



**HOCHSCHULE
NEUBRANDENBURG**
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Fachgebiet Nachhaltiges Landwirtschaftliches Produktionsmanagement

**Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)**

**CO₂-Bilanzierung im Ackerbau - ein Vergleich zwischen Argentinien und
Deutschland**

urn:nbn:de:gbv:519-thesis-2026-0237-8

vorgelegt von: Hans-Otto Papstein

Abgabe: Neubrandenburg, 30.03.2026

Erstgutachter: Prof. Dr. Clemens Fuchs

Zweitgutachter: Lic. en Administración Santiago Moscatelli

Inhaltsverzeichnis

I. Abkürzungsverzeichnis	iv
II. Abbildungsverzeichnis	vi
III. Tabellenverzeichnis	vii
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Forschungsziel	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2. Stand der Forschung, Datengrundlage und Methoden.....	4
2.1 Literaturstand zum Untersuchungsgegenstand	4
2.2 Auswahl der Region	6
2.3 Ökonomische Analyse	7
2.4 Ökologische Analyse	8
3. Agrarstandort Argentinien und Deutschland.....	10
3.1 Agrarstandort Argentinien	10
3.1.1 Geografie und klimatische Bedingungen Agrarstandort Argentinien.....	10
3.1.2 Anbauverhältnisse und Fruchtfolgen	13
3.1.3 Bodenbearbeitung Argentinien	15
3.2 Agrarstandort Deutschland	17
3.2.1 Geografie und klimatische Bedingungen Agrarstandort Deutschland	17
3.2.2 Anbauverhältnisse und Fruchtfolgen Deutschland	20
3.2.3 Bodenbearbeitung Deutschland.....	23
4. Analyse und Vergleich der Anbausysteme	28
4.1 Pflanzenbauliche und ökologische Parameter	28
4.1.1 Berechnung und Vergleich der CO ₂ Bilanzen	28
4.1.2 Vergleich der Pflanzenschutzmittel	42
4.2 Ökonomische Analyse	44
4.3 Risikoanalyse mit Hilfe einer stochastischen Simulation.....	47
4.3.1 Begriffserklärung stochastische Simulation	47
4.3.2 Analyse der ökonomischen Simulationsergebnisse	48
4.3.3 Analyse der ökologischen Simulationsergebnisse	53
5. Diskussion	58
5.1 Einordnung der Ergebnisse in die Literatur.....	58
5.2 Trade-off zwischen Ökonomie und Ökologie.....	65
5.3 Schlussfolgerung und Empfehlung	72

6. Zusammenfassung	75
7. Literaturverzeichnis	76

I. Abkürzungsverzeichnis

ASS	Ammoniumsulfatsalpeter
BEK	Berechnungsstandard für einzelbetriebliche Klimabilanzen
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BZL	Bundesinformationszentrum Landwirtschaft
Cfa	warmgemäßigt, immerfeucht, heißer Sommer (Köppen-Geiger-Klassifikation)
Cfb	warmgemäßigt, immerfeucht, warmer Sommer (Köppen-Geiger-Klassifikation)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
DAP	Diammonphosphat
dt	Dezitonne
dt/ha	Dezitonnen je Hektar
DüV	Düngeverordnung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EKfL / EkfL	einzelkostenfreie Leistung
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
EU	Europäische Union
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FiBL	Forschungsinstitut für biologischen Landbau
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GAEC	Good Agricultural and Environmental Conditions
GLÖZ	Guter landwirtschaftlicher und ökologischer Zustand
ha	Hektar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
J	Jahr
kg	Kilogramm
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
MAGyP	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca
N	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
N ₂ O	Lachgas
Nmin	mineralischer Stickstoffgehalt im Boden
No-Till	Bodenbearbeitung ohne Bodenbearbeitung / Direktsaatverfahren
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development

ÖR 2	Öko-Regelung 2
RETAA	Red de Estudios Territoriales Agronómicos Aplicados
ROE	Registro de Operaciones de Exportación
S.	Seite
SMN.....	Servicio Meteorológico Nacional
SMR.....	Statutory Management Requirements
t.....	Tonne
TM.....	TM.....Trockenmasse
UBA	Umweltbundesamt
UCCSNAL.....	Universidad Católica de Córdoba – Campus Social y Ambiental
USDA.....	United States Department of Agriculture
USDA-FAS.....	United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service
VDLUFA.....	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
z. B.....	zum Beispiel

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Landkarte Argentinien.....	11
Abbildung 2: Durchschnittlicher Anbauplan aus den Anbausaisons 2021 - 2025.....	13
Abbildung 3: Entwicklung der Direktsaatfläche	16
Abbildung 4: Landkarte Deutschland.....	18
Abbildung 5: Konventioneller Anbauplan Deutschland für die Anbausaison 2025	21
Abbildung 6: Bodenbearbeitung auf Ackerland in Deutschland 2022/2023.....	24
Abbildung 7: Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der ökonomischen Fruchtfolge auf Basis von 1000 Monte-Carlo-Simulationen	49
Abbildung 8: Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der erweiterten Fruchtfolge (ÖR2) auf Basis von 1000 Monte-Carlo-Simulationen	50
Abbildung 9: Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der Single Crop Fruchtfolge auf Basis von 1000 Monte-Carlo-Simulationen	51
Abbildung 10: Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der Double Crop Fruchtfolge auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen.....	52
Abbildung 11: Verteilung der CO2 Bilanzen der ökonomischen Fruchtfolge auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen.....	54
Abbildung 12: Verteilung der CO2 Bilanzen der Erweiterten Fruchtfolge (ÖR2) auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen.....	55
Abbildung 13: Verteilung der CO2-Bilanzen der Single Crop Fruchtfolge auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen.....	56
Abbildung 14: Verteilung der CO2 Bilanzen der Double Crop Fruchtfolge auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen.....	56
Abbildung 15: Trade-off zwischen CO2 Emissionen und der wirtschaftlichen Leistung der deutschen Fruchtfolgesysteme.....	66
Abbildung 16: Trade-off zwischen CO2 Emissionen und der wirtschaftlichen Leistung der argentinischen Fruchtfolgesysteme.....	70

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchte argentinische Fruchtfolgen	14
Tabelle 2: untersuchte deutsche Fruchtfolgen	22
Tabelle 3: N ₂ O-Emissionen aus NH ₃ -Verlusten bei Düngung mit mineralischem Düngemittel am Beispiel DAP	29
Tabelle 4: N ₂ O-Emissionen aus NH ₃ -Verlusten bei Düngung mit mineralischem Düngemittel am Beispiel ASS	30
Tabelle 5: N ₂ O-Emissionen aus NH ₃ -Verlusten bei Düngung mit mineralischem Düngemittel am Beispiel Harnstoff	31
Tabelle 6: direkte N ₂ O-Emissionen aus der Düngung mit dem Mineraldünger DAP	31
Tabelle 7: Direkte N ₂ O-Emissionen aus der Düngung mit dem Mineraldünger ASS	31
Tabelle 8: Direkte N ₂ O-Emissionen aus der Düngung mit dem Mineraldünger Harnstoff.	32
Tabelle 9: N ₂ O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen, sowie aus Stroh und Gründüngung.....	33
Tabelle 10: CO ₂ -Emissionen bzw. Bindung aus Humusabbau bzw. Humusaufbau.....	34
Tabelle 11: direkte CO ₂ -Emissionen aus der Harnstoffdüngung	34
Tabelle 12: direkte CO ₂ -Emissionen aus der Kalkdüngung	35
Tabelle 13: CO ₂ -Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers DAP	35
Tabelle 14: CO ₂ Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers ASS.....	35
Tabelle 15: CO ₂ -Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers Harnstoff.....	35
Tabelle 16: CO ₂ -Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers Kalimagnesia ..	36
Tabelle 17: CO ₂ -Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers DAP	36
Tabelle 18: CO ₂ -Emissionen aus der Bereitstellung des Saatgutes	36
Tabelle 19: CO ₂ -Emissionen aus der Bereitstellung der Pflanzenschutzmittel	37
Tabelle 20: CO ₂ -Emissionen aus der Energiebereitstellung und -konversion des Diesels.....	37
Tabelle 21: CO ₂ -Emissionen aus der Maschinenherstellung	37
Tabelle 22: Summe aller CO ₂ -Emissionen am Rechenbeispiel Winterraps.....	38
Tabelle 23: Flächen- und gewichtgebundene CO ₂ -Emissionen der Agrarstandorte Argentinien und Deutschland	39
Tabelle 24: Mittlere CO ₂ -Emissionen der vier untersuchten Fruchtfolgesysteme	40
Tabelle 25: Produktbezogene CO ₂ -Emissionen je kg Eiweiß bzw. Öl.....	41
Tabelle 26: Intensität des Pflanzenschutzmitteleinsatzes in Deutschland und Argentinien	42
Tabelle 27: Berechnung E _k F _L am Beispiel deutscher Winterraps	45
Tabelle 28: Mittlere E _k F _L der vier untersuchten Fruchtfolgesysteme	46

Tabelle 29: Endergebnis der stochastischen Simulation für die Ökonomie und Ökologie der untersuchten Fruchtfolgesysteme	58
Tabelle 30: Anzahl der Regionen mit negativen Netto-Margen auf gepachtetem Ackerland in Argentinien	63
Tabelle 31: Spannweite/Schwankungsbreite der einzelkostenfreien Leistung und der CO2 Bilanzen der deutschen Fruchtfolgesysteme auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen	67
Tabelle 32: Spannweite/Schwankungsbreite der einzelkostenfreien Leistung und der CO2 Bilanzen der argentinischen Fruchtfolgesysteme auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen	71
Tabelle 33: EkfL Winterraps Deutschland	88

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Das EU-Mercosur-Freihandelsabkommen wurde nach beinahe zwei Jahrzehnten Verhandlungen, am 6. Dezember 2024 politisch abgeschlossen und setzt einen wichtigen Wendepunkt in den Handelsbeziehungen zwischen der Europäischen Union und den Mercosur Staaten. (Europäische Kommission, 2024a; Grieger, 2025). Es sieht unter anderem den Abbau von Zöllen und nichttarifären Handelshemmnissen vor und hat damit tiefgreifende Konsequenzen für verschiedene Wirtschaftsbereiche (Europäische Kommission, 2024a). Besonders der Agrarsektor steht im Fokus, da ein erheblicher Teil des bilateralen Handelsvolumens auf landwirtschaftliche Erzeugnisse entfällt und damit direkt mit Fragen des Klima- und Umweltschutzes verknüpft ist (Grieger, 2025). Die Europäische Union betont in diesem Zusammenhang ihren Anspruch, hohe ökologische und soziale Standards auch in internationalen Handelsabkommen zu verankern und eine nachhaltige Produktion landwirtschaftlicher Güter sicherzustellen (Europäische Kommission, 2025a; Europäische Kommission, 2025b).

Parallel zur handelspolitischen Öffnung hat die Europäische Union im Zuge der Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) ihre Anforderungen an eine umwelt- und klimaverträglichere Bewirtschaftung weiter ausgebaut. Über die Konditionalität, die GAEC-/GLÖZ-Standards sowie die Öko-Regelungen werden Betriebe, die GAP-Unterstützung in Anspruch nehmen, an bestimmte Umwelt-, Klima- und Bewirtschaftungsstandards gebunden (Europäische Kommission, o. J.-a; Europäische Kommission, o. J.-b). Dabei ist zu unterscheiden, dass die Statutory Management Requirements (SMR) auf bestehenden EU-Rechtsvorgaben beruhen und grundsätzlich für alle landwirtschaftlichen Betriebe gelten, während die GAEC-/GLÖZ-Standards an den Bezug von GAP-Zahlungen geknüpft sind (Europäische Kommission, o. J.-a). Vor diesem Hintergrund ist die Inanspruchnahme von Förderinstrumenten nicht nur eine finanzielle Entscheidung, sondern zugleich mit betrieblichen Anpassungen an umwelt- und klimapolitische Anforderungen verbunden.

In diesem Zusammenhang rückt die Frage in den Mittelpunkt, wie klimawirksam Ackerbau in unterschiedlichen agrarökonomischen und regulatorischen Kontexten ausgestaltet ist. Argentinien nimmt als bedeutender Agrarexporteur des Mercosur eine zentrale Rolle im internationalen Handel mit Getreide sowie Öl- und Eiweißpflanzen ein, während Deutschland als Mitgliedstaat der Europäischen Union in ein stark reguliertes und förderorientiertes Agrarsystem eingebettet ist (Grieger, 2025). Beide Länder sind damit

wichtige Akteure im internationalen Agrarhandel, unterscheiden sich jedoch deutlich hinsichtlich ihrer agrarpolitischen und regulatorischen Rahmenbedingungen, was einen systematischen Vergleich ihrer Produktionssysteme besonders relevant macht.

1.2 Forschungsziel

Ziel dieser Arbeit ist es, den Ackerbau in Deutschland und Argentinien anhand der CO₂- bzw. Treibhausgasbilanzen (in CO₂-Äquivalenten) vergleichend zu bewerten und daraus Schlussfolgerungen für die Nachhaltigkeitsbeurteilung beider Produktionssysteme abzuleiten. Der Vergleich erfolgt vor dem Hintergrund der vertieften agrarischen Handelsbeziehungen im Kontext des am 6. Dezember 2024 politisch abgeschlossenen EU-Mercosur-Abkommens, da Fragen der Nachhaltigkeitsbewertung landwirtschaftlicher Produktion im Zuge einer weiteren Handelsliberalisierung an Bedeutung gewinnen (Europäische Kommission, 2024a; Grieger, 2025).

Hierzu werden die Treibhausgasemissionen des Ackerbaus für ausgewählte Kulturen und typische Produktionsverfahren in beiden Ländern bilanziert und sowohl flächenbezogen (Emissionen je Hektar) als auch produktbezogen (Emissionen je Produkteinheit) gegenübergestellt. Auf dieser Basis sollen Unterschiede in den Emissionsprofilen identifiziert und diskutiert werden, insbesondere mit Blick auf die Rolle regulatorischer Rahmenbedingungen und politischer Steuerungsinstrumente im Agrarsektor.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sechs inhaltliche Hauptkapitel gegliedert. Nach der Einleitung, in der Problemstellung, Forschungsziel und Relevanz des Themas dargestellt werden, folgt im zweiten Kapitel der Stand der Forschung sowie die Beschreibung der Datengrundlage und der angewandten Methoden. Zunächst wird die vorhandene Literatur zur Bilanzierung landwirtschaftlicher Treibhausgasemissionen in Argentinien und Europa eingeordnet. Daran anschließend werden die Auswahl der Untersuchungsregionen sowie die methodischen Grundlagen der ökonomischen und ökologischen Analyse erläutert. Dazu zählen insbesondere die Herleitung der Fruchtfolgen, die Datengrundlagen zu den Erträgen, Preisen und Kosten, die Berechnung der einzelkostenfreien Leistung sowie die methodische Vorgehensweise bei der Klimabilanzierung und der Bewertung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes.

Im dritten Kapitel werden die beiden untersuchten Agrarstandorte Argentinien und Deutschland systematisch beschrieben. Für beide Länder werden zunächst die geografischen und klimatischen Rahmenbedingungen kurz dargestellt. Anschließend

werden die jeweiligen Anbauverhältnisse, Fruchtfolgen und Formen der Bodenbearbeitung erläutert. Dieses Kapitel schafft die standörtliche und agrarstrukturelle Grundlage für den späteren Vergleich der Produktionssysteme.

Das vierte Kapitel bildet den analytischen Schwerpunkt der Arbeit. Hier erfolgen die Untersuchung und der Vergleich der ausgewählten Anbausysteme anhand pflanzenbaulicher, ökologischer und ökonomischer Parameter. Zunächst werden die CO₂-Bilanzen der Kulturen und Fruchtfolgen berechnet und gegenübergestellt sowie der Pflanzenschutzmitteleinsatz verglichen. Darauf aufbauend wird die ökonomische Analyse durchgeführt. Ergänzend erfolgt eine Risikoanalyse mithilfe einer stochastischen Simulation, um die Spannweiten und Unsicherheiten der ökonomischen und ökologischen Ergebnisse abzubilden.

Im fünften Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert. Dabei erfolgt zunächst eine Einordnung der Resultate in den bestehenden Forschungsstand. Anschließend wird der Trade-off zwischen ökonomischer Leistungsfähigkeit und ökologischer Wirkung der untersuchten Fruchtfolgesysteme herausgearbeitet. Auf diese Weise werden die zentralen Unterschiede zwischen den Produktionssystemen in Deutschland und Argentinien dargestellt und im Kontext agrarpolitischer sowie standörtlicher Rahmenbedingungen bewertet.

Das sechste Kapitel fasst die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammen. Dabei werden die ökonomischen und ökologischen Wirkungen der untersuchten Fruchtfolgesysteme im Kontext des EU-Mercosur-Abkommens verdichtet dargestellt. Im Mittelpunkt stehen dabei insbesondere die Unterschiede in den Treibhausgasemissionen, im Pflanzenschutzinsatz sowie in der Wirtschaftlichkeit der Systeme. Abschließend werden die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Nachhaltigkeitsbewertung landwirtschaftlicher Produktionssysteme eingeordnet.

2. Stand der Forschung, Datengrundlage und Methoden

2.1 Literaturstand zum Untersuchungsgegenstand

Die Bilanzierung von Treibhausgasemissionen landwirtschaftlicher Produktionssysteme ist in den vergangenen Jahren sowohl in Südamerika als auch in Europa verstärkt in den wissenschaftlichen Fokus gerückt. Der Schwerpunkt liegt dabei überwiegend auf einzelkulturbezogenen CO₂- bzw. CO₂-Äquivalent-Bilanzen sowie auf Systemvergleichen unterschiedlicher Bewirtschaftungsformen. Ein direkter Vergleich vollständiger Fruchtfolgesysteme zwischen Argentinien und Deutschland auf der Grundlage einer einheitlichen Methodik ist in der bisherigen Literatur nicht zu finden.

Für Argentinien existieren mehrere Untersuchungen, die zentrale Marktfrüchte wie Soja, Mais und Weizen hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen untersuchen. Viglizzo und Ricard (2023) berechneten auf Basis von Betriebsdaten aus dem landwirtschaftlichen Jahr 2019 CO₂-Emissionen pro Produkteinheit und Flächeneinheit für verschiedene landwirtschaftliche Erzeugnisse in drei unterschiedlichen argentinischen Agrarregionen. Die Berechnung erfolgte gemäß den IPCC-Richtlinien (2006) und konzentrierte sich auf direkte On-Farm-Emissionen. Die Emissionen zur Betriebsmittelbereitstellung, sowie der Antransport der Betriebsmittel und der Abtransport der produzierten Ware wurden in dieser Studie nicht beachtet. Auch die Kohlenstoffbindung wird nur eingeschränkt einbezogen, da insbesondere oberirdische Ernterückstände nicht vollständig in die Humusbilanz eingehen.

Eine weiterführende Systembetrachtung findet sich bei Bongiovanni et al. (2025), die den Carbon Footprint von Mais für die Anbausaison 2021/2022 in Argentinien berechneten. Im Gegensatz zu rein betriebsbezogenen Ansätzen werden hier zusätzlich vorgelagerte Emissionen aus der Herstellung von Betriebsmitteln sowie Transportemissionen bis zum Hafen (Farm-to-Port) berücksichtigt. Darüber hinaus analysieren die Autoren unterschiedliche Technologielevel, Saatzeitpunkte sowie den Einfluss von Direktsaat und Zwischenfrüchten. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sowohl die Wahl der Systemgrenzen als auch das Managementniveau einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der bilanzierten Emissionen haben.

Neben der Primärproduktion existieren zudem Untersuchungen entlang der Wertschöpfungskette. Hilbert et al. (2025) analysierten die Treibhausgasemissionen bei

der Verarbeitung von Sojabohnen zu Sojamehl und Sojaöl. Der Fokus liegt hierbei auf industriellen Prozessschritten, während Veränderungen der organischen Bodenkohlenstoffvorräte nicht berücksichtigt werden. Diese Arbeiten verdeutlichen, dass sich die ausgewiesenen Emissionswerte je nach gewählter Systemgrenze deutlich unterscheiden können.

Auch im europäischen Raum liegen zahlreiche Studien zur Klimawirkung landwirtschaftlicher Produktionssysteme vor. Holka (2020) untersuchte in Polen die CO₂-Bilanz von Winterweizen in den Anbaujahren 2015/2016 und 2016/2017 unter Pflug-, Grubber- und Direktsaatsystemen und berücksichtigte sowohl Pre-Farm- als auch On-Farm-Emissionen.

Mühlbachová et al. (2023) analysierten in einem mehrjährigen Feldversuch in Tschechien im Zeitraum von 2017 bis 2022 die Bodenrespiration unter verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen und stellten signifikante Unterschiede zwischen konventioneller und reduzierter Bearbeitung fest. Ergänzend dazu untersuchten Bhandari et al. (2025) in der kontinentalen Region Kroatiens saisonale CO₂-Emissionen aus dem Boden bei Mais-, Weizen- und Gerstenbeständen über die gesamte Vegetationsperiode hinweg. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Temperatur- und Feuchtebedingungen maßgeblichen Einfluss auf die Intensität der CO₂-Freisetzung aus dem Boden haben.

Für den deutschen Ackerbau existieren darüber hinaus standardisierte methodische Ansätze zur einzelbetrieblichen Treibhausgasbilanzierung. Beispielhaft ist der vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) entwickelte „Berechnungsstandard für einzelbetriebliche Klimabilanzen (BEK)“. Dieser beschreibt systematisch die Berechnung landwirtschaftlicher Treibhausgasemissionen auf Basis definierter Systemgrenzen und standardisierter Emissionsfaktoren. Berücksichtigt werden sowohl direkte Emissionen (z. B. N₂O-Emissionen aus Böden oder CO₂-Emissionen aus dem Energieeinsatz) als auch indirekte und vorgelagerte Emissionen aus der Herstellung von Betriebsmitteln. Die Anwendung standardisierter Verfahrensdaten ermöglicht eine transparente und vergleichbare Bewertung unterschiedlicher Produktionssysteme im deutschen Ackerbau.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die bestehende Literatur überwiegend kultur- oder systemspezifische Analysen innerhalb einzelner Länder bereitstellt. Die gewählten Systemgrenzen variieren erheblich: Während einige Studien ausschließlich direkte landwirtschaftliche Emissionen berücksichtigen, beziehen andere auch vorgelagerte

Prozesse oder Transportemissionen ein. Ebenso unterscheiden sich die Ansätze zur Berücksichtigung von Kohlenstoffbindung und Humusveränderungen deutlich.

Eine vergleichende Betrachtung vollständiger Fruchtfolgen zwischen Argentinien und Deutschland über mehrere Anbausaisons hinweg unter Anwendung eines einheitlichen Berechnungsstandards ist bislang nicht ersichtlich. Genau hier setzt die vorliegende Arbeit an. Mit Hilfe des standardisierten KTBL-Bilanzierungssystems werden ausgewählte Fruchtfolgen beider Länder über mehrere Jahre hinweg methodisch konsistent bewertet und hinsichtlich ihrer CO₂-Bilanz vergleichbar gemacht. Damit wird eine bestehende Forschungslücke geschlossen und ein Beitrag zur international vergleichbaren Bewertung landwirtschaftlicher Produktionssysteme geleistet.

2.2 Auswahl der Region

Für die vorliegende Arbeit wurden Deutschland und Argentinien als Untersuchungsräume ausgewählt, da beide Länder im Kontext des EU-Mercosur-Abkommens eine besondere Relevanz für den Agrarsektor besitzen. Mit dem politischen Abschluss des Abkommens rücken insbesondere landwirtschaftliche Handelsströme sowie deren ökologische und ökonomische Auswirkungen stärker in den Fokus der wissenschaftlichen und politischen Diskussion (Europäische Kommission, 2024a; Grieger, 2025).

Deutschland steht dabei für ein Agrarsystem innerhalb der Europäischen Union, das durch hohe regulatorische Anforderungen sowie durch die Instrumente der Gemeinsamen Agrarpolitik geprägt ist (Europäische Kommission, o. J.-a; Europäische Kommission, o. J.-b). Argentinien hingegen zählt zu den wichtigsten Agrarexporteurs des Mercosur und nimmt eine zentrale Rolle im internationalen Handel mit Getreide sowie Öl- und Eiweißpflanzen ein (Grieger, 2025). Die Gegenüberstellung beider Länder ermöglicht somit einen Vergleich zweier strukturell unterschiedlicher Ackerbausysteme unter verschiedenen politischen und produktionstechnischen Rahmenbedingungen.

Die Auswahl der Untersuchungsräume erfolgte mit dem Ziel, die Bewertung von Fruchtfolgesystemen nicht isoliert, sondern im Zusammenhang mit den agrar- und handelspolitischen Entwicklungen zwischen der Europäischen Union und den Mercosur-Staaten vorzunehmen. Dadurch lässt sich untersuchen, inwiefern sich Unterschiede in den Produktionssystemen auch auf die ökonomische und ökologische Einordnung landwirtschaftlicher Erzeugung im Kontext des EU-Mercosur-Abkommens auswirken können (Europäische Kommission, 2024a; Europäische Kommission, 2025b; Grieger, 2025).

2.3 Ökonomische Analyse

Zu Beginn wurde anhand der deutschen Anbauverhältnisse eine konventionelle ökonomische Fruchtfolge erstellt, und danach wurde eine zweite konventionelle Fruchtfolge, welche mit einer Körnerleguminose erweitert wurde und in dieser Arbeit als erweiterte Fruchtfolge ausgewählt. Der betrachtete Zeitraum umfasst die Anbausaisons von 2014/2015 bis 2023/2024. Jede einzelne Kultur wurde entsprechend der Düngebedarfsermittlung wie in der Düngeverordnung vorgegeben mit Stickstoff versorgt.

Die Erträge und Preise aller verwendeten Ackerbaukulturen Deutschlands (mit Ausnahme der Futtererbse) für die Anbausaisons 2014/2015 bis 2022/2023 stammen aus den Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL, o. J.).

Die Ertragsdaten der Futtererbse stammen von der FAO, während die Preisangaben auf Anfrage von der Ceravis Malchin zur Verfügung gestellt wurden.

Die Preise für die mineralischen Stickstoffdünger wurden aus den Angaben der Marktberichte von Agrarheute entnommen.

Die weiteren Kosten wurden auf der Grundlage der Datensammlung für die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg, Ausgabe 2021, ermittelt.

Für Argentinien wurden entsprechend auch zwei verbreitete Fruchtfolgen ausgewählt. Es wurde sich für eine Rotation mit zwei Ernten in einer Anbausaison entschieden, welche in dieser Arbeit als Double-Crop Fruchtfolge bezeichnet wird. Die zweite ist eine Fruchtfolge mit nur einer Ernte je Anbausaison und wird in dieser Arbeit als Single-Crop Fruchtfolge benannt.

Die durchschnittlichen Erträge der zehn Anbausaisons wurden auf Grundlage der offiziellen Produktionsstatistiken des argentinischen Landwirtschaftsministeriums, zuletzt aktualisiert am 06.03.2026 (MAGyP, 2016) errechnet.

Die Preise der landwirtschaftlichen Erzeugnisse sowie die Kosten für Düngemittel basieren auf den Angaben der argentinischen Fachzeitschrift *Márgenes Agropecuarios*. Eine Ausnahme bilden die Preise für Körnermais und Weizen in der Anbausaison 2014/2015. In diesem Zeitraum bestanden in Argentinien Exportgenehmigungssysteme (ROE), die laut einem Bericht des U.S. Department of Agriculture (USDA-FAS, 2015) dazu führten, dass die inländischen Erzeugerpreise für Weizen und Mais unter dem

Weltmarktniveau lagen. Um eine verzerrende Wirkung dieser politisch beeinflussten Preisbildung auf die ökonomische Bewertung der Fruchtfolgen zu vermeiden, wurden diese Preise in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

Die verwendeten Kosten stammen aus dem Bericht „Márgenes y Resultados – Junio 2025“ des Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP, 2025). In diesem Bericht wurde für jede agrarökonomische Zonen Argentiniens die Kostenverteilung aufgelistet. Anhand dieser Daten und dem Anteil jeder Region an der Gesamtproduktion des Landes, wurden die Kosten für eine durchschnittliche Region in Argentinien berechnet.

Die statistische Bewertung erfolgte mit einer Monte-Carlo-Simulation. Hierbei wurden Erträge in Dezitonnen, Erzeugerpreise und Stickstoffdüngerpreise mittels 1000 Simulationen variiert. Ein Simulationsablauf entspricht in jedem Fall einer Anbausaison. Als Ergebnis wurden Dreiecksverteilungen für Preise der Ware und der Stickstoffdünger, sowie der Erträge bestimmt. Diese Dreiecksverteilung stellt den durchschnittlichen Wert der Faktoren innerhalb der 1000 Simulationen dar.

Die simulierten Werte (Dreiecksverteilungen) wurden anschließend in Microsoft Excel weiterverarbeitet. Für jede Kultur wurde die einzelkostenfreie Leistung (EkfL) berechnet und darauf aufbauend die durchschnittliche EkfL der jeweiligen Fruchtfolge ermittelt.

Die Berechnung der EkfL für Deutschland erfolgte gemäß der Datensammlung für die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg, Ausgabe 2021. Für Argentinien wurde die EkfL nach demselben Berechnungssystem auf Grundlage der wirtschaftlichen Kennzahlen des Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP, 2025) durchgeführt, um eine methodisch konsistente Vergleichbarkeit sicherzustellen.

2.4 Ökologische Analyse

Für die ökologische Analyse wurden die im vorherigen Kapitel mittels Monte-Carlo-Simulation ermittelten Dreiecksverteilungen der Erträge als Grundlage verwendet. Auf dieser Basis wurden zunächst für jede einzelne Ackerbaukultur und anschließend für die jeweiligen deutschen Fruchtfolgen durchschnittliche Humusbilanzen berechnet. Die Berechnung erfolgte mithilfe des Humusbilanzprogramms der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL, o.J.).

Zur Ermittlung der Klimabilanzen wurde der „Berechnungsstandard für einzelbetriebliche Klimabilanzen (BEK)“ herangezogen, der 2021 in zweiter Auflage vom Kuratorium für

Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) veröffentlicht wurde. Der BEK stellt einen standardisierten methodischen Rahmen zur Berechnung landwirtschaftlicher Treibhausgasemissionen dar und ermöglicht dadurch eine vergleichbare Bewertung unterschiedlicher Produktionssysteme.

Im Rahmen der landwirtschaftlichen Produktion entstehen verschiedene Treibhausgase, insbesondere CO₂ und N₂O, die auf Grundlage der Global Warming Potentials des vierten Sachstandsberichts des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden (IPCC, 2007).

Auf Grundlage dieser Methodik wurde für jedes Glied der jeweiligen Fruchtfolgen eine Klimabilanz berechnet. Anschließend erfolgte ein Vergleich der gesamten Fruchtfolgen auf der Ebene der aggregierten CO₂-Äquivalente. Emissionen aus dem Transport von Saatgut und Ernteprodukten sowie mögliche Emissionen aus der Lagerung wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit zwischen den beiden Agrarstandorten wurde für Deutschland zusätzlich eine Klimabilanz ohne Berücksichtigung von Humusauf- beziehungsweise -abbau berechnet. Hintergrund ist, dass für Argentinien kein vergleichbares Humusbilanzierungsinstrument zur Verfügung steht. Zudem ist eine Übertragung des deutschen Humusrechners auf argentinische Fruchtfolgen, insbesondere unter Direktsaatsystemen, methodisch nicht möglich.

Die Wirkstoffmengen der Pflanzenschutzmittel für Deutschland wurden wie folgt berechnet. Das Julius-Kühn-Institut hat für das Jahr 2023 die insgesamt ausgebrachten Wirkstoffmengen für jede Kultur angegeben. (JKI, 2023) Mit Hilfe des Anbauplanes des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat, wurde dann die durchschnittliche Wirkstoffmenge je Hektar für jede der deutschen Kulturen berechnet. (BMEL-Statistik, o. J.)

Die Wirkstoffmengen für die Ackerbaukulturen aus Argentinien wurden einer Zusammenstellung von Hough (2022) auf der Plattform UCCSNAL entnommen.

3. Agrarstandort Argentinien und Deutschland

3.1 Agrarstandort Argentinien

3.1.1 Geografie und klimatische Bedingungen Agrarstandort Argentinien

Argentinien erstreckt sich über rund 3.700 km in Nord-Süd-Richtung (ca. 22°S bis 55°S) und weist dadurch eine ausgeprägte klimatische und naturräumliche Diversität auf. Die große latitudinale Spannweite führt zu deutlichen Unterschieden hinsichtlich Temperaturregimen, Niederschlagsverteilung und Vegetationsdauer (Peel, Finlayson & McMahon, 2007).

Entsprechend der aktualisierten Köppen-Geiger-Klassifikation dominieren im Nordosten humid-subtropische Klimate (Cfa), im zentralen Landesteil warm-gemäßigte bis semiaride Steppenklimate (BSk), während im Westen und in Patagonien aride bis kalt-aride Klimazonen (BWk/BSk) vorherrschen (Peel, Finlayson & McMahon, 2007).

Abbildung 1: Landkarte Argentinien



Quelle: Central Intelligence Agency (CIA) 2015

Die Anden bilden eine ausgeprägte orographische Barriere, wodurch auf der Ostseite der Gebirgskette Regenschatteneffekte entstehen, die insbesondere in Westargentinien zu geringen Jahresniederschlägen beitragen (Britannica, o. J.). Für die landwirtschaftliche Produktion ist vor allem die Pampa-Region von zentraler Bedeutung. Nach Angaben der FAO wird die Mehrheit der argentinischen Getreidekulturen in der Región Pampeana erzeugt (FAO, 2015). Innerhalb der Pampa-Region bestehen deutliche Unterschiede in

den Niederschlagsverhältnissen. Der jährliche Niederschlag liegt dort bei etwa 600 bis 1000 mm und nimmt von Südwesten nach Nordosten zu (Andrade et al., 2015).

Die mittleren Jahrestemperaturen in den zentralen Produktionsgebieten bewegen sich zwischen 14 °C und 18 °C (World Bank, 2023). Aufgrund der Lage auf der Südhalbkugel verlaufen die Jahreszeiten entgegengesetzt zu Europa: Die Hauptvegetationsperiode erstreckt sich überwiegend von Oktober bis März, während die kühleren Monate zwischen Juni und August liegen (World Bank, 2023). Diese saisonale Verschiebung ist insbesondere für die Einordnung von Aussaat- und Erntezeitpunkten im Vergleich zu Deutschland von Bedeutung.

Ein weiteres prägendes Merkmal des argentinischen Agrarklimas ist die ausgeprägte interannuelle Variabilität der Niederschläge. Große Teile des Landes werden durch ENSO-Ereignisse (El Niño und La Niña) beeinflusst, die erheblichen Schwankungen in Niederschlagsmengen und -verteilungen verursachen können. Während El-Niño-Phasen häufig mit erhöhten Niederschlägen einhergehen, sind La-Niña-Ereignisse oftmals mit Trockenperioden verbunden, die das Ertragsrisiko insbesondere bei Mais und Weizen erhöhen (FAO, 2015; World Bank, 2023).

Neben Temperatur und Niederschlag spielen auch die jährlichen Sonnenscheindauern eine zentrale Rolle für das pflanzenbauliche Produktionspotenzial. In den zentralen Ackerbauregionen der Pampa werden durchschnittlich zwischen 2.200 und 2.800 Sonnenstunden pro Jahr erreicht, wobei die höchsten Werte in den westlichen, niederschlagsärmeren Regionen auftreten (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2023). Die hohe solare Einstrahlung begünstigt die Photosyntheseleistung und trägt wesentlich zum hohen Ertragspotenzial von Mais und Soja bei. Gleichzeitig erhöht sie in trockenen Jahren die Verdunstungsraten und verstärkt somit das Risiko von Trockenstress.

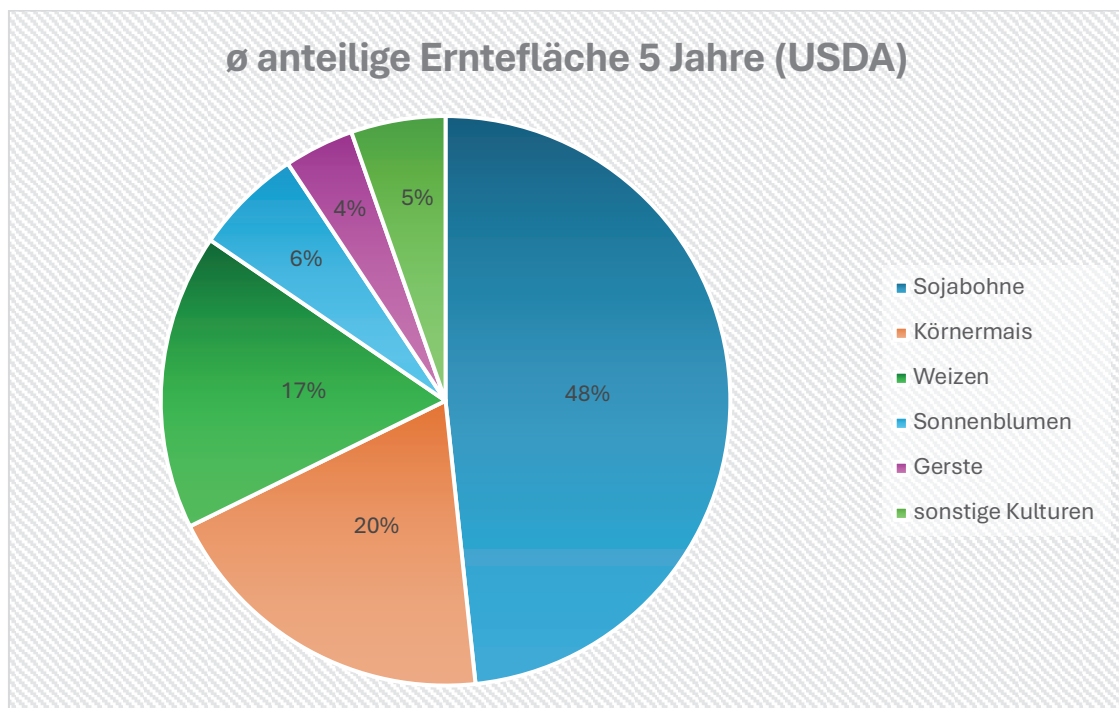
Zusammenfassend ist der Agrarstandort Argentinien durch günstige natürliche Produktionsbedingungen in den zentralen Tieflandregionen gekennzeichnet, zugleich jedoch durch regionale Trockenheitsrisiken und klimatische Schwankungen geprägt. Diese Rahmenbedingungen beeinflussen maßgeblich die Ausgestaltung der Fruchtfolgesysteme sowie die ökonomische und ökologische Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren.

3.1.2 Anbauverhältnisse und Fruchtfolgen

Die Anbauverhältnisse im argentinischen Ackerbau sind seit den 1990er-Jahren durch eine deutliche Konzentration auf wenige Marktfrüchte gekennzeichnet. Im Durchschnitt der letzten fünf Jahre nimmt die Sojabohne mit rund 48 % den größten Anteil an der Erntefläche ein. Es folgen Körnermais mit etwa 20 % sowie Weizen mit rund 17 %. Weitere Kulturen wie Sonnenblumen, Gerste und sonstige Feldfrüchte spielen eine deutlich geringere Rolle (USDA-FAS, 2024). Diese Flächenverteilung ist das Ergebnis technologischer Innovationen, ökonomischer Anreize und agrarpolitischer Rahmenbedingungen.

Quelle: Eigene Darstellung aus den Daten der USDA

Abbildung 2: Durchschnittlicher Anbauplan aus den Anbausaisons 2021 - 2025



Quelle: Eigene Darstellung aus den Daten der USDA

Ein wesentlicher Wendepunkt war die Einführung herbizidtoleranter Sojabohnen im Jahr 1996. Argentinien gehörte zu den ersten Ländern, die gentechnisch veränderte Soja großflächig einführten. In Verbindung mit dem verstärkten Einsatz von Glyphosat vereinfachte dies das Unkrautmanagement erheblich und senkte die Produktionskosten (Trigo, 2003; Burachik, 2010). Gleichzeitig breitete sich die Direktsaat stark aus. Diese Form der Bodenbewirtschaftung reduzierte Bearbeitungskosten, verringerte Erosionsrisiken und erleichterte die Bewirtschaftung großer Flächen (Trigo, 2003). In der wissenschaftlichen Literatur wird diese Entwicklung häufig als „Soybeanisierung“

bezeichnet, da die Sojabohne zunehmend zur dominierenden Kultur wurde (Phélinas, 2017).

Vor diesem Hintergrund haben sich in Argentinien zwei grundlegende Anbausysteme etabliert. Zum einen ist dies das Doppelkultursystem, bei dem Winterweizen angebaut und im Dezember geerntet wird. Direkt im Anschluss wird Soja als Zweitfrucht etabliert. Diese Anbauform ermöglicht zwei Ernten innerhalb eines Jahres und erhöht dadurch die jährliche Flächennutzung (USDA-FAS, 2019). Die nach Weizen angebaute Sojabohne wird als „Soja 2“ bezeichnet und erzielt aufgrund der verkürzten Vegetationsperiode in der Regel geringere Erträge als Soja, die als Hauptkultur angebaut wird (USDA-FAS, 2024; MAGyP, 2025).

Zum anderen existiert das Einfuchtsystem, bei dem Soja oder Mais als Hauptkultur angebaut werden. Soja als Hauptfrucht („Soja 1“) wird im Frühjahr ausgesät und im Spätsommer geerntet. Durch die vollständige Nutzung der Vegetationsperiode werden im Durchschnitt höhere Erträge erreicht als bei Soja 2 (USDA-FAS, 2024). Mais ist innerhalb dieses Systems eine ertragsstarke Sommerung und erreicht in den letzten Jahren durchschnittliche nationale Erträge von 7 bis 9 t ha⁻¹ (USDA-FAS, 2024).

Auf Basis dieser beiden Anbausysteme wurden in der vorliegenden Arbeit zwei Fruchtfolgen untersucht. Die Auswahl ermöglicht es, ein intensives System mit zwei Ernten pro Jahr mit einer stärker auf Einzelkulturen ausgerichteten Produktionsstrategie zu vergleichen und Unterschiede im Ertragsniveau sowie in ökonomischen und ökologischen Wirkungen systematisch zu bewerten.

Tabelle 1: Untersuchte argentinische Fruchtfolgen

Double Crop Fruchtfolge	Single Crop Fruchtfolge
Weizen/Soja2 → Weizen/Soja 2	Soja 1 → Körnermais

Quelle: Eigene Darstellung

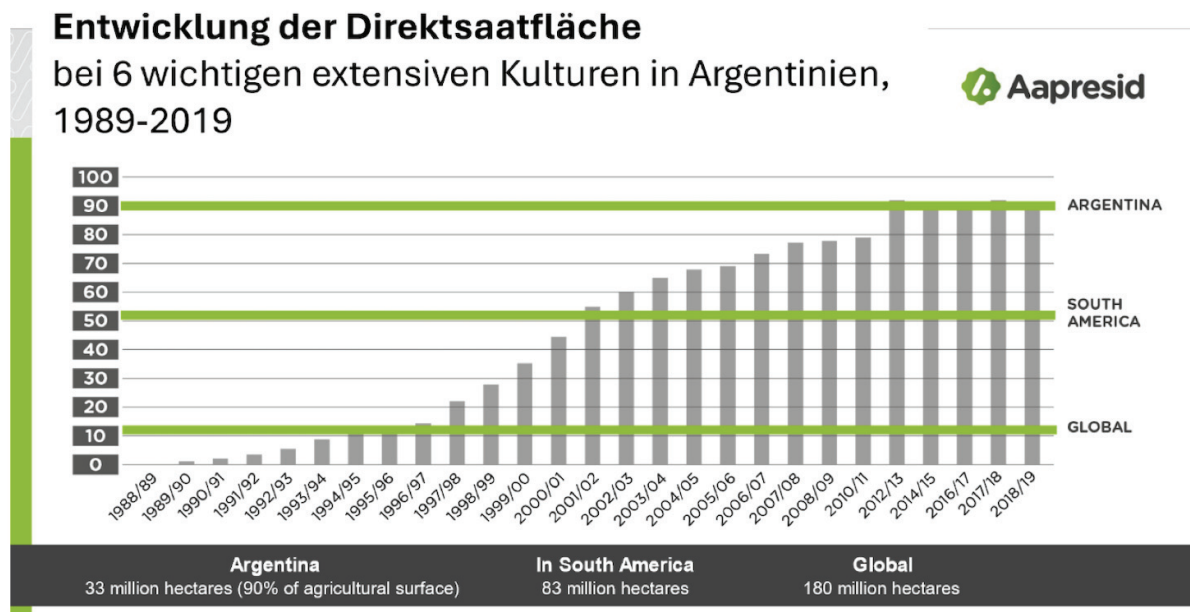
Auch agrarpolitische Maßnahmen beeinflussten die Entwicklung der Anbauverhältnisse. Exportsteuern und zeitweise Exportrestriktionen veränderten die relativen Preisrelationen zwischen Kulturen und wirkten sich damit auf Anbauentscheidungen aus (OECD, 2019; Piñeiro et al., 2017). Diese politischen Eingriffe trugen dazu bei, dass sich die Anteile von Mais, Weizen und Soja im Zeitverlauf variieren.

Zusammenfassend sind die heutigen Anbauverhältnisse in Argentinien das Ergebnis einer technologischen Transformation, die seit Mitte der 1990er-Jahre, zu einer starken Ausrichtung auf den internationalen Soja- und Maishandel sowie agrarpolitischer Einflussfaktoren (Trigo, 2003; Burachik, 2010; OECD, 2019). Die beiden untersuchten Fruchtfolgen bilden dabei zentrale Produktionsstrategien des argentinischen Ackerbaus ab und eignen sich somit für einen vergleichenden Ansatz im Rahmen dieser Arbeit (USDA-FAS, 2019; USDA-FAS, 2024).

3.1.3 Bodenbearbeitung Argentinien

Die Transformation der argentinischen Agrarlandschaft von einem System konventioneller Bodenbearbeitung hin zu einer nahezu flächendeckenden Direktsaat (*siembra directa*) stellt eine der bedeutendsten agronomischen Veränderungen der jüngeren Zeit dar. Ihren Ausgang nahm diese Entwicklung vor allem in der Pampa-Region und sie stand in engem Zusammenhang mit dem Ziel, Bodendegradation und Erosionsprozesse unter den Bedingungen intensiver Bodenbearbeitung zu begrenzen. In der wissenschaftlichen Literatur wird dieses Produktionssystem heute überwiegend im Kontext der Conservation Agriculture eingeordnet. Argentinien zählt dabei international zu den Ländern mit der höchsten Verbreitung dieser Bewirtschaftungsform. Nationale Erhebungen für die Kampagne 2019/20 zeigen, dass die Direktsaat mehr als 90 % der Ackerfläche erfasste. Kennzeichnend ist der weitgehende Verzicht auf wendende Bodenbearbeitung bei gleichzeitiger Bodenbedeckung durch Ernterückstände, wodurch der Boden vor Erosion geschützt, die Wasserinfiltration verbessert und die Bodenfeuchte stabilisiert werden kann (Derpsch et al. 2010; Kassam et al. 2019; Aapresid 2020).

Abbildung 3: Entwicklung der Direktsaatfläche



Quelle: Ramírez (2025, S. 5), nach Kassam et al. (2018)

Wissenschaftliche Langzeituntersuchungen, insbesondere die der INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), zeigen jedoch, dass die ökologischen Auswirkungen der Direktsaat komplexer sind als eine bloße Verbesserung der Erosionsbilanz. Ein zentrales Phänomen ist die ausgeprägte Stratifizierung organischer Substanz. Während in den obersten fünf Zentimetern des Bodenprofils signifikante Anreicherungen von organischem Kohlenstoff und Stickstoff zu beobachten sind, bleibt der Gehalt in den tieferen Horizonten im Vergleich zu konventionell gepflügten Böden oft niedriger, da der mechanische Transport von Biomasse in tiefere Schichten fehlt (Novelli et al., 2011). Diese oberflächennahe Konzentration verbessert zwar die Aggregatstabilität und die biologische Aktivität an der Schnittstelle Boden-Atmosphäre, führt jedoch zu einer vertikalen Entkoppelung der Nährstoffkreisläufe. Parallel dazu ist das physikalische Problem der Bodenverdichtung unter Direktsaat in den Fokus der Forschung gerückt. Ohne die mechanische Lockerung durch den Pflug entwickeln viele Böden der Pampa eine erhöhte Lagerungsdichte in einer Tiefe von 10 bis 15 cm, was oft als „No-Till-Plattenstruktur“ bezeichnet wird und das Wurzelwachstum sowie den Gasaustausch limitieren kann (Sasal et al., 2006).

Darüber hinaus hat die großflächige Umstellung auf Direktsaat die hydrologische Bilanz ganzer Regionen der Pampa verändert. Verbesserte Infiltration, geringerer Oberflächenabfluss und der Ersatz tiefwurzelnder, mehrjähriger Vegetation durch einjährige Kulturen haben in vielen Teilräumen zu einem Anstieg des Grundwasserspiegels beigetragen, wodurch das Risiko von Vernässung und

standortabhängig auch von Versalzung zunehmen kann (Viglizzo et al. 2011). Während die Direktsaat das Problem der Bodenerosion deutlich minderte, ging ihre Ausbreitung zugleich mit einer starken Abstützung der Unkrautkontrolle auf Herbizide einher. In der Literatur wird zunehmend darauf hingewiesen, dass die Ausbreitung herbizidresistenter Unkräuter die Stabilität stark herbizidbasierter Produktionssysteme beeinträchtigen kann und dadurch integrierte Strategien des Unkrautmanagements an Bedeutung gewinnen. Dazu zählen neben vielfältigeren Fruchtfolgen und präventiven Maßnahmen in Einzelfällen auch gelegentliche mechanische Eingriffe in langjährig pfluglosen Systemen (Aparicio et al. 2013; Oreja et al. 2024; Oreja et al. 2025).

Diese wachsende Krise der Herbizidresistenz stellt die argentinische Landwirtschaft vor die Frage, ob das System der Direktsaat ohne eine Rückkehr zu gelegentlichen mechanischen Eingriffen oder radikal neue Pflanzenschutzstrategien langfristig überlebensfähig ist.

3.2 Agrarstandort Deutschland

3.2.1 Geografie und klimatische Bedingungen Agrarstandort Deutschland

Deutschland erstreckt sich über rund 850 km in Nord-Süd-Richtung (ca. 47°N bis 55°N) und liegt vollständig in der gemäßigten Klimazone der Nordhalbkugel. Im Gegensatz zu Argentinien ist die latitudinale Spannweite geringer, dennoch bestehen deutliche regionale Unterschiede hinsichtlich Temperatur, Niederschlag und Vegetationsdauer. Nach der aktualisierten Köppen-Geiger-Klassifikation dominiert in Deutschland das warmgemäßigte, ganzjährig humide Klima (Cfb), das durch mäßig warme Sommer und relativ milde Winter gekennzeichnet ist (Peel, Finlayson & McMahon, 2007).

Abbildung 4: Landkarte Deutschland



Quelle: MundoMapa (o. J.).

Die großräumige Zirkulation wird maßgeblich durch die Westwindzone und den Einfluss des Nordatlantiks bestimmt. Maritime Luftmassen sorgen insbesondere im Westen und Norden für vergleichsweise geringe jahreszeitliche Temperaturschwankungen und eine relativ gleichmäßige Niederschlagsverteilung über das Jahr (Deutscher Wetterdienst [DWD], 2023). Mit zunehmender Entfernung vom Atlantik nimmt der kontinentale Einfluss

zu, wodurch in Ostdeutschland größere Temperaturamplituden und teilweise geringere Jahresniederschläge auftreten (DWD, 2023).

Die jährlichen Niederschläge variieren regional erheblich. Während in den Mittelgebirgen und im Alpenvorland häufig über 1.000 mm pro Jahr erreicht werden, liegen die Werte in den niederschlagsärmeren Regionen Nordostdeutschlands teilweise unter 550 mm (DWD, 2023). Im bundesweiten Mittel bewegen sich die Jahresniederschläge zwischen 700 und 800 mm. Anders als in vielen Teilen Argentinien ist die Niederschlagsverteilung gleichmäßig über das Jahr verteilt, wenngleich in den Sommermonaten konvektive Starkniederschläge auftreten können.

Die mittleren Jahrestemperaturen liegen in Deutschland je nach Region zwischen 8 °C in höheren Lagen und über 11 °C in klimatisch begünstigten Tieflandgebieten (DWD, 2023). Die Hauptvegetationsperiode erstreckt sich in der Regel von April bis Oktober. Winterkulturen wie Winterweizen oder Winterraps nutzen dabei die Herbst- und Frühjahrsfeuchte, während Sommerungen wie Mais oder Zuckerrüben vor allem von warmen Temperaturen im Sommer profitieren. Die Vegetationsdauer ist im Vergleich zu Argentinien kürzer, jedoch aufgrund ausreichender Bodenfeuchte häufig weniger stark durch Wasserstress limitiert.

Ein zentrales Merkmal des deutschen Agrarklimas ist die zunehmende klimatische Variabilität im Zuge des Klimawandels. Langzeitdaten zeigen einen signifikanten Temperaturanstieg seit den 1960er-Jahren sowie eine Häufung von Hitze- und Trockenperioden in den letzten Jahren (DWD, 2023). Besonders ausgeprägt waren die Dürrejahre 2018, 2019 und 2022, die in weiten Teilen Deutschlands zu erheblichen Ertragseinbußen führten. Diese Entwicklung erhöht insbesondere in den kontinental geprägten Regionen Ostdeutschlands das Produktionsrisiko.

Neben Temperatur und Niederschlag spielen auch Sonnenscheindauer und Globalstrahlung eine wichtige Rolle für das pflanzenbauliche Produktionspotenzial. In Deutschland werden je nach Region durchschnittlich zwischen 1.500 und 2.000 Sonnenstunden pro Jahr erreicht, wobei höhere Werte im Süden und Osten auftreten (DWD, 2023). Im Vergleich zur Pampa-Region Argentinien sind die Sonnenscheindauern geringer, was sich in einer niedrigeren potenziellen Photosyntheseleistung widerspiegeln kann, jedoch durch ausreichende Wasserversorgung teilweise kompensiert wird.

Die naturräumliche Ausstattung Deutschlands ist durch eine hohe Bodenvielfalt geprägt. In den Lösslandschaften Deutschlands treten charakteristisch Parabraunerden aus Löss auf; diese zählen aufgrund ihres hohen Schluffgehalts, ihres hohen

Wasserspeichervermögens und ihrer guten Nährstoffverfügbarkeit zu den besonders ertragsstarken landwirtschaftlichen Standorten (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2021). In Nordostdeutschland sind demgegenüber häufig leichtere, sandige Böden verbreitet, die Wasser nur in geringerem Maße speichern und daher schneller austrocknen; Sandböden weisen generell eine geringere Wasserhaltefähigkeit auf als schluffreiche Lössböden (Umweltbundesamt, 2015). Diese pedologischen Unterschiede beeinflussen maßgeblich die landwirtschaftliche Nutzung, da Bodeneigenschaften wie Wasserhaltevermögen, Nährstoffversorgung und Ertragspotenzial die Standortwahl von Kulturen und die Intensität der Bewirtschaftung wesentlich mitbestimmen (Umweltbundesamt, 2015).

Zusammenfassend ist der Agrarstandort Deutschland durch ein gemäßigt-humides Klima mit gleichmäßiger Niederschlagsverteilung, moderaten Temperaturen und mittleren Sonnenscheindauern gekennzeichnet. Während natürliche Standortbedingungen grundsätzlich günstige Produktionsvoraussetzungen bieten, nehmen klimatische Extremereignisse und sommerliche Trockenperioden zu. Diese Rahmenbedingungen unterscheiden sich deutlich von den stark sommerbetonten Niederschlagsmustern und der höheren solaren Einstrahlung in Argentinien und sind daher bei der vergleichenden Bewertung von Fruchtfolgesystemen besonders zu berücksichtigen.

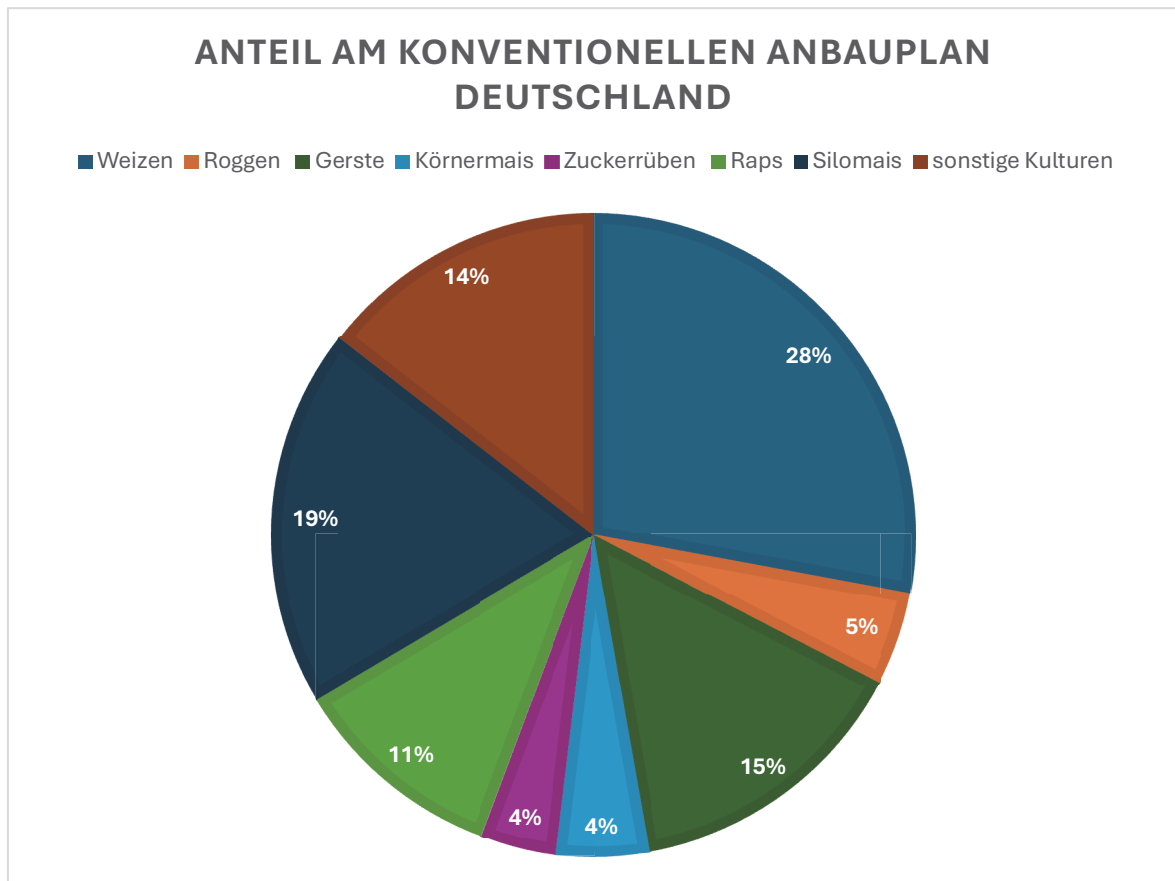
3.2.2 Anbauverhältnisse und Fruchtfolgen Deutschland

Die Anbauverhältnisse im konventionellen deutschen Ackerbau sind stark von Getreide und marktfruchtorientierten Kulturen geprägt. Nach Angaben des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMELH) für das Wirtschaftsjahr 2024/2025 entfallen 27,86 % der konventionellen Ackerfläche auf Weizen, was einer Anbaufläche von rund 2.811.700 ha entspricht (BMELH, 2025). Damit stellt Weizen die flächenstärkste Einzelkultur im deutschen Ackerbau dar. Gerste folgt mit einem Anteil von 14,66 % (1.479.200 ha), während Roggen mit 4,74 % (478.300 ha) eine geringere, regional jedoch bedeutende Rolle einnimmt (BMELH, 2025).

Neben Getreide sind Ölsaaten und Hackfrüchte wichtige Bestandteile des Anbauplans. Winterraps erreicht einen Anteil von 10,77 % der konventionellen Ackerfläche (1.086.900 ha), während Zuckerrüben 3,78 % (381.400 ha) ausmachen (BMELH, 2025). Körnermais wird auf 4,63 % der Fläche angebaut, was ca. 467.800 ha entspricht. Ein erheblicher Anteil entfällt zudem auf Silomais mit 19,06 % (1.924.100 ha), der jedoch vor allem in tierhaltenden Betrieben und im Kontext der Biogasproduktion von Bedeutung ist (BMELH, 2025). Die Kategorie „sonstige Kulturen“ umfasst 14,50 % der Fläche und beinhaltet unter

anderem Leguminosen, Kartoffeln sowie kleinere Spezialkulturen. Der deutsche konventionelle Anbauplan des Jahres 2025 wird in der Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 5: Konventioneller Anbauplan Deutschland für die Anbausaison 2025



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026, angelehnt an BMELH, 2025

Diese Struktur verdeutlicht, dass der deutsche Anbauplan durch einen hohen Anteil an Winterungen geprägt ist. Winterweizen, Wintergerste und Winterraps dominieren große Teile der Ackerfläche und bilden in vielen Regionen die Grundlage klassischer Marktfruchtrotationen. Gleichzeitig zeigt der hohe Silomaisanteil die Bedeutung gemischtwirtschaftlicher Betriebe mit Tierhaltung und/oder Biogasanlagen. Da sich die vorliegende Arbeit auf reine Ackerbaubetriebe konzentriert, wurden Fruchtfolgen mit Silomais bewusst ausgeschlossen. Dadurch wird eine stärkere Vergleichbarkeit mit spezialisierten Marktfruchtbetrieben gewährleistet und eine strukturelle Verzerrung durch futterbaulich geprägte Systeme vermieden.

Vor diesem Hintergrund wurden in dieser Arbeit zwei deutsche Fruchtfolgen untersucht.

Tabelle 2: untersuchte deutsche Fruchtfolgen

Ökonomische Fruchtfolge	Erweiterte Fruchtfolge (Ökoregung 2)
Winterweizen → Winterraps → Wintergerste → Zwischenfrucht → Zuckerrübe → Winterweizen/Rübenweizen	Winterweizen → Winterraps → Wintergerste → Zwischenfrucht → Körnererbse → Winterweizen

Quelle: Eigene Darstellung, 2026

Die ökonomische Fruchtfolge verkörpert eine typische marktfruchtorientierte Rotation in Deutschland. Sie vereint flächenstarke Kulturen wie Weizen (27,86 %) und Gerste (14,66 %) mit Raps (10,77 %) sowie der wirtschaftlich bedeutenden Hackfrucht Zuckerrübe (3,78 %) (BMELH, 2025).

Auf die Zuckerrübe folgt in dieser Fruchtfolge erneut Winterweizen. Dieser Weizen nach Zuckerrüben wird in der landwirtschaftlichen Praxis häufig als „Rübenweizen“ bezeichnet. Aufgrund der oft späten Rübenernte erfolgt die Aussaat häufig verspätet, was das Ertragspotenzial beeinflusst. Untersuchungen zeigen, dass Spätsaaten im November mit Ertragsverlusten von ca. 10 % verbunden sein können (Dehler, 2023, S. 98).

Als Vergleichssystem wird eine erweiterte Fruchtfolge betrachtet, die die Anforderungen der Öko-Regelung 2 (ÖR 2) erfüllt. Durch die Integration einer Leguminose wird die Fruchtfolge diversifiziert. Körnererbsen tragen über die biologische Stickstofffixierung zur Nährstoffversorgung bei und können den mineralischen Stickstoffbedarf der Folgekultur reduzieren. Gleichzeitig erhöhen Leguminosen die Kulturvielfalt und leisten einen Beitrag zu den Zielen der Gemeinsamen Agrarpolitik im Bereich Umwelt- und Klimaschutz (BLE, o.J.). Die im Rahmen der GAP ab 2023 eingeführte ÖR 2 honoriert den Anbau vielfältiger Kulturen im Ackerbau. Um förderfähig zu sein, müssen landwirtschaftliche Betriebe mindestens fünf verschiedene Hauptfruchtarten anbauen, wobei jede Kultur mindestens 10 % und maximal 30 % der Ackerfläche einnehmen darf. Zudem ist ein Leguminosenanteil von mindestens 10 % vorgeschrieben. Für die Erfüllung dieser Ansprüche erhalten Betriebe ab dem Antragsjahr 2024 eine flächenbezogene Prämie in Höhe von 60 Euro pro Hektar für die gesamte bewirtschaftete Ackerfläche (BMEL, 2024).

Der Vergleich beider Fruchtfolgen ermöglicht somit die Gegenüberstellung einer klassisch ökonomisch optimierten Marktfruchtrotation mit einer um eine Leguminose erweiterte

Fruchtfolge. Während die erste Fruchtfolge die dominierenden Kulturen des konventionellen Anbauplans widerspiegelt, integriert die zweite Fruchtfolge zusätzliche ökologische Funktionen. Beide Systeme bilden realitätsnahe Produktionsstrategien reiner Ackerbaubetriebe in Deutschland ab und sind daher geeignet, ökonomische und ökologische Unterschiede systematisch zu analysieren.

3.2.3 Bodenbearbeitung Deutschland

In Deutschland umfasst die „Bodenbearbeitung“ alle Arbeitsschritte, mit denen Ackerboden für die nächste Kultur vorbereitet wird – von tiefem Wenden mit dem Pflug bis hin zu sehr flachen, nicht-wendenden Verfahren oder einer Aussaat ganz ohne vorherige Bearbeitung. Welche Methode gewählt wird, hängt stark von Standort (Bodenart, Hangneigung, Wasserhaushalt), Fruchtfolge, Unkrautdruck, verfügbarer Technik und auch von den Zielen des Betriebs ab (z. B. Erosionsschutz, Arbeitswirtschaft, mechanische Unkrautregulierung) (BZL, 2024; KTBL, 2015).

Aktuelle Strukturdaten zeigen, dass sich die Praxis in Deutschland in Richtung weniger intensiver Bearbeitung verschoben hat: Im Wirtschaftsjahr 2022/2023 wurden konservierende, nicht-wendende Bodenbearbeitungsverfahren (z. B. Grubber, Eggen, Strip-Till) auf 49 % der deutschen Ackerflächen eingesetzt (5,7 Mio. ha). Das Pflügen als konventionelles, wendendes Verfahren lag bei 40 % (4,6 Mio. ha). Direktsaat/No-Till machte wie schon 2015/2016 etwa 1 % aus (2022/2023: 0,2 Mio. ha). Auf rund 10 % des Ackerlands (1,2 Mio. ha) fand keine Bodenbearbeitung statt, etwa weil mehrjährige Kulturen angebaut wurden oder Flächen nicht bewirtschaftet wurden. Besonders deutlich ist der Trend im Jahresvergleich. So wurden 2015/2016 noch 53 % der Ackerflächen gepflügt, während konservierende Verfahren damals bei 40 % lagen (BLE, 2024). Diese Verschiebung ist für eine ökologische Analyse relevant, weil sie sowohl Bodenschutzwirkungen (z. B. Erosionsminderung) als auch Zielkonflikte (z. B. Unkrautregulierung und Pflanzenschutz) beeinflusst. Die Verhältnisse der Bodenbearbeitung des Wirtschaftsjahres 2022/2023 werden in der Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Bodenbearbeitung auf Ackerland in Deutschland 2022/2023



Quelle: BZL, 2024 auf Grundlage der Daten des statistischen Bundesamtes, 2024

Der Pflug wendet den Boden in der Regel bis in eine Tiefe von etwa 25 bis 30 cm. Dabei werden Erntesterete sowie Beikräuter und Unkräuter in den Boden eingearbeitet, der Oberboden intensiv durchmischt und die Oberfläche zunächst weitgehend unbedeckt hinterlassen (BZL, 2024). Diese Form der Bodenbearbeitung kann aus agronomischer Sicht vorteilhaft sein, etwa für die mechanische Unkrautkontrolle oder die Saatbettbereitung. Gleichzeitig sind damit jedoch auch ökologische Nachteile verbunden. Ein unbedeckter und feinkrümelig bearbeiteter Boden ist besonders anfällig für Verschlammung und Erosion durch Starkregen, vor allem auf erosionsgefährdeten Standorten (Umweltbundesamt, 2025a).

Nicht wendende Verfahren verfolgen demgegenüber einen anderen Ansatz. Sie lockern und mischen den Boden, ohne ihn vollständig zu wenden, arbeiten meist in geringeren Tiefen und hinterlassen einen nennenswerten Anteil an Pflanzenresten auf der Bodenoberfläche zurück. Beim Einsatz des Grubbers liegen die Arbeitstiefen beispielsweise häufig zwischen von 5 und 20 cm, während bei der Mulchsaat oft noch 30 bis 70 % der Bodenoberfläche mit Pflanzenrückständen bedeckt bleiben (BZL, 2024);

KTBL, 2015). Diese Rückstände erfüllen eine wichtige Schutzfunktion, da sie die Aufprallenergie von Regentropfen mindern, zur Stabilisierung der Bodenstruktur beitragen und die Infiltration fördern können. Gerade vor dem Hintergrund zunehmender Starkregenereignisse und längerer Trockenphasen sind diese Effekte für die Bewertung von Bodenbearbeitungssystemen besonders relevant (Umweltbundesamt, 2025a; BZL, 2024).

Wie wichtig Erosionsschutz tatsächlich ist, zeigt eine Größenordnung, die im öffentlichen Diskurs oft wenig Beachtung findet. In Deutschland gehen durch Wassererosion im langjährigen Mittel rund 25 Mio. t Boden pro Jahr verloren, davon etwa 22 Mio. t auf Ackerflächen (Umweltbundesamt, 2025a). Das Umweltbundesamt betont zudem, dass das tatsächliche Erosionsrisiko nicht allein von natürlichen Standortfaktoren abhängt, sondern in hohem Maße auch durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftung beeinflusst wird. Insbesondere die Intensität der Bodenbearbeitung und der Grad der Bodenbedeckung spielen hierbei eine zentrale Rolle. Bereits eine Bodenbedeckung von etwa 30 % kann dazu beitragen, Wassererosion deutlich zu verringern (Umweltbundesamt, 2025a).

Allerdings sind diese Verfahren aus ökologischer Sicht nicht automatisch überlegen, sondern bringen zum Teil neue Herausforderungen mit sich. Besonders deutlich wird das bei der Unkrautregulierung. Wenn der Boden weniger intensiv gewendet wird, bleiben Samen und Wurzelunkräuter stärker in den oberen Bodenschichten, sodass der Unkrautdruck tendenziell zunehmen kann. In konventionellen Anbausystemen wird dies häufig zumindest teilweise durch den Einsatz von Herbiziden ausgeglichen; insbesondere die Direktsaat ist in der Praxis oft mit einer chemischen Abtötung des vorhandenen Aufwuchses vor der Saat verbunden (BZL, 2024).

Im Ökolandbau ist dieser Weg jedoch stark eingeschränkt. Deshalb spielt dort der Pflug oder zumindest eine intensivere mechanische Bodenbearbeitung weiterhin eine wichtigere Rolle. Pfluglose Anbausysteme sind zwar auch im ökologischen Landbau möglich, erfordern aber eine sehr genaue Abstimmung von Fruchtfolge, Zwischenfruchtanbau, Saatterminen und mechanischer Beikrautregulierung (BZL, 2024; FiBL, 2025; oekolandbau.de, 2024). Für die ökologische Bewertung bedeutet das, dass eine reduzierte Bodenbearbeitung zwar Vorteile für Bodenschutz und Bodenleben haben kann, die Umweltwirkungen insgesamt aber vom jeweiligen Anbausystem abhängen. So kann sie indirekt entweder zu mehr mechanischen Überfahrten, etwa durch Hacktechnik, oder in konventionellen Betrieben zu einer stärkeren Abhängigkeit von Herbiziden führen.

Beides hat wiederum Auswirkungen auf Energieeinsatz, Biodiversität und Emissionsprofile (FiBL, 2025; BZL, 2024).

Auch die klimabezogenen Wirkungen der Bodenbearbeitung lassen sich nicht pauschal bewerten, sondern müssen differenziert betrachtet werden. Die Bodenbearbeitung wirkt sich dabei sowohl auf den Energieverbrauch, etwa durch den Dieselbedarf, als auch auf Prozesse im Boden aus, beispielsweise auf den Abbau organischer Substanz und die Bildung von Lachgas.

Ein pflugloses System ist deshalb nicht automatisch mit einem Klimavorteil verbunden. Aufbereitete Übersichten aus Deutschland zeigen, dass sich die Humusvorräte über das gesamte Bodenprofil zwischen verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen häufig weniger stark unterscheiden als lange angenommen. Gleichzeitig gibt es Hinweise darauf, dass pfluglose Verfahren zum Teil mit höheren Lachgasemissionen verbunden sein können, was klimatisch besonders relevant ist, da N_2O eine hohe Treibhauswirkung besitzt (BZL, 2024). Für die ökologische Analyse erscheint es daher sinnvoll, pfluglose Verfahren nicht pauschal als Klimaschutzmaßnahme einzuordnen, sondern sie standort- und systembezogen zu bewerten. Entscheidend sind dabei Faktoren wie Bodenfeuchte, Verdichtungsrisiko, organische Düngung, Zwischenfruchtanbau und das Stickstoffmanagement. Erst im Zusammenspiel dieser Bedingungen lässt sich beurteilen, ob die potenziellen Vorteile, etwa beim Erosionsschutz, der Wasserspeicherung und der geringeren Bearbeitungsintensität, mögliche Nachteile wie ein erhöhtes Lachgasrisiko, eine stärkere Abhängigkeit vom Pflanzenschutz oder ungünstige Effekte auf die Nährstoffdynamik im Frühjahr überwiegen (BZL, 2024; Umweltbundesamt, 2025b).

Insgesamt lässt sich für Deutschland ein deutlicher Strukturwandel in der Bodenbearbeitung erkennen. Das flächendeckende Pflügen hat an Bedeutung verloren, während konservierende und nicht wendende Verfahren zunehmend an Relevanz gewonnen haben (BLE, 2024). Aus ökologischer Sicht ist diese Entwicklung vor allem mit Blick auf den Erosions- und Gewässerschutz gut nachvollziehbar, da Bodenabtrag weiterhin in erheblichem Umfang auftritt und die Art der Bewirtschaftung einen entscheidenden Einfluss auf das tatsächliche Risiko hat (Umweltbundesamt, 2025a).

Gleichzeitig bedeutet dieser Wandel nicht, dass der Pflug grundsätzlich an Bedeutung verloren hat. Vielmehr bleibt er in vielen Betrieben ein wichtiger Bestandteil des Bodenbearbeitungssystems, insbesondere dort, wo die mechanische Unkrautkontrolle, bestimmte Anforderungen an das Saatbett oder betriebliche Rahmenbedingungen eine intensivere Bearbeitung erforderlich machen (BZL, 2024; FiBL, 2025). Für diese Arbeit lässt sich daraus ableiten, dass „deutsche Bodenbearbeitung“ nicht als einheitliche Praxis

verstanden werden sollte, sondern vielmehr als ein Spektrum unterschiedlicher Verfahren. Deren ökologische Wirkung hängt davon ab, wie Bodenbedeckung, Bearbeitungsintensität sowie Pflanzenschutz- und Fruchtfolgestrategien im jeweiligen System zusammenwirken (Umweltbundesamt, 2025a; BLE, 2024).

4. Analyse und Vergleich der Anbausysteme

4.1 Pflanzenbauliche und ökologische Parameter

4.1.1 Berechnung und Vergleich der CO₂ Bilanzen

Zu Beginn wurde eine Bilanzierung aus allen Treibhausgasemissionen aller Betriebsmittel und Arbeitsmaßnahmen, die für die jeweilige Frucht eingesetzt wurden, berücksichtigt. Die deutschen Daten bezüglich der aufgewandten Düngemengen entsprechen den Berechnungen aus der Düngeverordnung, sowie den Richtwerten aus der Datensammlung Brandenburg 2024. Die Daten zu den argentinischen Aufwandmengen für Weizen und Mais wurden den RETAA-Berichten der Bolsa de Cereales (2025) entnommen. Die Daten zu den Aufwandmengen für Soja stammen aus einem Bericht von Altina (2020).

Basierend auf dem Berechnungsstandard für einzelbetriebliche Klimabilanzen (BEK) wurden die Treibhausgasemissionen als CO₂-Äquivalente berechnet. Die berücksichtigten Emissionsquellen wurden dabei in direkte und indirekte Emissionen aus dem Feldbau sowie in vorgelagerte Emissionen aus der Betriebsmittelbereitstellung unterteilt (KTBL, 2021, S. 8–9).

Für den betrachteten reinen Ackerbaubetrieb mit ausschließlicher Mineraldüngung wurden im Feldbau Lachgasemissionen (N₂O) aus folgenden Quellen (nach dem KTBL) berücksichtigt: -indirekte N₂O-Emissionen infolge von NH₃-Verlusten bei der Ausbringung von Mineraldüngern, -direkte N₂O-Emissionen aus der Stickstoffdüngung mit Mineraldüngern, -N₂O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründüngung und den -N₂O-Emissionen aus dem Humusabbau der angebauten Fruchtarten (KTBL, 2021, S. 8–9).

Zusätzlich wurden im Feldbau CO₂-Emissionen aus der Anwendung von Harnstoff- und Kalkdüngern sowie CO₂-Emissionen bzw. CO₂-Bindung infolge von Humusabbau bzw. -aufbau der angebauten Kulturen berücksichtigt (KTBL, 2021, S. 8–9).

Für den anschließenden Vergleich der Produktionssysteme in Deutschland und Argentinien wurden zusätzlich CO₂-Bilanzen ohne Berücksichtigung der CO₂-Emissionen aus Humusabbau sowie der N₂O-Emissionen aus Humusabbau berechnet.

Der Ausschluss dieser Emissionskomponente erfolgte, da für Argentinien kein geeignetes Verfahren zur Bestimmung von Humusbilanzen verfügbar ist und das in Deutschland

eingesetzte Humusbilanzierungsmodell nicht auf das in Argentinien verbreitete Direktsaatsystem übertragbar ist. Dadurch wird eine methodisch konsistente Vergleichsbasis zwischen beiden Produktionssystemen geschaffen. Die Emissionsquellen „CO₂-Emissionen bzw. CO₂-Bindung aus Humusabbau bzw. -aufbau“ sowie „N₂O-Emissionen aus Humusabbau“ wurden daher in den nachfolgenden Berechnungen und im Vergleich der Produktionssysteme nicht berücksichtigt.

Die Methodik der kompletten CO₂-Bilanzierung wird beispielhaft am deutschen Winterraps erläutert. (Die Berechnungen aller Fruchtfolgeglieder beider Agrarstandorte befinden sich im Anhang)

Der erste Schritt ist die Berechnung der Ammoniakverluste der mineralischen Düngung. Der erste eingesetzte Dünger ist Diammonphosphat (DAP). Es wurden zur Aussaat 100kg pro Hektar ausgebracht. Der Stickstoffgehalt von DAP ist 18%, was eine ausgebrachte Stickstoffmenge von 18kg pro Hektar entspricht. Hierbei wird diese Menge mit einem Ammoniakemissionsfaktor von 0,038 kg NH₃-N/kg N und darauffolgend mit dem Lachgas Emissionsfaktor von 0,01 N₂O-N/kg NH₃-N multipliziert. Im Anschluss wird das Ergebnis in N₂O-N mit einem Umrechnungsrechner von 1,57 zu N₂O verrechnet. Anschließend wird das N₂O mit dem Treibhausgaspotenzial von 298kg in CO₂-Emissionen umgerechnet. Dies dient der Vergleichbarkeit. Lachgas wird auf Grund seiner Eigenschaften ca. 298mal so klimawirksam wie CO₂ gewichtet. Insgesamt wurden innerhalb dieser Emissionsklasse für die Düngergabe 3,45 kg Kohlenstoffdioxid je Hektar freigesetzt.

Tabelle 3: N₂O-Emissionen aus NH₃-Verlusten bei Düngung mit mineralischem Düngemittel am Beispiel DAP

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge		100 kg	eigene Berechnung nach DÜV
	*Stickstoffgehalt		0,18 kg N/l	Herstellerangabe
	**=Ausgebrachte Menge N		18 kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor		0,041 kg NH ₃ -N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor		0,01 N ₂ O-N/kg NH ₃ -N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N ₂ O/kg N ₂ O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	=CO ₂ Emissionen		3,45 kg CO ₂ /ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Der zweite eingesetzte Stickstoffdünger war das Ammonsulfatsalpeter (ASS), dies entspricht einer ausgebrachten Stickstoffmenge von 78 kg N je ha und 13,87 kg CO₂-Äquivalent je ha. Die Berechnung erfolgt wie zuvor beschrieben.

Tabelle 4: N2O-Emissionen aus NH3-Verlusten bei Düngung mit mineralischem Düngemittel am Beispiel ASS

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
ASS	Ausgebrachte Menge		300 kg	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt		0,26 kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N		78 kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor		0,038 kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor		0,01 N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''		13,87 kg CO2/ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Als letzter Stickstoffdünger wurde Harnstoff eingesetzt- Die Menge dieser Anwendung ergibt sich aus der Restmenge, welche laut der Düngerverordnung der Kultur noch zugeführt werden darf. Bei einem durchschnittlichen Ertrag von 40 dt/ha beträgt der Stickstoffbedarfswert für Winterraps 200kg N/ha nach der Düngerverordnung (Bundesrepublik Deutschland, 2017, S. 25). Von diesem Bedarfswert werden die N-Min Werte und Vorfruchtwerte abgezogen. Die durchschnittlichen N-Min Werte stammen aus den Angaben der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen für das Jahr 2024. Der Raps kommt in beiden deutschen Fruchtfolgen nach Winterweizen. Für die Vorfrucht Winterweizen gibt es keine Abschläge (Bundesrepublik Deutschland, 2017, S.30). Zuletzt werden Zu- und Abschläge in der Stickstoffdüngung an den Erträgen gewichtet. Bei einem höheren Ertrag als 40dt, dürfen je 5 Dezitonnen Mehrertrag 10 Kilogramm Stickstoff je Hektar gedüngt werden. Bei einem geringeren Ertrag werden je 5 dt Ertragsdifferenz zum Richtwert 15 kg N/ha abgezogen (Bundesrepublik Deutschland, 2017, S.26).

Es ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der letzten Stickstoffgabe bei einem durchschnittlichen Rapsenertrag von 35,81 dt/ha, welcher sich aus den Berechnungen von 1000 simulierten Anbausaisons ergeben, hat:

$$200 - N_{\min} + ((\text{Ertrag in dt} - 40) * 3) - \text{kg N DAP} - \text{kg N ASS}$$

$$200 - 30 + ((35,81 - 40) * 3) - 18 - 78 = 88,02 \text{ kg N/ha}$$

Dies entspricht bei einem Stickstoffgehalt von 46% 191,35 kg Harnstoff. Danach findet eine Quantifizierung in Ammoniakverluste statt. Danach werden die Ammoniakverluste in Lachgas umgerechnet und zum Schluss wird Lachgas erneut in CO2e umgerechnet. Die letzte N-Düngung setzte im Ergebnis 4,03 kg CO2e je Hektar frei.

Tabelle 5: N₂O-Emissionen aus NH₃-Verlusten bei Düngung mit mineralischem Düngemittel am Beispiel Harnstoff

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Harnstoff	Ausgebrachte Menge		191 kg	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt		0,12 kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N		22,96 kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor		0,038 kg NH ₃ -N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor		0,01 N ₂ -O-N/kg NH ₃ -N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N ₂ O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	''=CO ₂ Emissionen''		4,08 kg CO ₂ /ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Die zweite Emissionsquelle sind die N₂O Emissionen aus der Düngung mit mineralischen Stickstoffdüngern. Auch hier wird mit DAP begonnen. Die ausgebrachte Menge wird wie in Tabelle 5 berechnet. Diese wird mit dem Lachgas Emissionfaktor von 0,01225 kg N₂O / kg N multipliziert. Anschließend folgt die Umrechnung von N₂O in N₂O. Auch hier werden die N₂O Emissionen mit ihrem Treibhausgaspotenzial multipliziert, um CO₂e je Hektar zu ermitteln. So entstehen 103,16 kg CO₂e pro Hektar an Lachgasemissionen bei der DAP-Düngergabe.

Tabelle 6: direkte N₂O-Emissionen aus der Düngung mit dem Mineraldünger DAP

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge		100 kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt		0,18 kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N		18 kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225 kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N ₂ O /kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	''=CO ₂ Emission''		103,16 Kg CO ₂ /ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Bei dem Einsatz des ASS-Düngers entstanden bei einer Ausbringmengen von 300 kg je Hektar 447,04 kg CO₂e je Hektar.

Tabelle 7: Direkte N₂O-Emissionen aus der Düngung mit dem Mineraldünger ASS

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
ASS	Ausgebrachte Menge		300 kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt		0,26 kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N		78 kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225 kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N ₂ O /kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	''=CO ₂ Emission''		447,04 Ka CO ₂ /ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Bei der Anwendung des Harnstoffdüngers wurden bei eine Aufwandmenge von 191 kg je Hektar 504,47 kg CO₂e emittiert.

Tabelle 8: Direkte N₂O-Emissionen aus der Düngung mit dem Mineraldünger Harnstoff

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Harnstoff	Ausgebrachte Menge		191 kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt		0,46 kg N/l	Herstellerangabe
	""=Ausgebrachte Menge N		88,02 kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225 kg N ₂ O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N ₂ O /kg N ₂ O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	""=CO ₂ Emission""		504,47 Kg CO ₂ /ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Im nächsten Schritt werden die Emissionen aus den Ernte- und Wurzelrückständen berechnet. Hierbei werden zuerst die Emissionen für das Rapsstroh berechnet und darauffolgend die Emissionen für die Wurzelrückstände.

Um die Lachgas-Emissionen aus dem Stroh zu berechnen, wird zuerst der Frischmasseertrag von 3581 kg pro Hektar mit dem Verhältnis von Stroh zu Korn, welches bei Raps laut der siebten Anlage der DüV, 1,70 beträgt, multipliziert, um den Frischmasseertrag des Rapsstrohes zu erhalten. Danach wird mit dem Stickstoffgehalt von 0,7kg N/dt Frischmasse Stroh (Bundesrepublik Deutschland, 2017, Anlage 7, Tabelle 1) multipliziert, um den Stickstoff je Hektar zu berechnen, welcher durch das Rapsstroh auf dem Acker bleibt. Auf einem Hektar bleiben 42,61 kg N auf dem Feld. Dieser Stickstoff wird jetzt erneut mit dem Lachgasemissionsfaktor von 0,01 kg N₂O-N /kg N und dem Umrechnungsfaktor von 1,57 N₂O/ kg N₂O-N in Lachgas umgerechnet. Dieses Ergebnis wird anhand des Treibhausgaspotenziales (298) gewichtet und folgend wird das CO₂e/ha berechnet. Es entstehen 244,23 CO₂e/ha an den Lachgasemissionen des Rapsstrohes.

Anschließend werden die Lachgasemissionen aus den Wurzeln errechnet. Zuerst wird der Frischmasseertrag von 3581kg/ha mit einem Trockenmasseanteil von 91 Prozent (Bundesrepublik Deutschland, 2017, Anlage 7, Tabelle 1) multipliziert. Es werden 3258 kg/ha Trockenmasse an Körner produziert. Danach wird dieses Ergebnis mit dem Stroh Korn Verhältnis von 0,7 multipliziert, um die Trockenmasse des Strohes zu erhalten. Auf einem Hektar verbleiben 5539,81 kg Trockenmasse Rapsstroh je Hektar. Als nächstes wird die gesamte oberflächliche Trockenmasse (TM-Korn + TM-Stroh) mit dem Proportionalitätsfaktor von 0,22 multipliziert, um die Trockenmasse der Wurzeln zu errechnen. Ein Kilogramm Trockenmasse der Rapswurzeln enthält nach den Angaben des KTBL 0,009 Stickstoff. Auf einem Hektar verbleiben 17,42 Kilogramm Stickstoff durch die Rapswurzeln. Dieser Stickstoff wird mit dem gleichen Verfahren wie auch beim Stroh zu

Lachgasemissionen, und letztendlich in CO₂e je Hektar umgerechnet. Die Rapswurzeln emittieren 99,85 kg CO₂e je Hektar, über Lachgasemissionen. Insgesamt entstehen durch die Lachgasemissionen beim Winterraps 344,08 kg CO₂e pro Hektar.

Tabelle 9: N₂O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen, sowie aus Stroh und Gründüngung

	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Stroh	Frischmasseertrag	3581,00	kg/ha	Betriebsangabe
	*Verhältnis Stroh Korn	1,70	kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7
	Frischmasseertrag Stroh	60,88	dt Stroh FM/ha	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	0,70	kg N/dt FM	DüV Anlage 7
	Stickstoff je Hektar	42,61	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ -O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	``=CO ₂ Emissionen	244,23	kg CO ₂ /ha	Ergebnis
Wurzeln	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
	Frischmasseertrag	3581,00	kg/ha	Betriebsangabe
	*TM Gehalt	0,91	kg TM/kg FM	DüV Anlage 7
	``=Trockenmasse je Hektar	3258,71	kg TM/ha	Ergebnis
	Verhältnis Stroh Korn	1,70	kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7
	Trockenmasse Stroh je ha	5539,81	Kg Stroh TM/ha	Ergebnis
	``=TM Stroh + Korn``	8798,52	Kg TM/ha	Ergebnis
	*Proportionalitätsfaktor TM	0,22	kg TM Wurzel /kg TM Stroh+K	Parameterdatei
	``=Wurzelrückstände``	1935,67	kg TM Wurzel/ha	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	0,009	kg N/kg TM	Parameterdatei
	Stickstoff je Hektar	17,42	kg N /ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01225	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ -O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	``=CO ₂ -Emissionen``	99,85	kg CO ₂ /ha	Ergebnis
Summe	344,08	kg CO ₂ /ha	Ergebnis	

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL

Weiterhin zu berücksichtigen sind die CO₂ Emissionen aus dem Humusabbau/Humusaufbau des angebauten Winterraps. Grundlage dafür ist die Menge Humus, welche auf beziehungsweise abgebaut wird. Dafür wird die Humusbilanz herangezogen, die auf der Grundlage des Verbands deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (VDLUFA) erstellt wurde. Humuszehrende Kulturen, setzen Kohlenstoff im Verhältnis 11:1 zu Stickstoff aus dem Humus frei. Dies entspricht den Daten von Gensior 2020. Es entstehen Kohlenstoffdioxidemissionen und Lachgasemissionen, welche den jeweiligen Fruchtfolgegliedern zugerechnet wird (vgl. KTBL-BEK 2021, S.35). Humusaufbauende Kulturen binden Kohlenstoff entsprechend den Humusreproduktionsleistungen der angebauten Frucht, gemäß der VDLUFA (2014). Die Bindung des Kohlenstoffdioxids führt zu einer Gutschrift für den Winterraps, weil das Stroh aller Früchte in diesen Berechnungen auf dem Feld verbleibt.

Bei dem Winterraps entstanden bei einem Ertrag von 35,81 Dezitonnen je Hektar nach der Berechnung des Humusbilanzrechners der VDLUFA ein Humusaufbau von 26,299 Kilogramm organischer Kohlenstoff je Hektar. Dieser organisch gebundene Kohlenstoff

wird mit einem Faktor von 3,67 zu Kohlenstoffdioxid umgerechnet. Es werden etwa 96,52 Kilogramm CO₂ je Hektar durch den Aufbau von organischem Humus gebunden.

Tabelle 10: CO₂-Emissionen bzw. Bindung aus Humusabbau bzw. Humusaufbau

Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Humusabbau	-26,299	kg Humus-C/ha	Humusbilanz
*Umrechnungsfaktor	3,67	CO ₂ / kg Humus-C	Parameterdatei
''CO ₂ Emission''	-96,51733	CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL

Bei einer negativen Humusbilanz entsteht an dieser Stelle eine weitere Emissionsquelle. Bei dem Abbau von organischem Humus entsteht neben den direkten CO₂ Emissionen, auch Lachgas. Die Humusbilanz des untersuchten Winterraps ist positiv, somit entfällt diese Emission Quelle und dient auch nicht als Senke (vgl. KTBL-BEK, 2021, S.8-9).

Eine weitere Emissionsquelle sind die direkten CO₂ Emissionen durch die Harnstoffdüngung. Harnstoff enthält im Vergleich zu den anderen Stickstoffdüngemitteln Kohlenstoff, welcher im Boden wieder zu CO₂ umgewandelt wird (vgl. KTBL-BEK, 2021, S.8-9). Für andere Stickstoffdünger fällt diese direkte Emissionsquelle also nicht an. Für die 191,35 kg Harnstoff wurden bei einem Stickstoffgehalt von 46% 88,02 kg Stickstoff je Hektar ausgebracht, welche 138,19 kg CO₂e für jeden Hektar entsprechen.

Tabelle 11: direkte CO₂-Emissionen aus der Harnstoffdüngung

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	191,35	kg/ha	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,46	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte N Menge''	88,02	kg N/ha	Ergebnis
	*CO ₂ Emissionsfaktor	1,57	kg CO ₂ e/kg Harnstoff N	Parameterdatei
	''=CO ₂ Emissionen''	138,19	kg CO ₂ /ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Die letzte betrachtete Emissionsquelle des Feldbaues ist die direkte CO₂ Emission der Kalkdüngung. Bei einer Aufwandmenge von 800 kg alle 4 Jahre wird jeder Frucht in den deutschen Fruchtfolgen eine Menge von 200kg Kalkdüngung zugesprochen. Für ein Kilogramm Kalk (CaO) entstehen nach den Angaben des KTBL 0,79 kg CO₂e. Für die Kalkdüngung werden somit 158kg CO₂e pro Hektar freigesetzt.

Tabelle 12: direkte CO₂-Emissionen aus der Kalkdüngung

Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Kalkdüngung	200	kg CaO/ha	
• CO ₂ -EF für CaO	0,79	kg CO ₂ /kg CaO	Parameterdatei
CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung	158	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Als erste CO₂ Emission aus der Betriebsmittelbereitstellung werden die Emissionen aus der Herstellung und den Transporten der Mineraldüngung herangezogen. Dazu wird die ausgebrachte Menge an Nährstoff mit dem Treibhausgasemissionsfaktor verrechnet. So entsteht durch die Bereitstellung von 100 Kilogramm DAP 61,15 kg CO₂e je Hektar.

Tabelle 13: CO₂-Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers DAP

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	100,00	kg/ha	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt	0,18	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	18,00	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,40	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	61,15	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Zusätzlich werden 300 Kilogramm ASS gestreut. Bei einem Stickstoffgehalt von 26%, entstanden durch diese Düngergabe 264,97 Kilogramm Kohlenstoffdioxid-Äquivalent je Hektar.

Tabelle 14: CO₂ Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers ASS

ASS	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
	Ausgebrachte Menge	300,00	kg/ha	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt	0,26	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	78,00	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,40	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	264,97	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Mit dem Einsatz von 191,35 kg Harnstoff entstehen 308,07 kg CO₂e je Hektar.

Tabelle 15: CO₂-Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers Harnstoff

Harnstoff	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
	Ausgebrachte Menge	191,35	kg/ha	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt	0,46	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	88,02	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,50	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	308,07	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Um den Kaliumbedarf des Raps zu decken, wird Kalimagnesia, auch bekannt als Patenkali verwendet. Es wurden 119,38 kg je ha gestreut, um den Entzug des Hauptproduktes auszugleichen. Mit einer Nährstoffkonzentration von 30% Kaliumoxid (K₂O) ergibt sich eine ausgebrachte Nährstoffmenge von 35,81 kg K₂O je Hektar Winterraps. Der Treibhausgasemissionsfaktor liegt hier bei 0,416 kg CO₂ je kg K₂O. Daraus ergibt sich eine freigesetzte Menge von 14,90 kg CO₂e je Hektar.

Tabelle 16: CO₂-Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers Kalimagnesia

Kalimagnesia	Ausgebrachte Menge K	29,72 kg K/ha	eigene Berechnung Entzug
	Ausgebrachte Menge Kalima	119,38 kg/ha	Ergebnis
	*Kaliumgehalt	0,30 kg K ₂ O/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte K ₂ O Menge	35,81 kg K ₂ O/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfakt	0,42 kg CO ₂ e/kg K ₂ O	Parameter Datei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	14,90 kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Der Phosphatbedarf wird bei Raps über die Unterfußdüngung mit DAP gedeckt. Mit einem Gehalt von 46% Phosphat werden 46 Kilogramm Nährstoff auf das Feld gebracht. Was 24,93 kg CO₂e/ha entspricht.

Tabelle 17: CO₂-Emissionen aus der Bereitstellung des Mineraldüngers DAP

DAP	Ausgebrachte Menge	100,00 kg/ha	eigene Berechnung nach DüV
	*Phosphatgehalt	0,46 kg P ₂ O ₅ /kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte P ₂ O ₅ Meng	46,00 kg P ₂ O ₅ /ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfakt	0,54 kg CO ₂ e/kg P ₂ O ₅	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	24,93 kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Die CO₂ Emissionen der Saatgutherstellung errechnen sich aus dem Produkt der Aussaatmenge von 5 kg je Hektar und dem Treibhausgas-Emissionsfaktor von 2,1 kg CO₂e/ kg Frischmasse. Daraus ergibt sich eine freigesetzte Menge von 10,5 kg CO₂e/ha.

Tabelle 18: CO₂-Emissionen aus der Bereitstellung des Saatgutes

Saatgut	Aussaatstärke	5,00 kg/ha	Datensammlung Brandenburg
	*Treibhausgas-Emissionsfakt	2,10 kg CO ₂ e /kgFM	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	10,50 kg CO ₂ / kg FM	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Für den Winterraps wird insgesamt 1,76 kg Wirkstoff je Hektar ausgebracht. Je Kilogramm Wirkstoff wird ein Emissionsfaktor von 11,09kg CO₂e angerechnet. So verursachen alle Pflanzenschutzmaßnahmen 19,55 kg CO₂e je Hektar.

Tabelle 19: CO₂-Emissionen aus der Bereitstellung der Pflanzenschutzmittel

Pflanzenschutzmittel	Ausbringungsmenge	1,76 kg/ha	eigene Berechnung anhand JKI Daten
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	11,09 kg CO ₂ e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	19,55 kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Die CO₂ Emissionen aus der Energiebereitstellung und -konversion, sowie aus der Maschinenherstellung werden jeweils mit dem verbrauchten Diesel berechnet. Bei der Herstellung von Diesel und dessen Verbrennung wird der Emissionsfaktor von 3,013 kg CO₂e angesetzt. Mit einem Dieserverbrauch von 48,02 l/ha werden 144,68 kg CO₂e je Hektar freigesetzt.

Tabelle 20: CO₂-Emissionen aus der Energiebereitstellung und -konversion des Diesels

Energiebereitstellung	Dieserverbrauch	48,02 l/ha	eigene Rechnung
	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,01 kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	144,68 kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Der Treibhausgas-Emissionsfaktor für die Maschinenherstellung beträgt 0,885 kg CO₂e pro Liter Diesel. So entsteht daraus 42,50 kg CO₂e pro Hektar.

Tabelle 21: CO₂-Emissionen aus der Maschinenherstellung

Maschinenherstellung	Dieserverbrauch	48,02 l/ha	eigene Rechnung
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,89 kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	42,50 kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Nach dem Summieren aller Emissionsquellen aus der Betriebsmittelbereitstellung und des Feldbaus ergibt sich folgende CO₂ Bilanz für den deutschen Wintertraps.

Tabelle 22: Summe aller CO₂-Emissionen am Rechenbeispiel Winterraps

Emissionsquelle	Werte in kg CO ₂ e/ha	Anteil an Summe Insgesamt in %
Feldbau		
1. N ₂ O aus NH ₃ Verlusten	21,40	0,85%
2. N ₂ O aus der Mineraldüngung	1054,67	42,00%
3. N ₂ O aus Ernte- und Wurzelrückständen	344,08	13,70%
4. CO ₂ e aus Harnstoffdüngung	138,19	5,50%
5. CO ₂ e aus Humusabbau/- aufbau	-96,52	-3,84%
6. N ₂ O aus Humusabbau	0	0,00%
7. CO ₂ e aus Kalkdüngung	158	6,29%
Summe aus dem Feldbau	1619,83	64,51%
Betriebsmittelbereitstellung		
1. CO ₂ e aus Mineraldüngerbereitstellung	674,01	26,84%
2. CO ₂ aus Saatgutbereitstellung	10,50	0,42%
3. CO ₂ e aus Pflanzenschutzmittelbereitstellung	19,55	0,78%
4. CO ₂ e aus der Energiebereitstellung und -konversion	144,68	5,76%
5. CO ₂ aus Maschinenherstellung	42,50	1,69%
Summe Betriebsmittelbereitstellung	891,24	35,49%
Summe Insgesamt	2511,06	100,00%

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

An erster Stelle der CO₂ Emissionen stehen mit 42% die Lachgasemissionen aus der mineralischen Düngung. An zweiter Stelle kommen die CO₂ Emissionen aus der Mineraldüngerbereitstellungen mit 26,8%. Geringe Emissionen entstehen durch die Maschinenherstellung, der Saatgutbereitstellung, der Pflanzenschutzmittelbereitstellung und dem NH₃ Verlusten aus der mineralischen Düngung. Aus der Humusbilanz erfolgt eine Gutschrift in der Höhe von 3,84%. Insgesamt entstehen bei der CO₂ Bilanzierung mit der Berücksichtigung von Humus im deutschen Winterraps 2511,06 Kilogramm Kohlenstoffdioxid-Äquivalent pro Hektar.

Nach diesem Rechenansatz wurden die CO₂-Bilanzen für alle Fruchtfolgeglieder an beiden Agrarstandorten ermittelt. Für den späteren Vergleich zwischen Argentinien und Deutschland wurden zusätzlich CO₂-Bilanzen ohne Berücksichtigung der Emissionen aus Humusveränderungen berechnet.

Die berechneten CO₂-Emissionen je Hektar sowie die zugehörigen Erträge der betrachteten Kulturen an den Agrarstandorten Argentinien und Deutschland sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Flächen- und gewichtgebundene CO₂-Emissionen der Agrarstandorte Argentinien und Deutschland

	Frucht	Ertrag in t/ha	CO ₂ Emissionen kg je Hektar	kg CO ₂ Emissionen je t Ware
Argentinien	Weizen	2,91	919,31	315,91
	Soja 2	2,35	704,53	299,80
	Soja 1	3,14	842,67	268,54
	Körnermais	7,37	1309,14	177,64
Deutschland	Raps	3,58	2607,58	728,17
	Weizen	7,67	2682,14	349,69
	Rübenweizen	6,52	2682,14	411,40
	Gerste	6,76	2100,36	310,70
	Zwischenfrucht	0,00	80,98	
	Zuckerrübe	75,19	3423,30	45,53
	Körnererbse	3,06	745,33	243,46

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Am Standort Argentinien lagen die flächenbezogenen Emissionen der Ackerkulturen zwischen 704,53 kg CO₂e/ha bei Soja 2 und 1309,14 kg CO₂e/ha für Körnermais. Weizen emittierte 919,31 kg CO₂e/ha bei einem Ertrag von 2,91 t/ha, während Soja 1 bei höherem Ertragsniveau (3,14 t/ha) geringfügig niedrigere Emissionen von 842,67 kg CO₂e/ha aufwies.

Am Standort Deutschland entstehen durchgehend höhere CO₂-Emissionen je Hektar. Die Spannweite reicht von 745,33 kg CO₂e/ha bei der Körnererbse bis 3 423,30 kg CO₂e/ha bei der Zuckerrübe. Der Winterraps verursacht 2 607,58 kg CO₂e/ha bei einem Ertrag von 3,58 t/ha. Für Winterweizen und Rübenweizen ergeben sich identische Emissionswerte von jeweils 2 682,14 kg CO₂e/ha bei Erträgen von 7,67 t/ha beziehungsweise 6,52 t/ha. Gerste lag mit 2 100,36 kg CO₂e/ha im mittleren Bereich. Die Zwischenfrucht wird nicht geerntet und weist mit 80,98 kg CO₂e/ha entsprechend sehr geringe flächenbezogene Emissionen auf.

Im direkten Standortvergleich zeigen sich deutlich höhere Erträge der Kulturen in Deutschland, gleichzeitig jedoch auch höhere CO₂-Emissionen je Hektar. Dies weist auf eine insgesamt höhere Produktionsintensität der deutschen Anbausysteme hin. Werden die Emissionen auf die produzierte Erntemenge bezogen, verringert sich die Differenz. Die produktspezifischen Emissionen liegen für Winterweizen (349,69 kg CO₂e/t) und Gerste (310,70 kg CO₂e/t) im ähnlichen Bereich wie für argentinischen Weizen (315,91 kg CO₂e/t) beziehungsweise Soja 1 (268,54 kg CO₂e/t). Für die Zuckerrübe ergeben sich aufgrund des sehr hohen Ertragsniveaus trotz hoher Hektaremissionen besonders niedrige produktspezifische Emissionen von 45,53 kg CO₂e/t. Insgesamt zeigt sich damit,

dass ein höheres Produktionsniveau zwar zu steigenden flächenbezogenen Emissionen führt, gleichzeitig jedoch die Emissionen je Produkteinheit reduzieren kann.

Die mittleren jährlichen CO₂-Emissionen der untersuchten Fruchtfolgesysteme bestätigen dieses Muster und werden in der Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Mittlere CO₂-Emissionen der vier untersuchten Fruchtfolgesysteme

Deutschland Ökonomische FF									
Fruchtfolge	Einheit	Raps	Weizen	Gerste	Zwischefrucht	Zuckerrübe	Rübenweizen	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr
Ertrag	dt/ha	35,81	76,70	67,60	0,00	751,90	65,20		
Aufwandmenge N	kg N/ha	184,02	186,50	161,50	0,00	104,52	179,24		
CO ₂ Bilanz ohne Humus	kg CO ₂ /ha	2607,58	2682,14	2100,36	80,98	3423,30	2543,98	5	2687,67
Deutschland Erweiterte FF ÖR2									
Fruchtfolge	Einheit	Raps	Weizen	Gerste	Zwischenfrucht	Erbse	Weizen	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr
Ertrag	dt/ha	35,81	76,7	67,6		30,614	76,7		
Aufwandmenge N	kg N/ha	184,02	186,5	161,5		0	186,5		
CO ₂ Bilanz ohne Humus	kg CO ₂ /ha	2607,58	2682,14	2100,36	80,98	745,33	2682,14	5	2179,71
Argentinien Double Crop									
Fruchtfolge	Einheit	Weizen	Soja 2	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr				
Ertrag	dt/ha	29,1	23,5	1					
Aufwandmenge N	kg N/ha	77	5,4	1					
CO ₂ Bilanz ohne Humus	kg CO ₂ /ha	919,31	704,53	1	1623,84				
Argentinien Single Crop									
Fruchtfolge	Einheit	Soja 1	Körnermais	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr				
Ertrag	dt/ha	31,38	73,695	2					
Aufwandmenge N	kg N/ha	9,9	62	2					
CO ₂ Bilanz ohne Humus	kg CO ₂ /ha	842,67	1566,79	2	1204,73				

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Die deutsche ökonomische Fruchtfolge emittiert mit 2 687,67 kg CO₂e/ha·a die größte Menge, während die erweiterte Fruchtfolge mit Leguminosenanteil deutlich geringere Emissionen von 2 179,71 kg CO₂e/ha·a aufweist. Die Emissionsminderung ist plausibel mit der Integration der Körnererbse verbunden, da Leguminosen durch biologische Stickstofffixierung geringere mineralische Stickstoffdüngermengen benötigen und auch für die Folgekultur einen Stickstoffeffekt bereitstellen. Dadurch reduzieren sich emissionsrelevante Stickstoffflüsse im System.

Auch in Argentinien unterscheiden sich die Fruchtfolgesysteme deutlich. Die Double-Crop-Fruchtfolge weist mit 1 623,84 kg CO₂e/ha·a höhere Emissionen auf als die Single-Crop-Fruchtfolge mit 1 204,73 kg CO₂e/ha·a. Dieser Unterschied ist auf die höhere Anbauintensität zurückzuführen, da im Double-Crop-System zwei Kulturen pro Jahr auf derselben Fläche produziert werden und damit zusätzliche Feldarbeiten, Betriebsmittelaufwendungen und Nährstoffumsätze verbunden sind.

Zur besseren funktionalen Vergleichbarkeit wurden die Emissionen zusätzlich auf die Hauptnutzungsrichtungen Eiweiß und Öl bezogen. Da Soja und Körnererbse primär der

Eiweißproduktion dienen, wurden die CO₂-Emissionen je Kilogramm Eiweiß verglichen, während für ölbetonte Kulturen ein Vergleich der Emissionen je Kilogramm Öl zwischen Soja und Raps erfolgte. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Sojabohnen mit etwa 38 % einen deutlich höheren Rohproteingehalt aufweisen als Körnererbsen mit rund 26 %, während Raps mit etwa 40 % einen höheren Fettgehalt besitzt als Sojabohnen mit etwa 19 % (Zarkadas et al., 2007; Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2024; UFOP, 2020).

Tabelle 25: Produktbezogene CO₂-Emissionen je kg Eiweiß bzw. Öl

Argentinien		
Soja 1	kg CO ₂ /kg Eiweiß	0,71
Soja 2	kg CO ₂ /kg Eiweiß	0,80
Soja1	kg CO ₂ /kg Öl	1,42
Soja 2	kg CO ₂ /kg Öl	1,61
Deutschland		
Körnererbse	kg CO ₂ /kg Eiweiß	0,94
Raps	kg CO ₂ /kg Öl	1,85

Quelle: Eigene Berechnung nach dem BEK des KTBL, 2026

Bezogen auf die Eiweißproduktion zeigen die Sojasysteme am Standort Argentinien geringere Emissionen (0,71–0,80 kg CO₂e/kg Eiweiß) als die Körnererbse in Deutschland (0,94 kg CO₂e/kg Eiweiß). Obwohl Körnererbsen je Tonne Rohware geringere Emissionen verursachen können, führt der höhere Proteingehalt der Sojabohne zu niedrigeren emissionsbezogenen Werten je Kilogramm Eiweiß. Ein vergleichbarer Zusammenhang ergibt sich für die Ölproduktion. Die CO₂-Emissionen je Kilogramm Öl liegen für Soja bei 1,42–1,61 kg CO₂e und für Winterraps bei 1,85 kg CO₂e.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse konsistent über Kultur-, Fruchtfolge- und Produktbetrachtung hinweg, dass die argentinischen Anbausysteme geringere flächenbezogene Treibhausgasemissionen aufweisen, während die deutschen Systeme durch höhere Erträge eine teilweise Kompensation auf Produktebene erreichen. Die Integration von Leguminosen wirkt emissionsmindernd, während eine Intensivierung durch Mehrfachnutzung pro Jahr die Emissionen je Hektar erhöht. Dies unterstreicht die Bedeutung einer gleichzeitigen Betrachtung von Flächen-, Ertrags- und Produktindikatoren bei der Bewertung landwirtschaftlicher Produktionssysteme hinsichtlich ihrer Treibhausgaswirkung.

4.1.2 Vergleich der Pflanzenschutzmittel

Zur Beurteilung der Intensität des Pflanzenschutzzeinsatzes in den betrachteten Anbausystemen wurden die durchschnittlich ausgebrachten Wirkstoffmengen je Hektar erfasst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 26: Intensität des Pflanzenschutzmitteleinsatzes in Deutschland und Argentinien

Deutschland	Ertrag t/ha	ØWirkstoffmenge kg/ha	Datenherkunft
Winterweizen	7,7	2,02	Berechnung aus Daten JKI 2023
Wintergerste	6,8	2,23	Berechnung aus Daten JKI 2023
Zuckerrübe	75,2	5,56	Berechnung aus Daten JKI 2023
Winterraps	3,6	1,76	Berechnung aus Daten JKI 2023
Körnererbse	3,1	2,70	abgeleitet von Legunet 2025
Argentinien	Ertrag t/ha	ØWirkstoffmenge kg/ha	Datenherkunft
Weizen	2,9	2,80	UCCSNAL 2022
Soja 2	2,4	5,10	UCCSNAL 2022
Soja 1	3,1	5,10	UCCSNAL 2022
Körnermais	7,4	7,14	UCCSNAL 2022

Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung (2026) auf Basis der Daten von JKI (2023), Legunet (2025) und Hough (2022)

Zur Beurteilung der Intensität des Pflanzenschutzzeinsatzes in den betrachteten Anbausystemen wurden die durchschnittlich ausgebrachten Wirkstoffmengen je Hektar erfasst. Die entsprechenden Werte für die untersuchten Kulturen an den Standorten Deutschland und Argentinien sind in der Tabelle 26 dargestellt.

Am Standort Deutschland lagen die ausgebrachten Wirkstoffmengen zwischen 1,76 kg/ha im Winterraps und 5,56 kg/ha in der Zuckerrübe. Winterweizen und Wintergerste wiesen mit 2,02 kg/ha beziehungsweise 2,23 kg/ha vergleichbare Intensitäten auf. Für Körnererbse wurde eine Wirkstoffmenge von 2,70 kg/ha ermittelt und lag damit im mittleren Bereich der deutschen Kulturen.

Am Standort Argentinien wurden insgesamt höhere Wirkstoffmengen je Hektar festgestellt. Die Spannweite reichte von 2,80 kg/ha im Weizen bis 7,14 kg/ha im Körnermais. Für Soja ergaben sich in beiden Anbausystemen (Soja 1 und Soja 2) identische Werte von jeweils 5,10 kg/ha.

Bemerkenswert ist dieser Unterschied insbesondere vor dem Hintergrund der deutlich höheren Erträge im deutschen Anbausystem. Trotz des höheren Produktionsniveaus und der damit verbundenen höheren Biomasse- und Ertragsleistung werden in Deutschland

geringere Wirkstoffmengen je Hektar eingesetzt als in den untersuchten argentinischen Systemen. Der direkte Standortvergleich zeigt somit über alle betrachteten Kulturen hinweg höhere Wirkstoffmengen je Flächeneinheit am Agrarstandort Argentinien gegenüber Deutschland. Dies deutet auf eine höhere Intensität des chemischen Pflanzenschutzs in den untersuchten argentinischen Anbausystemen hin. Eventuelle Gründe könnten die klimatischen Bedingungen und die Bodenbearbeitung sein (siehe Kapitel 3.1.1 und 3.1.3).

Als ergänzender Indikator für die ökologische Intensität der Produktionssysteme wurde neben den ausgebrachten Wirkstoffmengen auch das regulatorische Zulassungsspektrum betrachtet. Für Deutschland weist das Umweltbundesamt für das Jahr 2024 insgesamt 1.112 zugelassene Pflanzenschutzmittel mit 278 verschiedenen Wirkstoffen aus (Umweltbundesamt, o.J.). Diese Zahl umfasst die Wirkstoffe, die in Deutschland tatsächlich in zugelassenen Pflanzenschutzmitteln enthalten sind, und stellt damit nur einen Teil der in der Europäischen Union grundsätzlich genehmigten Wirkstoffe dar (Umweltbundesamt, 2025).

Für Argentinien liegen öffentlich zugängliche Zusammenstellungen zur Registrierungslage vor, die auf ein breiteres Portfolio hinweisen. De Groot et al. berichten für Argentinien 445 registrierte Wirkstoffe (CETAAR und IPEN, 2021). Ein direkter Vergleich dieser Gesamtzahl mit der deutschen Wirkstoffzahl ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da sich beide Kennzahlen auf unterschiedliche Ebenen beziehen. Während die argentinische Zahl alle national registrierten Wirkstoffe umfasst, beschreibt die deutsche Zahl nur jene Wirkstoffe, die in aktuell zugelassenen Produkten auf dem Markt enthalten sind.

Zwischen beiden Regulierungssystemen lassen sich mehrere Wirkstoffgruppen unterscheiden. Ein Teil der Wirkstoffe ist sowohl in Argentinien registriert als auch in der Europäischen Union genehmigt und in Deutschland in Pflanzenschutzmitteln enthalten. Daneben existieren Wirkstoffe, die in Argentinien zugelassen sind, für die jedoch in der Europäischen Union keine Genehmigung besteht. Für Argentinien werden hierfür 106 Wirkstoffe genannt (de Groot et al., 2026). Darüber hinaus gibt es Wirkstoffe, die in Argentinien zugelassen und in der Europäischen Union grundsätzlich genehmigt sind, jedoch in Deutschland derzeit nicht in zugelassenen Pflanzenschutzmitteln vorkommen. Solche Konstellationen entstehen, weil die Genehmigung von Wirkstoffen in der Europäischen Union zentral erfolgt, die Zulassung konkreter Pflanzenschutzmittelprodukte jedoch national geregelt ist und stark von agronomischer Relevanz und Marktbedingungen abhängig ist (Umweltbundesamt, 2025). Ein auf europäischer Ebene genehmigter Wirkstoff kann daher in einzelnen Mitgliedstaaten, etwa aufgrund fehlender

Kulturrelevanz oder ausbleibender Produktzulassungen, nicht am Markt vertreten sein, obwohl er regulatorisch zulässig wäre.

Unter den Wirkstoffen, die ausschließlich in Argentinien zugelassen sind, befinden sich mehrere Pflanzenschutzmittelwirkstoffe, die seit Jahren besonders kontrovers diskutiert werden und in der Europäischen Union bereits vor längerer Zeit ihre Genehmigung verloren haben oder nicht erneut genehmigt wurden, im argentinischen Zulassungsspektrum jedoch weiterhin vorkommen (de Groot et al., 2026). Zum Beispiel ist Atrazin in der Europäischen Union seit 2004 nicht mehr genehmigt, mit der Begründung wurde insbesondere auf die Problematik einer möglichen Grundwasserkontamination hingewiesen (European Commission, 2004). Acetochlor ist in der Europäischen Union seit Beginn der 2010er-Jahre nicht mehr zugelassen. Im Zulassungsverfahren blieben einige Risiken und Unsicherheiten bestehen, vor allem in Bezug auf eine mögliche Belastung des Grundwassers durch relevante Abbauprodukte (European Commission, 2011). Ein weiteres Beispiel ist Paraquat. Dieser Wirkstoff ist in der Europäischen Union seit 2007 nicht mehr genehmigt, nachdem die vorherige Aufnahme durch ein Urteil aufgehoben worden war. Dabei wurden unter anderem Defizite bei der Bewertung von Risiken für Anwender und Umwelt festgestellt (Court of Justice of the European Union, 2007).

4.2 Ökonomische Analyse

Zu Beginn wird die Berechnung für den deutschen Agrarstandort am Beispiel des Winterraps beispielhaft erläutert.

(Die Berechnungen für die EkfL der aller kultivierten Früchte der Fruchtfolgen für die Agrarstandorte befinden sich im Anhang)

Tabelle 27: Berechnung EkfL am Beispiel deutscher Winterraps

Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	35,8
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	39,2
Gesamterlös		€/ha	1404
Prämien	Direkzahlungen 2026	€/ha	152
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	70
	Saatguteinsatz	kg/ha	5
Handelsdünger Hauptprodukt	incl. Ca.	€/ha	248
	dafür N, P, K	kg/ha	120 28 30
Handelsdünger Koppelprodukt		€/ha	198
	dafür N, P, K	kg/ha	43 10 127
Pflanzenschutzmittel		€/ha	173
	Gesamtkosten	Herbizid €/ha	66
		Fungizid €/ha	26
		Insektizid €/ha	52
		Sonstige €/ha	30
Zinssatz	Umlaufkapital	€/ha	4,77
Summe Direktkosten		€/ha	699
direktkostenfreie Leistung ohne Prämie			
		€/ha	705
Arbeits erledigungskosten			
Maschinenkosten	variabel	€/ha	127
	darunter: Anbau, Pflege	€/ha	95
	Ernte, Transport, Einlagerung	€/ha	32
	fest (ohne Zinsansatz)	€/ha	108
Lohn		€/ha	58
Trocknung		€/ha	4
	Anteil Trocknung an Erntegut	%	10
	bei Erntefeuchte	%	12
Zinsansatz		€/ha	18
Summe Arbeits erledigungskosten		€/ha	316
weitere Kosten			
Flächenkosten (Pachten, WBV, Grundsteuer)			435
Berufsgenossenschaft			5,5
Einzelkosten			1455
Einzelkostenfreie Leistung			
	ohne Prämie		-51
	mit Prämie		101
	mit Prämie und Prämie ÖR2		161

Quelle: Eigene Berechnung, 2026

Für die ökonomische Analyse wurden Einzelkostenfreie Leistungen aus den Durchschnittserträgen, sowie die durchschnittlichen Preise (Verkaufspreis der Ware, Einkaufspreis des Stickstoff Düngemittels) aus der Monte Carlo Simulation verwendet. Als erstes wurde der Gesamterlös für den Winterraps berechnet. Anschließend wurden die Direktkosten ermittelt. Die Direktkosten setzen sich aus den Kosten für Saatgut und Dünger für das Hauptprodukt (Korn) und dem Dünger für das Nebenprodukt (Stroh), sowie die Kosten für Pflanzenschutzmittel und dem Zinsansatz auf das Umlaufkapital zusammen. Danach wurden Arbeits erledigungskosten bestimmt. Diese bestehen aus den variablen Maschinenkosten (Anbau und Pflege, Ernte, Transport), der Einlagerung und den festen Maschinenkosten (ohne Zinsansatz). Anschließend wurden die weiteren Kosten erfasst. Diese bestehen aus den Flächenkosten und der Berufsgenossenschaft. Der Gesamterlös abzüglich der genannten Kosten entspricht der Einzelkostenfreien

Leistung (EkfL). Die Ergebnisse der EkfL für die vier untersuchten Fruchtfolgen werden in folgender Tabelle abgebildet.

Tabelle 28: Mittlere EkfL der vier untersuchten Fruchtfolgesysteme

Deutschland Ökonomische FF										
Fruchtfolge	Einheit	Raps	Weizen	Gerste	Zwischefrucht	Zuckerrübe	Rübenweizen	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr	
Ertrag	dt/ha	35,81	76,70	67,60	0,00	751,90	65,20	5		
Preis	€/dt	39,20	17,46	16,23	0,00	3,35	17,46	5		
Prämie	€/ha	152,00	152,00	152,00	0,00	152,00	152,00	5		
Erlös	€/ha	1403,75	1339,18	1097,15	0,00	2518,87	1138,30	5		
Einzelkosten	€/ha	1454,61	1402,23	1297,72	114,42	2405,88	1330,84	5		
EkfL ökonomische	€/ha	101,14	88,95	-48,57	-114,42	264,99	-40,54	5		41,93
Deutschland Erweiterte FF ÖR2										
Fruchtfolge	Einheit	Raps	Weizen	Gerste	Zwischenfrucht	Körnererbse	Weizen	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr	
Ertrag	dt/ha	35,81	76,70	67,60	0,00	30,61	76,70	5		
Preis	€/dt	39,20	17,46	16,23	0,00	22,56	17,46	5		
Prämie	€/ha	212,00	212,00	212,00	0,00	212,00	212,00	5		
Erlös	€/ha	1403,75	1339,18	1097,15	0,00	690,65	1339,18	5		
Einzelkosten	€/ha	1454,61	1402,23	1297,72	114,42	1128,24	1402,30	5		
EkfL ökologische F	€/ha	161,14	148,95	11,43	-114,42	-225,59	145,88	5		21,23
Argentinien Double Crop										
Fruchtfolge	Einheit	Weizen	Soja 2	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr					
Ertrag	dt/ha	29,10	23,50	1						
Preis	€/dt	17,95	24,50	1						
Prämie	€/ha	0,00	0,00	1						
Erlös	€/ha	522,35	575,75	1						
Aufwandmenge N	kg N/ha	77,00	5,40	1						
Einzelkosten	€/ha	563,45	568,22	1						
EkfL	€/ha	-41,11	7,53	1		-33,58				
Argentinien Single Crop										
Fruchtfolge	Einheit	Soja 1	Körnermais	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr					
Ertrag	dt/ha	31,38	73,695	2						
Preis	€/dt	24,5	15,38	2						
Erlös	€/ha	768,81	1133,4291	2						
Einzelkosten	€/ha	719,78	1157,32	2						
EkfL	€/ha	49,03	-23,89	2		12,57				

Quelle: eigene Berechnung, 2026

Am Standort Deutschland erreicht die ökonomische Fruchtfolge mit 41,93 €/ha die höchste mittlere einzelkostenfreie Leistung. Die erweiterte Fruchtfolge nach Ökoregelung 2 weist mit 21,23 €/ha einen geringeren Wert auf. Die geringere EkfL der erweiterten Fruchtfolge ist im Wesentlichen auf die Integration der Körnererbse zurückzuführen, die mit -225,59 €/ha eine negative einzelkostenfreie Leistung aufweist und damit das Gesamtergebnis der Fruchtfolge reduziert. Demgegenüber erzielen die Marktfrüchte Winterraps und Winterweizen in beiden deutschen Fruchtfolgen positive EkfL-Beiträge, während Gerste und Rübenweizen teilweise geringe oder negative Beiträge aufweisen. Die ökonomische Fruchtfolge profitiert zusätzlich von den hohen Deckungsbeiträgen der Zuckerrübe, die mit 264,99 €/ha den größten positiven Einzelbeitrag liefert.

Die argentinischen Fruchtfolgesysteme zeigen insgesamt deutlich geringere einzelkostenfreie Leistungen. Die Double-Crop-Fruchtfolge erreicht im Mittel eine negative EkfL von -33,58 €/ha je Jahr. Die Ursache hierfür ist insbesondere der negative Beitrag

des Weizens (-41,11 €/ha), während Soja 2 mit 7,53 €/ha nur einen geringen positiven Deckungsbeitrag erzielt. Demgegenüber weist die Single-Crop-Fruchtfolge mit 12,57 €/ha pro Jahr eine leicht positive EkdL auf. Hier kompensiert der positive Beitrag von Soja 1 (49,03 €/ha) den negativen Beitrag des Körnermaises (-23,89 €/ha) teilweise.

Im direkten Standortvergleich wird deutlich, dass die deutschen Fruchtfolgen höhere einzelkostenfreie Leistungen erzielen als die argentinischen Systeme. Dies ist vor allem auf höhere Erträge, höhere Produktpreise sowie die Einbindung ertragsstarker Marktfrüchte wie Zuckerrübe und Winterraps zurückzuführen. Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass die Integration von Leguminosen in Deutschland sowie die Intensivierung durch Doppelernte in Argentinien jeweils zu einer Reduktion der einzelkostenfreien Leistung führen. Während in Deutschland die ökologisch motivierte Erweiterung der Fruchtfolge mit Erbsenanbau ökonomische Einbußen verursacht, reduziert in Argentinien die höhere Produktionsintensität der Double-Crop-Systeme die Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Single-Crop-Anbau.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die ökonomische Leistungsfähigkeit der Fruchtfolgesysteme stark von der Kulturzusammensetzung, dem Ertragsniveau sowie den jeweiligen Markt- und Produktionsbedingungen der Standorte abhängt.

4.3 Risikoanalyse mit Hilfe einer stochastischen Simulation

4.3.1 Begriffserklärung stochastische Simulation

Die stochastische Simulation, häufig auch als Monte-Carlo-Simulation bezeichnet, stellt ein parametrisches und numerisches Verfahren zur Analyse unsicherer Zielgrößen dar. Ziel ist es, die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zielgröße durch wiederholte numerische Experimente abzubilden. Im Unterschied zur historischen Simulation, bei der Zielgrößen unmittelbar aus beobachteten Stichprobendaten abgeleitet werden, werden bei der Monte-Carlo-Simulation zunächst parametrische Verteilungen für die relevanten Einflussgrößen bestimmt. Auf Basis dieser Verteilungen werden anschließend unter Berücksichtigung bestehender Korrelationen durch wiederholte Zufallsziehungen rechnerisch Werte für die einzelnen Zufallsvariablen erzeugt. Dieses Vorgehen entspricht einer „Was-wäre-wenn“-Analyse möglicher zukünftiger Entwicklungen (vgl. Mußhoff, S. 219 f.).

Jede dieser Zufallsziehungen stellt einen Simulationsdurchlauf dar. Im vorliegenden Kontext kann ein Durchlauf beispielsweise einem möglichen Erntejahr innerhalb der Fruchtfolgebewertung entsprechen. Durch eine große Anzahl an Simulationsläufen wird

gemäß dem Gesetz der großen Zahlen eine stabile Annäherung an die zugrunde liegende Verteilung der Zielgröße erreicht. Die Simulation liefert somit eine Vielzahl möglicher Realisationen der Zielgröße, die anschließend statistisch ausgewertet und geordnet werden können.

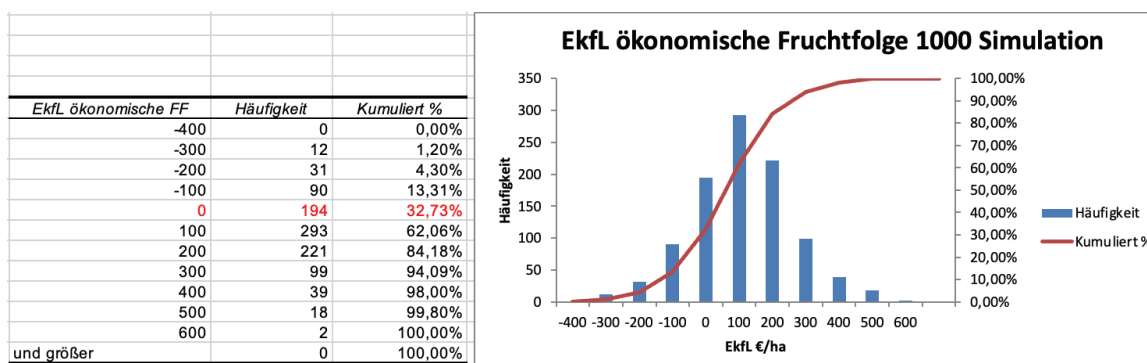
Ein wesentlicher Vorteil der stochastischen Simulation besteht darin, dass für jede einzelne Einflussgröße, etwa Erträge oder Preise, spezifische Wahrscheinlichkeitsverteilungen definiert werden können. Diese können sowohl aus historischen Beobachtungsdaten als auch aus Experteneinschätzungen abgeleitet werden. Dadurch lässt sich die Unsicherheit einzelner Parameter realitätsnah abbilden (vgl. Mußhoff, S. 219 f.).

Im Vergleich zur Varianz-Kovarianz-Methode bietet die stochastische Simulation eine höhere Flexibilität, da sie keine Annahme über eine bestimmte Verteilungsform der Zielgröße erfordert, sondern die empirisch beobachteten oder geschätzten Verteilungen direkt integrieren kann. Gleichzeitig geht sie über die historische Simulation hinaus, indem neben Vergangenheitsdaten auch Expertenwissen zu zukünftigen Entwicklungen berücksichtigt werden kann (vgl. Mußhoff, S. 219 f.).

4.3.2 Analyse der ökonomischen Simulationsergebnisse

Zur Beurteilung der ökonomischen Stabilität der deutschen Fruchtfolgesysteme wurden auf Basis von 1.000 Monte-Carlo-Simulationsdurchläufen die Verteilungen der einzelkostenfreien Leistung analysiert. Die Ergebnisse werden jeweils in Form eines Histogramms mit kumulativer Verteilungsfunktion dargestellt, wodurch sowohl die Streuung als auch die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Einkommensbereiche bewertet werden können.

Abbildung 7: Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der ökonomischen Fruchtfolge auf Basis von 1000 Monte-Carlo-Simulationen

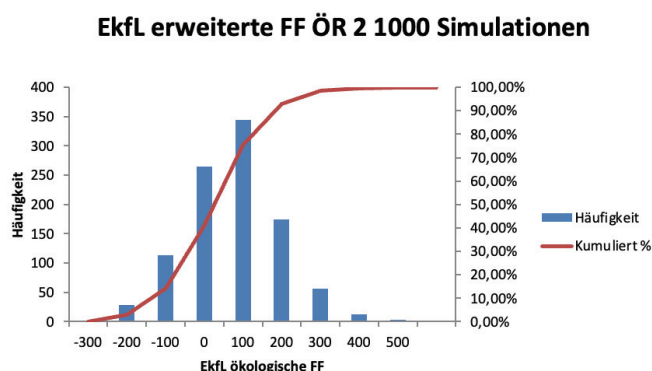


Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Die Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der ökonomischen Fruchtfolge zeigt eine deutliche Streuung mit einem Schwerpunkt im unteren positiven Bereich. Der häufigste Wertebereich liegt zwischen 0 und 100 € je Hektar, gefolgt vom Intervall zwischen 100 und 200 € je Hektar. Insgesamt verbleiben rund 62 % der Simulationen unterhalb von 100 € je Hektar, während etwa 84 % unterhalb von 200 € je Hektar liegen. Gleichzeitig besteht ein nicht unerhebliches Verlustrisiko. In rund einem Drittel der Simulationen liegt die einzelkostenfreie Leistung bei null oder darunter. Stark negative Ergebnisse treten zwar selten auf, können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Hohe positive Ergebnisse oberhalb von 400 € je Hektar sind ebenfalls nur in wenigen Simulationsdurchläufen zu beobachten. Die Verteilung weist damit eine moderate Rechtsschiefe auf, wobei extreme positive Ausreißer nur begrenzt auftreten. Insgesamt zeigt die ökonomische Fruchtfolge eine mittlere Einkommensstabilität mit einer relevanten Wahrscheinlichkeit negativer Ergebnisse, jedoch ohne ausgeprägtes Extremrisiko auf der positiven Seite.

Abbildung 8: Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der erweiterten Fruchtfolge (ÖR2) auf Basis von 1000 Monte-Carlo-Simulationen

EkfL ökologische FF	Häufigkeit	Kumuliert %
-300	1	0,10%
-200	29	3,00%
-100	113	14,31%
0	265	40,84%
100	345	75,38%
200	174	92,79%
300	56	98,40%
400	13	99,70%
500	3	100,00%
und größer	0	100,00%



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

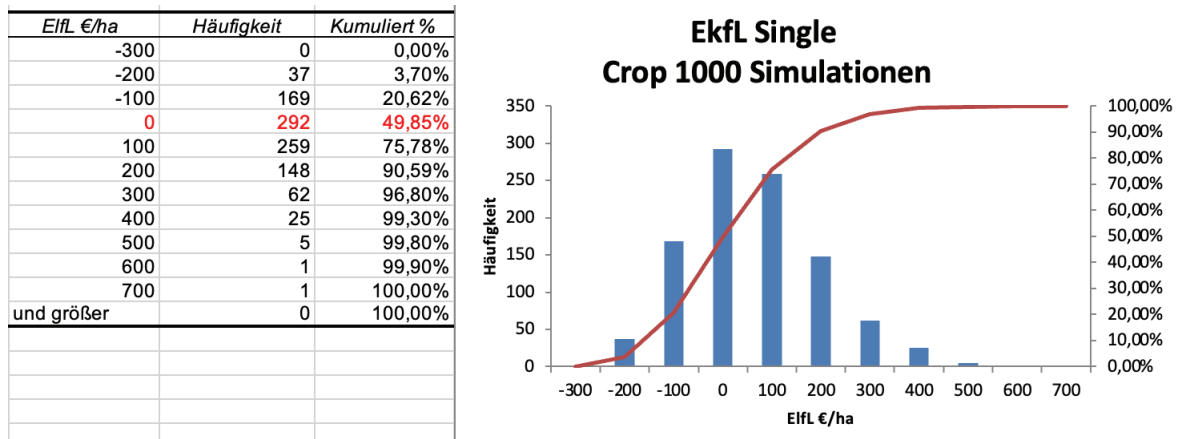
Die erweiterte Fruchtfolge weist ebenfalls eine breite Streuung der einzelkostenfreien Leistung auf. Der Schwerpunkt der Verteilung liegt im Bereich zwischen 0 und 200 € je Hektar, wobei das Intervall zwischen 0 und 100 € je Hektar die höchste Häufigkeit aufweist. Etwa 75 % der Simulationen erreichen maximal 100 € je Hektar, während rund 93 % unterhalb von 200 € je Hektar liegen. Auffällig ist der Anteil nicht positiver Ergebnisse. In etwa 41 % der Simulationen liegt die einzelkostenfreie Leistung bei null oder darunter. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, die Gewinnschwelle nicht zu überschreiten, höher als in der ökonomischen Fruchtfolge. Extreme Verlustwerte unter 200 € je Hektar treten nur vereinzelt auf. Gleichzeitig sind sehr hohe positive Ergebnisse oberhalb von 300 € je Hektar ebenfalls selten. Die Verteilung ist insgesamt stärker im unteren positiven Bereich konzentriert und weist ein begrenztes Potenzial für außergewöhnlich hohe Einkommenssituationen auf.

Im direkten Vergleich zeigen beide Systeme eine ähnliche Grundstruktur der Einkommensverteilung, unterscheiden sich jedoch im Risikoprofil. Die ökonomische Fruchtfolge weist eine geringere Wahrscheinlichkeit nicht positiver Ergebnisse auf und bietet in Einzelfällen höhere positive Ausreißer. Die erweiterte Fruchtfolge zeigt hingegen eine stärkere Konzentration im moderaten Einkommensbereich, jedoch eine höhere Wahrscheinlichkeit sehr niedriger oder nullnaher Ergebnisse. Diese Unterschiede stehen im Zusammenhang mit der veränderten Erlös- und Kostenstruktur der erweiterten Fruchtfolge. Die Integration der Körnererbse reduziert zwar das durchschnittliche Emissionsniveau, geht jedoch mit einer veränderten Marktstruktur einher. Die zusätzliche Förderung im Rahmen der Ökoregelung 2 wirkt einkommensstabilisierend, kompensiert jedoch nicht vollständig die geringeren Markterlöse einzelner Fruchtfolgeglieder.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass beide deutschen Fruchtfolgesysteme ein moderates Einkommensrisiko aufweisen. Während die ökonomische Fruchtfolge ein leicht höheres Potenzial für positive Extremwerte bietet, zeigt die erweiterte Fruchtfolge eine stärkere Konzentration im unteren positiven Bereich sowie eine höhere Wahrscheinlichkeit, die Gewinnschwelle nicht zu überschreiten.

Zur Analyse der ökonomischen Stabilität der argentinischen Fruchtfolgesysteme wurden ebenfalls 1.000 Monte-Carlo-Simulationsdurchläufe ausgewertet. Die Verteilungen der einzelkostenfreien Leistung werden in Form von Histogrammen mit kumulativer Verteilungsfunktion dargestellt, wodurch sowohl die Streuung als auch die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Einkommensbereiche beurteilt werden können.

Abbildung 9: Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der Single Crop Fruchtfolge auf Basis von 1000 Monte-Carlo-Simulationen



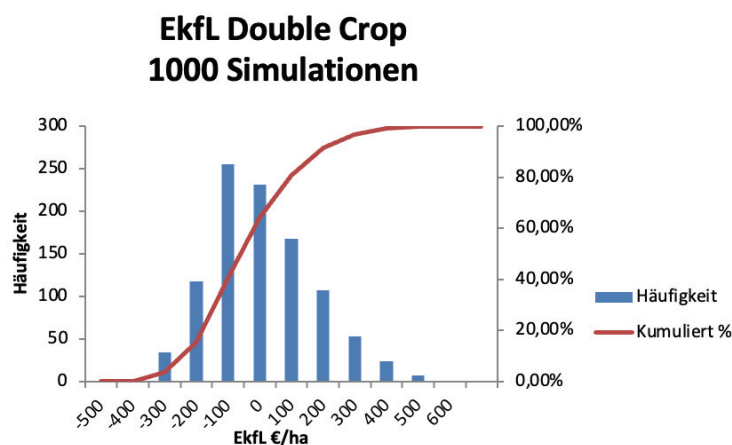
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Die Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der Single-Crop-Fruchtfolge zeigt eine breite Streuung mit einem Schwerpunkt im unteren positiven Bereich. Der häufigste Wertebereich liegt zwischen 0 und 100 € je Hektar. Rund 50 % der Simulationen liegen bei null oder darunter, sodass die Wahrscheinlichkeit eines nicht positiven Ergebnisses bei etwa der Hälfte aller Durchläufe liegt. Negative Ergebnisse treten vor allem im Bereich zwischen –100 € und 0 € je Hektar auf, während stark negative Werte unter –200 € je Hektar vergleichsweise selten sind. Gleichzeitig besteht ein gewisses Potenzial für positive Ergebnisse. Werte zwischen 100 € und 200 € je Hektar treten regelmäßig auf, während Ergebnisse oberhalb von 300 € je Hektar deutlich seltener erreicht werden. Extreme positive Ausreißer über 500 € je Hektar sind nur in einzelnen Simulationen zu beobachten. Insgesamt weist die Verteilung eine erkennbare Rechtsschiefe auf, wobei der Großteil der Simulationen im Bereich zwischen –100 € und 200 € je Hektar konzentriert ist.

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Abbildung 10: Verteilung der einzelkostenfreien Leistung der Double Crop Fruchtfolge auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen

EkfL Double Crop		
Klasse	Häufigkeit	Kumuliert %
-500	0	0,00%
-400	2	0,20%
-300	34	3,60%
-200	118	15,40%
-100	255	40,90%
0	231	64,00%
100	168	80,80%
200	107	91,50%
300	53	96,80%
400	24	99,20%
500	7	99,90%
600	1	100,00%
	0	100,00%



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Die Double-Crop-Fruchtfolge zeigt eine noch stärkere Konzentration im negativen bis leicht positiven Bereich. Der häufigste Wertebereich liegt zwischen -100 € und 0 € je Hektar. Insgesamt liegen rund 64 % der Simulationen bei null oder darunter, womit die Wahrscheinlichkeit eines nicht positiven Ergebnisses deutlich höher ist als im Single-Crop-System. Negative Ergebnisse treten insbesondere im Bereich zwischen -200 € und 0 € je Hektar auf, während stark negative Werte unter -300 € je Hektar nur vereinzelt vorkommen. Positive Ergebnisse zwischen 100 € und 300 € je Hektar werden regelmäßig erzielt, höhere Werte oberhalb von 400 € je Hektar bleiben jedoch seltene Ausnahmen. Auch diese Verteilung ist rechtsschief, weist jedoch eine stärkere Gewichtung im negativen Bereich auf.

Die negative einzelkostenfreie Leistung lässt annehmen, dass eine Double Crop Fruchtfolge nur auf optimalen Hohertragsstandorten in Argentinien profitabel praktiziert werden kann und für durchschnittliche Betriebe ungeeignet ist.

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass das Single-Crop-System eine geringere Wahrscheinlichkeit negativer Ergebnisse aufweist und insgesamt ein etwas ausgeglicheneres Risikoprofil besitzt. Die Double-Crop-Fruchtfolge hingegen weist eine deutlich höhere Einkommensvolatilität auf. Die gleichzeitige Produktion von Weizen und Soja innerhalb eines Jahres führt zu einer Kumulation von Ertrags- und Preisrisiken, da Schwankungen beider Kulturen unmittelbar in die einzelkostenfreie Leistung einfließen. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit negativer Gesamtergebnisse.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Intensivierung des Produktionssystems durch zwei Ernten pro Jahr nicht zwangsläufig zu einer höheren ökonomischen Stabilität führt. Während das Single-Crop-System ein moderates Einkommensrisiko mit vereinzeltem Potenzial für höhere positive Ergebnisse aufweist, zeigt das Double-Crop-System eine deutlich erhöhte Wahrscheinlichkeit nicht positiver Resultate und damit ein höheres ökonomisches Risikoprofil.

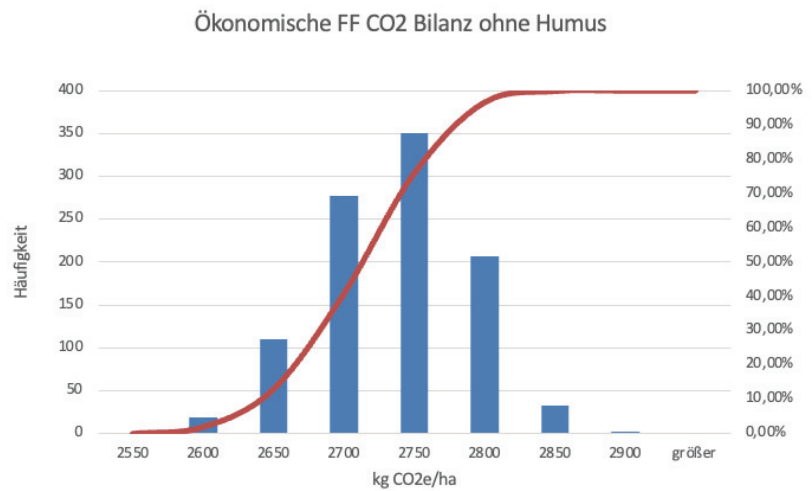
4.3.3 Analyse der ökologischen Simulationsergebnisse

Zur Beurteilung der ökologischen Stabilität der deutschen und argentinischen Fruchtfolgesysteme wurden auf Basis von jeweils 1.000 Monte-Carlo-Simulationsdurchläufen die Verteilungen der Treibhausgasemissionen analysiert. Als Indikator dient die CO₂-Bilanz je Hektar ohne Berücksichtigung von Humuseffekten. Die Ergebnisse werden in Form von Histogrammen mit kumulativer Verteilungsfunktion dargestellt, wodurch sowohl die Streuung der Emissionswerte als auch die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Emissionsbereiche beurteilt werden können.

Für die deutschen Fruchtfolgesysteme zeigt sich zunächst, dass die ökonomische Fruchtfolge insgesamt die höchsten Emissionswerte unter den betrachteten Systemen aufweist. Der Schwerpunkt der Verteilung liegt im Bereich zwischen etwa 2.700 und 2.800 kg CO₂e je Hektar, wobei insbesondere das Intervall um rund 2.750 kg CO₂e je Hektar die höchste Häufigkeit erreicht. Rund 41 % der Simulationen liegen unterhalb von etwa 2.700 kg CO₂e je Hektar, während etwa 76 % unterhalb von etwa 2.750 kg CO₂e je Hektar verbleiben. Emissionswerte oberhalb von etwa 2.800 kg CO₂e je Hektar treten nur in einem kleineren Anteil der Simulationen auf, während sehr hohe Werte oberhalb von etwa 2.850 kg CO₂e je Hektar selten bleiben. Insgesamt zeigt die Verteilung eine moderate Streuung mit einer leichten Rechtsschiefe.

Abbildung 11: Verteilung der CO₂ Bilanzen der ökonomischen Fruchtfolge auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen

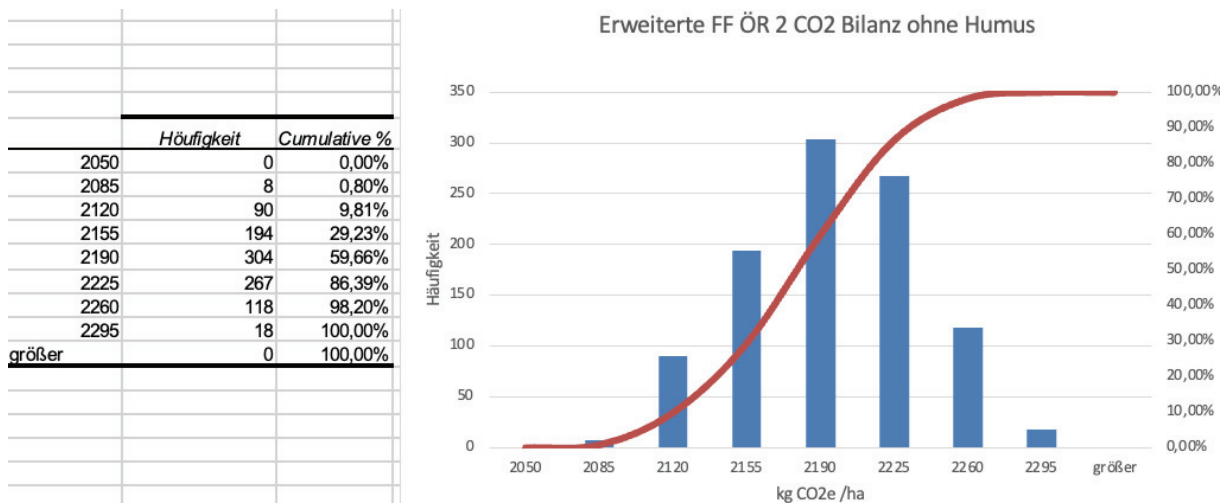
	Häufigkeit	Kumulativ %
2550	0	0,00%
2600	19	1,90%
2650	110	12,91%
2700	278	40,74%
2750	351	75,88%
2800	207	96,60%
2850	33	99,90%
2900	1	100,00%
größer	0	100,00%



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Im Vergleich dazu weist die erweiterte Fruchtfolge ein deutlich niedrigeres Emissionsniveau auf. Der Schwerpunkt der Verteilung liegt zwischen etwa 2.150 und 2.225 kg CO₂e je Hektar, wobei das Intervall um etwa 2.190 kg CO₂e je Hektar die höchste Häufigkeit aufweist. Rund 60 % der Simulationen erreichen maximal etwa 2.190 kg CO₂e je Hektar, während etwa 86 % unterhalb von etwa 2.225 kg CO₂e je Hektar liegen. Niedrigere Werte unterhalb von etwa 2.120 kg CO₂e je Hektar sowie höhere Werte oberhalb von etwa 2.260 kg CO₂e je Hektar treten nur vereinzelt auf. Insgesamt zeigt die erweiterte Fruchtfolge eine kompaktere Verteilung der Emissionswerte.

Abbildung 12: Verteilung der CO₂ Bilanzen der Erweiterten Fruchtfolge (ÖR2) auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

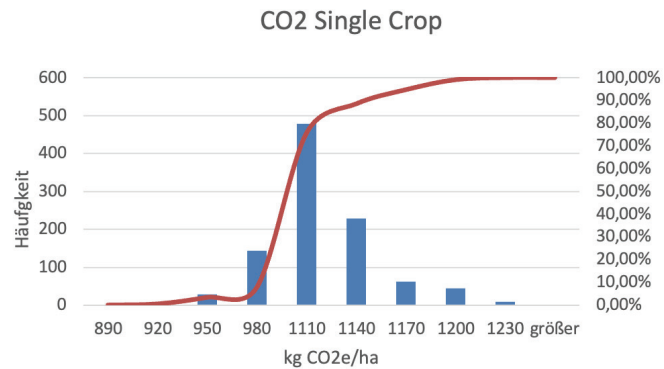
Im direkten Vergleich der beiden deutschen Fruchtfolgesysteme zeigt sich eine deutliche Differenz im Emissionsniveau. Über den gesamten Wertebereich hinweg weist die erweiterte Fruchtfolge geringere Treibhausgasemissionen auf als die ökonomische Fruchtfolge. Gleichzeitig ist die Streuung der Ergebnisse vergleichbar, sodass sich die Systeme vor allem im durchschnittlichen Emissionsniveau unterscheiden.

Für die argentinischen Produktionssysteme zeigt sich ein insgesamt niedrigeres Emissionsniveau. Die Verteilung der CO₂-Emissionen der Single-Crop-Fruchtfolge weist eine moderate Streuung mit einem klaren Schwerpunkt im Bereich um 1.110 kg CO₂e je Hektar auf. Der häufigste Wertebereich liegt bei 1.110 kg CO₂e/ha (rund 48 % der Simulationen), gefolgt vom Intervall um 1.140 kg CO₂e/ha. Insgesamt liegen etwa 75,7 % der Simulationen bei maximal 1.110 kg CO₂e/ha und rund 88,5 % bei maximal 1.140 kg CO₂e/ha. Niedrigere Emissionswerte unterhalb von 980 kg CO₂e/ha treten selten auf (rund 7,8 %), während höhere Werte oberhalb von 1.170 kg CO₂e/ha ebenfalls nur in einem kleinen Anteil der Simulationen auftreten (rund 5,3 %). Werte oberhalb von 1.200 kg CO₂e/ha bleiben nahezu Ausnahmefälle (unter 1 %). Insgesamt ist eine leichte Rechtsschiefe erkennbar, da sich ein begrenzter oberer Ausläufer bis etwa 1.230 kg CO₂e/ha zeigt.

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Abbildung 13: Verteilung der CO₂-Bilanzen der Single Crop Fruchtfolge auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen

CO ₂ Single crop	Frequency	Cumulative %
890	0	0,00%
920	5	0,50%
950	29	3,40%
980	144	7,81%
1110	478	75,68%
1140	228	88,49%
1170	62	94,69%
1200	44	99,10%
1230	9	100,00%
größer	0	100,00%



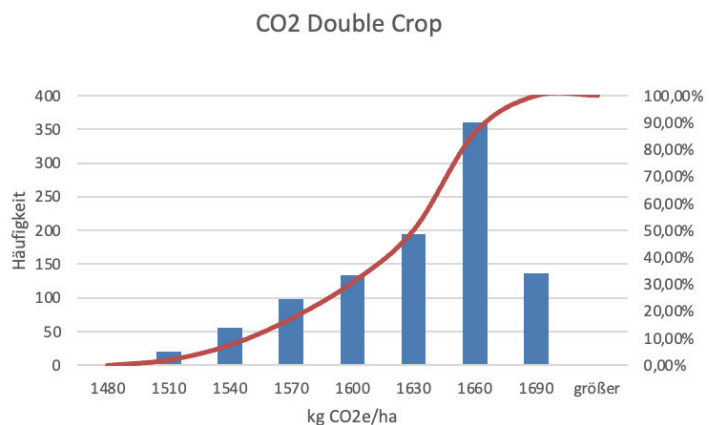
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Die Double-Crop-Fruchtfolge zeigt dagegen ein deutlich höheres Emissionsniveau. Die Emissionswerte konzentrieren sich überwiegend zwischen 1.600 und 1.690 kg CO₂e je Hektar, wobei das Intervall um etwa 1.660 kg CO₂e je Hektar die höchste Häufigkeit erreicht. Rund die Hälfte der Simulationen liegt unterhalb von etwa 1.630 kg CO₂e je Hektar, während etwa 86 % unterhalb von etwa 1.660 kg CO₂e je Hektar verbleiben. Niedrigere Werte unterhalb von etwa 1.540 kg CO₂e je Hektar sowie höhere Emissionen oberhalb von etwa 1.690 kg CO₂e je Hektar treten nur vereinzelt auf. Damit weist das Double-Crop-System insgesamt höhere Emissionen auf als das Single-Crop-System.

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Abbildung 14: Verteilung der CO₂ Bilanzen der Double Crop Fruchtfolge auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen

CO ₂ Double Crop	Frequency	Cumulative %
1480	0	0,00%
1510	20	2,00%
1540	55	7,51%
1570	98	17,32%
1600	134	30,73%
1630	194	50,15%
1660	361	86,29%
1690	136	99,90%
größer	1	100,00%



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Ein Vergleich der Emissionsniveaus zwischen den deutschen und argentinischen Produktionssystemen zeigt deutliche Unterschiede. Während sich die Emissionswerte der deutschen Fruchtfolgen überwiegend zwischen etwa 2.100 und 2.800 kg CO₂e je Hektar bewegen, liegen die argentinischen Systeme überwiegend zwischen etwa 1000 und 1.700 kg CO₂e je Hektar. Diese Unterschiede sind unter anderem auf unterschiedliche Produktionsstrukturen sowie den variierenden Einsatz von Betriebsmitteln und Energie zurückzuführen. Gleichzeitig zeigt sich, dass in beiden Ländern die Struktur der Fruchtfolge einen wesentlichen Einfluss auf das Emissionsniveau besitzt: In Deutschland führt eine stärkere Diversifizierung der Fruchtfolge zu niedrigeren Emissionen, während in Argentinien die Intensivierung durch zwei Ernten pro Jahr mit höheren Emissionen verbunden ist.

5. Diskussion

5.1 Einordnung der Ergebnisse in die Literatur

Die Ergebnisse der stochastischen Simulation aus den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 lassen sich in folgender Tabelle zusammenfassen.

Tabelle 29: Endergebnis der stochastischen Simulation für die Ökonomie und Ökologie der untersuchten Fruchtfolgesysteme

Deutschland Ökonomische FF									
Fruchtfolge	Einheit	Raps	Weizen	Gerste	Zwischenfrucht	Zuckerrübe	Rübenweizen	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr
Ertrag	dt/ha	35,81	76,70	67,60	0,00	751,90	65,20	5	
Preis	€/dt	39,20	17,46	16,23	0,00	3,35	17,46	5	
Prämie	€/ha	152,00	152,00	152,00	0,00	152,00	152,00	5	
Erlös	€/ha	1403,75	1339,18	1097,15	0,00	2518,87	1138,30	5	
Aufwandmenge N	kg N/ha	184,02	186,50	161,50	0,00	104,52	179,24	5	
Einzelkosten	€/ha	1454,61	1402,23	1297,72	114,42	2405,88	1330,84	5	
EktL ökonomische FF	€/ha	101,14	88,95	-48,57	-114,42	264,99	-40,54	5	41,93
CO2 Bilanz ohne Humus	kg CO2/ha	2607,58	2682,14	2100,36	80,98	3423,30	2543,98	5	2687,67
CO2 Bilanz je Ware	kg CO2/t Ware	728,17	349,69	310,70		45,53	390,21		
Deutschland Erweiterte FF ÖR2									
Fruchtfolge	Einheit	Raps	Weizen	Gerste	Zwischenfrucht	Körnererbse	Weizen	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr
Ertrag	dt/ha	35,81	76,70	67,60	0,00	30,61	76,70	5	
Preis	€/dt	39,20	17,46	16,23	0,00	22,56	17,46	5	
Prämie	€/ha	212,00	212,00	212,00	0,00	212,00	212,00	5	
Erlös	€/ha	1403,75	1339,18	1097,15	0,00	690,65	1339,18	5	
Aufwandmenge N	kg N/ha	184,02	186,5	161,5	0,00	0	186,5	5	
Einzelkosten	€/ha	1454,61	1402,23	1297,72	114,42	1128,24	1402,30	5	
EktL ökologische FF	€/ha	161,14	148,95	11,43	-114,42	-225,59	145,88	5	21,23
CO2 Bilanz ohne Humus	kg CO2/ha	2607,58	2682,14	2100,36	80,98	745,33	2682,14	5	2179,71
CO2 Bilanz je Ware	kg CO2/t Ware	728,17	349,69	310,70		243,46	349,69		
Argentinien Double Crop									
Fruchtfolge	Einheit	Weizen	Soja 2	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr				
Ertrag	dt/ha	29,10	23,50	1					
Preis	€/dt	17,95	24,50	1					
Prämie	€/ha	0,00	0,00	1					
Erlös	€/ha	522,35	575,75	1					
Aufwandmenge N	kg N/ha	77,00	5,40	1					
Einzelkosten	€/ha	563,45	568,22	1					
EktL	€/ha	-41,11	7,53	1	-33,58				
CO2 Bilanz ohne Humus	kg CO2/ha	919,31	704,53	1	1623,84				
CO2 Bilanz je Ware	kg CO2/t Ware	315,91	299,80						
Argentinien Single Crop									
Fruchtfolge	Einheit	Soja 1	Körnermais	Anzahl Jahre	Mittelwert je Jahr				
Ertrag	dt/ha	31,38	73,695	2					
Preis	€/dt	24,5	15,38	2					
Erlös	€/ha	768,81	1133,4291	2					
Einzelkosten	€/ha	719,78	1157,32	2					
EktL	€/ha	49,03	-23,89	2	12,57				
CO2 Bilanz ohne Humusaufbau/Hur	kg CO2/ha	842,67	1309,14	2	1075,91				
CO2 Bilanz je Ware	kg CO2/t Ware	268,54	177,64						

Quelle: Eigene Berechnungen, 2026

Die in dieser Arbeit berechneten Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) lassen sich insgesamt in die vorhandene Literatur einordnen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Studien häufig unterschiedliche Systemgrenzen verwenden. Während einige Arbeiten nur Emissionen berücksichtigen, die direkt auf dem Betrieb bzw. auf dem Feld entstehen („on-farm“), beziehen andere Autoren zusätzlich Emissionen aus der Herstellung von Betriebsmitteln wie Mineraldünger, Saatgut oder Pflanzenschutzmitteln ein („farm gate“).

Dadurch können die ausgewiesenen Werte je nach Abgrenzung deutlich variieren (Arbeitsgruppe BEK, 2021).

Für Argentinien ergeben sich in dieser Arbeit (ohne Humuskomponente) flächenbezogene Emissionen von 1.309,14 kg CO₂e/ha für Körnermais, 842,67 kg CO₂e/ha für Soja 1, 704,53 kg CO₂e/ha für Soja 2 und 919,31 kg CO₂e/ha für Weizen (eigene Berechnung, Tabelle 29). Für Körnermais liegt ein gut passender Referenzwert aus einer INTA-basierten LCA vor. Bongiovanni et al. (2025) berechneten die Carbon Footprint-Werte für Mais in Argentinien auf Basis des Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada (ReTAA) der Bolsa de Cereales de Buenos Aires für die Saison 2021/2022 und berichteten einen nationalen Durchschnitt von 1.248 kg CO₂eq/ha am Farm Gate (Bongiovanni et al., 2025). Die Größenordnung stimmt damit gut mit den in dieser Arbeit berechneten Werten überein.

Für Soja können die Ergebnisse direkt über produktspezifische Kennzahlen eingeordnet werden. Für Soja 1 werden 268,54 kg CO₂e/t Ware und für Soja 2 299,80 kg CO₂e/t Ware ausgewiesen (eigene Ergebnisse, Tabelle 29). Hilbert et al. (2025) berichten für die Kultivierungsstufe von Sojabohnen Emissionen von 186–266 kg CO₂eq je Tonne Sojabohne und weisen zugleich darauf hin, dass hohe Anteile der landwirtschaftlichen Emissionen mit Ernterückständen, der Produktion von Agrochemikalien und dem Kraftstoffeinsatz zusammenhängen (Hilbert et al., 2025). Vor diesem Hintergrund liegt der Soja-1-Wert dieser Arbeit im oberen Bereich bzw. leicht oberhalb der von Hilbert et al. genannten Spanne, was aufgrund unterschiedlicher Datengrundlagen, Emissionsfaktoren plausibel ist. (Hilbert et al., 2025).

Beim Weizen wird die Bedeutung der Systemgrenze besonders deutlich. In dieser Arbeit beträgt der Wert 919,31 kg CO₂e/ha bzw. 315,91 kg CO₂e/t Ware (eigene Rechnung, Tabelle 29). Viglizzo und Ricard (2023) untersuchen auf Basis von 70 kommerziellen Betrieben in Argentinien für das Jahr 2019 on-farm-Emissionen in Kohlenstoffeinheiten und geben für Weizen einen Mittelwert von 120,04 kg C/ha·a an (Viglizzo und Ricard, 2023). Umgerechnet entspricht dies rund 440 kg CO₂/ha·a. Die Differenz zum hier ausgewiesenen Wert ist im Kontext der Abgrenzung plausibel, da eine on-farm-Bilanz vorgelagerte Emissionen aus der Betriebsmittelbereitstellung nicht enthält (Viglizzo und Ricard, 2023).

Für Deutschland liegen die flächenbezogenen Emissionen (ohne Humus) insgesamt deutlich höher als in Argentinien. Dies ist im europäischen Kontext grundsätzlich plausibel, da intensive Ackerbausysteme häufig mit höheren N-Inputs und damit höheren

bodenbezogenen N₂O-Emissionen verbunden sind und zugleich Emissionen aus der Betriebsmittelherstellung relevant sind (Arbeitsgruppe BEK, 2021). Als Vergleichswerte für Getreide können Ergebnisse aus Finnland herangezogen werden. Rajaniemi, Mikkola und Ahokas (2011) analysieren Treibhausgasemissionen für Hafer, Gerste, Springweizen und Roggen in Finnland und vergleichen konventionelle, Direktsaat- und reduzierte Bodenbearbeitungsketten auf Basis von Literatur und nationaler Agrarstatistik (Rajaniemi, Mikkola und Ahokas, 2011). Die dort berichteten Größenordnungen stützen grundsätzlich die Einordnung, dass die in dieser Arbeit ausgewiesenen Werte für Winterweizen (2.682,14 kg CO₂e/ha; 349,69 kg CO₂e/t Ware) und Wintergerste (2.100,36 kg CO₂e/ha; 310,70 kg CO₂e/t Ware) im Bereich intensiver mitteleuropäischer bzw. nordeuropäischer Produktionssysteme liegen (eigene Berechnung, Tabelle 29; Rajaniemi et al. 2011).

Für Winterraps ergibt sich in dieser Arbeit ein flächenbezogener Wert von 2.607,58 kg CO₂e/ha und produktspezifisch 728,17 kg CO₂e/t Ware (eigene Rechnung, Tabelle 29). Fridrihsone et al. (2020) führen eine cradle-to-farm gate LCA für Winter- und Sommerraps in Lettland (Nordosteuropa) durch und zeigen, dass die produktspezifischen Emissionen je nach Annahmen und Praxisdaten deutlich variieren können (Fridrihsone et al., 2020). Damit ist die Einordnung sinnvoll, dass auch für Raps Literaturwerte eine erhebliche Spannweite aufweisen und Ergebnisse stark vom N-Management, Ertragsniveau und der Systemgrenze abhängen (Fridrihsone et al., 2020).

Bei der Zuckerrübe ergeben sich in dieser Arbeit flächenbezogene Emissionen von 3.423 kg CO₂e/ha, aufgrund des sehr hohen Ertrags entspricht das nur 45,53 kg CO₂e je Tonne Zuckerrüben (eigene Rechnung, Tabelle 29). Vergleichswerte liefert Jacobs et al. (2017): Die Autoren haben Zuckerrübe und Silomais für die Biogasproduktion auf Basis von drei Feldversuchen in Deutschland ausgewertet (Zeitraum 2011–2014) und berichten für die Zuckerrübe 2.551–2.852 kg CO₂e/ha (Jacobs et al., 2017). Außerdem zeigen sie, dass die Bilanz je nach Annahmen variiert: Wird eine Gutschrift für Gärreste berücksichtigt, sinken die bilanzierten Emissionen auf 84–97 % des Ausgangswerts (Jacobs et al., 2017). Diese Gutschrift ist einfach begründet: Enthält der Gärrest Stickstoff und ersetzt dadurch mineralischen Dünger, entfallen die Emissionen aus der energieintensiven Herstellung des Mineraldüngers. Deshalb kann bei gleichem N-Input die Gesamtemission je kg N mit Gärrest geringer ausfallen als mit Mineraldünger, auch wenn die feldseitigen N₂O-Emissionen je nach Standort und Ausbringung ähnlich bleiben können.

Damit wird deutlich, dass Unterschiede zwischen Studien nicht nur aus Erträgen und Bewirtschaftung entstehen, sondern auch daraus, ob solche Substitutionseffekte in der Bilanz als Gutschrift berücksichtigt werden (Jacobs et al., 2017).

Für die Körnererbse werden in dieser Arbeit 745,33 kg CO₂e/ha bzw. 243,46 kg CO₂e/t Ware ausgewiesen (eigene Rechnung, Tabelle 29). Knudsen et al. (2014) berichten für Erbse eine Bandbreite von 88–222 kg CO₂eq/t bezogen auf Trockenmasse (TM) und vergleichen fünf agroklimatische Zonen in Europa; die Ergebnisse wurden im Rahmen der 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA-Food 2014) vorgestellt (Knudsen et al., 2014). Für den direkten Vergleich ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse dieser Arbeit auf „Originalsubstanz“ basieren, während Knudsen et al. Trockenmasse verwenden. Eine Umrechnung auf TM würde den produktspezifischen Wert entsprechend erhöhen (Knudsen et al., 2014). Vor diesem Hintergrund liegt der hier ausgewiesene Wert nahe am oberen Bereich der in der Literatur berichteten Größenordnungen, wobei Abweichungen zusätzlich durch Systemgrenzen und Emissionsfaktoransätze erklärbar sind (Knudsen et al., 2014; Arbeitsgruppe BEK, 2021).

Insgesamt zeigt der Literaturvergleich, dass sich die kulturbezogenen Emissionsniveaus für Argentinien bei Mais und Soja gut in veröffentlichte LCA-Ergebnisse einordnen lassen (Bongiovanni et al., 2025; Hilbert et al., 2025). Beim Weizen wird zugleich sichtbar, dass Werte stark davon abhängen, ob ausschließlich betriebliche Emissionen (on-farm) oder zusätzlich vorgelagerte Emissionen berücksichtigt werden (Viglizzo und Ricard, 2023). Für Deutschland liegen die Getreidewerte in einer Größenordnung, die auch in europäischen Studien berichtet wird (Rajaniemi et al. 2011), während bei Zuckerrübe und Leguminosen Niveauunterschiede vor allem durch Datengrundlage, Bezugsgröße (Original- vs. Trockenmasse) und Bilanzannahmen erklärbar sind (Jacobs et al., 2017; Knudsen et al., 2014).

Die in dieser Arbeit berechneten EkfL-Werte der deutschen Fruchtfolgen sind im Mittel leicht positiv (41,93 €/ha·a für die ökonomische Fruchtfolge; 21,23 €/ha·a für die erweiterte Fruchtfolge) und lassen sich vor dem Hintergrund der in der Literatur dokumentierten breiten Ergebnisstreuung landwirtschaftlicher Betriebe plausibel einordnen. Das BMELH betont, dass Größenunterschiede der Betriebe sowie weitere Erfolgsfaktoren „zu großen Unterschieden der Ertragslage“ führen (BMELH, 2025, S. 16). Zugleich weist das Testbetriebsnetz für das Wirtschaftsjahr 2023/24 aus, dass 12,3 % der Haupterwerbsbetriebe Verluste verzeichneten und weitere 5,7 % weniger als 10.000 € Gewinn erzielten (BMELH, 2025, S. 16). Diese Verteilung zeigt, dass auch bei im Mittel positiven Ergebnissen ein relevanter Anteil der Betriebe nahe an der Gewinnschwelle wirtschaftet, sodass bereits moderate Änderungen in Erträgen, Preisen oder Kosten einzelner Fruchtfolgeglieder das Gesamtergebnis deutlich verschieben können (BMELH, 2025).

Ein weiteres Indiz für die begrenzte Ergebnisstabilität ist die hohe Bedeutung öffentlicher Zahlungen für das Einkommen. Das Thünen-Institut weist für den Durchschnitt der drei jüngsten Wirtschaftsjahre (2021/22 bis 2023/24) aus, dass Direktzahlungen über alle Betriebe rund 26 % des Einkommens ausmachen, und dass dieser Anteil in Ackerbau- und Futterbaubetrieben am höchsten ist (Thünen-Institut, 2025). Damit wird ein betriebswirtschaftliches Umfeld beschrieben, in dem die marktbasieren Ergebnisse häufig nicht ausreichen, um stabile Überschüsse zu garantieren, und in dem zusätzliche Systemanforderungen (z. B. Fruchtfolgeanpassungen) ohne ausreichende Kompensation das Ergebnis spürbar beeinflussen können (Thünen-Institut, 2025). Vor diesem Hintergrund sind die in dieser Arbeit ausgewiesenen, insgesamt niedrigen, aber positiven Fruchtfolge-Ekfl-Mittelwerte als realistische Abbildung eines volatilitätsgeprägten Ergebnisniveaus in deutschen Marktfrucht- bzw. Ackerbausystemen einzuordnen (BMELH, 2024; Thünen-Institut, 2025).

Die in dieser Arbeit ermittelte Abnahme der Ekfl durch die Integration der Körnererbse lässt sich mit der Literatur zur ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit von Körnerleguminosen erklären. Eine europäische Literaturübersicht zur Fruchtfolgegestaltung mit Leguminosen zeigt, dass Körnerleguminosen in vielen Studien gegenüber konkurrenzstarken Referenzkulturen ökonomische Nachteile aufweisen. Für Deutschland werden dabei Modellrechnungen für Brandenburg angeführt, nach denen ohne Berücksichtigung von Vorfruchtwerten ein Gross-Margin-Defizit von 300 bis 320 €/ha gegenüber alternativen Kulturen besteht. Als Hauptursache wird die häufig geringere Ertragsleistung der Leguminosen genannt, die in der Regel nicht durch höhere Preise kompensiert werden kann (Legume Hub, 2021). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich diese Ergebnisse auf Brandenburg beziehen, also auf einen ertragsschwachen Standortkontext mit sandigen Böden und geringer Standortproduktivität. Eine direkte Übertragung auf andere Regionen Deutschlands ist daher nur eingeschränkt möglich. Auf ertragsstärkeren Standorten können die Opportunitätskosten der Integration einer Leguminose höher ausfallen, insbesondere wenn dadurch wirtschaftlich starke Kulturen verdrängt werden (Legume Hub, 2021).

Vor diesem Hintergrund ist die Ausgestaltung der Öko-Regelung 2 (ÖR 2) relevant. Die Prämie für ÖR 2 wurde zum Antragsjahr 2024 von 45 auf 60 €/ha angehoben (BMELH, 2024). Zudem handelt es sich um eine gesamtbetriebliche Maßnahme: Als Berechnungsgrundlage gilt die gesamte Ackerfläche des Betriebes abzüglich der Brachen. Wird die ÖR 2 erfüllt, wird die Prämie auf die gesamte förderfähige Ackerfläche gezahlt (Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2026). Ökonomisch wirkt diese Zahlung damit wie eine Quersubvention innerhalb der Fruchtfolge. Bei einem

Leguminosenflächenanteil von etwa 20 %, also beispielsweise einem Leguminosenjahr in einer fünfgliedrigen Fruchtfolge, entspricht eine Prämie von 60 €/ha auf die Gesamtackerfläche rechnerisch rund 300 €/ha bezogen auf die Leguminosenfläche. Dieser Wert liegt zwar in der Größenordnung der für Brandenburg berichteten Defizite, ist jedoch nicht ohne Weiteres auf die vorliegende Untersuchung übertragbar (Legume Hub, 2021).

Hinzu kommt, dass in den von Legume Hub dargestellten Szenarien Weizen oder Mais durch eine Leguminose ersetzt wurden. In der hier untersuchten Fruchtfolge wurde dagegen die Zuckerrübe als besonders ökonomisch starkes Fruchtfolgeglied durch Körnererbse substituiert. Vor diesem Hintergrund ist nachvollziehbar, dass die EkfL trotz der zusätzlichen Prämienzahlung gesunken ist, da die Förderung den ökonomischen Nachteil der Substitution in diesem Fall nicht vollständig ausgleichen konnte (Legume Hub, 2021; BMLEH, 2024; Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2026).

Die in dieser Arbeit berechneten EkfL der argentinischen Fruchtfolgen (Double-Crop: -33,58 €/ha·a; Single-Crop: 12,57 €/ha·a) lassen sich gut in die offiziellen Margenberichte des argentinischen Landwirtschaftsministeriums einordnen. Das MAGyP veröffentlicht regelmäßig regionale Auswertungen („Márgenes y Resultados“) und weist dabei auch Netto-Margen (Margen Neto) für Pachtland (campo arrendado) aus (MAGyP, 2023; MAGyP, 2024; MAGyP, 2025). Diese Berichte zeigen, dass Nettoergebnisse auf Pachtflächen in vielen Regionen häufig negativ sind und zudem stark von Jahr zu Jahr schwanken. Die Häufigkeit negativer Netto-Margen der untersuchten Kulturen auf Pachtland wird für die Jahre 2023 bis 2025 in Tabelle 30 zusammengefasst.

Tabelle 30: Anzahl der Regionen mit negativen Netto-Margen auf gepachtetem Ackerland in Argentinien

Jahr (MaGyp, Juni)	Weizen	Soja 2	Soja 1	Körnermais
2023	9/16	8/16	11/16	2/16
2024	12/16	11/16	14/16	14/16
2025	12/16	10/16	10/16	14/16

Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Daten des MaGyp, 2023-2025

Das wird besonders deutlich, wenn betrachtet wird, in wie vielen der 16 Regionen die Netto-Marge auf Pachtland negativ ausfällt. Im Juni-Bericht 2025 waren die Margen Neto für Weizen in 12 von 16 Regionen negativ, für Soja 1 in 10 von 16, für Soja 2 ebenfalls in 10 von 16 und für Mais in 14 von 16 Regionen (MAGyP, 2025). Im Jahr 2024 war die Situation bei mehreren Kulturen noch angespannter: Weizen war ebenfalls in 12 Regionen negativ, Soja 1 in 14 Regionen, Soja 2 in 11 Regionen und Mais in 14 Regionen

(MAGyP, 2024). Im Jahr 2023 fällt das Bild dagegen gemischer aus: Weizen war in 9 Regionen negativ, Soja 1 in 11, Soja 2 in 8, während Mais nur in 2 Regionen eine negative Netto-Marge auf Pachtland aufwies (MAGyP, 2023). Über die drei Jahre wird damit ein typisches Muster sichtbar: Die Rentabilität ist regional sehr unterschiedlich und kann sich zwischen den Jahren deutlich verschieben (MAGyP, 2023; MAGyP, 2024; MAGyP, 2025).

Vor diesem Hintergrund sind die eigenen Simulationsergebnisse plausibel. Eine einzelkostenfreie Leistung der Fruchtfolge nahe Null oder leicht negativ, wie sie für das Double-Crop-System, auf gepachtetem Ackerland berechnet wurde, passt zu einem Umfeld, in dem Pachtflächen in einem großen Teil der Regionen und Jahre keine positiven Netto-Margen liefern (MAGyP, 2024; MAGyP, 2025). Gleichzeitig passt die leicht positive EkfL des Single-Crop-Systems in das Bild einer knappen Ergebnislage, die nicht in jedem Jahr und für jede Kultur durchgehend negativ ist; das zeigt sich besonders im Jahr 2023, in dem Mais auf Pachtland in den meisten Regionen noch positive Netto-Margen aufwies (MAGyP, 2023). Insgesamt spiegeln die EkfL-Ergebnisse dieser Arbeit damit eine wirtschaftliche Realität wider, die durch hohe regionale Streuung und ausgeprägte Jahr-zu-Jahr-Schwankungen der Nettoergebnisse geprägt ist (MAGyP, 2023; MAGyP, 2024; MAGyP, 2025).

Ein wesentlicher Erklärungsansatz für knappe oder negative Nettoergebnisse im argentinischen Ackerbau sind Exportabgaben („retenciones“), da sie den Netto-Erzeugerpreis und damit die Erlösbasis der Betriebe reduzieren. Die OECD beschreibt Exportsteuern als eine zentrale Markteingriffsform in Argentinien und als wesentlichen Kanal politisch induzierter Transfers von Produzenten an den Staat, wodurch sich ein negativer Preiseffekt für landwirtschaftliche Erzeuger ergibt (OECD, 2023).

Hinzu kommt, dass die Abgabenhöhe in den letzten Jahren mehrfach angepasst wurde. Der USDA-FAS dokumentiert eine dauerhafte Senkung der Exportsteuern Ende Juli 2025 (u. a. Soja von 33 % auf 26 %, Mais von 12 % auf 9,5 %), wodurch sich unmittelbar der beim Betrieb ankommende Preis und damit die Margensituation verbessern kann (USDA-FAS, 2025a). Im Dezember 2025 folgte eine weitere dauerhafte Reduktion, u. a. Soja auf 24 % sowie niedrigere Sätze für Weizen und Mais (USDA-FAS, 2025b). Diese Schritte deuten auf eine grundsätzliche export- und agrarfreundlichere Ausrichtung der Handelspolitik hin und können bei unveränderten Weltmarktpreisen den Nettoerlös der Produzenten erhöhen (USDA-FAS, 2025a; USDA-FAS, 2025b).

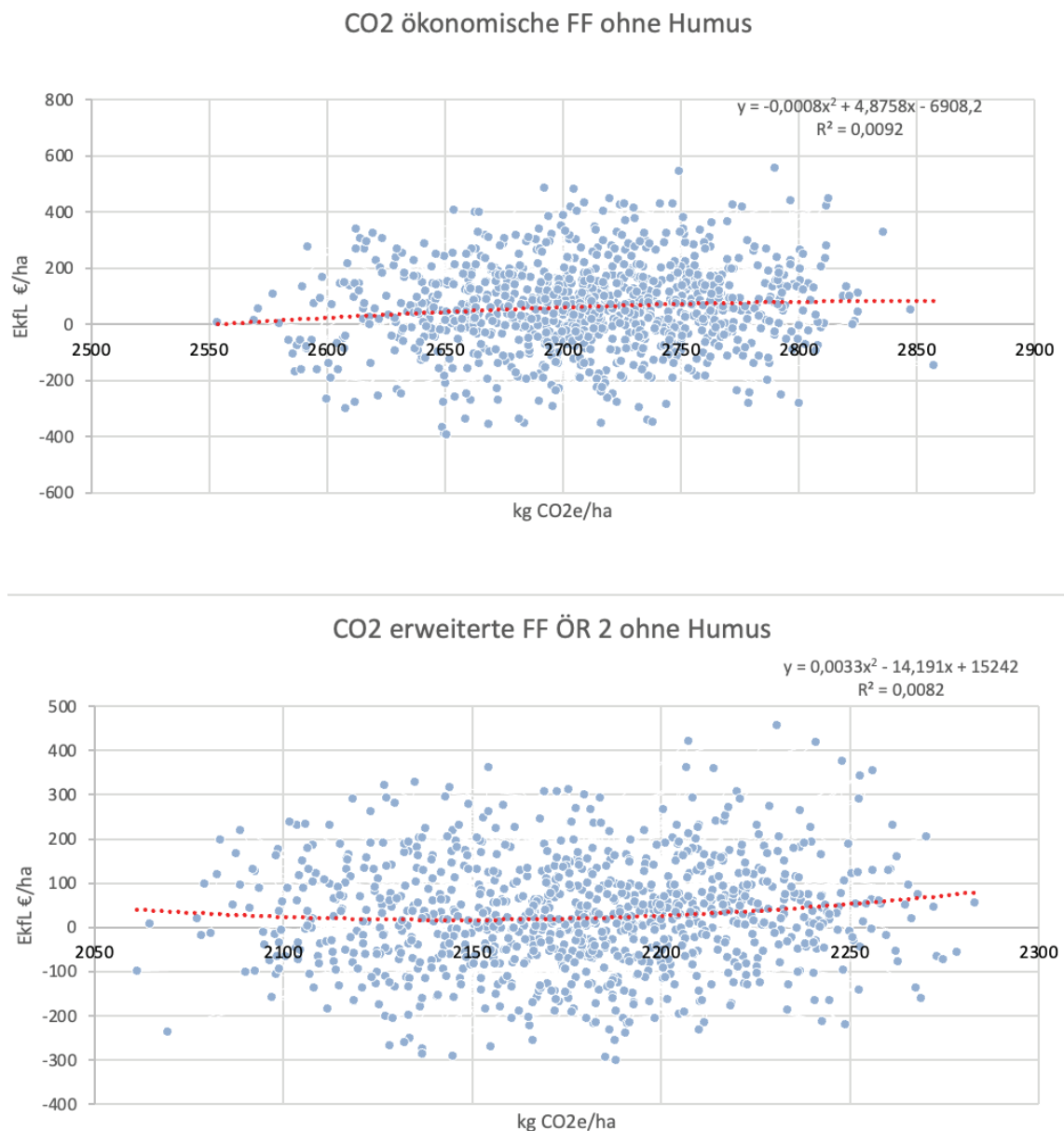
Für die betriebswirtschaftliche Ergebnislage, insbesondere auf Pachtflächen (campo arrendado), ist dabei entscheidend, dass Exportabgaben den Erlös pro Tonne senken, während große Teile der Kosten (z. B. Pacht, Arbeitsgänge, Betriebsmittel) weitgehend

unabhängig vom Abgabenniveau anfallen. Dadurch kann selbst bei durchschnittlichen Erträgen eine Situation entstehen, in der die Netto-Marge die Gewinnschwelle nicht erreicht. Vor diesem Hintergrund ist es plausibel, dass in den MAGyP-Berichten und auch in den eigenen Auswertungen für campo arrendado in vielen Regionen negative Netto-Margen auftreten (MAGyP, 2023; MAGyP, 2024; MAGyP, 2025; Tabelle 29). Gleichwohl bleibt die Abgabenpolitik ein Unsicherheitsfaktor: Berichte über zeitweise Maßnahmen und politische Anpassungen zeigen, dass die Rahmenbedingungen volatil sein können und daher nicht sicher prognostiziert werden kann, ob die zuletzt günstigere Richtung langfristig unverändert fortgeführt wird (Reuters, 2025).

5.2 Trade-off zwischen Ökonomie und Ökologie

Die Abbildung 15 zeigt den Zusammenhang zwischen den flächenbezogenen CO₂-Emissionen und der einzelkostenfreien Leistung (EkfL) für die ökonomische Fruchtfolge sowie die erweiterte Fruchtfolge nach Ökoregelung 2 ohne Berücksichtigung der Humusbilanz. Jeder Punkt repräsentiert einen Simulationsdurchlauf innerhalb der Monte-Carlo-Analyse. Die Trendlinie ist mit roten Punkten skizziert.

Abbildung 15: Trade-off zwischen CO₂ Emissionen und der wirtschaftlichen Leistung der deutschen Fruchtfolgesysteme



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, 2026

Unabhängig vom statistischen Zusammenhang zeigt sich zunächst, dass die erweiterte Fruchtfolge im Mittel geringere CO₂-Emissionen je Hektar aufweist als die ökonomische Fruchtfolge. Die Substitution der emissionsintensiven Zuckerrübe durch die Leguminose Körnererbse reduziert das durchschnittliche Emissionsniveau. Dies ist insbesondere auf den geringeren Bedarf an mineralischer Stickstoffdüngung sowie auf einen insgesamt niedrigeren Inputeinsatz im Leguminosenanbau zurückzuführen. Die Fruchtfolgeumstellung wirkt somit emissionsmindernd auf Systemebene.

Für beide deutschen Fruchtfolgesysteme zeigt sich nur ein sehr schwacher Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und EkfL. In der ökonomischen Fruchtfolge beträgt das Bestimmtheitsmaß (R²) 0,0092, in der erweiterten Fruchtfolge 0,0082. Damit lässt sich weniger als ein Prozent der Variation der einzelkostenfreien Leistung durch Veränderungen der CO₂-Emissionen erklären. Zwar ist in beiden Systemen eine leicht positive Tendenz erkennbar, die breite Streuung der Punkte verdeutlicht jedoch, dass die Wirtschaftlichkeit der deutschen Fruchtfolgen nur in sehr geringem Maße durch das Emissionsniveau bestimmt wird.

Dieses Ergebnis lässt sich strukturell erklären. Die einzelkostenfreie Leistung ist eine Fruchtfolgekennzahl, die aus mehreren Kulturen gebildet wird und neben den Erträgen insbesondere von den Marktpreisen der einzelnen Kulturen abhängt. In beiden deutschen Systemen umfasst die Fruchtfolge fünf Kulturen mit jeweils eigenen Preis- und Ertragschwankungen. Diese ökonomischen Einflussgrößen erhöhen die Streuung der EkfL erheblich, ohne das Emissionsniveau in vergleichbarem Umfang zu verändern. Während die CO₂-Emissionen stärker durch emissionsdominante Kulturen und inputbezogene Prozesse geprägt sind, wird die EkfL durch die Kombination aus Preisen, Erträgen und Kosten aller Fruchtfolgeglieder bestimmt. Dadurch entsteht eine statistische Entkopplung zwischen ökonomischer Performance und Emissionsniveau. In der erweiterten Fruchtfolge verstärkt zusätzlich die ertragsunabhängige Prämienzahlung diese Entkopplung, da sie die EkfL erhöht, ohne das Emissionsniveau zu beeinflussen.

Zur Bewertung der Variabilität der Simulationsergebnisse wurden für die einzelkostenfreie Leistung (EkfL) und die CO₂-Emissionen jeweils die höchsten und niedrigsten fünf Prozent der Simulationswerte ausgeschlossen und die verbleibenden 90 % der Ergebnisse betrachtet. Die daraus resultierenden Spannweiten sind in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Spannweite/Schwankungsbreite der einzelkostenfreien Leistung und der CO₂ Bilanzen der deutschen Fruchtfolgesysteme auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen

	EkfL ökonomische FF	CO₂ Bilanz ohne Humus	EkfL ökologische FF	CO₂ Bilanz ohne Humus
Minimal 51. Fall	-192,85	2618,76	-168,81	2106,55
Maximum 949. Fall	308,35	2792,47	231,39	2243,29
Spannweite (90%)	501,20	173,71	400,20	136,74

Quelle: eigene Berechnung, 2026

Die ökonomische Fruchtfolge weist mit 501,20 €/ha eine größere EkfL-Spannweite auf als die erweiterte Fruchtfolge mit 400,20 €/ha. Auch die Spannweite der CO₂-Emissionen ist in der ökonomischen Fruchtfolge höher (173,71 kg CO₂e/ha gegenüber 136,74 kg CO₂e/ha). Damit zeigt die ökonomische Fruchtfolge sowohl ökonomisch als auch emissionsbezogen eine größere Variabilität der Simulationsergebnisse. Ein wesentlicher Grund liegt in der unterschiedlichen Fruchtfolgestruktur und Förderwirkung. Die erweiterte Fruchtfolge erhält eine zusätzliche Prämienzahlung, die unabhängig vom Ertrag gewährt wird und niedrige EkfL-Werte in ertragsschwachen Jahren teilweise abfedert. Gleichzeitig fehlt in dieser Fruchtfolge mit der Zuckerrübe eine Kultur mit besonders hohen Erlös- und Intensitätsniveaus. In der ökonomischen Fruchtfolge können dagegen besonders ertragreiche Zuckerrübenjahre die EkfL stark erhöhen, während in schwachen Jahren keine zusätzliche Förderung stabilisierend wirkt. Auch die größere Spannweite der CO₂-Emissionen ist maßgeblich auf die Zuckerrübe zurückzuführen, da Schwankungen im Ertrag und Intensitätsniveau dieser Kultur die fruchtfolgebezogene Emissionsbilanz stärker beeinflussen.

Ergänzend lässt sich die Umstellung von der ökonomischen auf die erweiterte Fruchtfolge (ÖR 2) über eine Vermeidungskostenbetrachtung einordnen. Aus den mittleren Simulationsergebnissen (ohne Humusbilanz) ergibt sich durch die Umstellung eine Emissionsminderung von 507,96 kg CO₂e je Hektar und Jahr (2.687,67 gegenüber 2.179,71 kg CO₂e/ha, siehe Tabelle 27).

Trotz der ÖR-2-Prämie von 60 €/ha fällt die einzelkostenfreie Leistung (EkfL) in der erweiterten Fruchtfolge geringer aus (21,23 €/ha) als in der ökonomischen Fruchtfolge (41,93 €/ha), sodass ein verbleibender ökonomischer Nachteil von 20,70 €/ha besteht. Damit die Umstellung aus betriebswirtschaftlicher Sicht ergebnisneutral wird, müsste die Prämie unter den getroffenen Annahmen, um 20,70 €/ha erhöht werden. Das entspricht einer erforderlichen Gesamtprämie von 80,70 €/ha. Setzt man den verbleibenden Einkommensnachteil ins Verhältnis zur Emissionsminderung, ergeben sich implizite betriebliche Opportunitätskosten von rund 40,8 €/t CO₂e.

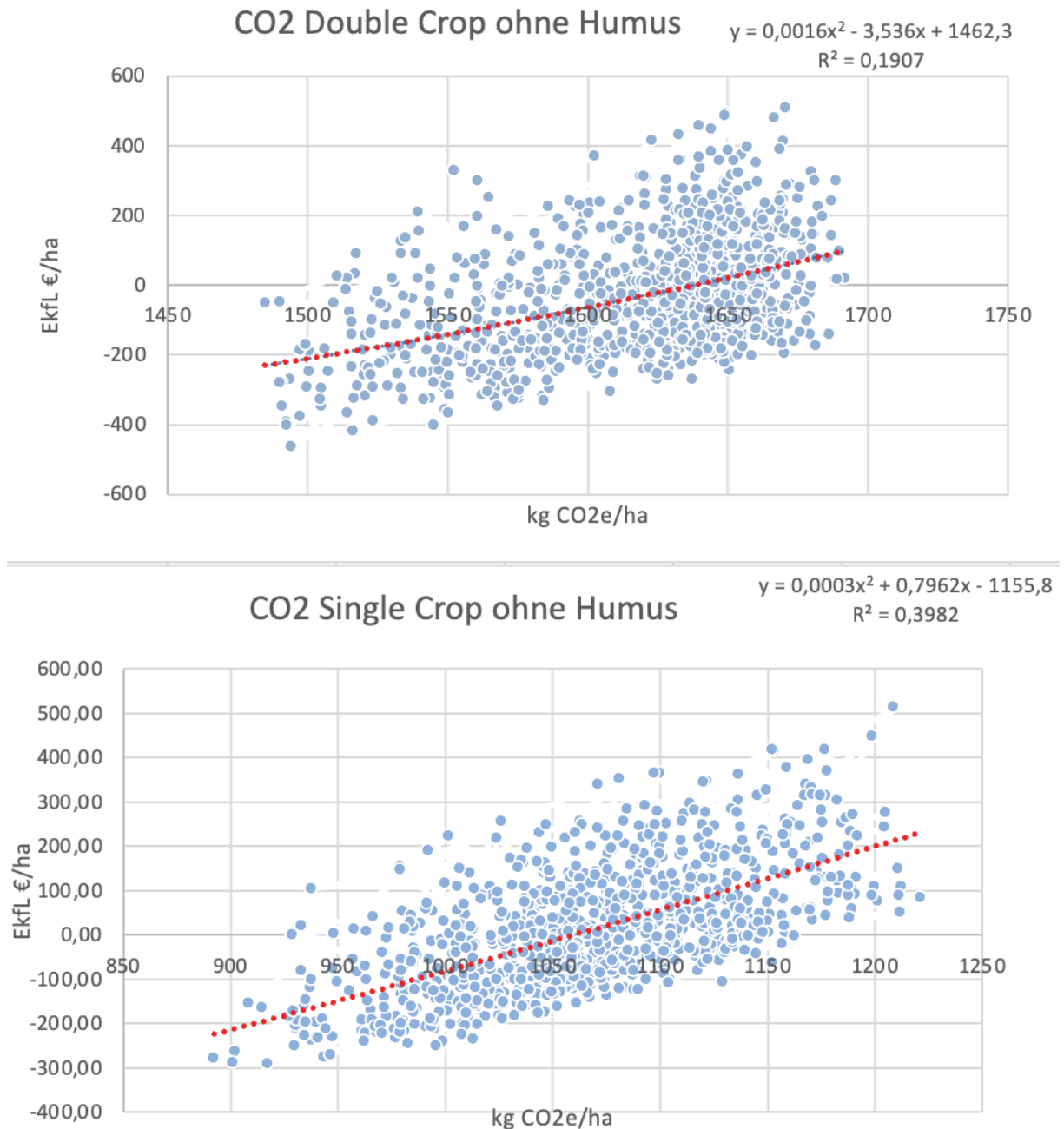
Die betriebswirtschaftliche Bewertung ist jedoch nicht mit der Perspektive der öffentlichen Förderung gleichzusetzen. Aus staatlicher Sicht ist vielmehr entscheidend, welcher Mitteleinsatz erforderlich ist, um eine Tonne CO₂e zu vermeiden. Bei einer Prämie von 60 €/ha und einer Emissionsminderung von 0,508 t CO₂e/ha ergibt sich ein öffentlicher Mitteleinsatz von rund 118 €/t CO₂e. Bei einer vollständig kompensierenden Prämie von 80,70 €/ha würde dieser Wert auf rund 159 €/t CO₂e steigen.

Damit zeigt sich ein Zielkonflikt zwischen betriebswirtschaftlicher und staatlicher Perspektive. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die Förderung weiterhin zu gering, da die Umstellung trotz Prämie mit einem Einkommensnachteil verbunden bleibt. Für eine einkommensneutrale Umstellung müsste die Prämie daher entsprechend erhöht werden. Aus staatlicher Sicht erscheint die Förderung hingegen bereits hoch, da der Mitteleinsatz von rund 118 €/t CO₂e deutlich über dem CO₂-Preissignal von 55 €/t CO₂ im nationalen Emissionshandel liegt. Wahrscheinlich wurden auch andere positive Effekte einer erweiterten Fruchtfolge, wie die positive Wirkung auf die Biodiversität einbezogen.

Besonders aufschlussreich wird die Einordnung im Vergleich mit anderen förderfähigen Maßnahmen der Eco-Schemes. Für die Öko-Regelung 4, die die Extensivierung des Dauergrünlands betrifft, weist das Umweltbundesamt eine Minderungswirkung von 0,3 t CO₂-Äquivalent je Hektar aus (Umweltbundesamt, 2023). Die Prämie beträgt im Antragsjahr 2026 100 € je Hektar Grünland. Daraus ergeben sich staatliche Kosten von rund 333 € je eingesparter Tonne CO₂e. Im Vergleich dazu wird deutlich, dass die Öko-Regelung 2 gemessen am Mitteleinsatz pro vermiedener Tonne CO₂e effizienter ist.

Die Abbildung 16 zeigt den Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und einzelkostenfreier Leistung für die argentinischen Fruchtfolgesysteme Double Crop (Weizen–Soja 2) und Single Crop (Soja 1–Körnermais) ohne Berücksichtigung der Humusbilanz. Jeder Punkt repräsentiert einen Simulationsdurchlauf der Monte-Carlo-Analyse.

Abbildung 16: Trade-off zwischen CO₂ Emissionen und der wirtschaftlichen Leistung der argentinischen Fruchtfolgesysteme



Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung, 2026

Für beide argentinischen Fruchtfolgesysteme ist ein positiver Zusammenhang zwischen Emissionsniveau und EkfL erkennbar. Mit steigenden CO₂-Emissionen je Hektar nehmen die einzelkostenfreien Leistungen tendenziell zu. Der Zusammenhang ist jedoch im Single-Crop-System deutlich stärker ausgeprägt als im Double-Crop-System. Das Bestimmtheitsmaß beträgt im Single-Crop-System 0,3982 und im Double-Crop-System 0,1907. Damit lassen sich rund 40 % der Streuung der EkfL im Single-Crop-System durch

Veränderungen des Emissionsniveaus erklären, während dieser Anteil im Double-Crop-System bei rund 19 % liegt.

Die stärkere Kopplung im Single-Crop-System ist vor allem auf die hohe Emissionselastizität des Körnermais zurückzuführen. Ertragsschwankungen führen zu deutlichen Veränderungen bei Erntemengen, Transportaufwand und Dieserverbrauch. Zusätzlich entstehen bei einem steigenden Ertrag des Körnermais mehr Ernte und Wurzelrückstände. Diese Ernte (Stroh) und Wurzelrückstände führen zu Lachgasemissionen (N₂O), welche nach dem BEK in CO₂-Emissionen umgerechnet werden.

Da höhere Erträge zugleich höhere Erlöse generieren, entwickeln sich Emissionen und einzelkostenfreie Leistung häufig in dieselbe Richtung. Im Double-Crop-System fällt diese Kopplung schwächer aus. Zwar reagieren auch hier Emissionen auf Ertragssteigerungen, jedoch ist die Emissionsdynamik insbesondere im Weizen geringer ausgeprägt. Zudem entstehen durch die doppelte Nutzung zusätzliche Arbeitsgänge und Grundaufwendungen, die das Emissionsniveau erhöhen, ohne proportional zur einzelkostenfreien Leistung beizutragen.

Die Analyse der Spannweiten bestätigt diese strukturellen Unterschiede. Unter Ausschluss, der jeweils höchsten und niedrigsten fünf Prozent der Simulationen ergibt, sich im Double-Crop-System eine ökonomische Spannweite von 526,63 €/ha, während die CO₂-Emissionen innerhalb von 143,02 kg CO₂e/ha variieren. Im Single-Crop-System ist die ökonomische Spannweite mit 439,40 €/ha geringer und die ökologische Spannweite mit 203,03 kg CO₂e/ha deutlich höher.

Tabelle 32: Spannweite/Schwankungsbreite der einzelkostenfreien Leistung und der CO₂ Bilanzen der argentinischen Fruchtfolgesysteme auf Basis der 1000 Monte-Carlo-Simulationen

	EkfL Double Crop FF	CO2 Double Crop	EkfL Single Crop	CO2 Single Crop
min. 51 Fall	-273,66	1527,62	-190,73	967,16
max. 949 Fall	252,97	1670,64	248,68	1170,19
Spannweite 90%	526,63	143,02	439,4	203,03

Quelle: eigene Berechnung, 2026

Im Vergleich zu Deutschland lassen sich die Unterschiede zusätzlich durch die agrarpolitischen und strukturellen Rahmenbedingungen erklären. In Deutschland wirken flächengebundene und ertragsunabhängige Einkommensbestandteile

einkommensstabilisierend, ohne das Emissionsniveau zu beeinflussen. Dadurch wird die einzelkostenfreie Leistung teilweise von der Produktionsintensität entkoppelt.

Bei dem Vergleich der Systeme zeigt sich zudem, dass die argentinischen Produktionssysteme zwar geringere flächenbezogene Treibhausgasemissionen aufweisen als die deutschen Fruchtfolgen, ein Anstieg der einzelkostenfreien Leistung und damit der Produktionsintensität in Argentinien jedoch mit einem vergleichsweise deutlichen Anstieg der CO₂-Emissionen verbunden ist. In Deutschland hingegen geht eine Steigerung der EkfL nur mit einem geringen Anstieg der Emissionen einher.

Aus klimapolitischer Perspektive ist der Import der betrachteten Produkte daher aus rein emissionsbezogener Sicht nicht grundsätzlich nachteilig. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass eine weitere Intensivierung der argentinischen Produktionssysteme mit einem deutlichen Emissionsanstieg verbunden wäre. Handelsabkommen sollten daher keine zusätzlichen Anreize zur weiteren Intensivierung emissionssensitiver Produktionssysteme setzen. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass in Argentinien ein stärker produktionsgetriebenes Einkommensmodell vorliegt, während das politisch gestützte und stärker diversifizierte Produktionssystem in Deutschland zu einer strukturellen Entkopplung zwischen ökonomischer Leistung und CO₂-Emissionen führt.

5.3 Schlussfolgerung und Empfehlung

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich landwirtschaftliche Produktionssysteme nicht sinnvoll über einen einzelnen Nachhaltigkeitsindikator bewerten lassen. Zwar weisen die untersuchten Fruchtfolgen in Argentinien geringere Treibhausgasemissionen je Hektar und teilweise auch je Produkteinheit auf als die deutschen Vergleichssysteme. Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, dass sie insgesamt nachhaltiger sind. Dem stehen insbesondere höhere Wirkstoffmengen im Pflanzenschutz sowie ein regulatorischer Rahmen gegenüber, der den Einsatz von Wirkstoffen erlaubt, die in der Europäischen Union nicht mehr zugelassen sind. Eine allein auf die CO₂-Bilanz gestützte Einordnung würde deshalb zu kurz greifen.

Auch innerhalb der deutschen Fruchtfolgesysteme wird deutlich, dass ökologische und ökonomische Zielgrößen nicht automatisch in dieselbe Richtung weisen. Die Integration einer Leguminose im Rahmen der Öko-Regelung 2 senkt die Treibhausgasemissionen, geht unter den hier getroffenen Annahmen jedoch mit einer geringeren einzelkostenfreien Leistung einher. Die Förderung kann diesen Nachteil abmildern, gleicht ihn aber nicht vollständig aus. Damit wird sichtbar, dass Umweltwirksamkeit auf betrieblicher Ebene nicht automatisch zu wirtschaftlicher Attraktivität führt. Für die landwirtschaftliche Praxis ist

das ein zentraler Punkt, denn eine Maßnahme wird auf Dauer nur dann breit angenommen, wenn sie nicht dauerhaft mit Einkommenseinbußen verbunden ist.

Gleichzeitig hängt die Bewertung einer solchen Maßnahme stark davon ab, aus welcher Perspektive sie betrachtet wird. Für den einzelnen Betrieb erscheint die Förderung weiterhin eher knapp bemessen, weil die Umstellung nicht vollständig einkommensneutral erfolgt. Aus Sicht des Staates fällt das Urteil anders aus, da der Mitteleinsatz pro vermiedener Tonne CO₂e bereits hoch ist. Darin zeigt sich ein grundlegendes Spannungsfeld agrarpolitischer Steuerung: Was aus umweltpolitischer Sicht wünschenswert ist, muss nicht automatisch betriebswirtschaftlich attraktiv sein, während eine aus Betriebssicht angemessene Förderung aus staatlicher Perspektive bereits ineffizient wirken kann.

Der Vergleich mit anderen Eco-Schemes verdeutlicht zudem, dass sich die Klimawirkung der Maßnahmen bei sehr unterschiedlichem Mitteleinsatz realisieren lässt. In der vorliegenden Gegenüberstellung schneidet die Öko-Regelung 2 im Verhältnis von Förderung zu vermiedenen Emissionen günstiger ab als die Öko-Regelung 4. Daraus lässt sich ableiten, dass die Ausgestaltung der Förderinstrumente künftig noch stärker an ihrer tatsächlichen Umweltwirkung und ihrer Effizienz ausgerichtet werden sollte. Gleichzeitig wäre es nicht sinnvoll, solche Maßnahmen ausschließlich über Vermeidungskosten zu bewerten, weil Agrarumweltmaßnahmen in der Regel mehrere Funktionen zugleich erfüllen und sich ihr Nutzen nicht allein in Treibhausgaswerten ausdrücken lässt.

Für die Einordnung des EU-Mercosur-Abkommens bedeutet dies, dass pauschale Annahmen über eine grundsätzlich klimaschädlichere Produktion in den Mercosur-Staaten durch die Ergebnisse dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Für die hier untersuchten Fruchtfolgesysteme ergeben sich keine Hinweise auf Carbon Leakage. Dennoch zeigt der Vergleich ebenso klar, dass Klimawirkung allein kein ausreichendes Kriterium für die Nachhaltigkeitsbewertung internationaler Agrarproduktion ist. Unterschiede im Pflanzenschutzsinsatz, bei den zugelassenen Wirkstoffen und bei den regulatorischen Standards müssen in eine solche Bewertung ebenso einbezogen werden.

Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, Fördermaßnahmen im Rahmen der GAP nicht nur flächenbezogen zu honorieren, sondern ihre konkrete Umweltwirkung stärker in den Mittelpunkt zu stellen. Ebenso wird deutlich, dass der Anbau von Leguminosen langfristig kaum allein über pauschale Prämien stabilisiert werden kann, solange

betriebliche Nachteile in der Fruchtfolge bestehen bleiben. Wenn solche Kulturen dauerhaft etabliert werden sollen, braucht es zusätzlich Rahmenbedingungen, die ihre Wirtschaftlichkeit verbessern. Auch für zukünftige internationale Vergleiche landwirtschaftlicher Produktionssysteme ergibt sich ein klarer Bedarf an umfassenderen Bewertungsansätzen, die neben Treibhausgasemissionen auch Pflanzenschutz, Bodenschutz und weitere Umweltwirkungen systematisch berücksichtigen. Darüber hinaus bleibt die Frage offen, wie sich Humusveränderungen und Direktsaatsysteme zwischen unterschiedlichen Standorten methodisch belastbar vergleichen lassen. Gerade hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Insgesamt wird deutlich, dass weder die deutschen noch die argentinischen Produktionssysteme pauschal als überlegen eingeordnet werden können. Je nach betrachteter Zielgröße treten unterschiedliche Stärken und Schwächen hervor. Die zentrale Schlussfolgerung dieser Arbeit liegt daher weniger in der eindeutigen Bevorzugung eines Systems als vielmehr in der Erkenntnis, dass Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft immer das Ergebnis eines Spannungsverhältnisses zwischen ökologischen, ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen ist. Eine tragfähige agrarpolitische Bewertung muss diesem Umstand Rechnung tragen und darf sich nicht auf eindimensionale Maßstäbe beschränken.

6. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, Fruchtfolgesysteme in Deutschland und Argentinien im Kontext des EU-Mercosur-Abkommens hinsichtlich ihrer ökonomischen und ökologischen Wirkungen zu vergleichen. Im Mittelpunkt standen dabei die Treibhausgasemissionen, der Pflanzenschutzinsatz und die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Systeme.

Die Ergebnisse zeigen, dass die argentinischen Fruchtfolgen sowohl flächenbezogen als auch produktbezogen geringere CO₂-Emissionen aufweisen als die untersuchten deutschen Fruchtfolgen. Das bedeutet, dass in Argentinien sowohl pro Hektar als auch pro erzeugte Einheit weniger Emissionen entstehen. Vor dem Hintergrund der häufig geäußerten Befürchtung, dass durch das EU-Mercosur-Abkommen Emissionen in klimaschädlichere Produktionssysteme verlagert werden könnten, lässt sich auf Basis dieser Arbeit daher kein Carbon Leakage feststellen.

Gleichzeitig zeigt die Untersuchung aber auch, dass eine rein klimabezogene Betrachtung zu kurz greift. Denn obwohl die argentinischen Fruchtfolgen niedrigere CO₂-Emissionen aufweisen, werden dort höhere Mengen an Pflanzenschutzmitteln eingesetzt. Hinzu kommt, dass in Argentinien mehr Wirkstoffe zugelassen sind, die in der Europäischen Union aufgrund ihrer Risiken für Umwelt oder Gesundheit nicht mehr erlaubt sind. Daraus wird deutlich, dass geringere Treibhausgasemissionen nicht automatisch bedeuten, dass ein Produktionssystem insgesamt umweltfreundlicher ist.

Auch in ökonomischer Hinsicht wurden Unterschiede sichtbar. Die deutschen Fruchtfolgen erzielten im Durchschnitt höhere einzelkostenfreie Leistungen als die argentinischen Systeme. Gleichzeitig wurde deutlich, dass sich ökologische und ökonomische Vorteile nicht immer in derselben Fruchtfolge finden. Damit bestätigt die Arbeit, dass zwischen Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkung häufig Zielkonflikte bestehen.

Insgesamt zeigt die Untersuchung, dass die Bewertung landwirtschaftlicher Produktionssysteme im Zusammenhang mit dem EU-Mercosur-Abkommen differenziert erfolgen muss. Bezogen auf die Emissionen sind die argentinischen Fruchtfolgen in dieser Arbeit überlegen, sodass kein Carbon Leakage festgestellt werden kann. Gleichzeitig weisen sie jedoch Nachteile beim Pflanzenschutzinsatz auf. Die Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Produktion kann daher nicht allein über die CO₂-Bilanz bewertet werden, sondern muss immer auch weitere Umweltwirkungen einbeziehen.

7. Literaturverzeichnis

Aapresid (2020): *Evolución de siembra directa en Argentina: Campaña 2019/2020*.

Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. Verfügbar unter:

<https://www.aapresid.org.ar/archivos/evolucion-siembra-directa2019-2020.pdf> [Zugriff: 20. Februar 2026].

Agrarheute (o. J.): *Stickstoffdünger*. Verfügbar unter:

<https://markt.agrarheute.com/duengemittel-4/stickstoffduenger-20> (Zugriff am: 10.03.2026).

Altina (2020): *Informe mensual N° 28: Fertilización*. Verfügbar unter:

https://www.altina.com.ar/v2/wp-content/uploads/2020/02/informemensualn28_fertilizacion.pdf (Zugriff am: 20.02.2026).

Aparicio, V. C., De Gerónimo, E., Marino, D., Primost, J., Carriquiriborde, P. & Costa, J. L. (2013): 'Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins', *Science of the Total Environment*, 465–466, S. 234–243. Verfügbar unter:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653513008837> [Zugriff: 20. Februar 2026].

Arbeitsgruppe BEK (2021): *Berechnungsstandard für einzelbetriebliche Klimabilanzen (BEK) in der Landwirtschaft*. 2. Aufl. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Verfügbar unter: <https://www.ktbl.de/themen/bek> (Zugriff: 12.03.2026).

Bhandari, D., Bilandžija, N., Krička, T., Zdunić, Z., Ghimire, S., Reinhardt Piskáčková, T. und Bilandžija, D. (2025): 'Soil Respiration in Maize, Wheat, and Barley Across a Growing Season: Findings from Croatia's Continental Region', *Sustainability*, 17(9), 4207.

Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/9/4207> (Zugriff am: 10.03.2026).

BLE – Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (o. J.): *Erbsen und Ackerbohnen anbauen und verwerten*. Verfügbar unter:

https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/Eiweisspflanzenstrategie/Erbsen-Ackerbohnen-Anbau.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (Zugriff: 11.03.2026).

BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2024): *Anpassungen der Öko-Regelungen ab 2024*. Verfügbar unter:

<https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/direktzahlung/oeko-regelungen.html> (Zugriff am: 20.02.2026).

BMEL-Statistik (o. J.): *Getreide*. Verfügbar unter: <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/bodennutzung-und-pflanzliche-erzeugung/getreide> (Zugriff am: 10.03.2026).

BMLEH – Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (2024): *Anpassungen der Öko-Regelungen ab 2024*. Verfügbar unter: https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/Landwirtschaft/EU-Agrarpolitik-Foerderung/anpassungen-oekoregelungen-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (Zugriff: 12.03.2026).

BMLEH – Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (2025): *Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe 2023/24*. Verfügbar unter: <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/0111001-2024.pdf> (Zugriff: 12.03.2026).

BMLEH Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (2025a): *Öko-Regelungen – Direktzahlung*. Verfügbar unter: <https://www.bmleh.de/DE/themen/landwirtschaft/eu-agrarpolitik-und-foerderung/direktzahlung/oeko-regelungen.html> (Zugriff: 16.03.2026).

Bolsa de Cereales (2025): *RETAA Mensual N° 82: Fertilización 2023/24*. Buenos Aires: Bolsa de Cereales. Verfügbar unter: <https://www.bolsadecereales.com/imagenes/retaa/2025-01/271-mensualn%C2%B082-fertilizacion23.24.pdf> (Zugriff am: 20.02.2026).

Bongiovanni, R., Tuninetti, L., Vigneau, P. und Gayo, S. (2025): 'Carbon footprint of maize produced in Argentina', *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 51(1), S. 54–69. Verfügbar unter: <https://ria.inta.gob.ar/wp-content/uploads/2025/04/Carbon-footprint-of-maize-produced-in-Argentina.pdf> (Zugriff am: 05.03.2026).

Burachik, M. (2010): 'Experience from use of GMOs in Argentinian agriculture, economy and environment', *New Biotechnology*, 27(5), S. 588–592. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20580682/> [Zugriff: 18. Februar 2026].

Bundesrepublik Deutschland (2017): *Anlage 7 zur Düngeverordnung (DüV): Nährstoffgehalte pflanzlicher Erzeugnisse*. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/anlage_7.html (Zugriff: 11.03.2026).

Bundesrepublik Deutschland (2017): *Düngeverordnung (DüV)*. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/D%C3%BCV.pdf (Zugriff: 11.03.2026).

BZL – Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2024): *Warum die einen pflügen und die anderen nicht*. 11.10.2024. Verfügbar unter: <https://www.landwirtschaft.de/tier-und-pflanze/pflanze/nutzpflanzen-allgemein/warum-die-einen-pfluegen-und-die-anderen-nicht> (Zugriff am: 09.01.2026).

Centro de Estudios sobre Tecnologías Apropriadas de la Argentina (CETAAR) und International Pollutants Elimination Network (IPEN) (2021): *Informe sobre la situación de los plaguicidas altamente peligrosos en Argentina*. Verfügbar unter: https://ipen.org/sites/default/files/documents/cetaar_anexo_d_informe_pap_15_junio_2021.pdf (Zugriff: 12.03.2026).

Central Intelligence Agency (CIA) (2015): *Argentina Physiography*. Verfügbar unter: <https://www.cia.gov/resources/map/argentina/> Zugriff: 16.03.2026).

Court of Justice of the European Union (2007): *Judgment of the Court of First Instance of 11 July 2007, T-229/04 (Sweden v Commission) – Paraquat*. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:62004TJ0229> (Zugriff am: 25.02.2026).

de Groot, G. S., Morales, C., Aldea-Sanchez, P., Aizen, M., Antúnez, K., Arbulo, N. et al. (2026): 'Global inequities in pesticide legislation: nearly half of pesticides approved in major crops in Latin America are not allowed in the European Union', *Proceedings of the Royal Society B*, 293, 20250267. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1098/rspb.2025.0267> (Zugriff: 12.03.2026).

Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A. & Li, H. (2010): 'Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits', *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(1), S. 1–25. Verfügbar unter: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/223> [Zugriff: 20. Februar 2026].

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2023): *Klimastatusbericht 2023*. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb_2023.pdf (Zugriff: 11.03.2026).

European Commission (2011): *Commission Implementing Regulation (EU) No 1372/2011 concerning the non-approval of acetochlor*. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32011R1372> (Zugriff am: 25.02.2026).

European Commission (2004): *Commission Decision 2004/248/EC concerning the non-inclusion of atrazine in Annex I to Council Directive 91/414/EEC*. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32004D0248> (Zugriff am: 25.02.2026).

European Commission / Knowledge for Policy (2024): *Environment and the common agricultural policy – briefing*. Verfügbar unter: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/environment-common-agricultural-policy-briefing_en (Zugriff am: 10.03.2026).

European Parliament (2024): *European Parliament resolution of 18 January 2024 on pesticide residues and health*. Verfügbar unter: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2024-0006_EN.html (Zugriff am: 25.02.2026).

Europäische Kommission (2020): *Commission Implementing Regulation (EU) 2020/18 of 10 January 2020 concerning the non-renewal of the approval of the active substance chlorpyrifos*. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2020/18/oj/eng (Zugriff: 12.03.2026).

Europäische Kommission (2024a): *EU-Mercosur agreement*. Verfügbar unter: https://policy.trade.ec.europa.eu/eu-trade-relationships-country-and-region/countries-and-regions/mercosur/eu-mercosur-agreement_en (Zugriff am: 10.03.2026).

Europäische Kommission (2024b): *Factsheet: EU-Mercosur partnership agreement*. Verfügbar unter: https://policy.trade.ec.europa.eu/eu-trade-relationships-country-and-region/countries-and-regions/mercosur/eu-mercosur-agreement/factsheet-eu-mercosur-partnership-agreement_en (Zugriff am: 10.03.2026).

Europäische Kommission (o. J.-a): *Conditionality*. Verfügbar unter: https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/income-support/conditionality_en (Zugriff am: 10.03.2026).

Europäische Kommission (o. J.-b): *CAP Strategic Plans*. Verfügbar unter: https://agriculture.ec.europa.eu/cap-my-country/cap-strategic-plans_en (Zugriff am: 10.03.2026).

Europäische Kommission (o. J.): *Chlorpyrifos & Chlorpyrifos-methyl*. Verfügbar unter: https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/approval-active-substances-safeners-and-synergists/renewal-approval/chlorpyrifos-chlorpyrifos-methyl_en (Zugriff: 12.03.2026).

Europäisches Parlament (2024): *European Parliament resolution of 18 September 2024 on the draft Commission regulation amending Annexes II, III and V to Regulation (EC) No 396/2005 as regards maximum residue levels for benomyl, carbendazim and thiophanate-methyl in or on certain products*. Verfügbar unter: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-10-2024-0006_EN.html (Zugriff: 12.03.2026).

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015): *AQUASTAT Country Profile – Argentina*. Rome: FAO. Verfügbar unter: <https://www.fao.org/4/y5210s/y5210s05.htm> (Zugriff am: 18.02.2026).

FiBL – Forschungsinstitut für biologischen Landbau (2025): *Reduzierte Bodenbearbeitung – Schutz der Bodenfunktionen für eine bessere Klimaresilienz. Umsetzung im biologischen Landbau*. Merkblatt 2025, Nr. 1652. Verfügbar unter: <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1652-bodenbearbeitung.pdf> (Zugriff am: 09.01.2026).

Fridrihsone, A., Romagnoli, F., Kirsanovs, V. und Cabulis, U. (2020): 'Environmental Life Cycle Assessment of Rapeseed and Rapeseed Oil Produced in Northern Europe: A Latvian Case Study', *Sustainability*, 12(14), 5699. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5699> (Zugriff am: 05.03.2026). DOI: <https://doi.org/10.3390/su12145699>

Grieger, G. (2025): *EU-Mercosur Partnership Agreement: Trade pillar*. European Parliamentary Research Service (EPRS). Verfügbar unter: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/769537/EPRS_BRI%282025%29769537_EN.pdf (Zugriff am: 10.03.2026).

Hilbert, J. A., Camardelli, A. und Ponieman, K. (2025): 'Greenhouse gas emissions from Argentinian soybean products', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 19, S. 2105–2114. Verfügbar unter: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbb.2816> (Zugriff am: 05.03.2026).

Holka, M. (2020): 'Assessment of carbon footprint and life cycle costs of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) production in different soil tillage systems', *Applied Ecology and*

Environmental Research, 18(4), S. 5841–5855. Verfügbar unter:
https://www.aloki.hu/pdf/1804_58415855.pdf (Zugriff am: 10.03.2026).

Hough, G. (2022): *Ordenanzas municipales que regulan la aplicación de pesticidas de uso agropecuario: argumentos para fundamentar la reducción de su uso*. UCCSNAL, 14.12.2022. Verfügbar unter: <https://uccsnal.org/ordenanzas-municipales-que-regulan-la-aplicacion-de-pesticidas-de-uso-agropecuario-argumentos-para-fundamentar-la-reduccion-de-su-uso/> (Zugriff am: 10.03.2026).

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Verfügbar unter:
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr.pdf (Zugriff am: 10.03.2026).

Jacobs, A., Auburger, S., Bahrs, E. und Brauer-Siebrecht, W. (2017): ‘Greenhouse gas emission of biogas production out of silage maize and sugar beet – An assessment along the entire production chain’, *Applied Energy*, 190, S. 114–121. Verfügbar unter:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916318980> (Zugriff am: 05.03.2026).

Julius Kühn-Institut (JKI) (2023): *Pflanzenschutz-Anwendungsprogramm für Ackerbau und Grünland (PAPA), Datenstand 2023*. Verfügbar unter: <https://papa.julius-kuehn.de/index.php?menuid=33> (Zugriff am: 10.03.2026).

Kassam, A., Friedrich, T. & Derpsch, R. (2019): ‘Global spread of conservation agriculture’, *International Journal of Environmental Studies*, 76(1), S. 29–51. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927> [Zugriff: 20. Februar 2026].

KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (2015): *Bodenbearbeitung und Bestellung – Definition von Bodenbearbeitungs- und Bestellsystemen*. Verfügbar unter:
https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Pflanzenbau/Bodenbearbeitung/Bodenbearbeitung_und_Bestellung_2015.pdf (Zugriff am: 09.01.2026).

KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (o. J.): *Berechnungsparameter für einzelbetriebliche Klimabilanzen*. Verfügbar unter:
<https://www.ktbl.de/webanwendungen/bek-parameter> (Zugriff am: 10.03.2026).

KTBL – Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (o. J.): *Standarddeckungsbeiträge und Daten für die Betriebsplanung*. Verfügbar unter:
<https://daten.ktbl.de/sdb/welcome.do> (Zugriff am: 10.03.2026).

Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung (LELF) (2021): *Datensammlung für die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg*. 8., überarbeitete Aufl. Verfügbar unter: <https://lelf.brandenburg.de/lelf/de/service/veroeffentlichungen/details/~04-10-2021-datensammlung-fuer-die-betriebswirtschaftliche-bewertung-landwirtschaftlicher-produktions> (Zugriff am: 10.03.2026).

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2026): *Öko-Regelung 2 – Vielfältige Kulturen im Ackerbau*. Verfügbar unter: https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/41669_%C3%96ko-Regelung_2_-_Vielfaeltige_Kulturen_im_Ackerbau (Zugriff: 12.03.2026).

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2024): *Körnererbsen LSV 2024*. Verfügbar unter: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/tabellen-erbsen-sv-2024.pdf> (Zugriff: 12.03.2026).

Legume Hub (2021): *Crop rotations with and without legumes: a review*. Verfügbar unter: <https://www.legumehub.eu/wp-content/uploads/2021/12/Legumes-Translated-Practice-Guide-1-1-2.pdf> (Zugriff: 12.03.2026).

LfL – Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (o. J.): *Humusbilanzierung*. Verfügbar unter: <https://www.lfl.bayern.de/iab/boden/031164/> (Zugriff am: 10.03.2026).

MAGyP – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2016): *Estimaciones agrícolas*. Verfügbar unter: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> (Zugriff am: 10.03.2026).

MAGyP – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2023): *Márgenes Resultados (Diciembre 2023)*. Verfügbar unter: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/analisis_economico/margenes/_archivos//000001_Informes%20de%20M%C3%A1rgenes%20y%20Resultados/202300_2023/231200_Margenes%20Resultados%20%28Diciembre%202023%29.pdf (Zugriff: 12.03.2026).

MAGyP – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2024): *Márgenes Resultados (Diciembre 2024)*. Verfügbar unter: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/analisis_economico/margenes/_archivos//000001_Informes%20de%20M%C3%A1rgenes%20y%20Resultados/202400_2024/241200_Margenes%20Resultados%20%28Diciembre%202024%29.pdf (Zugriff: 12.03.2026).

MAGyP – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2025): *Resumen Ejecutivo (Junio 2025)*. Verfügbar unter:

https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/analisis_economico/margenes/archivos//000003_Res%C3%BAmenes%20ejecutivos%20de%20Costos%20y%20Resultados%20Agr%C3%A Dcolas/202500_2025/250600_Resumen%20Ejecutivo%20%28Junio%202025%29.pdf

(Zugriff am: 10.03.2026).

MAGyP – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2025): *Márgenes Resultados (Septiembre 2025)*. Verfügbar unter:

https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/analisis_economico/margenes/archivos//000001_Informes%20de%20M%C3%A1rgenes%20y%20Resultados/202500_2025/250900_Marge nes%20Resultados%20%28Septiembre%202025%29.pdf (Zugriff: 12.03.2026).

Márgenes Agropecuarios (o. J.): *Márgenes Agropecuarios*. Verfügbar unter:

<https://www.margenes.com> (Zugriff am: 10.03.2026).

Mußhoff, Oliver / Hirschauer, Norbert (2016): *Modernes Agrarmanagement: Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren*.

Mühlbachová, G., Růžek, P., Kusá, H. und Vavera, R. (2023): 'CO₂ Emissions from Soils under Different Tillage Practices and Weather Conditions', *Agronomy*, 13(12), 3084.

Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/12/3084> (Zugriff am: 10.03.2026).

Novelli, L. E., Caviglia, O. P. und Piñeiro, G. (2011): 'Screening for carbon sequestration in no-till cropping systems', *Soil and Tillage Research*, 114(1), S. 1–10. Verfügbar unter:

<https://doi.org/10.1016/j.still.2011.03.002> (Zugriff am: 20.02.2026).

OECD (2019): *Agricultural Policies in Argentina*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. Verfügbar unter:

https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/03/agricultural-policies-in-argentina_30b37567/2f11e75f-en.pdf [Zugriff: 18. Februar 2026].

oekolandbau.de (2024): *Reduzierte Bodenbearbeitung schont Boden und Bodenleben*.

19.08.2024. Verfügbar unter: <https://www.oekolandbau.de/bio-in-der-praxis/oekologische-landwirtschaft/oekologischer-pflanzenbau/duengung-und-naehrstoffmanagement/bodenbearbeitung/reduzierte-bodenbearbeitung-schont-boden-und-bodenleben/> (Zugriff am: 09.01.2026).

Oreja, F. H., Moreno, N., Gundel, P. E., Vercellino, R. B., Pandolfo, C. E., Presotto, A., Perotti, V., Permingeat, H., Tuesca, D., Scursioni, J. A., Dellaferrera, I., Cortes, E. und

Vila-Aiub, M. (2024): 'Herbicide-resistant weeds from dryland agriculture in Argentina', *Weed Research*, 64(2), S. 89–106. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1111/wre.12613> [Zugriff: 20. Februar 2026].

Oreja, F., Presotto, A., Tuesca, D., Scursioni, J. A. & Yannicari, M. (2025): 'Weed Seedbank Changes Associated with Temporary Tillage After Long Periods of No-Till', *Agronomy*, 15(6), 1410. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/6/1410> [Zugriff: 20. Februar 2026].

Phélinas, P. & Choumert, J. (2017): 'Is GM soybean cultivation in Argentina sustainable?', *World Development*, 99, S. 452–462. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X17302073> [Zugriff: 18. Februar 2026].

Piñeiro, V., Elverdin, P., Laborde, D. & Diaz-Bonilla, E. (2017): 'Looking at export tariffs and export restrictions: The case of Argentina'. Verfügbar unter: <https://cgspace.cgiar.org/items/acdf2201-37a7-465e-b3ce-44fa3ff6a24e> [Zugriff: 18. Februar 2026].

Rajaniemi, M., Mikkola, H. und Ahokas, J. (2011): 'Greenhouse gas emissions from oats, barley, wheat and rye production', *Agronomy Research*, 9(Special Issue 1), S. 189–195. Verfügbar unter: <https://agronomy.emu.ee/vol09Spec1/p09s123.pdf> (Zugriff am: 05.03.2026).

Reuters (2025): 'Argentina suspends agro-export taxes to scoop up dollars', *Reuters*, 22. September. Verfügbar unter: <https://www.reuters.com/world/americas/argentina-suspends-agro-export-taxes-scoop-up-dollars-2025-09-22/> (Zugriff am: 06.03.2026).

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2021): *Lössboden – Boden des Jahres 2021*. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Verfügbar unter: <https://www.boden.sachsen.de/loessboden-boden-des-jahres-2021-23737.html> (Zugriff: 11.03.2026).

Sasal, M. C., Andriulo, A. E. und Taboada, M. A. (2006): 'Soil compaction during a gentle transition to no-tillage in the Argentinean Pampas', *Soil and Tillage Research*, 87(2), S. 191–198. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.007> (Zugriff am: 20.02.2026).

Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2023): *Estadísticas climatológicas normales 1991–2020*. Buenos Aires: SMN. Verfügbar unter: <https://www.smn.gob.ar> (Zugriff am: 18.02.2026).

Thünen-Institut (2025): *Einkommen in der Landwirtschaft*. Verfügbar unter: <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/einkommen-und-beschaeftigung/einkommen-in-der-landwirtschaft> (Zugriff: 12.03.2026).

Trigo, E. J. & Cap, E. J. (2003): *The adoption of transgenic crops in Argentine agriculture: an open-ended story*. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development. Verfügbar unter: https://www.iisd.org/system/files/publications/tkn_transgenic_argentina_sum.pdf [Zugriff: 18. Februar 2026].

Umweltbundesamt (2023): *Klimaschutz in der GAP 2023–2027. Wirkungsbeitrag und Ausgaben*. 2. Auflage, aktualisierte Fassung Juni 2023. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/103_2023_texte_klimaschutz_in_der_gap.pdf (Zugriff: 16.03.2026).

UBA – Umweltbundesamt (2025a): *Bodenerosion durch Wasser*. 02.06.2025. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-flaeche/bodenbelastungen/bodenerosion/bodenerosion-durch-wasser> (Zugriff am: 09.01.2026).

UBA – Umweltbundesamt (2025b): *Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen*. 26.05.2025. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/landforstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas> (Zugriff am: 09.01.2026).

UCCSNAL siehe Hough, G. (2022).

UFOP – Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen (2020): *Raps in der Bioökonomie*. Berlin: UFOP. Verfügbar unter: https://www.ufop.de/files/4215/9678/1797/UFOP_Raps_in_der_Biooekonomie_070820.pdf (Zugriff: 12.03.2026).

Umweltbundesamt (2015): *Bodenzustand in Deutschland*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/378/publikationen/bodenzustand_in_deutschland_0.pdf (Zugriff: 11.03.2026).

Umweltbundesamt (o. J.): *Wissenswertes über Pflanzenschutzmittel: Einsatz von Pflanzenschutzmitteln*. Verfügbar unter:

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/pflanzenschutzmittel/wissenswertes-ueber-pflanzenschutzmittel#einsatz-von-pflanzenschutzmitteln> (Zugriff: 12.03.2026).

Umweltbundesamt (2025): *Zonales Zulassungsverfahren für Pflanzenschutzmittel*.

Verfügbar unter:

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/pflanzenschutzmittel/wissenswertes-ueber-pflanzenschutzmittel/zonales-zulassungsverfahren-fuer> (Zugriff: 12.03.2026).

USDA-FAS – U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (2015a): *Grain and Feed Annual – Argentina*. Buenos Aires: USDA-FAS. Verfügbar unter:

https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Grain%20and%20Feed%20Annual_Buenos%20Aires_Argentina_4-1-2015.pdf (Zugriff am: 10.03.2026).

USDA-FAS – U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (2019):

Agricultural Biotechnology Annual: Argentina. Buenos Aires: USDA-FAS. Verfügbar unter:

https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Agricultural+Biotechnology+Annual_Buenos+Aires_Argentina_10-20-2019 [Zugriff: 18. Februar 2026].

USDA-FAS – U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (2024):

Production, Supply and Distribution Database. Verfügbar unter:

<https://www.fas.usda.gov/data/production/ar> (Zugriff am: 19.02.2026).

USDA-FAS – U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (2025a):

Argentina: Argentina Permanently Lowers Ag Export Taxes. Buenos Aires: USDA-FAS,

GAIN Report AR2025-0012. Verfügbar unter: <https://www.fas.usda.gov/data/argentina-argentina-permanently-lowers-ag-export-taxes> (Zugriff: 06.03.2026).

USDA-FAS – U.S. Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (2025b):

Argentina: Oilseeds and Products Update. Buenos Aires: USDA-FAS, GAIN Report AR2025-0028. Verfügbar unter:

https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Oilseeds+and+Products+Update_Buenos+Aires_Argentina_AR2025-0028.pdf (Zugriff: 06.03.2026).

VDLUFA (2014): *Humusbilanzierung – Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland*. Darmstadt: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher

Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Verfügbar unter:

https://www.humusbilanz.ch/download/VDLUFA_2014_Humusbilanzierung.pdf (Zugriff: 12.03.2026).

Viglizzo, E. F. und Ricard, F. (2023): 'Carbon accounting per unit of food and unit of land in food production systems of Argentina', *Universal Journal of Carbon Research*, 1(2), S. 1–11. Verfügbar unter:

https://www.researchgate.net/publication/374559578_Carbon_accounting_per_unit_of_food_and_unit_of_land_in_food_production_systems_of_Argentina (Zugriff am: 05.03.2026).

Viglizzo, E. F. et al. (2011): 'The eco-hydrological and agronomic signatures of land-use change in the Pampas of Argentina', *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, S. 1931–1942. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1931-2011> (Zugriff am: 20.02.2026).

World Bank (2023): *Climate Change Knowledge Portal: Argentina*. Washington, DC: World Bank Group. Verfügbar unter:

<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/argentina> (Zugriff am: 19.02.2026).

Zarkadas, C. G., Gagnon, C., Gleddie, S., Khanizadeh, S., Cober, E. R. und Guillemette, R. J. D. (2007): 'Assessment of the protein quality of fourteen soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivars using amino acid analysis and two-dimensional electrophoresis', *Food Research International*, 40(1), S. 129–146. Verfügbar unter:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996906001311> (Zugriff: 12.03.2026).

Anhang

Tabelle 33: EkfL Winterraps Deutschland

Winterraps			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	35,8
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	39,2
Gesamterlös		€/ha	1404
Prämien	Direkzahlungen 2026	€/ha	152
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	75
	Saatguteinsatz	kg/ha	5
Handelsdünger Hauptprodukt	incl. Ca.	€/ha	248
	dafür N, P, K	kg/ha	120 28 30
Handelsdünger Koppelprodukt		€/ha	198
	dafür N, P, K	kg/ha	43 10 127
Pflanzenschutzmittel		€/ha	173
	Gesamtkosten	Herbizid €/ha	66
		Fungizid €/ha	26
		Insektizid €/ha	52
		Sonstige €/ha	30
Zinssatz	Umlaufkapital	€/ha	4,77
Summe Direktkosten		€/ha	699
direktkostenfreie Leistung ohne Prämie		€/ha	705
Arbeits erledigungskosten			
Maschinenkosten	variabel	€/ha	127
	darunter: Anbau, Pflege	€/ha	95
	Ernte, Transport, Einlagerung	€/ha	32
	fest (ohne Zinsansatz)	€/ha	108
Lohn		€/ha	58
Trocknung		€/ha	4
	Anteil Trocknung an Ernteg	%	10
	bei Erntefeuchte	%	12
Zinsansatz		€/ha	18
Summe Arbeitserledigungskosten		€/ha	316
weitere Kosten			
Flächenkosten (Pachten, WBV, Grundsteuer)			435
Berufsgenossenschaft			5,5
Einzelkosten			1455
Einzelkostenfreie Leistung			
	ohne Prämie		-51
	mit Prämie		101
	mit Prämie und Prämie ÖR2		161

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 34: EkfL Winterweizen Deutschland

Winterweizen			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	76,7
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	17,46
Gesamterlös		€/ha	1339
Prämien	Direkzahlungen 2026	€/ha	152
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	80
	Saatguteinsatz	kg/ha	170
Handelsdünger Hauptprodukt	incl. Ca.	€/ha	268
	dafür N, P, K	kg/ha	139 27 38
Handelsdünger Koppelprodukt		€/ha	122
	dafür N, P, K	kg/ha	31 8 71
Pflanzenschutzmittel		€/ha	123
	Gesamtkosten	Herbizid €/ha	41
		Fungizid €/ha	67
		Insektizid €/ha	3
		Sonstige €/ha	12
Zinssatz	Umlaufkapital	€/ha	3,34
Summe Direktkosten		€/ha	597
direktkostenfreie Leistung ohne Prämie		€/ha	742
Arbeiterledigungskosten			
Maschinenkosten	variabel	€/ha	145
	darunter: Anbau, Pflege	€/ha	92
	Ernte, Transport, Einlagerung	€/ha	53
	fest (ohne Zinsansatz)	€/ha	122
Lohn		€/ha	64
Trocknung		€/ha	14
	Anteil Trocknung an Erntegut	%	15
	bei Erntefeuchte	%	16
Zinsansatz		€/ha	20
Summe Arbeiterledigungskosten		€/ha	365
weitere Kosten			
Flächenkosten (Pachten, WBV, Grundsteuer)			435
Berufsgenossenschaft			5,5
Einzelkosten			1402
Einzelkostenfreie Leistung			
	ohne Prämie		-63
	mit Prämie		89
	mit Prämie und Prämie ÖR2		149

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 35: EkfL Rübenweizen Deutschland

Rübenweizen			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	65,2
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	17,46
Gesamterlös		€/ha	1138
Prämien	Direkzahlungen 2026	€/ha	152
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	80
	Saatguteinsatz	kg/ha	170
Handelsdünger Hauptprodukt	incl. Ca.	€/ha	234
	dafür N, P, K	kg/ha	118 23 33
Handelsdünger Koppelprodukt		€/ha	104
	dafür N, P, K	kg/ha	26 7 61
Pflanzenschutzmittel		€/ha	123
	Gesamtkosten	Herbizid €/ha	41
		Fungizid €/ha	67
		Insektizid €/ha	3
		Sonstige €/ha	12
Zinssatz	Umlaufkapital	€/ha	3,34
Summe Direktkosten		€/ha	594
direktkostenfreie Leistung ohne Prämie		€/ha	742
Arbeits erledigungskosten			
Maschinenkosten	variabel	€/ha	139
	darunter: Anbau, Pflege	€/ha	92
	Ernte, Transport, Einlage	€/ha	47
	fest (ohne Zinsansatz)	€/ha	116
Lohn		€/ha	61
Trocknung		€/ha	12
	Anteil Trocknung an Ernte	%	15
	bei Erntefeuchte	%	16
Zinsansatz		€/ha	19
Summe Arbeits erledigungskosten		€/ha	346
weitere Kosten			
Flächenkosten (Pachten, WBV, Grundsteuer)			435
Berufsgenossenschaft			5,5
Einzelkosten			1331
Einzelkostenfreie Leistung	ohne Prämie		-193
	mit Prämie		-41

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 36: EkfL Wintergerste Deutschland

Wintergerste			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	67,6
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	16,23
Gesamterlös		€/ha	1097
Prämien	Direkzahlungen 2026	€/ha	152
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	69
	Saatguteinsatz	kg/ha	150
Handelsdünger Hauptprodukt	incl. Ca.	€/ha	243
	dafür N, P, K	kg/ha	112 24 34
Handelsdünger Koppelprodukt		€/ha	109
	dafür N, P, K	kg/ha	24 6 67
Pflanzenschutzmittel		€/ha	99
Gesamtkosten	Herbizid	€/ha	53
	Fungizid	€/ha	40
	Insektizid	€/ha	0
	Sonstige	€/ha	6
Zinssatz	Umlaufkapital	€/ha	3,25
Summe Direktkosten		€/ha	523
direktkostenfreie Leistung ohne Prämie			€/ha 575
Arbeits erledigungskosten			
Maschinenkosten	variabel	€/ha	135
	darunter: Anbau, Pfl	€/ha	87
	Ernte, Transport, Ein	€/ha	48
	fest (ohne Zinsansatz)	€/ha	113
Lohn		€/ha	57
Trocknung		€/ha	12
	Anteil Trocknung an	%	15
	bei Erntefeuchte	%	16
Zinsansatz		€/ha	17
Summe Arbeits erledigungskosten		€/ha	335
weitere Kosten			
Flächenkosten (Pachten, WBV, Grundsteuer)			435
Berufsgenossenschaft			5,5
Einzelkosten			1402
Einzelkostenfreie Leistung			
	ohne Prämie		-201
	mit Prämie		-49
	mit Prämie und Prämie ÖR2		11

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 37: EkfL Zuckerrübe Deutschland

Zuckerrüben			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	751,9
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	3,35
Gesamterlös		€/ha	2519
Prämien	Direkzahlungen 2026	€/ha	152
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	252
	Saatguteinsatz	kg/ha	3
Handelsdünger Hauptprodukt	incl. Ca.	€/ha	394
	dafür N, P, K	kg/ha	135 30 158
Handelsdünger Koppelprodukt		€/ha	511
	dafür N, P, K	kg/ha	211 26 263
Pflanzenschutzmittel		€/ha	166
	Gesamtkosten	Herbizid €/ha	148
		Fungizid €/ha	13
		Insektizid €/ha	5
		Sonstige €/ha	0
Zinssatz		Umlaufkapital €/ha	3,2
Summe Direktkosten		€/ha	1329
direktkostenfreie Leistung ohne Prämie		€/ha	1189
Arbeits erledigungskosten			
Maschinenkosten	variabel	€/ha	291
	darunter: Anbau, Pflege	€/ha	86
	Ernte, Transport, Einlagerung	€/ha	206
	fest (ohne Zinsansatz)	€/ha	213
Lohn		€/ha	107
Trocknung		€/ha	0
	Anteil Trocknung an Erntegut	%	0
	bei Erntefeuchte	%	0
Zinsansatz		€/ha	24
Summe Arbeitserledigungskosten		€/ha	636
weitere Kosten			
Flächenkosten (Pachten, WBV, Grundsteuer)			435
Berufsgenossenschaft			5,5
Einzelkosten			2406
Einzelkostenfreie Leistung			
	ohne Prämie		113
	mit Prämie		265
	mit Prämie und Prämie ÖR2		325

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 38: EkfL Körnererbse Deutschland

Körnererbse			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	30,6
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	22,56
Gesamterlös		€/ha	691
Prämien	Direkzahlungen 2026	€/ha	152
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	116
	Saatguteinsatz	kg/ha	200
Handelsdünger Hauptprodukt	incl. Ca.	€/ha	0
	dafür N, P, K	kg/ha	15 36
Handelsdünger Koppelprodukt		€/ha	81
	dafür N, P, K	kg/ha	4 66
Pflanzenschutzmittel		€/ha	71
	Gesamtkosten	Herbizid €/ha	64
		Fungizid €/ha	0
		Insektizid €/ha	7
		Sonstige €/ha	0
Zinssatz	Umlaufkapital	€/ha	0,97
Summe Direktkosten		€/ha	389
direktkostenfreie Leistung ohne Prämie		€/ha	302
Arbeits erledigungskosten			
Maschinenkosten	variabel	€/ha	113
	darunter: Anbau, Pflege	€/ha	84
	Ernte, Transport, Einlagerung	€/ha	30
	fest (ohne Zinsansatz)	€/ha	92
Lohn		€/ha	48
Trocknung		€/ha	33
	Anteil Trocknung an Erntegut	%	60
	bei Erntefeuchte	%	20
Zinsansatz		€/ha	14
Summe Arbeits erledigungskosten		€/ha	299
weitere Kosten			
Flächenkosten (Pachten, WBV, Grundsteuer)			435
Berufsgenossenschaft			5,5
Einzelkosten			1128
Einzelkostenfreie Leistung			
	ohne Prämie		-438
	mit Prämie		-286
	mit Prämie und Prämie ÖR2		-226

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 39: Ekfl Weizen und Soja 2 Argentinien

Weizen Argentinien			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	29,1
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	17,95
Gesamterlös		€/ha	522
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	43
	Saatguteinsatz	kg/ha	106
Düngemittel	Produktkosten	€/ha	131
Pflanzenschutzmittel	Produktkosten	€/ha	23
Summe Direktkosten		€/ha	174
direktkostenfreie Leistung		€/ha	348
Arbeits erledigungskosten			
Vermarktung- und Erntekosten		€/ha	153
Feldarbeiten und Beregnung		€/ha	88
Flächenkosten		€/ha	129
Betriebsfixkosten		€/ha	19,6
Summe Arbeits erledigungskosten		€/ha	390
Einzelkosten		€/ha	563
Einzelkostenfreie Leistung		€/ha	-41
Soja 2 Argentinien			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	23,5
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	24,5
Gesamterlös		€/ha	576
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	48
	Saatguteinsatz	kg/ha	65
Düngemittel	Produktkosten	€/ha	25
Pflanzenschutzmittel	Produktkosten	€/ha	59
Summe Direktkosten		€/ha	132
direktkostenfreie Leistung		€/ha	444
Arbeits erledigungskosten			
Vermarktung- und Erntekosten		€/ha	162
Feldarbeiten und Beregnung		€/ha	80
Flächenkosten		€/ha	169
Betriebsfixkosten		€/ha	25,6
Summe Arbeits erledigungskosten		€/ha	437
Einzelkosten		€/ha	568
Einzelkostenfreie Leistung		€/ha	8

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 40: EkfL Soja 1 und Körnermais Argentinien

Soja 1 Argentinien			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	31,4
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	24,5
Gesamterlös		€/ha	769
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	43
	Saatguteinsatz	kg/ha	60
Düngemittel	Produktkosten	€/ha	42
Pflanzenschutzmittel	Produktkosten	€/ha	59
Summe Direktkosten		€/ha	84
direktkostenfreie Leistung		€/ha	684
Arbeits erledigungskosten			
Vermarktung- und Erntekosten		€/ha	203
Feldarbeiten und Beregnung		€/ha	89
Flächenkosten		€/ha	298
Betriebsfixkosten		€/ha	45,2
Summe Arbeits erledigungskosten		€/ha	635
Einzelkosten		€/ha	720
Einzelkostenfreie Leistung		€/ha	49
Körnermais Argentinien			
Leistung		Einheit	Ergebniss
Ertrag	Marktware	dt/ha	73,7
Erzeugerpreis	Marktware	€/dt	15,38
Gesamterlös		€/ha	1133
Direktkosten			
Saatgut		€/ha	122
	Saatguteinsatz	kg/ha	20
Düngemittel	Produktkosten	€/ha	128
Pflanzenschutzmittel	Produktkosten	€/ha	77
Summe Direktkosten		€/ha	327
direktkostenfreie Leistung		€/ha	807
Arbeits erledigungskosten			
Vermarktung- und Erntekosten		€/ha	397
Feldarbeiten und Beregnung		€/ha	90
Flächenkosten		€/ha	298
Betriebsfixkosten		€/ha	45,2
Summe Arbeits erledigungskosten		€/ha	831
Einzelkosten		€/ha	1157
Einzelkostenfreie Leistung		€/ha	49

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 41: CO2-Bilanzierung Winterweizen Deutschland Teil 1

	kg N	kg/l Dünger		
Weizen				
SSA	29,4	140		
AHL	75,6	270		
Rest Kalkammons	81,50	301,85		

CO2 Emissionen Feldbau

N2O Emissionen aus NH3 Verlusten bei Düngung mit mineralischen Düngemitteln

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
SSA	Ausgebrachte Menge	140,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,21	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	29,40	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	5,23	kg CO2/ha	Ergebnis
AHL	Ausgebrachte Menge	270,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,28	kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	75,60	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	13,44	kg CO2/ha	Ergebnis
KAS	Ausgebrachte Menge	301,85	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,27	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	81,50	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	14,49	kg CO2/ha	Ergebnis
	Summe	33,16	Kg CO2/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 42: CO2-Bilanzierung Winterweizen Deutschland Teil 2

N2O Emissionen aus der Düngung mit Mineraldüngern				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
ISA	Ausgebrachte Menge	140,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,21	kg N/kg	Herstellerangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	29,40	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emission"	168,50	kg CO2/ha	Ergebnis
AHL	Ausgebrachte Menge	270,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,28	kg N/kg	Herstellerangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	75,60	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emission"	433,29	kg CO2/ha	Ergebnis
CAS	Ausgebrachte Menge	301,85	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,27	kg N/kg	Herstellerangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	81,50	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emission"	467,10	kg CO2/ha	Ergebnis
	Summe	1068,88	kg CO2/ha	Ergebnis
N2O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründung				
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Stroh	Frischmasseertrag	7670,00	kg/ha	Betriebsangabe
	*Verhältnis Stroh Korn	0,80	kg Stroh/ kg Korn	Verband Humus und Erdwirtschaft
	Frischmasseertrag Stroh	61,36	dt Stroh FM/ha	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	0,50	kg N/dt FM	DÜV Anlage 7
	Stickstoff je Hektar	30,68	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emissionen"	175,84	kg CO2/ha	Ergebnis
Wurzeln	Frischmasseertrag	7670,00	kg/ha	Betriebsangabe
	*TM Gehalt	0,86	kg TM/kg FM	DüV
	"=Trockenmasse je Hektar	6596,20	kg TM/ha	Ergebnis
	Verhältnis Stroh Korn	0,80	kg Stroh/ kg Korn	Verband Humus und Erdwirtschaft
	Trockenmasse Stroh je ha	5276,96	kg Stroh TM/ha	Ergebnis
	"=TM Stroh + Korn"	11873,16	kg TM/ha	Ergebnis
	*Proportionalitätsfaktor TM	0,23	kg TM/kg	Parameterdatei
	"=Wurzelrückstände"	2730,83	kg TM/kg	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	0,009	kg N/kg TM	Parameterdatei
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01225	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2-Emissionen"	140,86	kg CO2/ha	Ergebnis
		Summe	316,70	kg CO2/ha

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 43: CO₂-Bilanzierung Winterweizen Deutschland Teil 3

CO ₂ -Emissionen bzw Bindungen aus Humusabbau bzw. aufbau der angebauten Fruchtarten				
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
	Humusabbau	-29,224	kg Humus-c/ha	Humusbilanz
	*Umrechnungsfaktor	3,67	CO ₂ / kg C	Parameterdatei
	''CO ₂ Emission''	-107,25208	CO ₂ e/ha	Ergebnis
CO₂ Emissionen aus der Kalkdüngung				
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
	Kalkdüngung	200	kg CaO/ha	
	• CO ₂ -EF für CaO	0,79	kg CO ₂ /kg CaO	Parameterdatei
	CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung	158	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 44: CO2-Bilanzierung Winterweizen Deutschland Teil 4

CO2 Emissionen Betriebsmittelbereitstellung

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
SSA	Ausgebrachte Menge	140,00	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,21	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	29,40	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,52	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO2 Emissionen	103,49	kg CO2e/ha	Ergebnis
AHL	Ausgebrachte Menge	270,00	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,28	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	75,60	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,40	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO2 Emissionen	256,81	kg CO2e/ha	Ergebnis
KAS	Ausgebrachte Menge	301,85	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,27	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	81,50	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,52	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO2 Emissionen	286,88	kg CO2e/ha	Ergebnis
Kalimagnesia	Ausgebrachte Menge K	38,35	kg K/ha	eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
	Ausgebrachte Menge Kalimagnesia	154,04	kg/ha	Ergebnis
	*Kaliumgehalt	0,30	kg K2O/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte K2O Menge	46,21	kg K2O/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,42	kg CO2e/kg K2O	Parameter Datei KTBL
=CO2 Emissionen	19,22	kg CO2e/ha	Ergebnis	
TSP	Ausgebrachte Menge P	26,85		eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
	Ausgebrachte Menge	133,67	kg/ha	Ergebnis
	*Phosphatgehalt	0,46	kg P2O5/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte P2O5 Menge	61,49	kg P2O5/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,54	kg CO2e/kg P2O5	Parameterdatei KTBL
=CO2 Emissionen	33,33	kg CO2e/ha	Ergebnis	
Saatgut	Aussaatzstärke	170,00	kg/ha	Betriebsdaten
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	0,89	kg CO2e /kgFM	Parameterdatei KTBL
	=CO2 Emissionen	151,30	kg CO2/ kg FM	Ergebnis
Pflanzenschutzmittel	Ausbringmenge	2,02	kg/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	11,09	kg CO2e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	=CO2 Emissionen	22,40	kg CO2e/ ha	Ergebnis
Energiebereitstellung/Diesel	Dieserverbrauch	59,51	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,01	kg CO2e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO2 Emissionen	179,30	kg CO2e/ha	Ergebnis
Maschinenherstellung	Dieserverbrauch	59,51	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,89	kg CO2e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO2 Emissionen	52,67	kg CO2e/ ha	Ergebnis
CO2 Bilanz mit Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau		1469,49	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Betriebsmittelbereitstellung		1105,40	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Gesamt		2574,89	kg CO2e/ha	Ergebnis
CO2 Bilanz ohne Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau		1576,74	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Betriebsmittelbereitstellung		1105,40	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Gesamt		2682,14	kg CO2e/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 45: CO2-Bilanzierung Rügenweizen Deutschland Teil 1

	kg N	kg/l Dünger		
Rügenweizen				
SSA	29,4	140		
AHL	75,6	270		
Rest Kalkammons	74,24	274,97		
CO2 Emissionen Feldbau				
N2O Emissionen aus NH3 Verlusten bei Düngung mit mineralischen Düngemitteln				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
SSA	Ausgebrachte Menge	140,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,21	kg N/kg	Herstellerangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	29,40	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emissionen"	6,53	kg CO2/ha	Ergebnis
AHL	Ausgebrachte Menge	270,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,28	kg N/l	Herstellerangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	75,60	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emissionen"	13,44	kg CO2/ha	Ergebnis
KAS	Ausgebrachte Menge	274,97	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,27	kg N/kg	Herstellerangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	74,24	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emissionen"	13,20	kg CO2/ha	Ergebnis
	Summe	33,17	kg CO2/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 46: CO₂-Bilanzierung Rügenweizen Deutschland Teil 2

N ₂ O Emissionen aus der Düngung mit Mineraldüngern				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
SSA	Ausgebrachte Menge	140,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,21	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	29,40	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ O /kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	''=CO ₂ Emission''	168,50	Kg CO ₂ /ha	Ergebnis
AHL	Ausgebrachte Menge	270,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,28	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	75,60	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ O /kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	''=CO ₂ Emission''	433,29	Kg CO ₂ /ha	Ergebnis
KAS	Ausgebrachte Menge	274,97	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,27	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	74,24	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ O /kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	''=CO ₂ Emission''	425,50	Kg CO ₂ /ha	Ergebnis
	Summe	1027,29	Kg CO ₂ /ha	Ergebnis
N ₂ O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründung				
Stroh	Frischmasseertrag	6519,50	kg/ha	Betriebsangabe
	*Verhältnis Stroh Korn	0,80	kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7
	Frischmasseertrag Stroh	52,16	dt Stroh FM/ha	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	0,50	kg N/dt FM	DüV Anlage 7
	Stickstoff je Hektar	26,08	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ -O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	''=CO ₂ Emissionen	149,46	kg CO ₂ /ha	Ergebnis
Wurzeln	Frischmasseertrag	6519,50	kg/ha	Betriebsangabe
	*TM Gehalt	0,86	kg TM/kg FM	DüV
	''=Trockenmasse je Hektar	5606,77	kg TM/ha	Ergebnis
	Verhältnis Stroh Korn	0,80	kg Stroh/ kg Korn	Verband Humus und Erdwirtschaft
	Trockenmasse Stroh je ha	4485,42	Kg Stroh TM/ha	Ergebnis
	''=TM Stroh + Korn''	10092,19	Kg TM/ha	Ergebnis
	*Proportionalitätsfaktor TM	0,23	kg TM/kg	Parameterdatei
	''=Wurzelrückstände''	2321,20	kg TM/kg	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	0,009	kg N/kg TM	Parameterdatei
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01225	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ -O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	''=CO ₂ -Emissionen''	119,73	kg CO ₂ /ha	Ergebnis
	Summe	269,19	Kg CO ₂ /ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 48: CO2-Bilanzierung Rügenweizen Deutschland Teil 3

CO2 Emissionen Betriebsmittelbereitstellung

Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
SSA	Ausgebrachte Menge	140,00	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,21	kgN/kg	Herstellerangabe
	∑=Ausgebrachte N Menge	29,40	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,52	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	∑=CO2 Emissionen	103,49	kg CO2e/ha	Ergebnis
AHL	Ausgebrachte Menge	270,00	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,28	kgN/kg	Herstellerangabe
	∑=Ausgebrachte N Menge	75,60	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,40	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	∑=CO2 Emissionen	256,81	kg CO2e/ha	Ergebnis
KAS	Ausgebrachte Menge	274,97	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,27	kgN/kg	Herstellerangabe
	∑=Ausgebrachte N Menge	74,24	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,52	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	∑=CO2 Emissionen	261,33	kg CO2e/ha	Ergebnis
Kalimagnesia	Ausgebrachte Menge K	32,60	kg K/ha	eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
	Ausgebrachte Menge Kalimagnesia	130,94	kg/ha	Ergebnis
	*Kaliumgehalt	0,30	kg K2O/kg	Herstellerangabe
	∑=Ausgebrachte K2O Menge	39,28	kg K2O/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,42	kg CO2e/kg K2O	Parameter Datei KTBL
∑=CO2 Emissionen	16,34	kg CO2e/ha	Ergebnis	
TSP	Ausgebrachte Menge P	22,82		eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
	Ausgebrachte Menge	113,60	kg/ha	Ergebnis
	*Phosphatgehalt	0,46	kg P2O5/kg	Herstellerangabe
	∑=Ausgebrachte P2O5 Menge	52,26	kg P2O5/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,54	kg CO2e/kg P2O5	Parameterdatei KTBL
∑=CO2 Emissionen	28,32	kg CO2e/ha	Ergebnis	
Saatgut	Aussaatzstärke	170,00	kg/ha	Betriebsdaten
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	0,89	kg CO2e /kgFM	Parameterdatei KTBL
	∑=CO2 Emissionen	151,30	kg CO2/ kg FM	Ergebnis
Pflanzenschutzmittel	Ausbringmenge	2,02	kg/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	11,09	kg CO2e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	∑=CO2 Emissionen	22,40	kg CO2e/ ha	Ergebnis
Energiebereitstellung/Diesel	Dieserverbrauch	55,83	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,01	kg CO2e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	∑=CO2 Emissionen	168,22	kg CO2e/ha	Ergebnis
Maschinenherstellung	Dieserverbrauch	55,83	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,89	kg CO2e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	∑=CO2 Emissionen	49,41	kg CO2e/ ha	Ergebnis
CO2 Bilanz mit Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau		1638,01	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Betriebsmittelbereitstellung		1057,63	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Gesamt		2695,64	kg CO2e/ha	Ergebnis
CO2 Bilanz ohne Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau		1487,66	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Betriebsmittelbereitstellung		1057,63	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Betriebsmittelbereitstellung		2545,28	kg CO2e/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 49: CO2-Bilanzierung Wintergerste Deutschland Teil 1

	kg N	kg/l Dünger		
Gerste				
ASS	78	300		
Rest Kalkammons	83,50	309,26		
CO2 Emissionen Feldbau				
N2O Emissionen aus NH3 Verlusten bei Düngung mit mineralischen Düngemitteln				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
ASS	Ausgebrachte Menge	140,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,26	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	36,40	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	6,47	kg CO2/ha	Ergebnis
KAS	Ausgebrachte Menge	309,26	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,27	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	83,50	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	14,85	kg CO2/ha	Ergebnis
	Summe	21,32	Kg CO2/ha	Ergebnis
N2O Emissionen aus der Düngung mit Mineraldüngern				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
ASS	Ausgebrachte Menge	140,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,26	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	36,40	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emission''	208,62	Kg CO2/ha	Ergebnis
	KAS	Ausgebrachte Menge	309,26	kg
*Stickstoffgehalt		0,27	kg N/kg	Herstellerangabe
''=Ausgebrachte Menge N in kg''		83,50	kg N/ha	Ergebnis
*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
*Umrechnungsfaktor		1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
*Treibhausgaspotenzial		298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
''=CO2 Emission''		478,56	Kg CO2/ha	Ergebnis
		Summe	687,18	Kg CO2/ha

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 50: CO2-Bilanzierung Wintergerste Deutschland Teil 2

N2O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründung					
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
Stroh	Frischmasseertrag	6760,00	kg/ha	Betriebsangabe	
	*Verhältnis Stroh Korn	0,70	kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7	
	Frischmasseertrag Stroh	47,32	dt Stroh FM/ha	Ergebnis	
	*Stickstoffgehalt	0,50	kg N/dt FM	DüV Anlage 7	
	Stickstoff je Hektar	23,66	kg N/ha	Ergebnis	
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei	
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei	
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei	
	''=CO2 Emissionen	135,60	kg CO2/ha	Ergebnis	
	Wurzeln	Frischmasseertrag	6760,00	kg/ha	Betriebsangabe
*TM Gehalt		0,86	kg TM/kg FM	DüV	
''=Trockenmasse je Hektar		5813,60	kg TM/ha	Ergebnis	
Verhältnis Stroh Korn		0,70	kg Stroh/ kg Korn	Verband Humus und Erdwirtschaft	
Trockenmasse Stroh je ha		4069,52	Kg Stroh TM/ha	Ergebnis	
''=TM Stroh + Korn''		9883,12	Kg TM/ha	Ergebnis	
*Proportionalitätsfaktor TM		0,22	kg TM/kg	Parameterdatei	
''=Wurzelrückstände''		2174,29	kg TM/kg	Ergebnis	
*Stickstoffgehalt		0,009	kg N/kg TM	Parameterdatei	
*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei	
*Umrechnungsfaktor		1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei	
*Treibhausgaspotenzial		298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei	
''=CO2-Emissionen''		112,15	kg CO2/ha	Ergebnis	
Summe		247,78	Kg CO2/ha	Ergebnis	
CO2-Emissionen bzw Bindungen aus Humusabbau bzw. aufbau der angebauten Fruchtarten					
		Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
	Humusabbau	68,46	kg Humus-c/ha	Humusbilanz	
	*Umrechnungsfaktor	3,67	CO2/ kg C	Parameterdatei	
	''CO2 Emission''	251,2482	CO2e/ha	Ergebnis	
N2O-Emissionen aus Humusabbau					
	Humusabbau	68,46	kg Humus-c/ha	Humusbilanz	
	:N/C Verhältnis	11	kg C/kg N	Parameterdatei	
	''=freigewordene N Menge''	6,22	kg N/ha	Ergebnis	
	*Lachgasemissionsfaktor	0,01225	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei	
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei	
	*Treibhausgaspotenzial	298	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei	
	''=CO2 Emissionen	35,67	kg CO2e/ha	Ergebnis	
CO2 Emissionen aus der Kalkdüngung					
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
	Kalkdüngung	200	kg CaO/ha		
	* CO2-EF für CaO	0,79	kg CO2/kg CaO	Parameterdatei	
	CO2 Emissionen aus der Kalkdüngung	158	kg CO2e/ha	Ergebnis	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 51: CO2-Bilanzierung Wintergerste Deutschland Teil 3

CO2 Emissionen Betriebsmittelbereitstellung				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
ASS				
	Ausgebrachte Menge	300,00	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,26	kgN/kg	Herstellerangabe
	'=Ausgebrachte N Menge	78,00	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,52	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	'=CO2 Emissionen	274,56	kg CO2e/ha	Ergebnis
KAS				
	Ausgebrachte Menge	309,26	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,27	kgN/kg	Herstellerangabe
	'=Ausgebrachte N Menge	83,50	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,52	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	'=CO2 Emissionen	293,92	kg CO2e/ha	Ergebnis
	Ausgebrachte Menge K	33,80	kg K/ha	eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
Kalimagnesia				
	Ausgebrachte Menge Kalimagnesia	135,76	kg/ha	Ergebnis
	*Kaliumgehalt	0,30	kg K2O/kg	Herstellerangabe
	'=Ausgebrachte K2O Menge	40,73	kg K2O/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,42	kg CO2e/kg K2O	Parameter Datei KTBL
	'=CO2 Emissionen	16,94	kg CO2e/ha	Ergebnis
	Ausgebrachte Menge P	23,66		eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
TSP				
	Ausgebrachte Menge	117,79	kg/ha	Ergebnis
	*Phosphatgehalt	0,46	kg P2O5/kg	Herstellerangabe
	'=Ausgebrachte P2O5 Menge	54,18	kg P2O5/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,54	kg CO2e/kg P2O5	Parameterdatei KTBL
	'=CO2 Emissionen	29,37	kg CO2e/ha	Ergebnis
Saatgut				
	Aussaatzstärke	150,00	kg/ha	Betriebsdaten
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	0,89	kg CO2e /kgFM	Parameterdatei KTBL
	'=CO2 Emissionen	133,50	kg CO2/ kg FM	Ergebnis
Pflanzenschutzmittel				
	Ausbringmenge	2,23	kg/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	11,09	kg CO2e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	'=CO2 Emissionen	24,71	kg CO2e/ ha	Ergebnis
Energiebereitstellung/Diesel				
	Dieserverbrauch	54,67	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,01	kg CO2e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	'=CO2 Emissionen	164,72	kg CO2e/ha	Ergebnis
Maschinenherstellung				
	Dieserverbrauch	54,67	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,89	kg CO2e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	'=CO2 Emissionen	48,38	kg CO2e/ ha	Ergebnis
CO2 Bilanz mit Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau		1401,17	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Betriebsmittelbereitstellung		986,10	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Gesamt		2387,28	kg CO2e/ha	Ergebnis
CO2 Bilanz ohne Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau		1114,25	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Betriebsmittelbereitstellung		986,10	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Gesamt		2100,36	kg CO2e/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 52: CO2-Bilanzierung Winterraps Deutschland Teil 1

	kg N	kg/l Dünger		
Raps				
DAP	18,00	100		
ASS	78,00	300		
Rest Harnstoff	88,02	191		
CO2 Emissionen Feldbau				
N2O Emissionen aus NH3 Verlusten bei Düngung mit mineralischen Düngemitteln				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge		100 kg	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt		0,18 kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N		18 kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor		0,041 kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor		0,01 N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''		3,45 kg CO2/ha	Ergebnis
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
ASS	Ausgebrachte Menge		300 kg	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt		0,26 kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N		78 kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor		0,038 kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor		0,01 N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''		13,87 kg CO2/ha	Ergebnis
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Harnstoff	Ausgebrachte Menge		191 kg	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt		0,12 kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N		22,96 kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor		0,038 kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor		0,01 N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''		4,08 kg CO2/ha	Ergebnis
	Summe		21,40	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 53: CO2-Bilanzierung Winterraps Deutschland Teil 2

N2O Emissionen aus der Düngung mit Mineraldüngern				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge		100 kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt		0,18 kg N/l	Herstellerangabe
	``=Ausgebrachte Menge N		18 kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225 kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	``=CO2 Emission``		103,16 Kg CO2/ha	Ergebnis
ASS	Ausgebrachte Menge		300 kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt		0,26 kg N/l	Herstellerangabe
	``=Ausgebrachte Menge N		78 kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225 kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	``=CO2 Emission``		447,04 Kg CO2/ha	Ergebnis
Eingesetzter Dünger Harnstoff	Ausgebrachte Menge		191 kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt		0,46 kg N/l	Herstellerangabe
	``=Ausgebrachte Menge N		88,02 kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225 kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298 kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	``=CO2 Emission``		504,47 Kg CO2/ha	Ergebnis
Summe		1054,67		
N2O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründung				
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Stroh	Frischmasseertrag		3581,00 kg/ha	Betriebsangabe
	*Verhältnis Stroh Korn		1,70 kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7
	Frischmasseertrag Stroh		60,88 dt Stroh FM/ha	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt		0,70 kg N/dt FM	DüV Anlage 7
	Stickstoff je Hektar		42,61 kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01 kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei
*Treibhausgaspotenzial		298,00 kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei	
``=CO2 Emissionen		244,23 kg CO2/ha	Ergebnis	
Wurzeln	Frischmasseertrag		3581,00 kg/ha	Betriebsangabe
	*TM Gehalt		0,91 kg TM/kg FM	DüV Anlage 7
	``=Trockenmasse je Hektar		3258,71 kg TM/ha	Ergebnis
	Verhältnis Stroh Korn		1,70 kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7
	Trockenmasse Stroh je ha		5539,81 Kg Stroh TM/ha	Ergebnis
	``=TM Stroh + Korn``		8798,52 Kg TM/ha	Ergebnis
	*Proportionalitätsfaktor TM		0,22 kg TM Wurzel /kg TM Stroh+	Parameterdatei
	``=Wurzelrückstände``		1935,67 kg TM Wurzel/ha	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt		0,009 kg N/kg TM	Parameterdatei
	Stickstoff je Hektar		17,42 kg N /ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225 kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor		1,57 kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial		298,00 kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
``=CO2-Emissionen``		99,85 kg CO2/ha	Ergebnis	
Summe		344,08 kg CO2/ha	Ergebnis	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 54: CO₂-Bilanzierung Winterraps Deutschland Teil 3

CO ₂ Emissionen aus Harnstoffdüngung				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	191,35	kg/ha	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,46	kg N/kg	Herstellerangabe
	``=Ausgebrachte N Menge``	88,02	kg N/ha	Ergebnis
	*CO ₂ Emissionsfaktor	1,57	kg CO ₂ e/kg Harnstoff N	Parameterdatei
	``=CO ₂ Emissionen``	138,19	kg CO ₂ /ha	Ergebnis
CO ₂ -Emissionen bzw Bindungen aus Humusabbau bzw. aufbau der angebauten Fruchtarten				
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
	Humusabbau	-26,299	kg Humus-C/ha	Humusbilanz
	*Umrechnungsfaktor	3,67	CO ₂ / kg Humus-C	Parameterdatei
	``CO ₂ Emission``	-96,51733	CO ₂ e/ha	Ergebnis
CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung				
Rechenschritt		Wert	Einheit	Datenherkunft
Kalkdüngung		200	kg CaO/ha	
* CO ₂ -EF für CaO		0,79	kg CO ₂ /kg CaO	Parameterdatei
CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung		158	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 55: Tabelle 56: CO₂-Bilanzierung Winterraps Deutschland Teil 4

CO ₂ Emissionen Betriebsmittelbereitstellung				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	100,00	kg/ha	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt	0,18	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	18,00	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,40	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	61,15	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
ASS	Ausgebrachte Menge	300,00	kg/ha	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt	0,26	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	78,00	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,40	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	264,97	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	191,35	kg/ha	eigene Berechnung nach DüV
	*Stickstoffgehalt	0,46	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	88,02	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,50	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	308,07	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Kalimagnesia	Ausgebrachte Menge K	29,72	kg K/ha	eigene Berechnung Entzug Hauptprod.
	Ausgebrachte Menge Kalimagr	119,38	kg/ha	Ergebnis
	*Kaliumgehalt	0,30	kg K ₂ O/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte K ₂ O Menge	35,81	kg K ₂ O/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,42	kg CO ₂ e/kg K ₂ O	Parameter Datei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	14,90	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
DAP	Ausgebrachte Menge	100,00	kg/ha	eigene Berechnung nach DüV
	*Phosphatgehalt	0,46	kg P ₂ O ₅ /kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte P ₂ O ₅ Menge	46,00	kg P ₂ O ₅ /ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,54	kg CO ₂ e/kg P ₂ O ₅	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	24,93	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Saatgut	Aussaatstärke	5,00	kg/ha	Datensammlung Brandenburg
	*Treibhausgas-Emissionsfakt	2,10	kg CO ₂ e /kgFM	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	10,50	kg CO ₂ / kg FM	Ergebnis
Pflanzenschutzmittel	Ausbringmenge	1,76	kg/ha	eigene Berechnung anhand JKI Daten
	*Treibhausgas-Emissionsfakt	11,09	kg CO ₂ e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	19,55	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
Energiebereitstellung	Dieselverbrauch	48,02	l/ha	eigene Rechnung
	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,01	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	144,68	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Maschinenherstellung	Dieselverbrauch	48,02	l/ha	eigene Rechnung
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,89	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	42,50	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
CO₂ Bilanz mit Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau	1619,83	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Betriebsmittelbereitstellung	891,24	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Gesamt	2511,06	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
CO₂ Bilanz ohne Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau	1716,34	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Betriebsmittelbereitstellung	891,24	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Gesamt	2607,58	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 57: CO2-Bilanzierung Zuckerrübe Deutschland Teil 1

	kg N	kg/l Dünger		
Zuckerrüben				
KAS	60,00	222,22		
Rest Harnstoff	44,52	96,79		
CO2 Emissionen Feldbau				
N2O Emissionen aus NH3 Verlusten bei Düngung mit mineralischen Düngemitteln				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
KAS	Ausgebrachte Menge	222	kg	
	*Stickstoffgehalt	0,27	kg N/l	
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	60	kg N/ha	
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,038	kg NH3-N /kg N	
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	
	*Treibhausgaspotenzial	298	kg CO2e/kg N2O	
	''=CO2 Emissionen''	10,67	kg CO2/ha	
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	97	kg	
	*Stickstoffgehalt	0,46	kg N/l	
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	44,52	kg N/ha	
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,038	kg NH3-N /kg N	
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	
	*Treibhausgaspotenzial	298	kg CO2e/kg N2O	
	''=CO2 Emissionen''	7,92	kg CO2/ha	
	Summe	18,58		
N2O Emissionen aus der Düngung mit Mineraldüngern				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
KAS	Ausgebrachte Menge	250	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,27	kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	67,5	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01225	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emission''	386,86	Kg CO2/ha	Ergebnis
	Harnstoff	Ausgebrachte Menge	97	kg
*Stickstoffgehalt		0,46	kg N/l	Herstellerangabe
''=Ausgebrachte Menge N in kg''		44,52	kg N/ha	Ergebnis
*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
*Umrechnungsfaktor		1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
*Treibhausgaspotenzial		298	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
''=CO2 Emission''		255,18	Kg CO2/ha	Ergebnis
		Summe	642,04	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 58: CO₂-Bilanzierung Zuckerrübe Deutschland Teil 2

N ₂ O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründung					
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
Blatt	Frischmasseertrag	75190,00	kg/ha	Betriebsangabe	
	*Verhältnis Blatt Rübe	0,70	kg Blatt/ kg Rübenkörper	DüV Anlage 7	
	Frischmasseertrag Stroh	526,33	dt Stroh FM/ha	Ergebnis	
	*Stickstoffgehalt	0,40	kg N/dt FM	DüV Anlage 7	
	Stickstoff je Hektar	210,53	kg N/ha	Ergebnis	
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei	
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ -O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei	
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei	
	''=CO ₂ Emissionen	1206,62	kg CO ₂ /ha	Ergebnis	
	Wurzeln	Frischmasseertrag	75190,00	kg/ha	Betriebsangabe
		*TM Gehalt	0,23	kg TM/kg FM	DüV
''=Trockenmasse je Hektar		17293,70	kg TM/ha	Ergebnis	
Verhältnis Kraut Rübenkörper		0,70	kg Stroh/ kg Korn	Verband Humus und Erdwirtschaft	
Trockenmasse Stroh je ha		12105,59	kg Stroh TM/ha	Ergebnis	
''=TM Stroh + Korn''		29399,29	kg TM/ha	Ergebnis	
*Proportionalitätsfaktor TM		0,22	kg TM/kg	Parameterdatei	
''=Wurzelrückstände''		6467,84	kg TM/kg	Ergebnis	
*Stickstoffgehalt		0,009	kg N/kg TM	Parameterdatei	
*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei	
*Umrechnungsfaktor		1,57	kg N ₂ -O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei	
*Treibhausgaspotenzial		298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei	
''=CO ₂ -Emissionen''		333,62	kg CO ₂ /ha	Ergebnis	
Summe		1540,24			
CO ₂ Emissionen aus Harnstoffdüngung					
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	96,79	kg/ha	Betriebsdaten	
	*Stickstoffgehalt	0,46	kg N/kg	Herstellerangabe	
	''=Ausgebrachte N Menge''	44,52	kg N/ha	Ergebnis	
	*CO ₂ Emissionsfaktor	1,57	kg CO ₂ e/kg Harnstoff N	Parameterdatei	
	''=CO ₂ Emissionen''	69,90	kg CO ₂ /ha	Ergebnis	
CO ₂ -Emissionen bzw Bindungen aus Humusabbau bzw. aufbau der angebauten Fruchtarten					
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
	Humusabbau	616,16	kg Humus-C/ha	Humusbilanz	
	*Umrechnungsfaktor	3,67	CO ₂ / kg C	Parameterdatei	
	''CO ₂ Emission''	2261,31087	CO ₂ e/ha	Ergebnis	
N ₂ O-Emissionen aus Humusabbau					
	Humusabbau	616,161	kg Humus-C/ha	Humusbilanz	
	:N/C Verhältnis	11	kg C/kg N	Parameterdatei	
	''=freigewordene N Menge''	56,01	kg N/ha	Ergebnis	
	*Lachgasemissionsfaktor	0,01225	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei	
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei	
	*Treibhausgaspotenzial	298	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei	
	''=CO ₂ Emissionen	321,04	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung					
Rechenschritt		Wert	Einheit	Datenherkunft	
Kalkdüngung		200	kg CaO/ha		
• CO ₂ -EF für CaO		0,79	kg CO ₂ /kg CaO	Parameterdatei	
CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung		158	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 59: CO2-Bilanzierung Zuckerrübe Deutschland Teil 3

CO2 Emissionen Betriebsmittelbereitstellung				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
KAS	Ausgebrachte Menge	222,22	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,27	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	60,00	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,52	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO2 Emissionen	211,20	kg CO2e/ha	Ergebnis
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	96,79	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,46	kgN/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte N Menge	44,52	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,50	kg CO2e/kg N	Parameter Datei KTBL
	=CO2 Emissionen	155,83	kg CO2e/ha	Ergebnis
Kalimagnesia	Ausgebrachte Menge K	157,90	kg K/ha	eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
	Ausgebrachte Menge Kalimagnesia	634,23	kg/ha	Ergebnis
	*Kaliumgehalt	0,30	kg K2O/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte K2O Menge	190,27	kg K2O/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,42	kg CO2e/kg K2O	Parameter Datei KTBL
	=CO2 Emissionen	79,91	kg CO2e/ha	Ergebnis
TSP	Ausgebrachte Menge P	30,08		eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
	Ausgebrachte Menge	149,75	kg/ha	Ergebnis
	*Phosphatgehalt	0,46	kg P2O5/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte P2O5 Menge	68,88	kg P2O5/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,54	kg CO2e/kg P2O5	Parameterdatei KTBL
	=CO2 Emissionen	37,20	kg CO2e/ha	Ergebnis
Saatgut	Aussaatzstärke	15,00	kg/ha	Betriebsdaten
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	2,07	kg CO2e /kgFM	Parameterdatei KTBL
	=CO2 Emissionen	31,04	kg CO2/ kg FM	Ergebnis
Pflanzenschutzmittel	Ausbringmenge	5,56	kg/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	11,09	kg CO2e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	=CO2 Emissionen	61,63	kg CO2e/ ha	Ergebnis
Energiebereitstellung/Diesel	Dieserverbrauch	107,11	l/ha	eigene Rechnung
	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,01	kg CO2e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO2 Emissionen	322,40	kg CO2e/ha	Ergebnis
Maschinenherstellung	Dieserverbrauch	107,11	l/ha	eigene Rechnung
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,89	kg CO2e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO2 Emissionen	95,33	kg CO2e/ ha	Ergebnis
CO2 Bilanz mit Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau		5011,11	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Betriebsmittelbereitstellung		994,53	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Gesamt		6005,64	kg CO2e/ha	Ergebnis
CO2 Bilanz mit Humusaufbau/Humusabbau				
Summe Feldbau		2428,76	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Betriebsmittelbereitstellung		994,53	kg CO2e/ha	Ergebnis
Summe Gesamt		3423,30	kg CO2e/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 60: CO₂-Bilanzierung Körnererbse Deutschland Teil 1

	kg N	kg/l Dünger		
Körnererbse				
CO₂ Emissionen Feldbau				
N₂O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründung				
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Blatt	Frischmasseertrag	3061,40	kg/ha	Betriebsangabe
	*Verhältnis Stroh Erbse	1,00	kg Stroh/kg Erbse	DüV Anlage 7
	Frischmasseertrag Stroh	30,61	dt Stroh FM/ha	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	1,50	kg N/dt FM	DüV Anlage 7
	Stickstoff je Hektar	45,92	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N ₂ -O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
	``=CO ₂ Emissionen	263,19	kg CO ₂ /ha	Ergebnis
	Wurzeln	Frischmasseertrag	3061,40	kg/ha
*TM Gehalt		0,86	kg TM/kg FM	DüV
``=Trockenmasse je Hektar		2632,80	kg TM/ha	Ergebnis
Verhältnis Stroh Erbse		1	kg Kraut/ kg Rübenkörper	DüV
Trockenmasse Stroh je ha		2632,80	Kg Stroh TM/ha	Ergebnis
``=TM Stroh + Korn``		5265,61	Kg TM/ha	Ergebnis
*Proportionalitätsfaktor TM		0,4	kg TM/kg	Parameterdatei
``=Wurzelrückstände``		2106,24	kg TM/kg	Ergebnis
*Stickstoffgehalt		0,008	kg N/kg TM	Parameterdatei
*Lachgas-Emissionsfaktor		0,01225	kg N ₂ -O-N/kg N	Parameterdatei
*Umrechnungsfaktor		1,57	kg N ₂ -O/kg N ₂ -O-N	Parameterdatei
*Treibhausgaspotenzial		298	kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Parameterdatei
``=CO ₂ -Emissionen``		96,57	kg CO ₂ /ha	Ergebnis
CO₂-Emissionen bzw Bindungen aus Humusabbau bzw. aufbau der angebauten Fruchtarten				
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
	Humusabbau	-160	kg Humus/ha	Humusbilanz
	*Umrechnungsfaktor	3,67	CO ₂ / kg C	Parameterdatei
	``CO ₂ Emission``	-587,2	CO ₂ e/ha	Ergebnis
CO₂ Emissionen aus der Kalkdüngung				
Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
Kalkdüngung	200	kg CaO/ha	Betrieb	
• CO ₂ -EF für CaO	0,79	kg CO ₂ /kg CaO	Parameterdatei	
CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung	158	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 61: CO₂-Bilanzierung Körnererbse Deutschland Teil 2

Betriebsmittelbereitstellung				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
	Ausgebrachte Menge K	35,51	kg K/ha	eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
Kalimagnesia	Ausgebrachte Menge Kalimagnesia	142,63	kg/ha	Ergebnis
	*Kaliumgehalt	0,30	kg K ₂ O/kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte K ₂ O Menge	42,79	kg K ₂ O/ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,42	kg CO ₂ e/kg K ₂ O	Parameter Datei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	17,97	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
	Ausgebrachte Menge P	14,69		eigene Berechnung Entzug Hauptprodukt
TSP	Ausgebrachte Menge	73,13	kg/ha	Ergebnis
	*Phosphatgehalt	0,46	kg P ₂ O ₅ /kg	Herstellerangabe
	=Ausgebrachte P ₂ O ₅ Menge	33,64	kg P ₂ O ₅ /ha	Ergebnis
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,54	kg CO ₂ e/kg P ₂ O ₅	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	18,17	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
	Ausbrachte Menge	15	kg/ha	Betriebsdaten
Saatgut	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	2,069	kg CO ₂ e /kg FM	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	31,035	kg CO ₂ / kg FM	Ergebnis
	Ausbringmenge	2,7	kg/ha	Betriebsdaten
Pflanzenschutzmittel	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	11,09	kg CO ₂ e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	29,943	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
	Dieserverbrauch	42,63	l/ha	Betriebsdaten
Energiebereitstellung/Diesel	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,013	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	128,44419	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
	Dieserverbrauch	42,63	l/ha	Betriebsdaten
Maschinenherstellung	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,885	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	=CO ₂ Emissionen	37,72755	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
	CO ₂ Bilanz mit Humusaufbau/Humusabbau			
	Summe Feldbau	-69,44	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
	Summe Betriebsmittelbereitstellung	227,57	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
	Summe Gesamt	158,13	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
	CO ₂ Bilanz ohne Humusaufbau/Humusabbau	517,76	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
		227,57	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
	Summe Gesamt	745,33	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 63: CO2-Bilanzierung Weizen Argentinien Teil 1

	kg N	kg/l Dünger	N Anteil	
Weizen				
DAP	12,24	68,00	18%	
Harnstoff	64,76	140,78	46%	
CO2 Emissionen Feldbau				
N2O Emissionen aus NH3 Verlusten bei Düngung mit mineralischen Düngemitteln				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	68,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,18	kg N/kg	Herstellerrangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	12,24	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emissionen"	2,29	kg CO2/ha	Ergebnis
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	140,78	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,46	kg N/l	Herstellerrangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	64,76	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04		Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emissionen"	12,12	kg CO2/ha	Ergebnis
N2O Emissionen aus der Düngung mit Mineraldüngern				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	68,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,18	kg N/kg	Herstellerrangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	12,24	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emission"	57,27	Kg CO2/ha	Ergebnis
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	140,78	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,46	kg N/kg	Herstellerrangabe
	"=Ausgebrachte Menge N in kg"	64,76	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	"=CO2 Emission"	302,99	Kg CO2/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 64: CO2-Bilanzierung Weizen Argentinien Teil 2

N2O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründung					
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
Stroh	Frischmasseertrag	2910,00	kg/ha	Betriebsangabe	
	*Verhältnis Stroh Korn	0,80	kg Stroh/ kg Korn	Verband Humus und Erdwirtschaft	
	Frischmasseertrag Stroh	23,28	dt Stroh FM/ha	Ergebnis	
	*Stickstoffgehalt	0,50	kg N/dt FM	DÜV Anlage 7	
	Stickstoff je Hektar	11,64	kg N/ha	Ergebnis	
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei	
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei	
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei	
	''=CO2 Emissionen	66,71	kg CO2/ha	Ergebnis	
Wurzeln	Frischmasseertrag	2910,00	kg/ha	Betriebsangabe	
	*TM Gehalt	0,86	kg TM/kg FM	DÜV	
	''=Trockenmasse je Hektar	2502,60	kg TM/ha	Ergebnis	
	*Verhältnis Stroh Korn	0,80	kg Stroh/ kg Korn	Verband Humus und Erdwirtschaft	
	Trockenmasse Stroh je ha	2002,08	kg Stroh TM/ha	Ergebnis	
	''=TM Stroh + Korn''	4504,68	kg TM/ha	Ergebnis	
	*Proportionalitätsfaktor TM	0,23	kg TM/kg	Parameterdatei	
	''=Wurzelrückstände''	1036,08	kg TM/kg	Ergebnis	
	*Stickstoffgehalt	0,01	kg N/kg TM	Parameterdatei	
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei	
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei	
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei	
	''=CO2-Emissionen''	53,44	kg CO2/ha	Ergebnis	
		Summe	120,15	kg CO2/ha	Ergebnis
CO2 Emissionen aus der Kalkdüngung					
Rechenschritt		Wert	Einheit	Datenherkunft	
Kalkdüngung		24,72	kg CaO/ha		
• CO2-EF für CaO		0,79	kg CO2/kg CaO	Parameterdatei	
CO2 Emissionen aus der Kalkdüngung		19,5288	kg CO2e/ha	Ergebnis	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 66: CO2-Bilanzierung Körnermais Argentinien Teil 1

	kg N	kg/l Dünger	N Anteil	
Körnermais				
DAP	13,5	75,00	18%	
Harnstoff	48,5	105,43	46%	
CO2 Emissionen Feldbau				
N2O Emissionen aus NH3 Verlusten bei Düngung mit mineralischen Düngemitteln				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	75,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,18	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	13,50	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	2,53	kg CO2/ha	Ergebnis
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	105,43	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,46	kg N/l	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	48,50	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	9,08	kg CO2/ha	Ergebnis
N2O Emissionen aus der Düngung mit Mineraldüngern				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	75,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,18	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	13,50	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emission''	63,16	kg CO2/ha	Ergebnis
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	105,43	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,46	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	48,50	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emission''	226,91	kg CO2/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 67: CO2-Bilanzierung Weizen Argentinien Teil 2

CO2 Emissionen aus der Kalkdüngung				
Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
Kalkdüngung	32,96	kg CaO/ha		
* CO ₂ -EF für CaO	0,79	kg CO ₂ /kg CaO	Parameterdatei	
CO2 Emissionen aus der Kalkdüngung	26,0384	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
CO2 Emissionen Betriebsmittelbereitstellung				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	75,00	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,18	kgN/kg	Herstellerangabe
	∑=Ausgebrachte N Menge	13,50	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,40	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	∑=CO ₂ Emissionen	45,86	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Harnstoff	Ausgebrachte Menge	105,43	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,46	kgN/kg	Herstellerangabe
	∑=Ausgebrachte N Menge	48,50	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,50	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	∑=CO ₂ Emissionen	169,75	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
SO ₄ Ca	Ausgebrachte Menge	80,00	kg/ha	
	Treibhausgasemissionsfaktor	0,04	kg CO ₂ e/kg SO ₄ Ca	GEMIS
	∑=CO ₂ Emissionen	3,28	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Saatgut	Aussaatzstärke	20,00	kg/ha	Betriebsdaten
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	2,14	kg CO ₂ e /kgFM	Parameterdatei KTBL
	∑=CO ₂ Emissionen	42,72	kg CO ₂ / kg FM	Ergebnis
Pflanzenschutzmittel	Ausbringmenge	7,14	kg/ha	UCCSNAL
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	11,09	kg CO ₂ e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	∑=CO ₂ Emissionen	79,18	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
Energiebereitstellung/Diesel	Dieserverbrauch	38,11	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,01	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	∑=CO ₂ Emissionen	114,71	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Maschinenherstellung	Dieserverbrauch	38,11	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,89	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	∑=CO ₂ Emissionen	33,92	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
Summe Feldbau	819,72	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Betriebsmittelbereitstellung	489,42	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Gesamt	1309,14	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 68: CO2-Bilanzierung Soja 1 Argentinien Teil 1

	kg N	kg/l Dünger	N Anteil	
Soja 1				
DAP	9,9	55,00	18%	
CO2 Emissionen Feldbau				
N2O Emissionen aus NH3 Verlusten bei Düngung mit mineralischen Düngemitteln				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	55,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,18	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	9,90	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	1,85	kg CO2/ha	Ergebnis
N2O Emissionen aus der Düngung mit Mineraldüngern				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	55,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,18	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	9,90	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emission''	46,32	Kg CO2/ha	Ergebnis
N2O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründung				
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Stroh	Frischmasseertrag	3138,00	kg/ha	Betriebsangabe
	*Verhältnis Stroh Korn	1,50	kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7
	Frischmasseertrag Stroh	47,07	dt Stroh FM/ha	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	1,51	kg N/dt FM	DüV Anlage 7
	Stickstoff je Hektar	71,08	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen	407,36	kg CO2/ha	Ergebnis
Wurzeln	Frischmasseertrag	3138,00	kg/ha	Betriebsangabe
	*TM Gehalt	0,86	kg TM/kg FM	DüV
	''=Trockenmasse je Hektar	2698,68	kg TM/ha	Ergebnis
	*Verhältnis Stroh Korn	1,00	kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7
	Trockenmasse Stroh je ha	2698,68	Kg Stroh TM/ha	Ergebnis
	''=TM Stroh + Korn''	5397,36	Kg TM/ha	Ergebnis
	*Proportionalitätsfaktor TM	0,40	kg TM/kg	Parameterdatei
	''=Wurzelrückstände''	2158,94	kg TM/kg	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	0,008	kg N/kg TM	Parameterdatei
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01225	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2-Emissionen''	98,99	kg CO2/ha	Ergebnis
	Summe	506,34	kg CO2/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 69: CO₂-Bilanzierung Soja 1 Argentinien Teil 2

CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung				
Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
Kalkdüngung	12,36	kg CaO/ha		
• CO ₂ -EF für CaO	0,79	kg CO ₂ /kg CaO	Parameterdatei	
CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung	9,7644	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
CO₂ Emissionen Betriebsmittelbereitstellung				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	55,00	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,18	kgN/kg	Herstellerangabe
	'=Ausgebrachte N Menge	9,90	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,40	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	33,63	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
SO ₄ Ca	Ausgebrachte Menge	21,30	kg/ha	
	Treibhausgasemissionsfaktor	0,04	kg CO ₂ e/kg SO ₄ Ca	GEMIS
	'=CO ₂ Emissionen	0,87	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Saatgut	Aussaatzstärke	60,00	kg/ha	Betriebsdaten
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	2,07	kg CO ₂ e /kgFM	Parameterdatei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	124,14	kg CO ₂ / kg FM	Ergebnis
Pflanzenschutzmittel	Ausbringmenge	5,40	kg/ha	UCCSNAL
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	11,09	kg CO ₂ e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	59,89	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
Energiebereitstellung/Diesel	Dieserverbrauch	15,35	l/ha	Ergebniss DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,01	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	46,20	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Maschinenherstellung	Dieserverbrauch	15,35	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,89	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	13,66	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
Summe Feldbau	564,28	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Betriebsmittelbereitstellung	278,39	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Gesamt	842,67	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 70: CO2-Bilanzierung Soja 2 Argentinien Teil 1

	kg N	kg/l Dünger	N Anteil	
Soja 2				
DAP	5,4	30,00	18%	
CO2 Emissionen Feldbau				
N2O Emissionen aus NH3 Verlusten bei Düngung mit mineralischen Düngemitteln				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	30,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,18	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	5,40	kg N/ha	Ergebnis
	*Ammoniak Emissionsfaktor	0,04	kg NH3-N /kg N	Parameterdatei
	*Lachgas Emissionsfaktor	0,01	N2-O-N/kg NH3-N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	1,01	kg CO2/ha	Ergebnis
N2O Emissionen aus der Düngung mit Mineraldüngern				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	30,00	kg	Betriebsdaten
	*Stickstoffgehalt	0,18	kg N/kg	Herstellerangabe
	''=Ausgebrachte Menge N in kg''	5,40	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2O /kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emission''	25,26	Kg CO2/ha	Ergebnis
N2O-Emissionen aus Ernte- und Wurzelrückständen sowie aus Stroh- und Gründung				
	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
Stroh	Frischmasseertrag	2350,00	kg/ha	Betriebsangabe
	*Verhältnis Stroh Korn	1,50	kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7
	Frischmasseertrag Stroh	35,25	dt Stroh FM/ha	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	1,51	kg N/dt FM	DüV Anlage 7
	Stickstoff je Hektar	53,23	kg N/ha	Ergebnis
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2 Emissionen''	305,06	kg CO2/ha	Ergebnis
Wurzeln	Frischmasseertrag	2350,00	kg/ha	Betriebsangabe
	*TM Gehalt	0,86	kg TM/kg FM	DüV
	''=Trockenmasse je Hektar''	2021,00	kg TM/ha	Ergebnis
	*Verhältnis Stroh Korn	1,00	kg Stroh/ kg Korn	DüV Anlage 7
	Trockenmasse Stroh je ha	2021,00	Kg Stroh TM/ha	Ergebnis
	''=TM Stroh + Korn''	4042,00	Kg TM/ha	Ergebnis
	*Proportionalitätsfaktor TM	0,40	kg TM/kg	Parameterdatei
	''=Wurzelrückstände''	1616,80	kg TM/kg	Ergebnis
	*Stickstoffgehalt	0,008	kg N/kg TM	Parameterdatei
	*Lachgas-Emissionsfaktor	0,01225	kg N2-O-N/kg N	Parameterdatei
	*Umrechnungsfaktor	1,57	kg N2-O/kg N2-O-N	Parameterdatei
	*Treibhausgaspotenzial	298,00	kg CO2e/kg N2O	Parameterdatei
	''=CO2-Emissionen''	74,13	kg CO2/ha	Ergebnis

Quelle: eigene Berechnung 2026

Tabelle 71: CO₂-Bilanzierung Soja 2 Argentinien Teil 2

CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung				
Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft	
Kalkdüngung	22,66	kg CaO/ha		
• CO ₂ -EF für CaO	0,79	kg CO ₂ /kg CaO	Parameterdatei	
CO ₂ Emissionen aus der Kalkdüngung	17,9014	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
CO₂ Emissionen Betriebsmittelbereitstellung				
Eingesetzter Dünger	Rechenschritt	Wert	Einheit	Datenherkunft
DAP	Ausgebrachte Menge	30,00	kg/ha	
	*Stickstoffgehalt	0,18	kgN/kg	Herstellerangabe
	'=Ausgebrachte N Menge	5,40	kg N/ha	Ergebnis
	Treibhausgasemissionsfaktor	3,40	kg CO ₂ e/kg N	Parameter Datei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	18,34	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Saatgut	Aussaatstärke	65,00	kg/ha	Betriebsdaten
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	2,07	kg CO ₂ e /kgFM	Parameterdatei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	134,49	kg CO ₂ / kg FM	Ergebnis
Pflanzenschutzmittel	Ausbringmenge	5,40	kg/ha	UCCSNAL
	*Treibhausgas-Emissionsfaktor	11,09	kg CO ₂ e /kg Wirkstoff	Parameterdatei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	59,89	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
Energiebereitstellung/Diesel	Dieserverbrauch	17,55	l/ha	Ergebniss DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	3,01	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	52,83	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis
Maschinenherstellung	Dieserverbrauch	17,55	l/ha	Ergebnis DB BB
	*Treibhausgasemissionsfaktor	0,89	kg CO ₂ e/l Diesel	Parameterdatei KTBL
	'=CO ₂ Emissionen	15,62	kg CO ₂ e/ ha	Ergebnis
Summe Feldbau	423,37	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Betriebsmittelbereitstellung	281,16	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	
Summe Gesamt	704,53	kg CO ₂ e/ha	Ergebnis	

Quelle: eigene Berechnung 2026

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der aufgeführten Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt entnommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde bisher keiner Prüfungsbehörde in ähnlicher oder gleicher Form vorgelegt.

Hans-Otto Papstein, Neubrandenburg, 30.03.2026