibhausgasbilanzierung verwendeten Systemgrenzen; sämtliche THG-Emissionen innerhalb des roten Rechtecks wurden berücksichtigt.

Tab. 1. Eckdaten des angenommenen Marktfruchtbetriebs inkl. des für den Weizenanbau genutzten Fuhrparks

| Eckdaten | |
|---------------------------------------|---|
| Ackerfläche gesamt | 500 ha |
| Schlaggröße betrachteter Weizenschlag | 20 ha |
| Hof-Feld-Entfernung | 4 km |
| Fuhrpark | |
| Traktoren | Traktor 310 PS Traktor 260 PS Traktor 210 PS Traktor 155 PS |
| Mähdrescher | Mähdrescher 354 PS |
| Teleskoplader | Teleskoplader 145 PS |
| Bodenbearbeitung | Scheibenegge (6,5 m) Stoppelgrubber (6 m) Grubber (4 m) Pflug (5 Schar) (+ Packer) Kreiselegge (4 m) |
| Saattechnik | Drillmaschine (4 m) |
| Düngetechnik | Anbaudüngerstreuer (3.200 l) Kalkstreuer (10.000 l) |
| Pflanzenschutz | Feldspritze (4.500 l) |
| Transport | 2x Muldenkipper (28 m ³) Pick-up für Bonituren |
| Pflegetechnik | Mulcher (4 m) |

aus ließen sich nun die Dieserverbräuche für die Feldarbeit, Wegstrecken und Befüllarbeiten berechnen. Zur Plausibilitätsprüfung wurden die Kalkulationsergebnisse mit dem KTBL-Dieselbedarfsrechner (KTBL, 2017) abgeglichen.

Für Diesel wurde ein Emissionsfaktor von 3,02 kg CO₂eq l⁻¹ angenommen (KTBL, 2019). Der Anteil der THG-Emissionen für die Herstellung der landwirtschaftlichen Maschinen an der Weizenproduktion, wurde gemäß KTBL (2019) vereinfacht über den Dieserverbrauch mit dem Faktor 0,885 kg CO₂eq l⁻¹ Diesel abgeschätzt. Dies ermöglicht die Zuordnung der THG-Emissionen für Maschinen- und Geräteherstellung für den betrachteten Weizenanbau anteilig zur gesamten Nutzungsdauer bzw. Arbeitsleistung. Die Bewertung der THG-Emissionen zur Herstellung und Transport der eingesetzten Düngemittel erfolgte über düngemittelspezifische Emissionsfaktoren (EFs; CO₂eq kg⁻¹). Ebenso wurden wirkstoffklassenspezifische EFs für die Bewertung

der Emissionen für Herstellung und Transport der eingesetzten Pflanzenschutzmittel genutzt (WERNET et al., 2016), und entsprechend der Wirkstoffanteile pflanzenschutzmittelspezifisch berücksichtigt. Für das Weizensaatgut wurde ein Emissionsfaktor von 0,8494 CO₂eq kg⁻¹ angesetzt (NEMECEK, 2017).

Die bodenbürtigen Lachgasemissionen im Zusammenhang mit der Weizenproduktion wurden entsprechend der Vorgaben des IPCC (2006) parzellen- und jahresspezifisch kalkuliert. Die direkten und indirekten Lachgasemissionen werden vorrangig durch die eingebrachte Menge an Stickstoff aus mineralischer und organischer Düngung bestimmt, die entsprechend der tatsächlichen Aufwandmengen im Versuch berücksichtigt wurde. Zusätzlich trägt der Stickstoffgehalt der ober- und unterirdischen Ernterückstände zu den Emissionen bei. Die Ernterückstände wurden in Abhängigkeit der erzielten Kornerträge entsprechend Tabelle 1 1.2 in IPCC (2006) kalkuliert und mit einem Verhältnis der unterirdischen

Rückstände zur oberirdischen Biomasse von 23% abgeschätzt. Die Stickstoffgehalte wurden mit $0,006 \text{ kg N (kg TM)}^{-1}$ für die oberirdischen Rückstände und $0,009 \text{ kg N (kg TM)}^{-1}$ für die unterirdischen Rückstände angenommen (IPCC, 2006).

Statistische Analyse

Die Versuchsdaten wurden mittels gemischter linearer Modelle mit dem Paket nlme in R (R CORE TEAM, 2020) analysiert. Hierbei wurden „Ertrag“, „THG-Emissionen“ und „CO₂-Fußabdruck“ als abhängige Variablen untersucht. Die Versuchsfaktoren „Pflanzenschutzstrategie“, „Fungizidanwendung“ und „Bodenbearbeitung“ wurden als fixe Effekte festgelegt, während der Block als zufällig angesehen wurde. Das Modell wurde mit der restricted maximum likelihood (REML) Methode geschätzt. Der Stichprobenumfang umfasst bei den drei Versuchsfaktoren mit je zwei Levels bei je zehn Wiederholungen über die zwölf Jahre 960 Beobachtungen. Der Faktor „Jahr“ wurde im ersten Schritt als zufälliger Effekt gewählt, um eine möglichst umfassende Aussage über den gesamten Versuchszeitraum von zwölf Jahren zu erhalten. Im zweiten Schritt wurde „Jahr“ als fixer Effekt gewählt, und die Effekte der drei Versuchsfaktoren jahresweise darzustellen und zu bewerten. Es wurden für alle drei abhängigen Variablen Modelle mit Haupteffekten und Interaktionen 1., 2. und (wenn möglich) 3. Ordnung gerechnet und jeweils eine schrittweise Rückwärtsselektion durchgeführt, bis nur noch Variablen und Interaktionsterme im Modell verblieben, die einen p-Wert $< 0,05$ aufwiesen. Multiple Mittelwertvergleiche wurden mit einem Tukey-Test und dem Paket emmeans durchgeführt. Da sowohl die Daten der THG-Emissionen als auch der CO₂-Fußabdrücke Varianzheterogenität aufwiesen, wurden diese für die Analyse log-transformiert.

Ergebnisse

Im Durchschnitt über die zwölf betrachteten Jahre und die zehn Wiederholungen je Variante liegen die THG-Emissionen zwischen minimal $2896 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$ bei „GfP, ohne Fungizid, nicht-wendend“ und maximal $3143 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$ bei „GfP, mit Fungizid, wendend“ (Abb. 2). Eine im Jahr 2013 über sämtliche Parzellen des Dauerfeldversuchs hinweg erfolgte Kalkung führt zu den einzelnen Emissionswerten größer $5000 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1}$. Betrachtet man die Effekte der drei Versuchsvarianten, so zeigt sich, dass über die zwölf Jahre gerechnet „GfP, mit Fungizid“ signifikant höhere Emissionen aufweist, als „IPS, mit Fungizid“, sowohl in der nicht-wendenden als auch in der wendenden Variante. Ohne Fungizide zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen GfP und IPS weder nicht-wendend noch wendend. Die wendende Bodenbearbeitung weist hingegen bei sämtlichen direkten Vergleichen, d.h., innerhalb „GfP, mit Fungizid“, „GfP, ohne Fungizid“, „IPS, mit Fungizid“, „IPS, ohne Fungizid“ stets signifikant höhere Emissionen auf. Die THG-Emissionen ordnen sich sowohl in der GfP-Strategie, als auch in der IPS-Strategie absteigend in der Reihenfolge: „mit Fungizid, wendend“, „ohne Fungizid, wendend“, „mit Fungizid, nicht-wendend“, „ohne Fungizid, nicht-wendend“. Bei IPS sind die Unterschiede stets signifikant, während sich bei GfP die Varianten „ohne Fungizid, wendend“ und „mit Fungizid, nicht-wendend“ nicht signifikant unterscheiden.

Die Durchschnittserträge je Variante reichen von maximal $75,2 \text{ dt ha}^{-1}$ bei „GfP, mit Fungizid, wendend“ bis minimal $60,3 \text{ dt ha}^{-1}$ bei „GfP, ohne Fungizid, nicht-wendend“ (Abb. 3). Es zeigt sich in beiden Strategien GfP und IPS ein abnehmender Ertrag in der Reihenfolge „mit Fungizid, wendend“, „mit Fungizid, nicht-wendend“,

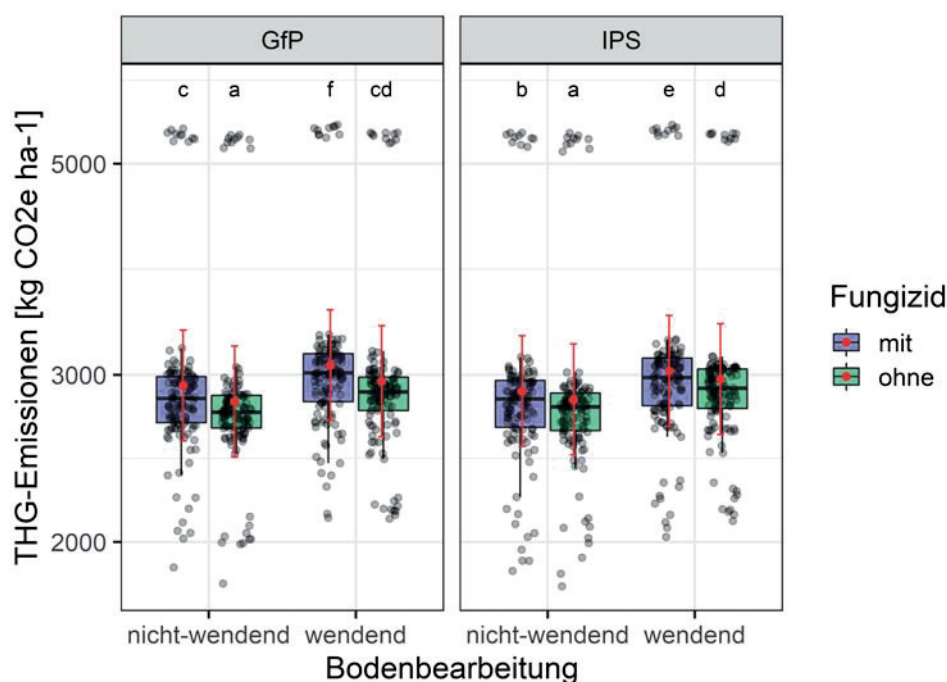


Abb. 2. Einfluss der drei Versuchsfaktoren Pflanzenschutzstrategie (GfP vs. IPS), Fungizidvariante (mit vs. ohne Fungizid) und Bodenbearbeitungsvariante (nicht-wendend vs. wendend) auf die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) der Weizenproduktion in Dahnsdorf in 2008–2019. Durch das Modell (s. Tab. S3) geschätzte Mittelwerte (Punkte) und das 95% Konfidenzintervall (Fehlerbalken) sind in rot gegeben. Die Daten wurden für die Analyse aufgrund Varianzheterogenität log-transformiert; entsprechend ist die Y-Achse log-skaliert. Gruppen die keinen Buchstaben teilen sind signifikant voneinander verschieden.

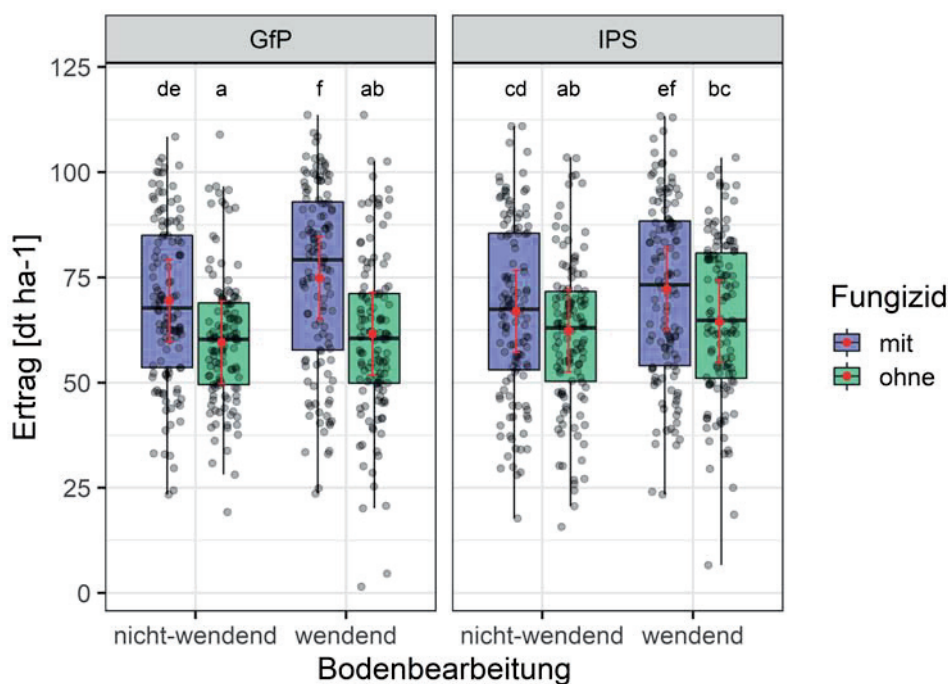


Abb. 3. Einfluss der drei Versuchsfaktoren Pflanzenschutzstrategie (GfP vs. IPS), Fungizidvariante (mit vs. ohne Fungizid) und Bodenbearbeitungsvariante (nicht-wendend vs. wendend) auf den Ertrag in 2008–2019. Durch das Modell (s. Tab. S3) geschätzte Mittelwerte (Punkte) und das 95% Konfidenzintervall (Fehlerbalken) sind in rot gegeben. Gruppen die keinen Buchstaben teilen sind signifikant voneinander verschieden.

„ohne Fungizid, wendend“, „ohne Fungizid, nicht-wendend“. Die Unterschiede sind hierbei stets signifikant bis auf „ohne Fungizid, wendend“ vs. „ohne Fungizid, nicht-wendend“ in GfP sowie in IPS „mit Fungizid, nicht-wendend“ vs. „ohne Fungizid, wendend“ und „ohne Fungizid, wendend“ vs. „ohne Fungizid, nicht-wendend“. Im Vergleich von GfP und IPS zeigen sich keine signifikanten Ertragsunterschiede in den entsprechenden Vergleichsvarianten von Fungizidvariante und Bodenbearbeitung. Die wendenden Varianten erzielten „mit Fungizid“ signifikant höhere Erträge im Vergleich zu den nicht-wendenden Varianten in beiden Pflanzenschutzstrategien, während sich ohne Fungizide keine signifikanten Unterschiede zwischen „nicht-wendend“ und „wendend“ zeigen.

Der CO₂-Fußabdruck reicht im Mittel über die zwölf Jahre und zehn Wiederholungen je Variante von minimal 0,47 kg CO₂eq kg⁻¹ bei „GfP, mit Fungizid, wendend“ bis 0,71 kg CO₂eq kg⁻¹ bei „GfP, ohne Fungizid, wendend“ (Abb. 4). Die einzelnen hohen Werte über 3 kg CO₂eq kg⁻¹ sind maßgeblich auf sehr niedrige Erträge in einzelnen Parzellen in 2011 zurückzuführen.

Im Vergleich von GfP und IPS zeigen sich beim CO₂-Fußabdruck keine signifikanten Unterschiede in den entsprechenden Vergleichsvarianten von Fungizidvariante und Bodenbearbeitung. Ebenso zeigen sich im Vergleich der wendenden und nicht-wendenden Varianten keine signifikanten Unterschiede beim CO₂-Fußabdruck in den entsprechenden Vergleichsvarianten von Pflanzenschutzstrategie und Fungizidvariante. Hingegen führt der Verzicht auf Fungizide in allen Vergleichsvarianten von Pflanzenschutzstrategie und Bodenbearbeitung zu signifikant höheren, d.h., schlechteren CO₂-Fußabdrücken. Lediglich die Variante „IPS, nicht-wendend“ weist ohne Fungizid keinen signifikant schlechteren CO₂-Fuß-

abdruck auf, verglichen mit „IPS, mit Fungizid, wendend“ und „IPS, mit Fungizid, nicht-wendend“. Trotz der signifikant höchsten THG-Emissionen je ha zeigt die „intensivste“ Variante „GfP, mit Fungizid, wendend“ mit 0,47 kg CO₂eq kg⁻¹ die geringsten Emissionen je Einheit Erntegut. Die signifikant höheren erzielten Erträge verglichen mit „extensiveren“ Varianten überkompensieren hier die höheren Emissionen.

Betrachtet man den mittleren Beitrag der verschiedenen Emissionsquellen zu den THG-Emissionen der acht untersuchten Versuchsvarianten (Abb. 5), so leisten die eingesetzten Düngemittel mit 1304,0 kg CO₂eq ha⁻¹, sowie die Lachgasemissionen, die zwischen 1243,6 kg CO₂eq ha⁻¹ (GfP, ohne Fungizid, nicht-wendend) und 1350,4 kg CO₂eq ha⁻¹ (GfP, mit Fungizid, wendend) den höchsten Beitrag. Die Düngung wurde über alle Versuchsvarianten identisch durchgeführt. Der durch Düngemittel eingebrachte Stickstoff trägt daher im gleichen Maß zu den Lachgasemissionen der verschiedenen Varianten bei. Die Unterschiede zwischen den Varianten ergeben sich durch unterschiedliche Erntemengen und daraus resultierende unterschiedliche Ernterückstandsmengen und entsprechende N-Einträge.

Im Dieserverbrauch zeigen sich die größten Unterschiede zwischen den gepflügten und nicht-wendenden Varianten mit rund 90 kg CO₂eq ha⁻¹ geringeren Emissionen in den nicht-wendenden Varianten. Die größten Emissionen mit 288,2 kg CO₂eq ha⁻¹ weist die Variante „GfP, mit Fungizid, wendend“ auf, während die Variante „GfP, ohne Fungizid, nicht-wendend“ mit 180,0 kg CO₂eq ha⁻¹ die geringsten Emissionen aufweist. Der Verzicht auf Fungizide und die entsprechenden Überfahrten führt über die verschiedenen Varianten zu geringeren Emissionen beim Dieserverbrauch von 12–25 kg CO₂eq ha⁻¹. Da die Emissionen für die Herstellung der Maschi-

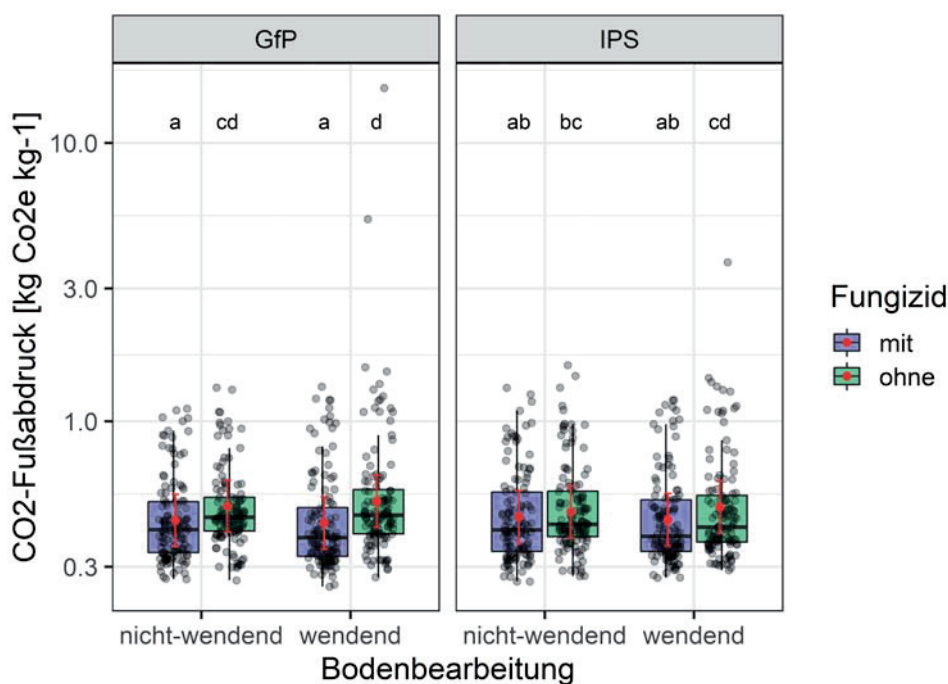


Abb. 4. Einfluss der drei Versuchsfaktoren Pflanzenschutzstrategie (GfP vs. IPS), Fungizidvariante (mit vs. ohne Fungizid) und Bodenbearbeitungsvariante (nicht-wendend vs. wendend) auf den CO₂-Fußabdruck der Weizenproduktion in Dahnsdorf in 2008–2019. Durch das Modell (s. Tab. S3) geschätzte Mittelwerte (Punkte) und das 95% Konfidenzintervall (Fehlerbalken) sind in rot gegeben. Die Daten wurden für die Analyse aufgrund Varianzheterogenität log-transformiert; entsprechend ist die y-Achse log-skaliert. Gruppen die keinen Buchstaben teilen sind signifikant voneinander verschieden.

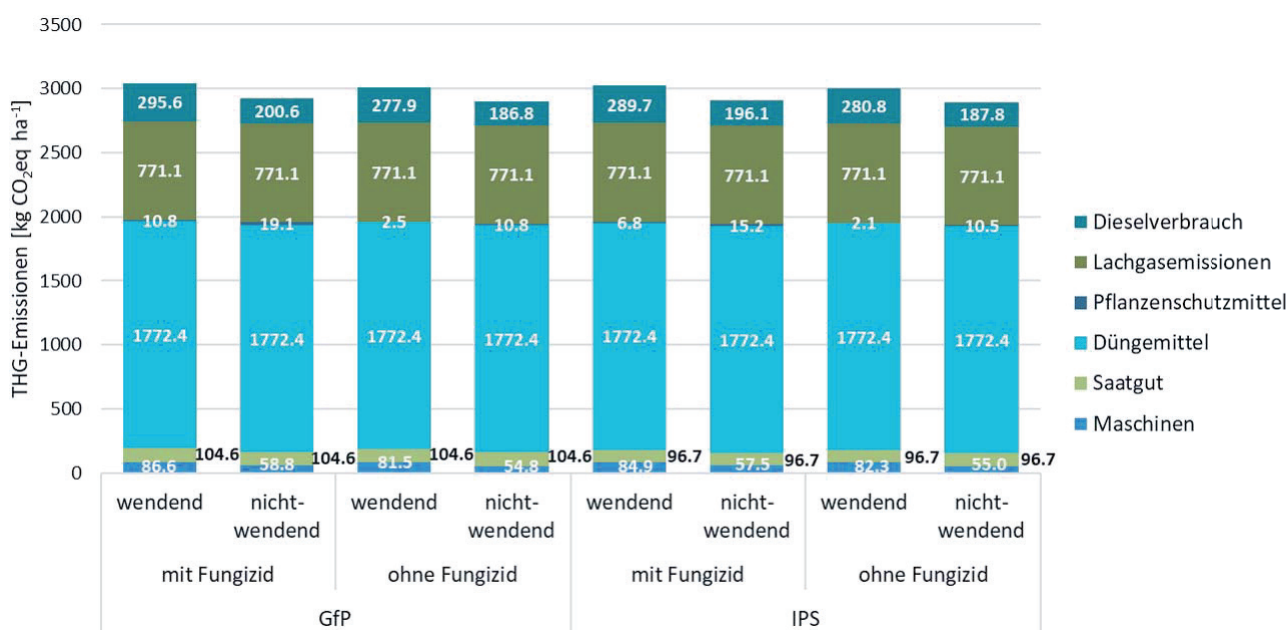


Abb. 5. Zusammensetzung der durchschnittlichen THG-Emissionen der Weizenproduktion unter Einfluss der drei Versuchsfaktoren Pflanzenschutzstrategie (GfP vs. IPS), Fungizidvariante (mit vs. ohne Fungizid) und Bodenbearbeitungsvariante (nicht-wendend vs. wendend) in 2008–2019.

nen direkt aus dem Dieserverbrauch abgeleitet werden, sind die Ergebnis analog zu den Emissionen aus dem Dieserverbrauch, nur auf einem niedrigeren Niveau. Die Spanne reicht von 52,8 kg CO₂eq ha⁻¹ bei „GfP, ohne Fungizid, nicht-wendend“ bis 84,5 kg CO₂eq ha⁻¹ bei „GfP, mit Fungizid, wendend“.

Bei den Emissionen für das Saatgut weist GfP aufgrund höherer Tausendkorngewichte des verwendeten Saatguts leicht höhere Emissionen auf, verglichen mit IPS.

Die Emissionen für die Herstellung der Pflanzenschutzmittel liegt auf einem niedrigen Niveau zwischen maximal 19,2 kg CO₂eq ha⁻¹ bei „GfP, mit Fungizid, nicht-wendend“ und minimal 2,1 kg CO₂eq ha⁻¹ bei „IPS, ohne Fungizid, wendend“. In GfP liegen die Werte stets unter den entsprechenden Varianten in IPS. Die wendende Bodenbearbeitung zeigt geringere Emissionen verglichen mit der nicht-wendenden Variante. Der Verzicht auf Fungizide führt zu stark verringerten Werten.

Um die Unterschiede im Dieserverbrauch zwischen der nicht-wendenden und wendenden Variante genauer zu verstehen hilft es einen Blick auf die Annahmen zu den Dieserverbräuchen zu werfen (Tab. 2). Während die Stoppelbearbeitung und Saatbettbereitung in beiden Varianten nahezu identisch erfolgte, wurde für Grundbodenbearbeitung in der Variante „nicht-wendend“ ein Grubber eingesetzt und in der Variante „wendend“ ein Pflug bzw. Pflug mit Packer. Der 5-Schar-Pflug mit 1,75 m Arbeitsbreite und 30 cm Bearbeitungstiefe benötigt 27,50 l Diesel ha⁻¹ und mit Packer 33,71 l Diesel ha⁻¹, während der Grubber mit 4 m Arbeitsbreite und 25 cm Bearbeitungstiefe mit 14,41 l ha⁻¹ nur ungefähr den halben Dieserverbrauch aufweist. Entsprechend sind die kalkulierten THG-Emissionen für den Dieserverbrauch und die anteilige Maschinen- und Geräteherstellung beim Grubber ebenfalls nur halb so hoch im Vergleich zum Pflug.

Betrachtet man die Unterschiede in den durch den Pflanzenschutz verursachten THG-Emissionen in Tab. 3, zeigen sich klare Effekte zwischen „wendend“ und „nicht-wendend“ sowie zwischen „mit Fungizid“ und „ohne Fungizid“. Bei der nicht-wendenden Variante liegen die THG-Emissionen durch den Herbizideinsatz fast dreimal so hoch im Vergleich zur gepflügten Variante. Bei der fungizidfreien Variante liegen die THG-Emissionen selbsterklärend bei null, während sie in den anderen Varianten zwischen ca. 10 und 18 kg CO₂eq ha⁻¹ liegen. Während die Emissionen in der IPS-Strategie im Vergleich zur GfP-Strategie bei den Herbiziden ungefähr gleich sind, betragen sie bei den Fungiziden ca. zwei Drittel und bei den Insektiziden ca. ein Drittel der Emissionen der GfP-Strategie. Bei den Wachstumsreglern gibt es keine Unterschiede aufgrund der identischen Behandlung über alle Varianten. Die Emissionen für die Bonituren liegen bei maximal 0,26 kg CO₂eq ha⁻¹ bei „GfP, mit Fungizid“ und sind in den fungizidfreien Varianten nahe null.

Neben dem direkten Beitrag von Pflanzenschutzmittelanwendungen zu den THG-Emissionen (Tab. 3), trägt

auch die ertragssichernde Wirkung des Fungizideinsatzes indirekt zu erhöhten THG-Emissionen bei, durch einen erhöhten Dieserverbrauch bei Drusch und Transport.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der THG-Emissionen zwischen 2008 und 2019 so liegt das Niveau in den meisten Jahren bei rund 3000 kg CO₂eq ha⁻¹ (Abb. 6). Ausnahmen bilden 2013 mit wesentlich höheren und 2015 mit geringeren THG-Emissionen. Die Abweichungen in 2013 beruhen auf der Ausbringung von knapp 2 t ha⁻¹ Granukul 85, das bei einem EF von 1,5655 kg CO₂eq kg⁻¹ von Calciumcarbonat (WERNET et al., 2016) zu den entsprechend hohen Emissionen führt. In 2015 beruhen die Unterschiede auf dem Einsatz von Ammoniumsulfat-haltigem Stickstoffdünger, der einen EF von 2,0566 kg CO₂eq kg⁻¹ N aufweist, anstelle einer N-Gabe mit Kalkamonsalpeter (KAS) in allen anderen Jahren, der einen EF von 8,237 kg CO₂eq kg⁻¹ N aufweist (WERNET et al., 2016).

Die Effekte der drei Versuchsfaktoren differenzieren unterschiedlich über die Jahre. Während der Faktor Bodenbearbeitung in den Jahren 2008–2010 und 2015 die Unterschiede maßgeblich bestimmt, zeigen sich in 2011 und 2013 keinerlei Unterschiede zwischen den acht Versuchsvarianten. Betrachtet man den Effekt „mit Fungizid“ vs. „ohne Fungizid“ genauer, so zeigen sich in den Jahren 2008–2011, 2013, 2018 und 2019 keine Unterschiede zwischen den jeweiligen Vergleichsvarianten von Pflanzenschutzstrategie und Bodenbearbeitung. Hingegen zeigen sich 2017 signifikante Unterschiede zwischen allen entsprechenden Vergleichsvarianten, in 2012 und 2016 unterscheiden sich die beiden GfP-Varianten sowie die gepflügte IPS-Variante, während sich in 2014 und 2015 nur die GfP-Varianten und nicht die IPS-Varianten hinsichtlich der Fungizidvariante unterscheiden.

Verglichen mit den THG-Emissionen weisen die Erträge deutlichere Jahresunterschiede auf (Abb. 7). In guten Jahren reichen die Erträge im Durchschnitt über alle

Tab. 2. Annahmen zu verwendeten Zugmaschinen, Arbeitsbreiten, -tiefen, und -geschwindigkeiten bei den verschiedenen im Feldversuch eingesetzten Bodenbearbeitungsschritten, sowie die nach SCHREIBER (2006) kalkulierten Dieserverbräuche und nach IPCC (2006) und KTBL (2019) kalkulierten THG-Emissionen des Dieserverbrauchs und der Geräteherstellung (anteilig Zugmaschine + Anbau- bzw. Anhängegerät).

| Geräte | Zugmaschine | Arbeitsbreite | Arbeitstiefe | Arbeitsgeschwindigkeit | Dieselverbrauch | THG-Emissionen | |
|-----------------|-------------|---------------|--------------|------------------------|-----------------------|---|-------------------|
| | | | | | | Dieselverbrauch | Geräteherstellung |
| | [kW] | [m] | [cm] | [km h ⁻¹] | [l ha ⁻¹] | [kg CO ₂ eq ha ⁻¹] | |
| Scheibenegge | 154 | 6,5 | 5 | 13 | 3,61 | 10,90 | 3,19 |
| Kreiselegge | 154 | 4 | 5 | 7 | 11,76 | 35,51 | 10,41 |
| Mulcher | 102 | 4 | -- | 13 | 9,20 | 27,78 | 8,14 |
| Stoppelgrubber | 195 | 6 | 10 | 11 | 6,52 | 19,70 | 5,77 |
| Grubber | 228 | 4 | 25 | 10 | 14,41 | 43,53 | 12,76 |
| Pflug (5 Schar) | 154 | 1,75 | 30 | 5 | 27,50 | 83,06 | 24,34 |
| Pflug + Packer | 195 | 1,75 | 30 | 5 | 33,71 | 101,80 | 29,83 |

Tab. 3. Durchschnittliche THG-Emissionen durch Pflanzenschutz in der Weizenproduktion unter Einfluss der drei Versuchsfaktoren Pflanzenschutzstrategie (GfP vs. IPS), Fungizidvariante (mit vs. ohne Fungizid) und Bodenbearbeitungsvariante (nicht-wendend vs. wendend) in 2008–2019.

| Pflanzenschutzstrategie | GfP | | | | IPS | | | |
|---------------------------------|---|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| | mit Fungizid | | ohne Fungizid | | mit Fungizid | | ohne Fungizid | |
| | nicht-wendend | wendend | nicht-wendend | wendend | nicht-wendend | wendend | nicht-wendend | wendend |
| | [kg CO ₂ eq ha ⁻¹] | | | | | | | |
| Pflanzenschutz insgesamt | 42.02 | 30.19 | 23.99 | 12.16 | 34.21 | 21.35 | 23.56 | 10.70 |
| Herbizidmaßnahmen | 19.10 | 7.26 | 19.10 | 7.26 | 19.74 | 6.88 | 19.74 | 6.88 |
| Herstellung Mittel | 9.83 | 1.53 | 9.83 | 1.53 | 9.52 | 1.16 | 9.52 | 1.16 |
| Dieserverbrauch | 7.17 | 4.43 | 7.17 | 4.43 | 7.91 | 4.43 | 7.91 | 4.43 |
| Herstellung Maschinen | 2.10 | 1.30 | 2.10 | 1.30 | 2.32 | 1.30 | 2.32 | 1.30 |
| Fungizidmaßnahmen | 17.79 | 17.79 | 0.00 | 0.00 | 10.42 | 10.42 | 0.00 | 0.00 |
| Herstellung Mittel | 8.25 | 8.25 | 0.00 | 0.00 | 4.70 | 4.70 | 0.00 | 0.00 |
| Dieserverbrauch | 7.38 | 7.38 | 0.00 | 0.00 | 4.43 | 4.43 | 0.00 | 0.00 |
| Herstellung Maschinen | 2.16 | 2.16 | 0.00 | 0.00 | 1.30 | 1.30 | 0.00 | 0.00 |
| Insektizidmaßnahmen | 1.62 | 1.62 | 1.62 | 1.62 | 0.56 | 0.56 | 0.56 | 0.56 |
| Herstellung Mittel | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| Dieserverbrauch | 1.11 | 1.11 | 1.11 | 1.11 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.37 |
| Herstellung Maschinen | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| Wachstumsreglermaßnahmen | 3.25 | 3.25 | 3.25 | 3.25 | 3.25 | 3.25 | 3.25 | 3.25 |
| Herstellung Mittel | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.86 |
| Dieserverbrauch | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 | 1.84 |
| Herstellung Maschinen | 0.54 | 0.54 | 0.54 | 0.54 | 0.54 | 0.54 | 0.54 | 0.54 |
| Bonituren | 0.26 | 0.26 | 0.03 | 0.03 | 0.24 | 0.24 | 0.01 | 0.01 |
| Dieserverbrauch | 0.20 | 0.20 | 0.02 | 0.02 | 0.19 | 0.19 | 0.01 | 0.01 |
| Herstellung Pick-up | 0.06 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.06 | 0.00 | 0.00 |

Varianten auf über 80 dt ha⁻¹, während Sie in schlechten Jahren nur knapp über 50 dt ha⁻¹ und im Trockenjahr 2018 sogar nur knapp über 42 dt ha⁻¹ aufweisen. Die niedrigen Jahreserträge sind vornehmlich durch die Limitation an pflanzenverfügbarem Wasser bedingt. In 2013 hat ein Hagelschlag kurz vor der Ernte zudem zu Ertragsminderungen geführt.

In fünf von zwölf Jahren ergeben sich keinerlei signifikante Ertragsunterschiede zwischen den acht Varianten. Dies beinhaltet mit 2011, 2013, 2018 und 2019 die trockensten Jahre, in denen die Ertragswirkung des abiotischen Stresses die Wirkung der eigentlichen Versuchsfaktoren offensichtlich nicht zur Geltung kommen lässt. In 2008 lag das Ertragsniveau sehr hoch, jedoch weisen die Erträge der zehn Wiederholungen je Variante eine große Streuung auf, weshalb keine Effekte nachzuweisen sind. Ein ähnliches Bild zeigt sich in 2009, wo lediglich „GfP, mit Fungizid, wendend“ einen signifikant höheren Ertrag im Vergleich zu „IPS, ohne Fungizid, nicht-wendend“ aufweist. Der Faktor Bodenbearbeitung wirkt sich nur in vier von zwölf Jahren auf die Erträge aus. In 2012 und

2015 weisen die gepflügten Varianten jeweils höhere Erträge auf im Vergleich zur entsprechenden Vergleichsvariante aus Pflanzenschutzstrategie und Fungizidvariante. In 2009 und 2016 weisen die gepflügten Varianten nur mit Fungizideinsatz höhere Erträge auf als die nicht-wendenden Vergleichsvarianten. In fünf von zwölf Jahren zeigt sich eine signifikante Ertragswirkung des Fungizideinsatzes. In 2017 zeigen sämtliche Vergleichsvarianten aus Pflanzenschutzstrategie und Bodenbearbeitung „mit Fungizid“ höhere Erträge als „ohne Fungizid“. In 2016 ist es ähnlich, nur, dass sich die beiden „IPS, nicht-wendend“ Varianten ertraglich nicht hinsichtlich Fungizidvariante unterscheiden. In 2014 und 2015 ist unterscheiden sich lediglich die Vergleichsvarianten in GfP.

Während die CO₂-Fußabdrücke in den besten Jahren knapp über 0,3 kg CO₂eq kg⁻¹ liegen, steigen Sie in den Jahren mit niedrigem Ertragsniveau, d.h., 2011, 2013, 2018 und 2019 im Mittel auf über 0,5 kg CO₂eq kg⁻¹. In 2013 führten zudem die durch die Kalkung der Flächen erhöhten THG-Emissionen zu den höchsten CO₂-Fußabdrücken aller Jahre. In den Jahren 2008–2010 sowie

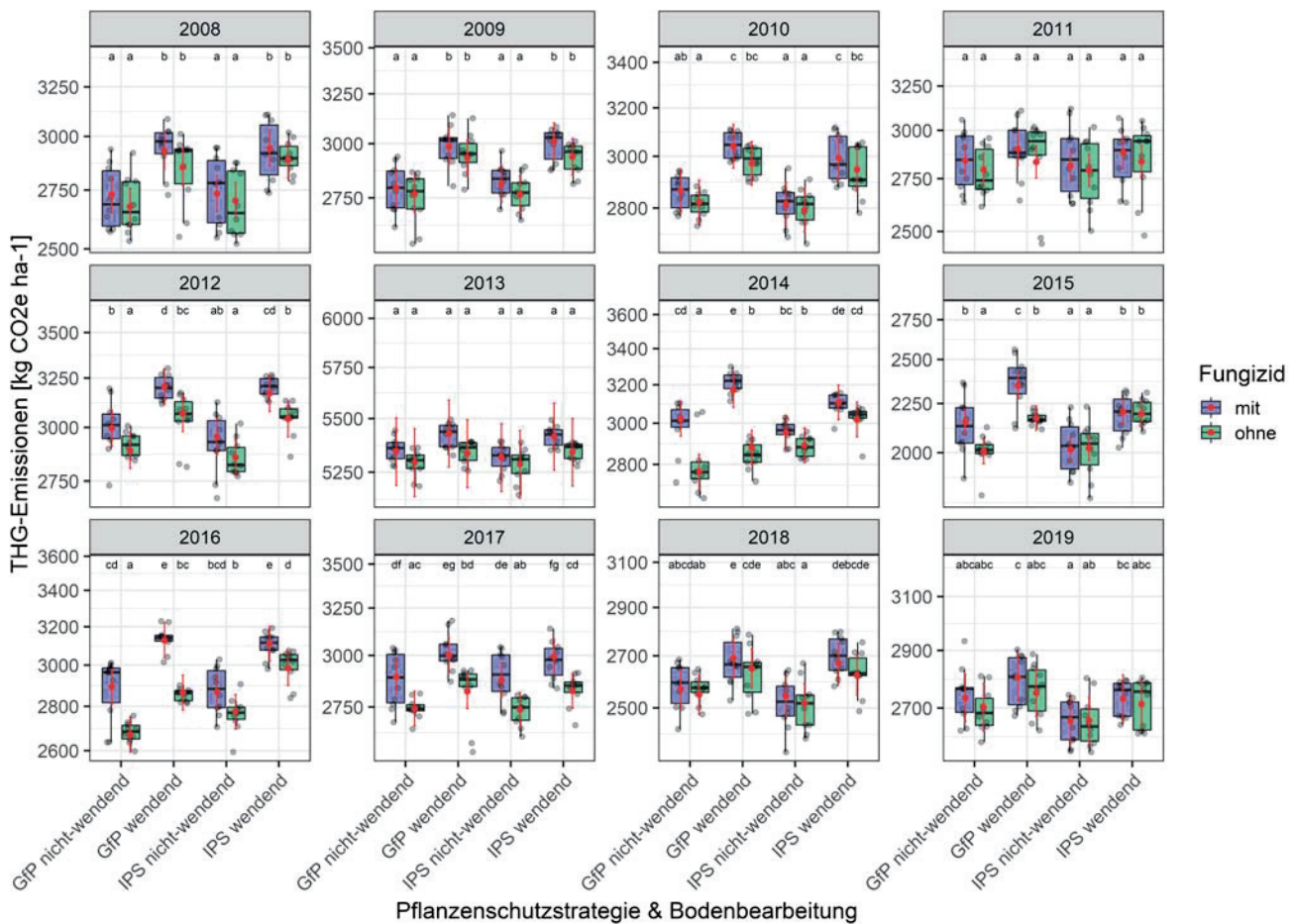


Abb. 6. Jahresspezifischer Einfluss der drei Versuchsfaktoren Pflanzenschutzstrategie (GfP vs. IPS), Fungizidvariante (mit vs. ohne Fungizid) und Bodenbearbeitungsvariante (nicht-wendend vs. wendend) auf die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) der Weizenproduktion in Dahnsdorf in 2008–2019. Durch das Modell (s. Tab. S2) geschätzte Mittelwerte (Punkte) und das 95% Konfidenzintervall (Fehlerbalken) sind in rot gegeben. Die Daten wurden für die Analyse aufgrund Varianzheterogenität log-transformiert; entsprechend ist die Y-Achse log-skaliert. Gruppen, die in einem Jahr keinen Buchstaben teilen sind in diesem Jahr signifikant voneinander verschieden.

2018 zeigen sich keinerlei Unterschiede zwischen den acht Versuchsvarianten.

Hinsichtlich des Effekts des Fungizideinsatzes zeigen sich in sieben von zwölf Jahren signifikant geringere, d.h., bessere CO₂-Fußabdrücke „mit Fungizid“ im Vergleich zu „ohne Fungizid“. In 2012, 2013 und 2015 zeigen sich die Vorteile nur in den Varianten „GfP, wendend“. In 2011, 2014, 2016 und 2017 zeigen sich die Vorteile von „mit Fungizid“ in allen Vergleichsvarianten bis auf in „IPS, nicht-wendend“.

Die Pflanzenschutzstrategien zeigen nur in drei von zwölf Jahren signifikante Effekte auf den CO₂-Fußabdruck. So schneidet in 2014 und 2016 GfP in der Variante „ohne Fungizid, wendend“ schlechter ab, als die Vergleichsvariante in IPS. In 2019 hingegen weist GfP in der Variante „mit Fungizid, nicht-wendend“ einen geringeren CO₂-Fußabdruck auf als die entsprechende Vergleichsvariante in IPS.

Der Faktor Bodenbearbeitung zeigt in vier von zwölf Jahren signifikante Effekte auf den CO₂-Fußabdruck. In 2011, 2013 und 2019 zeigt die wendende Variante in den Varianten „GfP, ohne Fungizid“ einen höheren CO₂-Fuß-

abdruck als die nicht-wendende Variante. Hingegen zeigt die gepflügte Variante in 2015 in „IPS, mit Fungizid“ einen geringeren CO₂-Fußabdruck als die nicht-wendende Variante.

Diskussion

Die Frage ob reduzierte Inputintensität im Weizenanbau – bzw. in der pflanzlichen Produktion insgesamt – eine sinnvolle Strategie im Zusammenhang mit dem Klimaschutz darstellt wird viel diskutiert. Die vorliegende Studie liefert hierzu Hinweise in Bezug auf die Bodenbearbeitung und den Pflanzenschutz am Standort Dahnsdorf. Zum einen zeigt sich, dass eine wendende Bodenbearbeitung nicht per se schlecht für den Klimaschutz sein muss. Zudem zeigt sich eindeutig, dass der Verzicht auf Fungizide negative Auswirkungen auf die Ertragssicherung und damit den CO₂-Fußabdruck des Weizens hat.

Im Vergleich der beiden Pflanzenschutzstrategien GfP und IPS zeigen sich nur geringe Effekte hinsichtlich CO₂-Fußabdruck. In der umfangreichen Bewertung über

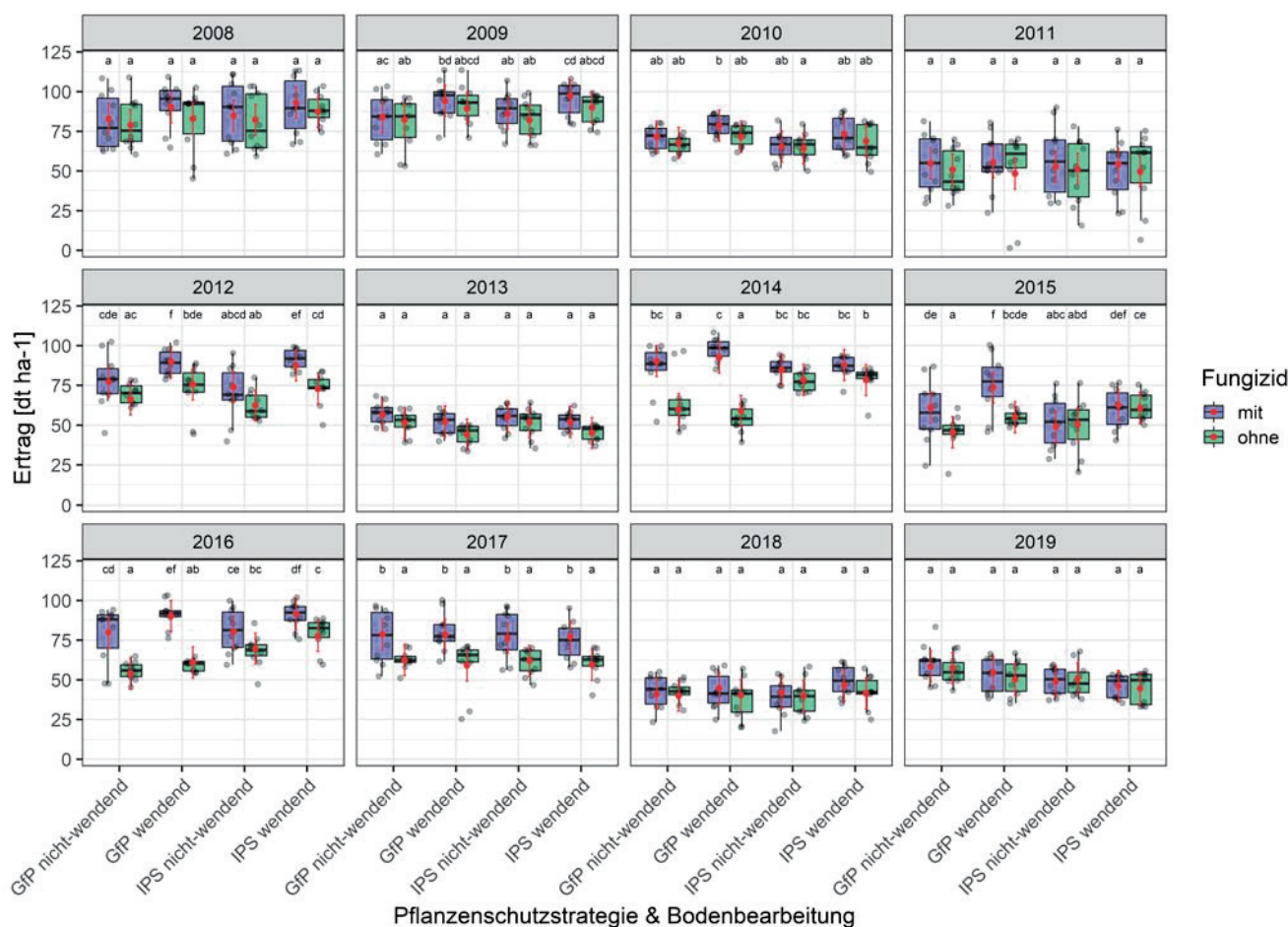


Abb. 7. Jahresspezifischer Einfluss der drei Versuchsfaktoren Pflanzenschutzstrategie (GfP vs. IPS), Fungizidvariante (mit vs. ohne Fungizid) und Bodenbearbeitungsvariante (nicht-wendend vs. wendend) auf die Erträge der Weizenproduktion in Dahnsdorf in 2008–2019. Durch das Modell (s. Tab. S2) geschätzte Mittelwerte (Punkte) und das 95% Konfidenzintervall (Fehlerbalken) sind in rot gegeben. Gruppen, die in einem Jahr keinen Buchstaben teilen sind in diesem Jahr signifikant voneinander verschieden.

den gesamten Versuchszeitraum (Abb. 4), unter Berücksichtigung von „Jahr“ als zufälligem Effekt im gemischtem Modell, zeigten sich keine signifikanten Effekte der Pflanzenschutzstrategie. Bei der jahresspezifischen Bewertung, unter Berücksichtigung von „Jahr“ als fixem Effekt im gemischtem Modell (Abb. 8), schnitt GfP im Vergleich zu IPS in der Variante „ohne Fungizid, wendend“ in zwei von zwölf Jahren schlechter ab. In einem Jahr schnitt GfP im Vergleich zu IPS in der Variante „mit Fungizid, nicht-wendend“ besser ab.

Der Verzicht auf Fungizide führte über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet (Abb. 4) in allen Varianten außer in „IPS, nicht-wendend“ zu einem signifikant erhöhten CO₂-Fußabdruck. In sieben von zwölf Jahren zeigten sich zudem Vorteile des Fungizideinsatzes hinsichtlich Klimaschutz (Abb. 8). Es zeigt sich zudem, dass die Nachteile des Verzichts auf Fungizide der Strategie IPS schwächer ausfallen als in GfP. Dies kann vorrangig durch die erhöhte Sortenresistenz in IPS gegenüber GfP erklärt werden. Eine tiefergehende Analyse zum Pathogenaufreten und ertragssichernden Effekt des Fungizideinsatzes in dem für die vorliegende Studie genutzten Feldversuch, findet sich in KLOCKE et al. (2020). Auch in

der Studie von WÓJCIK-GRONT (2018), die auf polnischen Sortenversuchsdaten aufbaut, zeigte sich der positive Beitrag des Fungizideinsatzes zum Klimaschutz, der vor allem über die Reduzierung der Ertragsvariabilität wirkte.

Die gepflügten Varianten zeigten trotz der in allen Varianten über den Gesamtzeitraum betrachtet signifikant erhöhten THG-Emissionen je Hektar (Abb. 2), keine signifikant höheren CO₂-Fußabdruck auf (Abb. 4). In der jahresspezifischen Betrachtung zeigte die gepflügte Variante in „GfP, ohne Fungizid“ in drei Jahren einen höheren CO₂-Fußabdruck als die nicht-wendende Variante. In einem Jahr wies die gepflügte Variante „IPS, mit Fungizid“ hingegen einen geringeren CO₂-Fußabdruck als die nicht-wendende Variante auf. Im Gegensatz hierzu stellte der Pflug in der Studie von HE et al. (2019) beim Weizenanbau auf dem chinesischen Löss-Plateau im Vergleich zu verschiedenen reduzierten Bodenbearbeitungsvarianten sowohl bei den THG-Emissionen pro Fläche als auch beim CO₂-Fußabdruck die schlechteste Variante mit den höchsten Emissionen da. Auch bei ZHANG et al. (2016), die verschiedene Bodenbearbeitungsvarianten im dominanten Winterweizen-Mais-Doppelanbausystem in der Nordchinesischen Tiefebene untersuchten, wies die ge-

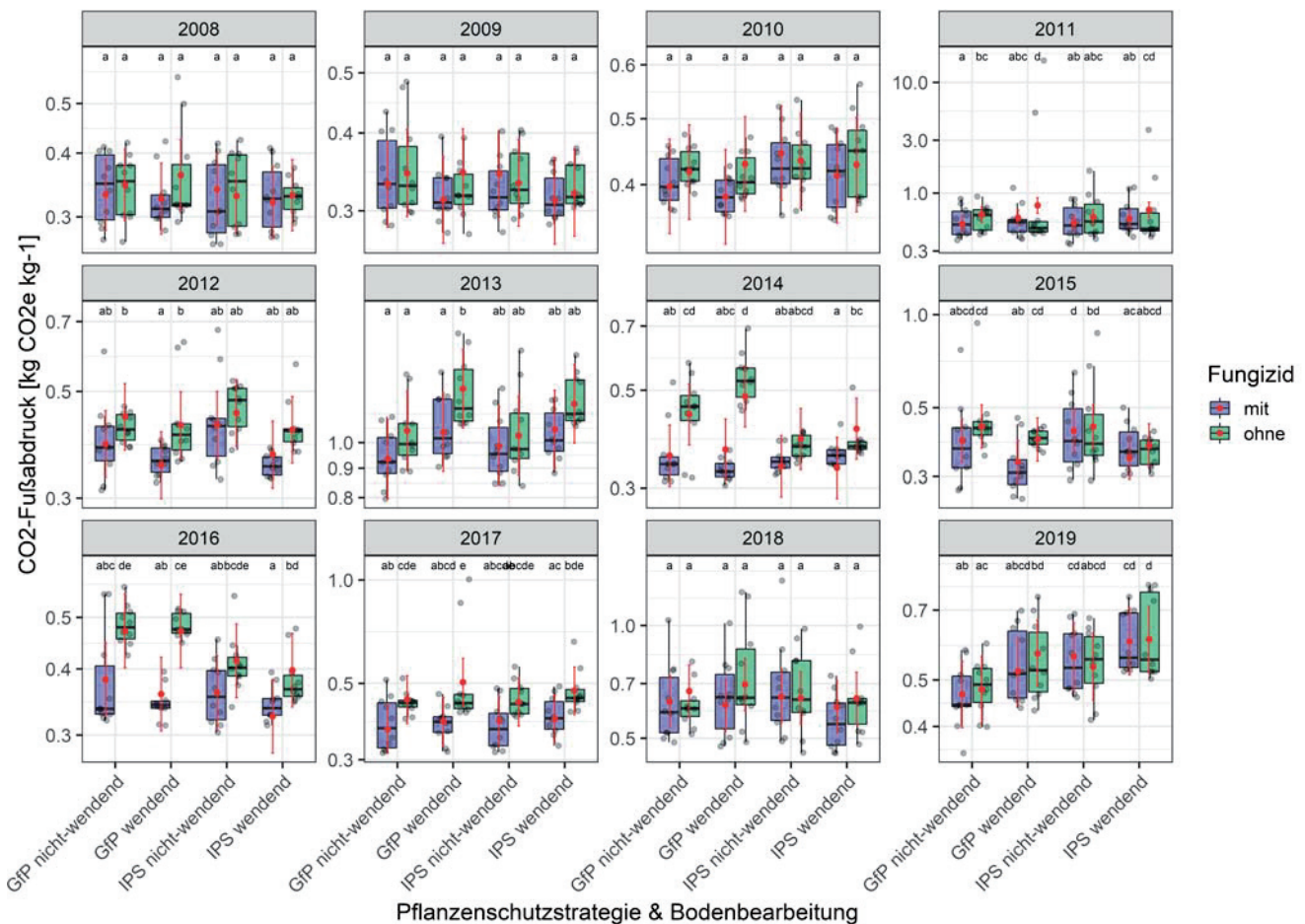


Abb. 8. Jahresspezifischer Einfluss der drei Versuchsfaktoren Pflanzenschutzstrategie (Gfp vs. IPS), Fungizidvariante (mit vs. ohne Fungizid) und Bodenbearbeitungsvariante (nicht-wendend vs. wendend) auf den CO₂-Fußabdruck der Weizenproduktion in Dahnsdorf in 2008–2019. Durch das Modell (s. Tab. S2) geschätzte Mittelwerte (Punkte) und das 95% Konfidenzintervall (Fehlerbalken) sind in rot gegeben. Die Daten wurden für die Analyse aufgrund Varianzheterogenität log-transformiert; entsprechend ist die Y-Achse log-skaliert. Gruppen, die in einem Jahr keinen Buchstaben teilen sind in diesem Jahr signifikant voneinander verschieden.

pflügte Variante die höchsten Emissionen mit durchschnittlich 4613 kg CO₂eq ha⁻¹ für den Weizen auf. Beim CO₂-Fußabdruck lagen die Werte der reduzierten und gepflügten Variante bei ZHANG et al. (2016) bei je ca. 0,65 kg CO₂eq kg⁻¹, ohne signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Die höheren Werte gegenüber der vorliegenden Studie, die im Mittel über alle Varianten und Jahre in Dahnsdorf bei 3002 kg CO₂eq ha⁻¹ bzw. 0,53 kg CO₂eq kg⁻¹ liegen, sind vorrangig durch den Energieeinsatz für die notwendige Bewässerung in China begründet.

Auch bei HA et al. (2015b) zeigten sich wesentlich höhere CO₂-Fußabdrücke der Weizenproduktion von durchschnittlich sogar 0,9 kg CO₂eq kg⁻¹. Da diese Studie auf Praxisdaten chinesischer Weizenbauern basiert, spielt hier neben der Bewässerung auch suboptimales Inputmanagement eine Rolle. Es zeigte sich in dieser Region jedoch auch, dass erhöhte Inputintensität nicht zu höheren CO₂-Fußabdrücken führt (HA et al., 2015a). Bei der Analyse von Produktionsdaten von 281 iranischen Weizenbauern lagen die Emissionen im nicht-bewässerten Weizenanbau bei vergleichsweise geringer Inputintensität bei 1600 kg CO₂eq ha⁻¹ und 0,55 kg CO₂eq kg⁻¹ (TAHMASEBI et al., 2018). Bei WÓJCIK-GRONT

(2018) lagen die CO₂-Fußabdrücke in den polnischen Sortenversuchen im Durchschnitt zwischen 0,33 kg CO₂eq kg⁻¹ bei niedrigem Ertragsniveau und nur 0,2 kg CO₂eq kg⁻¹ bei hohem Ertragsniveau. Für das Vereinigte Königreich errechneten TUOMISTO et al. (2012) einen CO₂-Fußabdruck für die konventionelle und ökologische Weizenproduktion von rund 0,36 kg CO₂eq kg⁻¹. TROST (2015) bewertete den konventionellen Weizenanbau basierend auf einem Feldversuch in Nordost-Deutschland mit rund 1200–1600 kg CO₂eq ha⁻¹ und einem CO₂-Fußabdruck von 0,35–0,4 kg CO₂eq kg⁻¹. In einer globalen Betrachtung kommen NEMECEK et al. (2012) auf mittlere THG-Emissionen von 2165 kg CO₂eq ha⁻¹ bei einer Standardabweichung von 1439 kg CO₂eq ha⁻¹ sowie einem CO₂-Fußabdruck von 0,2 bis 0,70 kg CO₂eq kg⁻¹.

Die Gründe für die Unterschiede in den Bewertungsergebnissen sind divers. Neben den Unterschieden in der Inputintensität spielen besonders bodenklimatische Unterschiede und entsprechende Unterschiede im Ertragspotential eine wichtige Rolle. Des Weiteren beeinflussen Unterschiede in den gewählten Emissionsfaktoren, d.h., die angenommenen CO₂eq je Einheit der jeweiligen Inputs, die Ergebnisse. Durch die Nutzung anerkannter

Datenbanken (IPCC, 2006; WERNET et al., 2016; KTBL, 2019) und allgemein akzeptierter Berechnungsverfahren (IPCC, 2006; MYHRE et al., 2013) versucht die vorliegende Studie Transparenz und Reproduzierbarkeit sicherzustellen.

Die Umfänglichkeit der vorliegenden Studie ist durch die Nicht-Berücksichtigung möglicher Veränderungen des Bodenkohlenstoffgehalts (C_{org} -gehalt) limitiert. Mögliche unterschiedliche Veränderungen des C_{org} -gehalts in verschiedenen Versuchsvarianten konnten so nicht berücksichtigt werden. Obwohl Erhebungsdaten hierzu vorliegen wurde von einer Berücksichtigung abgesehen, da der bewertete Weizen nur eines von sechs Fruchtfolgegliedern darstellt. Den Beitrag des Fruchtfolgeglieds Weizen auf mögliche Veränderungen im C_{org} -Gehalt über den Versuchszeitraum zu bewerten ist nicht zielführend möglich. Da ein substantieller Teil des Bodenkohlenstoffpools dem labilen Pool zuzuordnen ist, der innerhalb von Monaten bis wenigen Jahren umgesetzt wird (FAO, 2017), sind Veränderungen über einen Winterweizenzyklus vorrangig als Vorfruchteffekte anzusehen. Nichtsdestotrotz könnte eine Berücksichtigung der Veränderung im C_{org} -Gehalt die Bewertung, besonders im Hinblick auf wendende vs. nicht-wendende Bodenbearbeitung beeinflussen. Bei ZHANG et al. (2016) zeigte sich bei Berücksichtigung der Veränderungen im C_{org} -Gehalt eine deutliche stärkere Reduzierung des CO_2 -Fußabdrucks unter reduzierter Bodenbearbeitung im Vergleich zum Pflug.

Letztlich muss auch darauf hingewiesen werden, dass der Klimaschutz nur eines von mehreren ökologischen Nachhaltigkeitszielen darstellt. Im Hinblick auf die vorliegende Studie gilt dies vor allem für den Bodenschutz bzw. Erosionsschutz, der nicht betrachtet werden konnte, jedoch bzgl. Bodenbearbeitung durchaus von Bedeutung ist. Zudem könnte eine Bewertung des Risikos des Pflanzenschutzmitteleinsatzes, wie dies von KRENGEL-HORNEY et al. (2020) für das Versuchsfeld Dahnsdorf durchgeführt wurde, ein umfassenderes Bild liefern, und helfen Zielkonflikte zu erkennen und aufzulösen.

Interessenskonflikte

Die Autoren erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

BMEL, 2017: Nationaler Aktionsplan zur Nachhaltigen Nutzung von Pflanzenschutzmitteln. Bonn, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: 99.

BÖNECKE, E., L. BREITSAMETER, N. BRUGGEMANN, T.W. CHEN, T. FEIKE, H. KAGE, K.C. KERSEBAUM, H.P. PIEPHO, H. STÜTZEL, 2020: Decoupling of impact factors reveals the response of German winter wheat yields to climatic changes. *Glob Chang Biol* 10.1111/gcb.15073, DOI: 10.1111/gcb.15073.

DIN, D.I.f.N.e.V., 2006: DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Berlin, Beuth Verlag GmbH.

FAO, 2017: Soil Organic Carbon: the hidden potential. Rome, Italy.

HA, N., T. FEIKE, E. ANGENENDT, H. XIAO, E. BAHRS, 2015a: Impact of farm management diversity on the environmental and economic performance of the wheat–maize cropping system in the North China Plain. *International Journal of Agricultural Sustainability* 13 (4), 350-366, DOI: 10.1080/14735903.2015.1004856.

HA, N., T. FEIKE, H. BACK, H. XIAO, E. BAHRS, 2015b: The effect of simple nitrogen fertilizer recommendation strategies on product carbon footprint and gross margin of wheat and maize production in the North China Plain. *Journal of Environmental Management* 163, 146-154, DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.08.014.

HE, L., A. ZHANG, X. WANG, J. LI, Q. HUSSAIN, 2019: Effects of different tillage practices on the carbon footprint of wheat and maize production in the Loess Plateau of China. *Journal of Cleaner Production* 234, 297-305, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.161.

INRAE, 2020: Alternatives to chemical pesticides: 24 European research institutes undertake an ambitious roadmap. Paris, France, National Research Institute for Agriculture, Food and Environment (INRAE).

IPCC, 2006: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4 - Agriculture, Forestry and Other Land Use. Intergovernmental Panel for Climate Change.

KLOCKE, B., C. WAGNER, J. SCHWARZ, 2020: Erkenntnisse und Perspektiven eines 25-jährigen Dauerfeldversuches zum situationsbezogenen Pflanzenschutz gegen pilzliche Schaderreger im Winterweizen. *Journal für Kulturpflanzen* 72 (7), XX.

KRENGEL-HORNEY, S., J. STRASSEMAYER, J. SCHWARZ, 2020: Dauerfeldversuche zu Insektizidanwendungen im Winterraps – Was lernen wir aus 25 Jahren? *Journal für Kulturpflanzen* 72 (7), XX.

KTBL, 2017: KTBL-Dieselbedarfsrechner. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.

KTBL, 2019: Berechnungsparameter Klimagasbilanzierung. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.

LÜTTGER, A.B., T. FEIKE, 2018: Development of heat and drought related extreme weather events and their effect on winter wheat yields in Germany. *Theoretical and Applied Climatology* 132 (1-2), 15-29, DOI: 10.1007/s00704-017-2076-y.

MYHRE, G., D. SHINDELL, F.M. BRÉON, W. COLLINS, J. FUGLESTVEDT, J. HUANG, D. KOCH, J.F. LAMARQUE, D. LEE, B. MENDOZA, T. NAKAJIMA, A. ROBOCK, G. STEPHENS, T. TAKEMURA, H. ZHANG, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K., Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley, Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.

NEMECEK, T., 2017: wheat seed production, for sowing, GLO, Allocation, cut-off by classification. ecoinvent database version 3.4.

NEMECEK, T., K. WEILER, K. PLASSMANN, J. SCHNETZER, G. GAILLARD, D. JEFFERIES, T. GARCÍA-SUÁREZ, H. KING, L. MILÀ I CANALS, 2012: Estimation of the variability in global warming potential of worldwide crop production using a modular extrapolation approach. *Journal of Cleaner Production* 31, 106-117, DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.005.

PALLUTT, B., M. JAHN, B. FREIER, E. MOLL, 2010: Dauerfeldversuche auf dem Versuchsfeld Dahnsdorf unter besonderer Berücksichtigung der Unkrautbekämpfung. *Journal für Kulturpflanzen* 62 (7), 238-247, DOI: 10.5073/JfK.2010.07.02.

PRAGER, K., N. HAGEMANN, J. SCHULER, N. HEYN, 2010: Incentives and Enforcement: The institutional design and policy mix for soil conservation in Brandenburg (Germany). *Land Degradation & Development*.

RCORE TEAM, 2020: R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing.

SCHREIBER, M., 2006: Kraftstoffverbrauch beim Einsatz von Acker-schleppern im besonderen Hinblick auf CO_2 -Emissionen. PhD Thesis, Stuttgart, Universität Hohenheim, 182 p.


SCHWARZ, J., 2013: Energetische Betrachtung zum Einsatz von Herbiziden und Bodenbearbeitung. *Gesunde Pflanzen* 65 (1), 33-37, DOI: 10.1007/s10343-013-0295-4.

SENAPATI, N., P. STRATONOVITCH, M.J. PAUL, M.A. SEMENOV, 2019: Drought tolerance during reproductive development is important for increasing wheat yield potential under climate change in Europe. *Journal of Experimental Botany* 70 (9), 2549-2560, DOI: 10.1093/jxb/ery226.


SMITH, P., M. BUSTAMANTE, H. AHAMMAD, H. CLARK, H. DONG, E.A. ELSIDDIG, H. HABERL, R. HARPER, J. HOUSE, M. JAFARI, O. MASERA, C. MBOW, N.H. RAVINDRANATH, C.W. RICE, C. ROBLEDÓ ABAD, A. ROMANOVSKAYA, F. SPERLING, F. TUBIELLO, 2014: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

- Change. Eds.: Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. und S.S. Savolainen, C. von Stechow, T. Zwickel, J.C. Minx, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- TAHMASEBI, M., T. FEIKE, A. SOLTANI, M. RAMROUDI, N. HA, 2018: Trade-off between productivity and environmental sustainability in irrigated vs. rainfed wheat production in Iran. *Journal of Cleaner Production* **174**, 367-379, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.305.
- TROST, B., 2015: Treibhausgasemissionen unter Bewässerung und unterschiedlicher Stickstoffdüngungsintensität auf einem Sandboden in Nord-Ost-Deutschland. Doktorarbeit, Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin, 132 p.
- TUOMISTO, H.L., I.D. HODGE, P. RIORDAN, D.W. MACDONALD, 2012: Comparing global warming potential, energy use and land use of organic, conventional and integrated winter wheat production. *Annals of Applied Biology* **161** (2), 116-126, DOI: 10.1111/j.1744-7348.2012.00555.x.
- WERNET, G., C. BAUER, B. STEUBING, J. REINHARD, E. MORENO-RUIZ, B. WEIDEMA, 2016: The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **21** (9), 1218-1230, DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- WÓJCIK-GRONT, E., 2018: Variables influencing yield-scaled Global Warming Potential and yield of winter wheat production. *Field Crops Research* **227**, 19-29, DOI: 10.1016/j.fcr.2018.07.015.
- ZHANG, X.Q., C. PU, X. ZHAO, J.F. XUE, R. ZHANG, Z.J. NIE, F. CHEN, R. LAL, H.L. ZHANG, 2016: Tillage effects on carbon footprint and ecosystem services of climate regulation in a winter wheat-summer maize cropping system of the North China Plain. *Ecological Indicators* **67**, 821-829, DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.03.046.

© Der Autor/Die Autorin 2020.

 Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

© The Author(s) 2020.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Zusatzinformationen

Tab. S1. Überblick über pflanzenbauliche Maßnahmen je Versuchsvariante entsprechend der drei Versuchsfaktoren Pflanzenschutzstrategie (GfP vs. IPS), Fungizidvariante (mit vs. ohne Fungizid) und Bodenbearbeitungsvariante (nicht-wendend vs. wendend) in 2008–2019. Gegeben ist das arithmetische Mittel über die zwölf Versuchsjahre mit der entsprechenden Standardabweichung in Klammern.

| Pflanzenschutzstrategie | GfP | | | | IPS | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | mit Fungizid | | ohne Fungizid | | mit Fungizid | | ohne Fungizid | |
| | nicht-wendend | wendend | nicht-wendend | wendend | nicht-wendend | wendend | nicht-wendend | wendend |
| Aussaat | | | | | | | | |
| Saatgutmenge [kg ha ⁻¹] | 195,5 (26,2) | 195,5 (26,2) | 195,5 (26,2) | 195,5 (26,2) | 180,7 (19,9) | 180,7 (19,9) | 180,7 (19,9) | 180,7 (19,9) |
| Aussaatstärke [Körner m ⁻²] | 340,8 (18,5) | 340,8 (18,5) | 340,8 (18,5) | 340,8 (18,5) | 340,8 (18,5) | 340,8 (18,5) | 340,8 (18,5) | 340,8 (18,5) |
| Aufwandmengen Düngung | | | | | | | | |
| Stickstoff [kg N ha ⁻¹] | 141,0 (4,9) | 141,0 (4,9) | 141,0 (4,9) | 141,0 (4,9) | 141,0 (4,9) | 141,0 (4,9) | 141,0 (4,9) | 141,0 (4,9) |
| Phosphor [kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹] | 18,0 (42,2) | 18,0 (42,2) | 18,0 (42,2) | 18,0 (42,2) | 18,0 (42,2) | 18,0 (42,2) | 18,0 (42,2) | 18,0 (42,2) |
| Kalium [kg K ₂ O ha ⁻¹] | 36,2 (83,1) | 36,2 (83,1) | 36,2 (83,1) | 36,2 (83,1) | 36,2 (83,1) | 36,2 (83,1) | 36,2 (83,1) | 36,2 (83,1) |
| Kalk [kg CaO ha ⁻¹] | 138,7 (462,0) | 138,7 (462,0) | 138,7 (462,0) | 138,7 (462,0) | 138,7 (462,0) | 138,7 (462,0) | 138,7 (462,0) | 138,7 (462,0) |
| Aufwandmengen Pflanzenschutz | | | | | | | | |
| Herbizide [kg ha ⁻¹] | 2,31 (0,98) | 0,36 (0,40) | 2,31 (0,98) | 0,36 (0,40) | 2,36 (0,94) | 0,27 (0,31) | 2,36 (0,94) | 0,27 (0,31) |
| Fungizide [kg ha ⁻¹] | 2,35 (1,15) | 2,35 (1,15) | 0,00 (0,00) | 2,35 (1,15) | 0,00 (0,00) | 1,43 (0,66) | 0,00 (0,00) | 1,43 (0,66) |
| Insektizide [kg ha ⁻¹] | 0,01 (0,03) | 0,01 (0,03) | 0,01 (0,03) | 0,01 (0,03) | 0,00 (0,00) | 0,00 (0,00) | 0,00 (0,00) | 0,00 (0,00) |
| Wachstumsregler [kg ha ⁻¹] | 0,23 (0,30) | 0,23 (0,30) | 0,23 (0,30) | 0,23 (0,30) | 0,23 (0,30) | 0,23 (0,30) | 0,23 (0,30) | 0,23 (0,30) |
| Überfahrten Pflanzenschutz | | | | | | | | |
| Herbizide [Anzahl] | 1,83 (0,37) | 1,00 (0,00) | 1,83 (0,37) | 1,00 (0,00) | 2,00 (0,41) | 1,00 (0,00) | 2,00 (0,41) | 1,00 (0,00) |
| Fungizide [Anzahl] | 1,67 (0,47) | 1,67 (0,47) | 0,00 (0,00) | 1,67 (0,47) | 0,00 (0,00) | 1,00 (0,41) | 0,00 (0,00) | 1,00 (0,41) |
| Insektizide [Anzahl] | 0,25 (0,43) | 0,25 (0,43) | 0,25 (0,43) | 0,25 (0,43) | 0,08 (0,28) | 0,08 (0,28) | 0,08 (0,28) | 0,08 (0,28) |
| Wachstumsregler [Anzahl] | 0,42 (0,50) | 0,42 (0,50) | 0,42 (0,50) | 0,42 (0,50) | 0,42 (0,50) | 0,42 (0,50) | 0,42 (0,50) | 0,42 (0,50) |

Tab. S2. Überblick über die in den gemischten Modellen für die drei abhängigen Variablen: Ertrag, THG-Emissionen und CO₂-Fußabdruck durch Rückwärtsselektion ausgewählte Erklärungsvariablen (BI = Pflanzenschutzstrategie; FUNG = Fungizidvariante; TILL = Bodenbearbeitungsvariante) und Interaktionsterme sowie die entsprechenden P-Werte. Block genested in Jahr wurde hierbei als zufällige Effekte berücksichtigt.

| Unabhängige Variablen und Interaktionsterme | Abhängige Variablen | | |
|---|---------------------|------------------------------------|---|
| | Ertrag | THG-Emissionen (log-transformiert) | CO ₂ -Fußabdruck (log-transformiert) |
| | P-Werte | | |
| (Intercept) | <.0001 | <.0001 | <.0001 |
| TILL | <.0001 | <.0001 | 0.2211 |
| BI | 0.0142 | <.0001 | 0.1341 |
| FUNG | <.0001 | <.0001 | <.0001 |
| BI:FUNG | 0.0003 | <.0001 | 0.0046 |
| TILL:FUNG | 0.0298 | | 0.0166 |
| TILL:BI | | | |
| TILL:BI:FUNG | | | |

Tab. S3. Überblick über die in den gemischten Modellen für die drei abhängigen Variablen: Ertrag, THG-Emissionen und CO₂-Fußabdruck durch Rückwärtsselektion ausgewählte Erklärungsvariablen (BI = Pflanzenschutzstrategie; FUNG = Fungizidvariante; TILL = Bodenbearbeitungsvariante) und Interaktionsterme sowie die entsprechenden P-Werte. Jahr wurde hierbei als fixer Effekt und Block als zufälliger Effekt berücksichtigt.

| Unabhängige Variablen und Interaktionsterme | Abhängige Variablen | | |
|---|---------------------|------------------------------------|---|
| | Ertrag | THG-Emissionen (log-transformiert) | CO ₂ -Fußabdruck (log-transformiert) |
| | P-Werte | | |
| (Intercept) | <.0001 | <.0001 | <.0001 |
| TILL | 0.0125 | <.0001 | 0.7410 |
| BI | 0.4616 | 0.7055 | 0.7568 |
| FUNG | 0.0668 | 0.0190 | 0.0502 |
| JAHR | <.0001 | <.0001 | <.0001 |
| TILL:BI | 0.5543 | 0.5641 | 0.1558 |
| TILL:FUNG | 0.0378 | 0.0932 | 0.0310 |
| BI:FUNG | 0.7895 | 0.6267 | 0.0107 |
| TILL:JAHR | <.0001 | <.0001 | 0.0002 |
| BI:JAHR | 0.1777 | 0.0012 | 0.0581 |
| FUNG:JAHR | <.0001 | <.0001 | 0.0148 |
| BI:FUNG:JAHR | 0.0046 | 0.0004 | |
| TILL:BI:FUNG | | | |
| TILL:BI:JAHR | | | |
| TILL:FUNG:JAHR | | | |
| TILL:BI:FUNG:JAHR | | | |