

Technische Minderungs- Potenziale für Treibhausgas- Emissionen im Ackerbau

IVA-Diskussionspapier zum Klimaschutz im Ackerbau

Frankfurt am Main, September 2024

Inhalt

1. Zusammenfassung	3
2. Einleitung	4
3. Klimarelevanz des Ackerbaus	6
4. THG-Minderungsmaßnahmen im Ackerbau	6
4.1 Systematisches Verständnis von Ackerbau	8
4.2 Klimaschutz und Umweltschutz durch inländische Produktion	9
4.3 Extensivierung verspricht keine Verbesserung	10
4.4 Stickstoffverluste minimieren und Stickstoffeffizienz optimieren	11
4.4.1 Teilflächenapplikation von Stickstoffdüngern	11
4.4.2 Dynamische Düngebedarfsermittlung	12
4.4.3 Verwendung von Enhanced Efficiency Fertilizers	14
4.4.4 Schwefel-, Kalium- und Kalkversorgung	16
4.4.5 Biostimulanzien	18
4.5 THG-Emissionen in der Produktion von Mineraldüngern minimieren	18
4.5.1 Substitution durch organische Düngemittel	18
4.5.2 Produktion mit hohen technischen Standards	19
4.5.3 Grüne Düngemittel und CO ₂ -Abscheidung	19
4.6 Pflanzenzüchtung beschleunigen	22
4.7 Pflanzenschutz erhalten und weiterentwickeln	23
5. Schlussbetrachtung	26
6. Literatur	33
7. Anhang	37

1. Zusammenfassung

Der menschengemachte Klimawandel ist die größte ökologische, ökonomische und soziale Herausforderung dieses Jahrhunderts. Die (konventionelle) Landwirtschaft wird als wichtiger Verursacher von Treibhausgasen (THG) gesehen. Da die zusätzliche Kultivierung von Naturflächen zum Ausgleich von Produktionsrückgängen erheblicher Mengen an THG durch die Zersetzung organisch gebundenen Kohlstoffs freisetzen würde, muss das Ertragsniveau auf den bestehenden Ackerflächen erhalten und bei steigender Nachfrage weiter erhöht werden.

Eine Extensivierung des Ackerbaus wäre hingegen eine Scheinlösung, da sie den Flächenbedarf stark erhöht und die Klimabilanz pro produzierte Einheit verschlechtert. So führt z. B. der Ausbau der ökologischen Landwirtschaft als vermeintlich klimaschonende Wirtschaftsweise nicht zu einer Verbesserung der Klimabilanz, da die produktbezogenen Emissionen aufgrund der geringeren Erträge in etwa denen aus konventioneller Erzeugung entsprechen.

Im Ackerbau gibt es erhebliche **technische Potenziale zur effizienten THG-Minderung**:

Düngeeffizienz

- Die Steigerung der Stickstoff-Effizienz und die damit einhergehende Reduktion von Lachgas-, Ammoniak- und Nitratemissionen bietet große Potenziale. Beitragen können insbesondere:
 - der Einsatz digitaler Technik für Präzisionslandwirtschaft
 - eine dynamische Berechnung des Düngebedarfs
 - der Einsatz moderner Düngemittel – "Enhanced Efficiency Fertilizers"
- Der Einsatz von Düngemitteln aus effizienten Produktionsanlagen ist kurzfristig ein wichtiger Hebel für die Klimateffizienz des Ackerbaus. Da solche Anlagen vor allem in Europa betrieben werden, wo aber aktuell aufgrund der hohen Energiepreise kaum wettbewerbsfähig produziert werden kann, nehmen Importe aus dem außereuropäischen Ausland stark zu.

Zukunftsstrategie

- Für den Ausbau einer nachhaltigeren Düngemittelproduktion braucht es eine verlässliche Versorgung mit erneuerbaren Energien zu wettbewerbsfähigen Preisen.
- Die Nutzung neuer genomischer Techniken (NGT) verspricht eine Verbesserung der THG-Bilanz und würde gleichzeitig die Produktionskosten senken. Daher sollte die Zulassung dieser Technik auf europäischer Ebene zügig erfolgen.

Insgesamt ermöglichen diese Maßnahmen THG-Einsparungen von fast 50 % im Ackerbau. Dieses Potenzial sollte durch finanzielle Förderung und Anpassungen im Düngerecht genutzt werden.

Grundlagen klimafreundlicher Pflanzenproduktion sichern

Der Einsatz von Düngemitteln aus effizienten Produktionsanlagen ist kurzfristig ein wichtiger Hebel für die Klimateffizienz des Ackerbaus. Solche Anlagen werden vor allem in Europa betrieben, wo aber aktuell aufgrund der hohen Energiepreise kaum wettbewerbsfähig produziert werden kann. Stark zunehmende Importe aus dem außereuropäischen Ausland mit deutlich höheren Emissionen verschlechtern die Klimabilanz des Ackerbaus in Deutschland.

Auch die abnehmende Wirkstoffvielfalt bei Pflanzenschutzmitteln bedroht das hohe Ertrags- und Qualitätsniveau des deutschen Acker-, Obst und Gemüsebaus und verschlechtert in der Folge deren Klimabilanz. Drohende Rückgänge der Ernten erhöhen die Emissionen pro produzierter Einheit und führen zu Landnutzungsänderungen, die die Freisetzung großer Mengen an THG bewirken. Neben dem häufig allein betrachteten Risiko-Aspekt muss ebenso der Nutzen-Aspekt bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln wieder stärker berücksichtigt werden.

2. Einleitung

Der menschengemachte Klimawandel ist die größte ökologische, ökonomische und soziale Herausforderung dieses Jahrhunderts. In der deutschen Landwirtschaft wurden in den vergangenen Jahren bereits erhebliche Einsparungen an Treibhausgasen (THG) erzielt und die im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) von 2023 gesetzten Sektorziele erreicht – durch Rückgänge in den Rinderbeständen und beim Einsatz von Stickstoffdüngern (Vos et al. 2024). Diese Emissionsreduktionen wurden vor allem durch eine gesteigerte Effizienz erreicht, z. B. in der Milchleistung je Kuh oder im Ertrag von Kulturpflanzen je eingesetztem Kilogramm Stickstoff.

Weiterreichende Mengenreduktionen, sei es in der Tierhaltung oder im Betriebsmitteleinsatz im Pflanzenbau, hätten erhebliche negative Auswirkungen auf die Leistung und somit gleichzeitig auf die Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft und die Versorgung der Gesellschaft mit Lebensmitteln. So zeigen Analysen zu den Auswirkungen der in der Düngeverordnung vorgeschriebenen Düngung mit 20 % unter dem berechneten Pflanzenbedarf in den nach Düngeverordnung als „Rote Gebiete“ eingestuften Arealen erhebliche negative ökonomische Folgen und kaum zusätzliche positive Umwelteffekte (Kage et al. 2022).

Wie können THG-Emissionen in der Landwirtschaft (mit Fokus auf den Ackerbau) in Zukunft weiterhin effizient gesenkt werden? THG-Effizienz ist der Schlüssel!

Die Erderwärmung hat keine nationalen Grenzen. Agrarrohstoffe werden international gehandelt und die globale Nachfrage nach landwirtschaftlichen Erzeugnissen steigt (z. B. Alexandratos & Bruinsma 2012; Searchinger et al. 2014, Valin et al. 2021). Daher ist die nationale Betrachtung der Emissionen ohne Berücksichtigung der Produktionsmenge, wie sie aktuell im Klimaschutzgesetz und der UN-Klima-Berichterstattung erfolgt, im Kontext der Landwirtschaft wenig zielführend.

Es ist also nicht wichtig, wie viele Treibhausgas-Emissionen (THGE) in einzelnen Ländern entstehen, sondern dass die Emissionen im Zuge der landwirtschaftlichen Produktion global so gering wie möglich ausfallen. Hieraus folgt, dass nicht die Menge an entstehenden CO₂-Äquivalenten¹ (CO₂eq), die je bewirtschaftetem Hektar oder innerhalb einer Nation freigesetzt wird, entscheidend ist, sondern wie viel CO₂eq zur Deckung des (globalen) Bedarfs an Agrarrohstoffen entstehen (Breunig & Mergenthaler 2022).

Daher steht in den nachfolgenden Überlegungen die THG-Effizienz, also das Verhältnis aus Emissionen je Produkteinheit, z. B. eine Tonne Weizen, Raps, Zuckerrüben etc., im Fokus.

Das Kriterium THG-Effizienz ermöglicht den Systemvergleich zwischen ökologischer und konventioneller Wirtschaftsweise (Hülsbergen et al. 2023) und zwischen verschiedenen Produktionsstandorten auf der Welt. Zudem kann der Effekt einzelner ackerbaulicher Maßnahmen bewertet werden.

¹ Mit Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten (CO₂eq) wird das Treibhauspotenzial chemischer Verbindungen beschrieben. Es gibt an, wie viel eine bestimmte Masse eines Treibhausgases im Vergleich zur gleichen Masse CO₂ zur globalen Erwärmung beiträgt. Beispielsweise liegt der Wert für Lachgas (N₂O) 273 (Smith et al. 2021). Ein Kilogramm N₂O hat das 273-fache Treibhauspotenzial eines Kilogramms CO₂.

3. Klimarelevanz des Ackerbaus

In der deutschen Landwirtschaft wurden in den vergangenen Jahren bereits erhebliche THG-Einsparungen erzielt und die im Bundes-Klimaschutzgesetz 2023 gesetzten Sektorziele erreicht (siehe Abbildung 1).

Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft von 1990 bis 2023

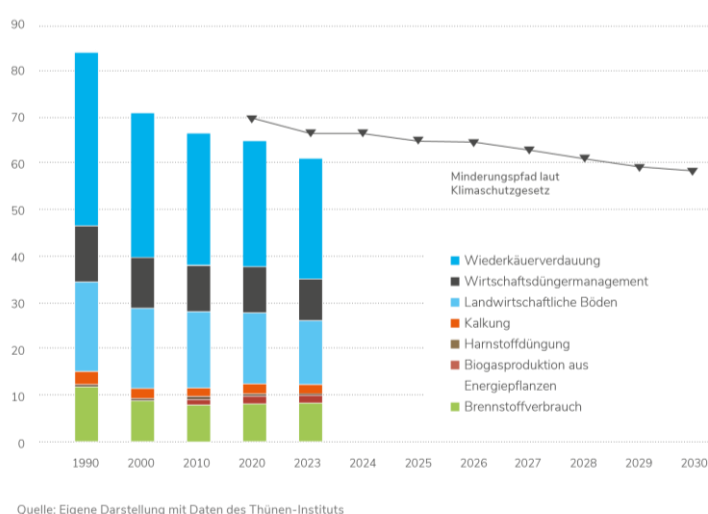


Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen des Sektors Landwirtschaft.
(Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus Vos et al. 2024)

Im Jahr 2023 hatten die Wiederkäuerverdauung (26 Mio. t CO₂eq), Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden (14 Mio. t CO₂eq) und Wirtschaftsdüngermanagement (9 Mio. t CO₂eq) den größten Anteil an den Gesamtemissionen (60 Mio. t CO₂eq) des Sektors.²

4. THG-Minderungsmaßnahmen im Ackerbau

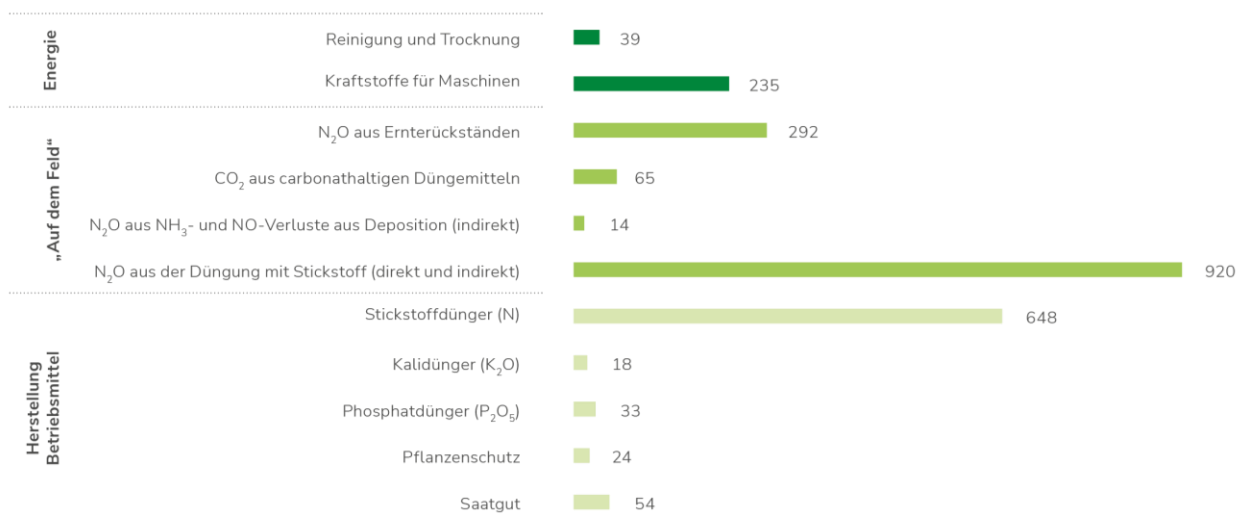
Abgesehen von der in dieser Ausarbeitung unberücksichtigten Tierhaltung (inkl. Wirtschaftsdüngermanagement) sind Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden und der Brennstoffverbrauch zunächst die größten Hebel zur Reduktion von THG-Emissionen in der landwirtschaftlichen Produktion. Aus diesen aggregierten Zahlen lässt sich nicht unmittelbar ableiten, welche konkreten Maßnahmen zur Minderung der THG-Emissionen im Ackerbau ergriffen werden können. Hierzu bedarf es einer näheren Betrachtung der THG-relevanten Faktoren.

² Die Herstellung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln ist in der Betrachtung nicht berücksichtigt, da diese dem Sektor Industrie zugeordnet werden.

Am Beispiel der Winterweizenproduktion wird deutlich, dass insbesondere die Herstellung von Düngemitteln, die im nationalen THG-Inventar nicht dem Sektor Landwirtschaft, sondern der Industrie zugeordnet werden, sowie N₂O-Emissionen „auf dem Feld“ die relevantesten Faktoren darstellen (siehe Abbildung 2)³. Ursächlich hierfür ist das energieintensive Verfahren zur Herstellung von Stickstoffdüngern, bei dem bislang fast ausschließlich fossile Energieträger zum Einsatz kommen, und Lachgasemissionen aus biologischen Umsetzungsprozessen von N-haltigen Verbindungen im Boden.⁴

Umgekehrt verursacht die Herstellung von Pflanzenschutzmitteln und Saatgut vergleichsweise geringe Emissionen. Insgesamt ergeben sich nach der in Abbildung 2 zugrundeliegenden Berechnung Gesamtemissionen von 2.341 kg CO₂eq/ha und 0,3 kg CO₂ je kg Weizen (Frischmasse).⁵

Treibhausgasemissionen (kg CO₂eq/ha) im Weizenanbau (gesamt 2.341 kg CO₂eq/ha)



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Abbildung 2: Treibhausgas-Emissionen im Weizenanbau. Die Annahmen zum Produktionsverfahren und die Werte der THG-Emissionen sind im Anhang dargestellt (Eigene Darstellung auf Basis von Berechnungen mit dem [LfL-Klimarechner](#)).

³ Die folgenden Ausführungen werden beispielhaft anhand des [LfL-Klimarechner](#) verdeutlicht. Es existieren weitere Kalkulations-Tools und es ist zu prüfen, ob die jeweils hinterlegten Emissionsfaktoren für die spezifischen Fragestellungen angemessen sind.

⁴ Eine Übersicht der berücksichtigten Emissionen findet sich in Anhang 1: Übersicht berücksichtigender Emissionen bei der Berechnung der Treibhausgasbilanz mit dem LfL-Klimarechner.

⁵ In der Berechnung sind Effekte der Humusbilanz sowie THG-Emissionen aus der Herstellung von Gebäuden und Maschinen sowie THG-Emissionen aus der Atmung und Bildung von CO₂ durch Tiere und Pflanzen nicht berücksichtigt. Die Humusbilanz des Produktionsverfahrens ergibt nach VDLUFA-Methode ([LfL-Humusbilanzierung](#)) ein leicht positiver Saldo von 31 kg Humus C, was wiederum etwa 100 kg CO₂ entspricht.

Die Betrachtung der absoluten Emissionen zeigt jedoch nur eine Seite der Gleichung. Die andere Seite ist die Ertragswirkung, die entscheidend für die Gesamtbewertung der einzelnen Faktoren ist.

4.1 Systematisches Verständnis von Ackerbau

Pflanzenproduktion ist ein System, bei dem verschiedene Betriebsmittel, z. B. Saatgut, Pflanzenschutz- und Düngemittel, eingesetzt werden. Dieses Zusammenspiel wird in Abbildung 3 deutlich: Züchtung, Pflanzenschutz und Düngemittel haben einen erheblichen Einfluss auf die Ertragsleistung je Hektar, also die Flächeneffizienz. Die fortlaufende züchterische Verbesserung führt in Kombination mit einer ausreichenden Nährstoffversorgung und dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu kontinuierlichen Steigerungen der Flächeneffizienz. Kein Pflanzenschutz (Abbildung 3, Mitte) oder eine ungenügende Versorgung mit Nährstoffen (Abbildung 3, rechts) hätten erhebliche negative Effekte auf die Ertragsleistung und somit gleichbedeutend auch negative Auswirkungen auf die Klimabilanz.

Trends bezüglich Kornertragsleistung von 191 Winterweizensorten in Deutschland über einen Zeitraum von fünf Jahrzehnten (Zulassungsjahre 1966-2013 in Europa)

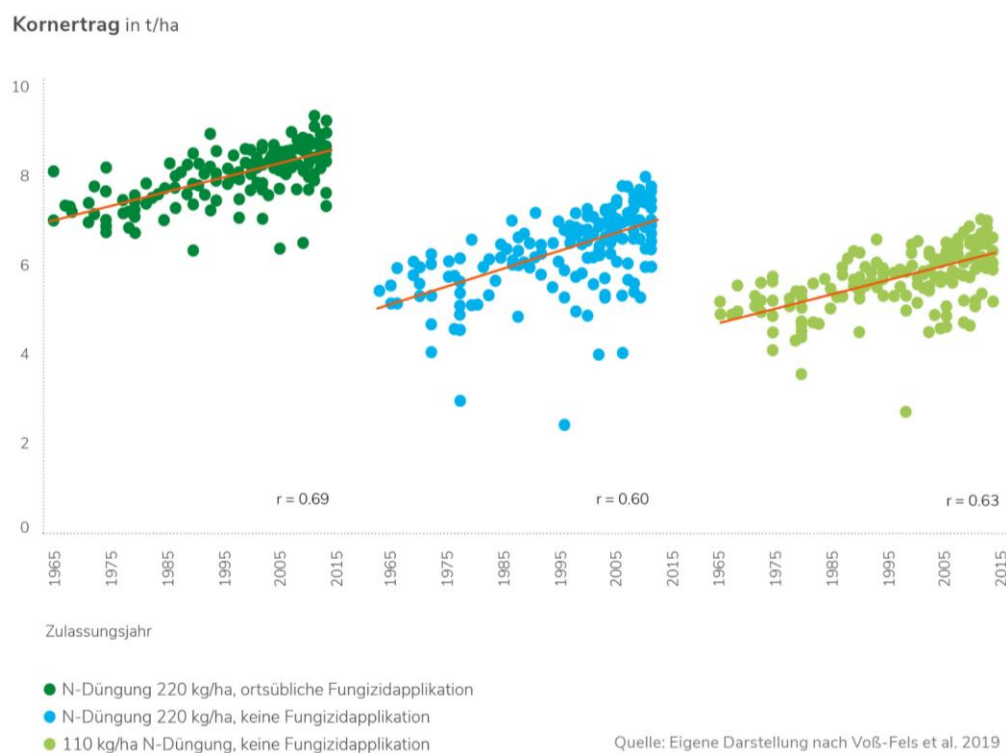


Abbildung 3: Trends der Kornertragsleistung von Winterweizen in Deutschland. (Quelle: Voß-Fels et al. 2019)

Bevor auf konkrete Maßnahmen zur Steigerung der THG-Effizienz eingegangen wird, werden in den folgenden Abschnitten zwei weitere grundlegende Optionen diskutiert, nämlich die Verlagerung der Produktion und die Umstellung auf ökologische Landwirtschaft

4.2 Klimaschutz und Umweltschutz durch inländische Produktion

Unabhängig von der Wirtschaftsweise – ökologisch oder konventionell – ist jede Maßnahme zur Steigerung der THG-Effizienz auf ihre Realisierbarkeit zu prüfen. Hierbei sind insbesondere die Skalierbarkeit und die ökonomischen Auswirkungen zu berücksichtigen.

Die ökonomischen Effekte bzw. Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit inländischer Erzeugnisse sind von besonderer Relevanz. Der deutsche Ackerbau ist im internationalen Vergleich bereits heute besonders klimaeffizient. Die europäische und insbesondere deutsche Landwirtschaft nutzt die Potenziale ihres Gunststandorts in Zentraleuropa und hat es in den zurückliegenden Jahrzehnten geschafft, die Erträge bei sinkenden THG-Emissionen kontinuierlich zu steigern. Bei der wichtigsten Ackerkultur Winterweizen weist Deutschland im Vergleich europäischer Länder besonders geringe produktspezifische THG-Emissionen auf (Achten & Van Acker 2016).

Ordnungsrechtliche Wettbewerbsnachteile bzw. durch Ordnungsrecht induzierte Ertragsrückgänge und Qualitätsverluste, die zur Verlagerung der Produktion ins Ausland führen, wären also gleichbedeutend mit einer Steigerung der THG-Emissionen. Ein mahnendes Beispiel in Bezug auf die Effekte ordnungsrechtlicher Einschränkungen ist Dänemark. Im Zuge extrem restriktiver Düngevorgaben ist dort der Proteingehalt von Weizen in den letzten Jahrzehnten um ca. 2,4 - 2,9 % gesunken (Styczen et al. 2020). Durch die damit einhergehende Abnahme der Backfähigkeit können dort fast keine hochwertigen Weizen für die Brotproduktion („Backweizen“) mehr erzeugt werden. Die Folge ist, dass der Bedarf zunehmend durch Importe von proteinreichem Weizen gedeckt werden muss.

Eine Extensivierung des Ackerbaus in Mitteleuropa würde die weltweit stetig stattfindende Umwandlung von Natur- in Agrarflächen (z. B. Martin 2008, Richards et al. 2014; Pendrill et al. 2019, Beckmann et al. 2020, Fuchs et al. 2020) forcieren.

Insbesondere die Kultivierung von Naturflächen und die Intensivierung der Produktion auf bestehenden Agrarflächen an anderen Orten der Welt würden in der globalen Betrachtung durch Leakage-Effekte zu gesteigerten THG-Emissionen führen und den Biodiversitätsverlust beschleunigen (Müller et al. 2017). Wie groß die Klimawirkung von Landnutzungsänderungen ist, zeigt sich bei Betrachtung von THG-Emissionen bei der Kultivierung von Naturflächen: Im globalen Durchschnitt werden hierbei je Hektar ca. 200 t CO₂ durch die Zersetzung von ober- und unterirdischer Biomasse freigesetzt (von Witzke & Noleppa 2012 mit Verweis auf Searchinger et al. 2008, Burney et al. 2010 oder Tyner et al. 2010). Der Vergleich dieser „Klima-Hypothek“ zu den am Beispiel Weizen ermittelten Emissionen von etwa 2,4 t/ha (siehe Abbildung 2) verdeutlicht, wie schädlich Landnutzungsänderungen für das Klima sind.

Landnutzungsänderungen, also die Kultivierung bisheriger Naturflächen, müssen mit Blick auf die Klimawirkung unbedingt vermieden werden.

4.3 Extensivierung verspricht keine Verbesserung

Häufig ist zu lesen, dass die Ausweitung der ökologischen Landwirtschaft einen Beitrag zum Klimaschutz darstellt. Tatsächlich schneidet der ökologische Ackerbau bei der Betrachtung von THG-Emissionen je Hektar deutlich besser ab. Allerdings betragen dort die Hektarerträge nur etwa die Hälfte der Erntemengen des konventionellen Anbaus (Weckenbrock et al. 2019, Hülsbergen et al. 2023). In den Fruchtfolgen des ökologischen Landbaus werden vermehrt Kulturen mit geringeren Naturalerträgen⁶ angebaut, was die Flächeneffizienz im Gesamtvergleich der Anbauverfahren zusätzlich mindert. Gleiches gilt für die höheren Anteile an Grünbrachen und Körnerleguminosen (Ströbel 2024).

Erträge im konventionellen und ökologischen Ackerbau in Deutschland in dt pro Hektar

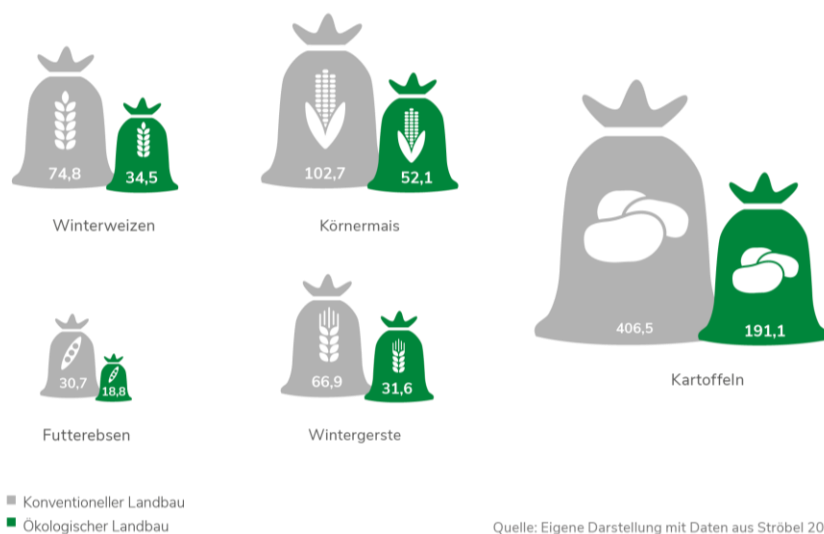


Abbildung 4: Erträge (dt/ha) Ackerkulturen im konventionellen und ökologischen Ackerbau. (Eigene Darstellung mit Daten aus Ströbel 2024)

Aufgrund der hohen Steigerung bzw. Sicherung von Erträgen durch Mineraldünger und Pflanzenschutzmittel im konventionellen Ackerbau wird der vermeintliche Nachteil höherer Emissionen pro Hektar in der ertragsskalierten Betrachtung ausgeglichen. Die Anbaufläche als Bewertungsgrundlage wird der notwendigen Effizienzbetrachtung für klimaschonende Produktion, wie sie in allen anderen Sektoren üblich ist, nur unzureichend gerecht. Auf Basis der THG-Emissionen je

⁶ z. B. Roggen und Sommergetreide, siehe Kühl et al. 2021.

Produkteinheit werden zwischen ökologischem und konventionellem Ackerbau keine Unterschiede festgestellt (z. B. Weckenbrock et al. 2019, S. 152, Hülsbergen et al. 2023, S. 52).

Berücksichtigt man die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Effekte von Landnutzungsänderungen, ist die konventionelle Wirtschaftsweise im Hinblick auf die Klimawirkung sogar deutlich überlegen (Noleppa 2017, Ströbel 2024).

Anstelle einer pauschalen Bevorzugung eines Systems, gilt es, die THG-Effizienz in beiden Wirtschaftsweisen zu verbessern. **Eine Ausdehnung des ökologischen Landbaus hätte mit Blick auf die Klimawirkung keine positiven Effekte.**

Aus den bisherigen Überlegungen ergeben sich bezüglich der Verbesserung der THG-Effizienz im Ackerbau folgende Handlungsfelder:

1. Stickstoffverluste minimieren und damit Stickstoffeffizienz optimieren
2. THG-Emissionen in der Düngemittelproduktion minimieren
3. Zuchtfortschritt erhöhen
4. Flächen- und Nährstoffeffizienz durch Pflanzenschutz sichern.

Wie dies konkret gelingen kann und was hierzu notwendig ist, wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

4.4 Stickstoffverluste minimieren und Stickstoffeffizienz optimieren

Ein zentraler Hebel zur Minderung von Stickstoffverlusten ist die bedarfsgerechte Bereitstellung von Stickstoff. Konkret geht es darum, die in den jeweiligen Wachstumsphasen benötigten Mengen zum richtigen Zeitpunkt und an den richtigen Ort in pflanzenverfügbarer Form zur Verfügung zu stellen.

4.4.1 Teilflächenapplikation von Stickstoffdüngern

Bei teilflächenspezifischer Applikation von Düngemitteln werden unter Berücksichtigung des Ertragspotenzials bzw. des Pflanzenbedarfs innerhalb einer landwirtschaftlichen Fläche die Düngemengen räumlich angepasst. So werden ertragsstarke Areale innerhalb eines Felds mit mehr und ertragsschwache Gebiete mit weniger Nährstoffen versorgt, was zu einer Erhöhung der Nährstoffeffizienz und einer Reduktion von Emissionen führt.

Hierbei werden Informationen aus Ertragskarten von Sensoren und Satelliten sowie Kombinationen dieser (Karte + Sensor und Karte + Satellit = MapOverlay) zur Intensitätsanpassung verwendet (Drücker 2016).

Das Reduktionspotenzial durch diese Verfahren wird im Durchschnitt von auf 3 bis 10 % (Kühl et al. 2019, Sponagel et al. 2024) des eingesetzten Stickstoffs bei gleichbleibenden Erträgen geschätzt. Insgesamt entstehen in Abhängigkeit der betrieblichen Voraussetzungen, trotz Einsparungen beim Düngemittelkauf zusätzliche Kosten in einer Spanne von ca. 10 bis 20 € je ha (Kühl et al. 2019). Aufgrund von Kostensteigerungen im Bereich der Landtechnik⁷ könnten die Kosten jedoch inzwischen höher liegen, sodass die zusätzlichen Verfahrenskosten höher sein könnten. Bezüglich der Klimawirkung ergeben sich zwei Vorteile:

- (I) Es muss für den gleichen Ertrag weniger Stickstoff eingesetzt und somit auch weniger Dünger produziert werden.
- (II) Die Vermeidung lokaler Stickstoffüberschüsse mindert die Bildung von Lachgas (direkte Klimawirkung) und Nitrat-Emission sowie Ammoniak und Stickoxid-Verluste (indirekte Klimawirkung). Da die lokalen Nährstoffüberschüsse auf ertragsschwachen Arealen gemindert werden, könnte sogar ein überproportionaler Minderungseffekt auftreten (Sponagel et al. 2024).

Baden-Württemberg hat das große Potenzial der Teilflächenapplikation von Düngemitteln erkannt und fördert dies als Klimaschutzmaßnahme über die zweite Säule der Agrarpolitik⁸. Zur Beschleunigung der bundesweiten Anwendung sollte dies zukünftig über die erste Säule der Agrarpolitik erfolgen.

➔ **Erweiterung der Eco-Schemes um die Förderung teilflächenspezifischer Düngung.**

4.4.2 Dynamische Düngbedarfsermittlung

Die EU-Nitratrichtlinie (91/676/EWG) zielt darauf ab, Verluste in der Düngung zu reduzieren und die Effizienz zu steigern. Zur Umsetzung in Deutschland definiert die Düngeverordnung (DüV) eine starre Schätzung des Düngedarfs anhand der Ertragswartung. Diese wird aus den Durchschnittserträgen der fünf vorangegangenen Jahre abgeleitet. Feldspezifische und saisonale Einflussfaktoren können jedoch dazu führen, dass der tatsächliche Pflanzenbedarf deutlich über oder unter den nach DüV berechneten Werten liegt. In Jahren mit niedrigen Erträgen droht folglich ein Nährstoffüberschuss, während das Ertragspotenzial in Jahren mit guten Bedingungen nicht ausgeschöpft werden kann.

Zudem schreibt die DüV in §13a Abs. 2 für Gebiete mit hoher Nitratbelastung im Grundwasser, sogenannten „Roten Gebieten“, eine starre Reduktion der Stickstoffdüngung um 20 % vor. Dieser

⁷ Im Zeitraum 2015/16 bis 2022/23 sind die Kosten für Landtechnik um 33,6 % gestiegen (Quelle: BMEL: [Allgemeine Preisstatistik - Index der Einkaufspreise landwirtschaftlicher Betriebsmittel](#))

⁸ Siehe [Förderprogramm für Agrarumwelt, Klimaschutz und Tierwohl in Baden-Württemberg \(FAKT II\)](#)

Sicherheitspuffer stellt aufgrund der negativen Auswirkungen auf die Erträge und Qualitäten eine ineffiziente Regelung dar.

Eine ungenügende Versorgung mit Stickstoff, so wie derzeit in „Roten Gebieten“ vorgeschrieben, bedingt, dass im Bodenvorrat vorliegende Reserven im Zeitablauf abgebaut werden, da diese durch biologische Abbauprozesse freigesetzt, jedoch durch verminderte Bildung organischer Substanz infolge der Düngeeinschränkung nicht nachgeliefert werden. Die Reduktion des Nährstoff-Bodenvorrats senkt das Ertragspotenzial und die organische Masse im Boden über die Zeit ab. Dies kostet Erträge bzw. Erlöse und führt durch Humusabbau zur Freisetzung von organisch gebundenem Kohlenstoff mit klimaschädlichen Folgen. Eine Wiederherstellung dieser verminderten Bodenfruchtbarkeit ist langwierig und kostet überproportional Geld (Pasda et al. 2018).

Der Rechtsrahmen zur Düngemengen-Bestimmung begrenzt, insbesondere in Roten Gebieten, die bedarfsgerechte Nährstoffversorgung von Pflanzen und gefährdet somit Erntequalität, Erträge und die Bodenfruchtbarkeit – und so die ökonomische Situation von Betrieben.

Eine Alternative zum aktuellen Verfahren ist die dynamische Düngebedarfsermittlung. Hierbei werden die tatsächlichen Bedarfe anhand von N-Management-Tools mit Unterstützung von Sensoren oder Satellitenbildern ermittelt⁹. Diese Herangehensweise bietet im Vergleich zu Standardverfahren erhebliche Verbesserungspotenziale: Stickstoffüberschüsse können signifikant gesenkt werden (Gate et al. 2019, Argento et al. 2022). Somit kann bei deutlich besseren wirtschaftlichen Ergebnissen effizienter Klima- und Gewässerschutz erreicht werden.

In Frankreich wird dieses Verfahren auch in Roten Gebieten genutzt. Dort erfolgt die Stickstoff-Düngebedarfsermittlung in nitratsensiblen Gebieten verpflichtend über die Bilanzmethode. Der Düngebedarf kann während der Saison angepasst werden, sofern ein behördlich anerkanntes N-Management Tool einen höheren oder niedrigeren Bedarf einfach ermittelt.

Geeignete Tools sind z. B. durch das Prev’N Label von COMIFER gekennzeichnet.

➔ **Anstelle bzw. ergänzend zu der in der DüV beschriebenen (starren) Methode zur Düngebedarfsermittlung sollte insbesondere in Roten Gebieten eine dynamische Düngebedarfsermittlung ermöglicht werden.**

➔ **Einrichtung eines bundeseinheitlichen Zertifizierungssystems und einer Stelle zur Anerkennung von geeigneten N-Management-Tools für eine dynamische Düngebedarfsermittlung (DEMAND-Tools), z. B. durch das Thünen-Institut oder das Julius Kühn-Institut.**

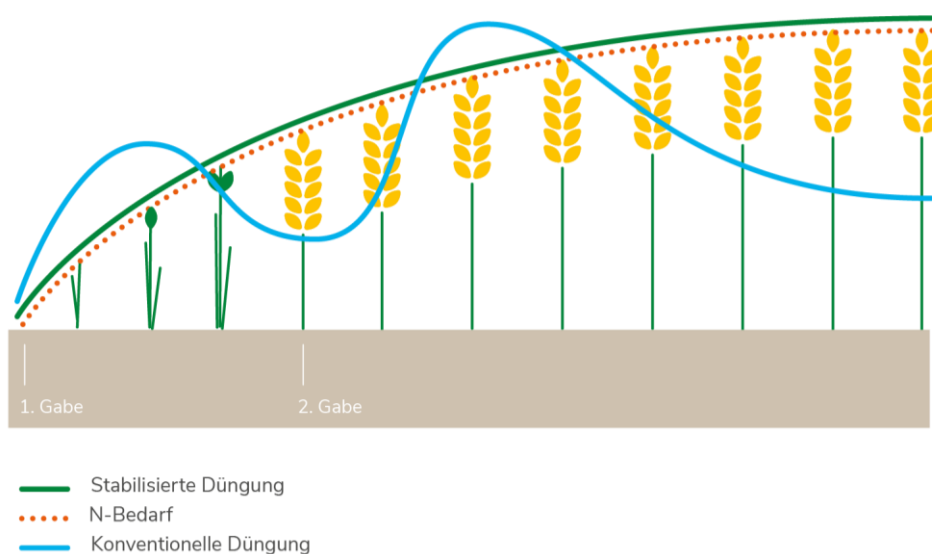
⁹ Der Unterschied zu der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Teilflächenapplikation von Düngemitteln mittels Sensoren oder Satellitenbildern liegt bei dynamischer Düngebedarfsermittlung darin, dass ohne vorherige Festlegung der Dünge(höchst-)menge, nach dem tatsächlichen Bedarf, ggf. auch teilflächenspezifisch, gedüngt werden kann. Bei Teilflächenapplikation unter Berücksichtigung der aktuellen starren Berechnung der zulässigen Düngemenge nach DüV können entsprechend der Ertragserwartung von Teilflächen Zu- oder Abschläge gemacht werden. Insgesamt darf jedoch die errechnete Höchstmenge nicht überschritten werden.

- ➔ **Anreize für Schulung und Beratung von Landwirten zur flächendeckenden Umsetzung des Verfahrens schaffen.**

4.4.3 Verwendung von Enhanced Efficiency Fertilizers

Neben der räumlichen Verteilung ist die zeitgerechte Bereitstellung von Nährstoffen besonders wichtig für die Nährstoffeffizienz. Entscheidend ist, dass die Bereitstellung bzw. Verfügbarkeit von Nährstoffen möglichst synchron zum Bedarf der Pflanzen erfolgt. In der Regel werden Stickstoffdünger in mehreren Gaben auf die Felder ausgebracht. Zu den jeweiligen Düngezeitpunkten werden zunächst mehr Nährstoffe auf die Flächen gebracht, als von den Kulturen unmittelbar aufgenommen werden können (siehe Abbildung 5).

Konventionelle und stabilisierte Düngung



Quelle: Eigene Darstellung nach SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH

Abbildung 5: Schematische Darstellung von Stickstoffbedarf (Einheit) und Stickstoffverfügbarkeit (Einheit) mit und ohne N-Inhibitoren (Quelle: Eigene Darstellung nach SKW Piesteritz)

Je nach Düngeform bedarf es biologischer Umwandlungsprozesse, damit der Stickstoff pflanzenverfügbar ist. Diese Umsetzungsprozesse sind witterungsabhängig und nur bedingt planbar. Neue Technologien im Bereich der Düngung, die Verluste in die Umwelt reduzieren und damit die Nährstoffnutzungseffizienz von Nutzpflanzen erhöhen, lassen sich unter dem Begriff "Enhanced Efficiency Fertilizers" (EEFs) zusammenfassen. Dazu gehören zum Beispiel Düngemittel mit kontrollierter Freisetzung (CRF) und Langzeitdünger (SRF), die im Mittel zu einer N_2O -Reduktion von 33 % führen. (Grados et al. 2022).

Das prominenteste Beispiel dieser Kategorie sind die stabilisierten N-Düngemittel, denen (N)-Stabilisatoren (Inhibitoren) zugesetzt sind. N-Stabilisatoren verlängern die Dauer, in der die N-Komponente des Düngers in Form von Harnstoff (Urease-Inhibitor (UI)) oder Ammonium (Nitrifikationshemmer; NI) im Boden verbleibt und der Pflanze zur Verfügung steht. N-Stabilisatoren führen zu deutlich geringeren Stickstoffverlusten in Form von N_2O , NH_3 und NO_3^- und wirken sowohl bei organischen als auch mineralischen N-Düngern.

Insbesondere das klimarelevante N_2O kann erheblich reduziert werden. Dabei schwanken die N_2O -Minderungen zwischen 10 und 65 %. Im Mittel wird eine Minderung um 44 % festgestellt (Grados et al. 2022), und sogar über 70 % N_2O -Minderung sind möglich (Ni et al. 2023)¹⁰. Durch Reduktion der NH_3 -Emissionen und der NO_3^- -Auswaschung werden auch die indirekten N_2O -Emissionen vermindert.

Die Preise für stabilisierte N-Dünger liegen etwa 11 % über den Preisen für vergleichbare Düngemittel ohne Stabilisatoren (Sponagel 2024).

Der Einsatz von N-Inhibitoren ist ein sehr effektiver und günstiger Weg zur THG-Reduktion.

→ Erweiterung der Eco-Schemes um die Förderung des Einsatzes von N-Inhibitoren bei Mineral- und Wirtschaftsdüngern

¹⁰ Ein Teil der N_2O -Emissionen tritt erst durch biologische Prozesse nach der eigentlichen Produktionsperiode auf. Daher kann der Effekt in der Betrachtung über die Produktionsperiode hinaus auch geringer ausfallen (Ruser und Schulz 2015, Fan et al. 2022). Jedoch könnte dieses Phänomen wiederum durch nachfolgende agronomische Maßnahmen, z. B. den Anbau von Zwischenfrüchten, gemindert werden.

4.4.4 Schwefel-, Kalium- und Kalkversorgung

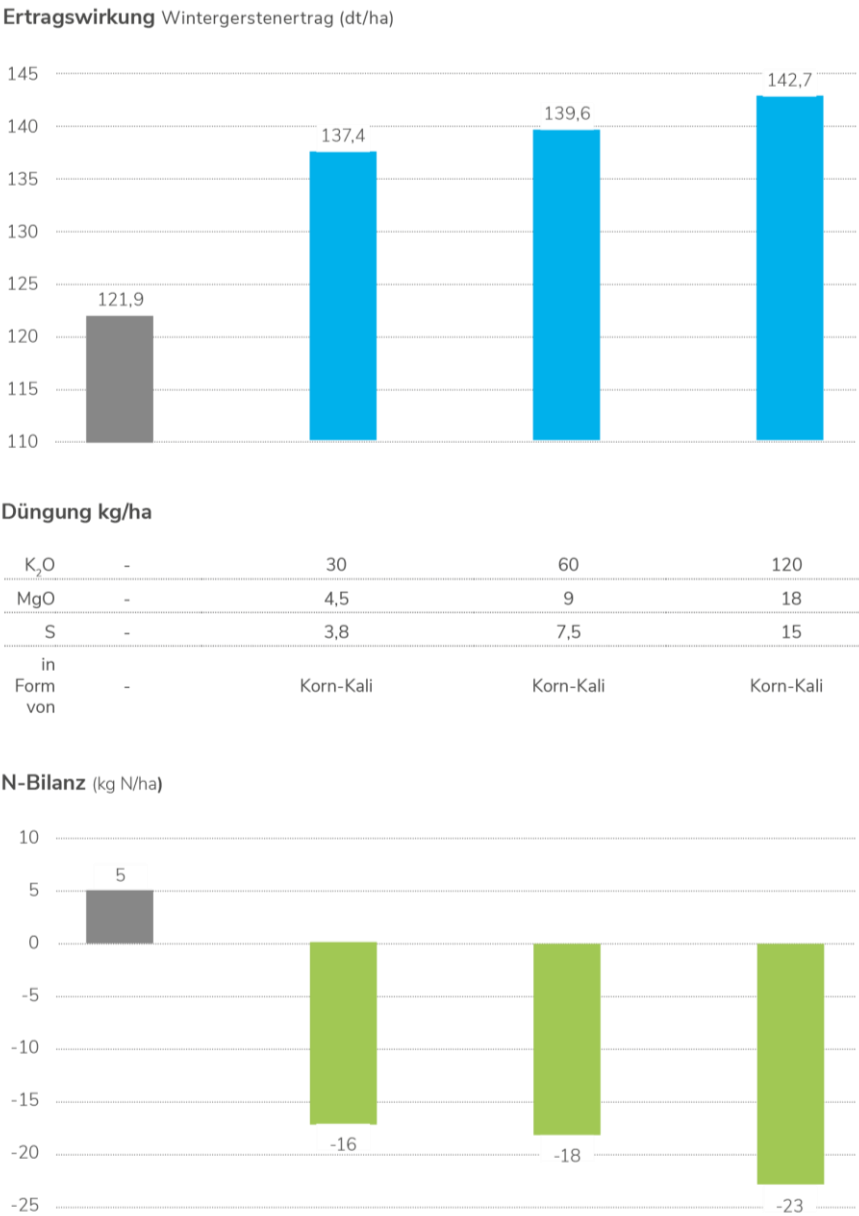
Damit der eingesetzte Stickstoff optimal von den Pflanzen verwertet werden kann, müssen auch andere Nährstoffe ausreichend verfügbar sein (siehe Abbildung 6).

Schwefel kommt eine wichtige Rolle in der Proteinsynthese zu. Er dient neben Stickstoff als essenzieller Baustein beim Aufbau von Proteinen. Dadurch trägt Schwefel maßgeblich zur Sicherung der Erträge und Qualität des Ernteguts bei. Die Funktion des Schwefels in der Pflanze ist eng mit der Nutzung von Stickstoff verbunden. Besteht ein Schwefelmangel, kann verfügbarer Stickstoff durch die Pflanze nicht genutzt werden, und die Stickstoffeffizienz sinkt. **Zur Optimierung der Stickstoffeffizienz ist eine ausreichende Schwefelversorgung der Pflanze essenziell.**

Auch die Kalium-Düngung gilt es nicht zu vernachlässigen, da eine optimale Kalium-Versorgung die Wirkung der Stickstoffdüngung verbessert. Nur bei einer optimalen Kaliumversorgung kann der zur Verfügung stehende Stickstoff vollständig aufgenommen und in Ertrag umgesetzt werden (siehe Abbildung 6). Zusätzlich werden die produktive Wassernutzung und die Minderung von Trockenstress **durch eine ausreichende Kaliumversorgung verbessert, was Ertragseinbußen vermindert.**

Für die meisten Kulturpflanzen ist ein optimaler pH-Wert wichtig, damit die Nährstoffe im Boden bestmöglich für die Pflanzen verfügbar sind (Nährstoffeffizienz). Daher zählt eine standortspezifische Kalkung (Calcium und auch Magnesium) zu den Grundlagen der Nährstoffversorgung. Sie verhindert Bodenversauerung und erhält so natürliche Bodenfunktionen und die Bodenfruchtbarkeit. **Eine optimale Kalkversorgung verbessert die physikalischen Bodeneigenschaften und erhöht so beispielsweise Infiltrationsraten und die Wasserhaltekapazität.**

Balancierte Düngung sichert gute Erträge und hohe Nährstoffeffizienz



Versuchsstandort Ostenfeld, K-Düngungsversuch 2015 in Wintergerste Vorfrucht: Winterweizen Bodenart sl, ph: 6,1 (B), mg/100 g Boden: 24 mg P₂O₅ (C), 12 mg K₂O (B), 5,5 mg Mg (A)
 N-Versorgung: Nmin: 31 kg N/ha; N-Düngung: 190 kg N/ha; Gesamt-N: 221 kg N/ha)

Quelle: IVA Broschüre „Kalium – Baustein für eine nachhaltige Ertragsbildung“

Abbildung 6: Auswirkung der Schwefel- und Kaliumdüngung auf den Ertrag und die N-Bilanz von Wintergerste (Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus „IVA-Kali-Broschüre“)

4.4.5 Biostimulanzien

Biostimulanzien umfassen ein breites Spektrum an Substanzen. Man unterscheidet zwischen mikrobiellen und nicht-mikrobiellen Biostimulanzien. Zu den nicht-mikrobiellen Biostimulanzien zählen z.B. Algen, anorganische Substanzen, Aminosäuren sowie Humin- und Fulvosäuren. Biostimulanzien ergänzen neben den klassischen Betriebsmitteln den Werkzeugkasten in der Landwirtschaft, im Gartenbau und in Sonderkulturen. Sie sind vielfältig einsetzbar und tragen dazu bei, Kulturpflanzen leistungs- und widerstandsfähiger zu machen und abiotischen Stress zu mindern. **Als Ergänzung zu Pflanzenschutz- und Düngemitteln können Biostimulanzien im Hinblick auf den stetig voranschreitenden Klimawandel genauso von Bedeutung sein und die Nährstoffeffizienz erhöhen.**

4.5 THG-Emissionen in der Produktion von Mineraldüngern minimieren

Die Emissionen im Zuge der Herstellung von Mineraldüngern können im Kern auf zwei Wegen reduziert werden: Durch die Reduktion der Produktionsmenge und durch verbesserte THG-Effizienz, also die Reduktion der Emissionen pro produzierte Einheit. Die Reduktion der Produktionsmenge wird implizit in diesem Papier im Kontext der Nährstoffeffizienz angesprochen. Wenn es gelingt, die Agrarrohstoffe in gleicher Menge und gleichbleibender Qualität mit geringeren Mengen an Mineraldüngern herzustellen, kann bei konstanter Nachfrage nach landwirtschaftlichen Erzeugnissen die Produktion von Mineraldüngern reduziert werden.

4.5.1 Substitution durch organische Düngemittel

Die Substitution von Mineraldüngern durch organische Düngemittel stellt keine zielführende Minderungsoption dar. Zur Steigerung des Anteils organischer Dünger müsste das Aufkommen von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung oder aus Biogasanlagen erhöht werden, was wiederum dazu führen würde, dass mehr Fläche für die Produktion von Rohstoffen für diese Verwertungspfade verwendet werden müsste, die dann ggf. nicht zur Nahrungsmittelerzeugung zur Verfügung steht. Auch dadurch würde die Substitution mineralischer Düngemittel die THG-Bilanz nicht verbessern. Zwar würden die Emissionen bei der Mineraldüngerproduktion proportional sinken, dieser Vorteil wird jedoch durch Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern kompensiert¹¹. **Die Substitution mineralischer Dünger durch organische Düngemittel bringt keine Verbesserung der CO₂-Bilanz im Ackerbau.**

¹¹ In der Abbildung 2 zugrundeliegenden Rechnung würde z. B. die Substitution von 3 dt der 6,5 dt Kalkammonsalpeter durch 11 m² Biogasgärrest und 11 m³ Mastschweinegülle nur zu einer Minderung der THG-Emissionen um 0,01 kg CO₂-Äq je kg Weizen führen. Zusätzliche Emissionen bei der Tierhaltung, sind hierbei nicht berücksichtigt.

4.5.2 Produktion mit hohen technischen Standards

Der CO₂-Fußabdruck bei der Herstellung von mineralischen Stickstoff-Düngemitteln ist in Europa aufgrund des hohen technischen Standards im internationalen Vergleich mit Abstand am geringsten. Während hier z. B. die produktbezogenen THG-Emissionen bei der Herstellung von Kalkammonsalpeter 0,95 kg CO₂eq /kg Produkt betragen, sind es beispielsweise in Russland 1,98 und in China sogar 2,86 kg CO₂eq /kg Produkt (Brentrup et al. 2018). **Der Weg zur THG-Reduktion in der Düngemittelproduktion führt also zunächst über die Verwendung von Mineraldüngern, die in der EU unter hohen technischen Standards produziert werden.**

Durch die erheblichen Kostensteigerungen für Erdgas, den derzeit wichtigsten Energieträger in der Stickstoffproduktion, kann innerhalb der EU kaum zu konkurrenzfähigen Preisen produziert werden. Blicke dieser Zustand erhalten, würden die in den vergangenen Jahren schon stark gestiegenen Importe aus Regionen mit deutlich klimaschädlicheren Anlagen weiter zunehmen.

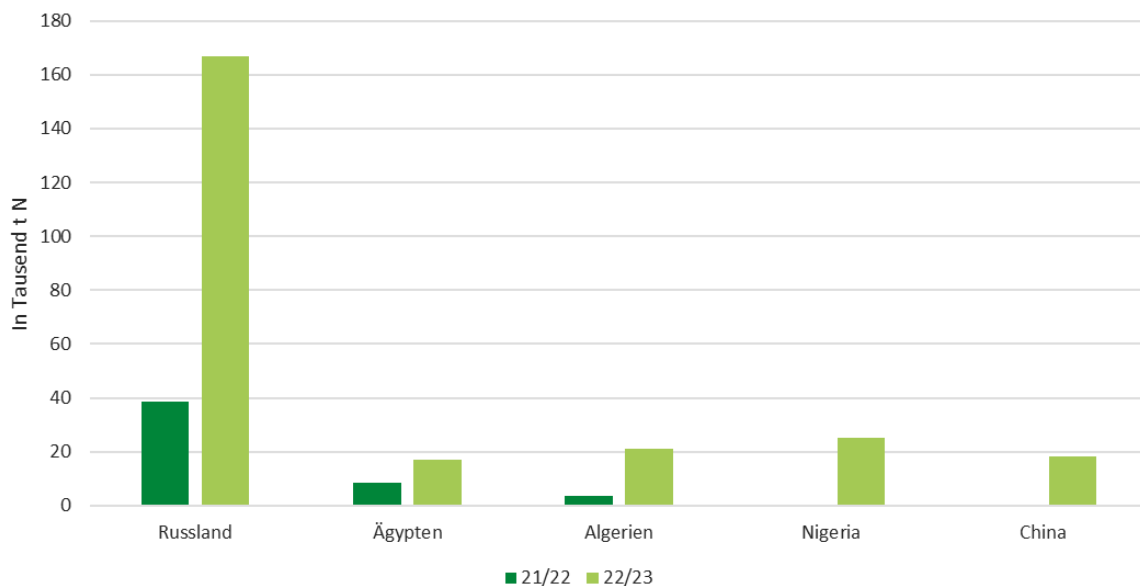


Abbildung 7: Importmengen in Tausend Tonnen N (Stickstoff Einzeldünger) aus dem nicht-europäischen Ausland, Vergleich Düngesaison 21/22 und 22/23. (Quelle: Destatis/IVA)

➔ **Die Politik muss dringend Lösungen für das Problem struktureller Wettbewerbsnachteile für europäische Düngemittelproduzenten durch hohe Energiekosten finden!**

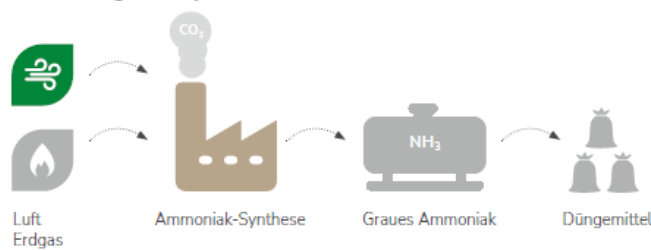
4.5.3 Grüne Düngemittel und CO₂-Abscheidung

Zukünftig können THG-Reduktionen durch die Verwendung erneuerbarer Energien, z. B. „grünem“ Kali, „Bio“-Methan oder „grünem“ Ammoniak und die Abscheidung von in der Produktion

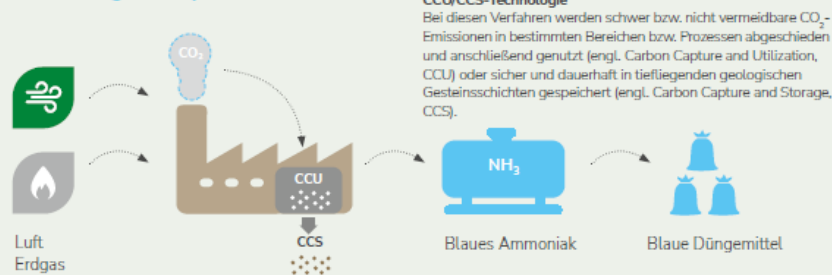
freigesetztem CO₂, die Klimabilanz deutlich verbessern. Insbesondere im Bereich der Verwendung erneuerbarer Energien gibt es bereits einige Pilotprojekte, z. B. bei der Herstellung von „grünem“ Kali und „grünen“ Stickstoffdüngern. Die unterschiedlichen Produktionsverfahren sind in Abbildung 8 für Stickstoff und in Abbildung 9 für Kali dargestellt.

Produktion von Stickstoffdünger

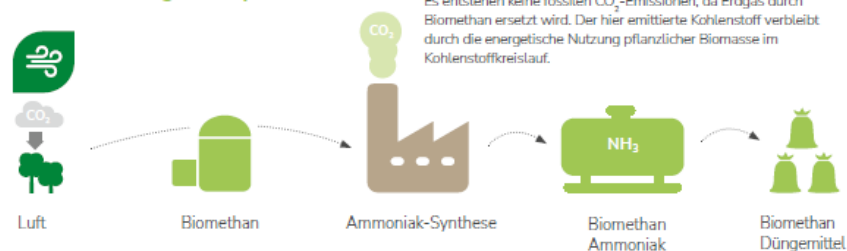
Graue Düngemittelproduktion



Blaue Düngemittelproduktion



Biomethan-Düngemittelproduktion



Grüne Düngemittelproduktion



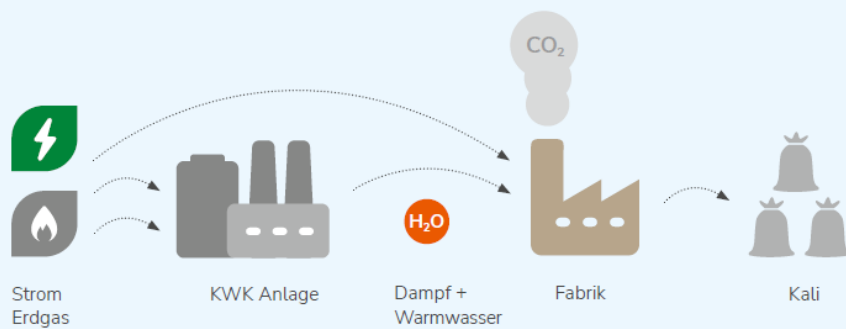
Abbildung 8: Verfahren zur Treibhausgasminderung in der N-Mineraldüngerherstellung

Grünes Kali durch Einsatz von Power-to-Heat

HEUTE

Energieintensive Produktion

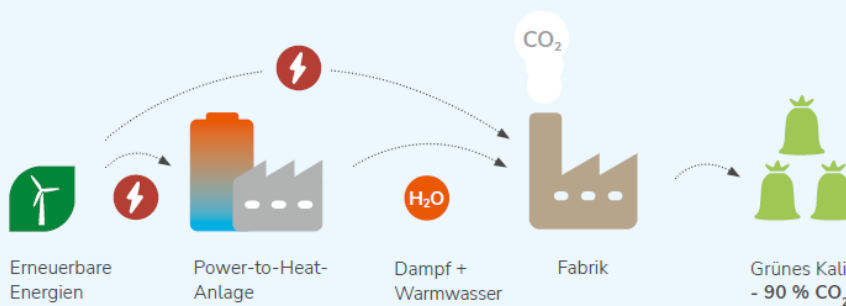
Kraft-Wärme-Koppelung auf Basis von Erdgas



ZIEL

Dekarbonisierung der Produktion

Power-to-Heat mit externem Grünstrombezug



Quelle: verändert nach K+S Minerals and Agriculture GmbH

Abbildung 9: Verfahren zur Treibhausgasminderung in der Kali-Mineraldüngerherstellung

Hier zeigt sich, dass die THG-Emissionen um bis zu 95 % gesenkt werden können (Gao & Cabrera Serrenho 2023; IEA 2021). Jedoch sind diese Erfolge derzeit mit hohen Kosten verbunden. Sponagel et al. (2024) schätzen in Anlehnung an Egerer et al. (2023), dass die Kosten zur Herstellung von grünen Stickstoffdüngern 200 bis 300 % des Niveaus konventioneller Düngemittel betragen. In zwei Szenarien schätzen sie das THG-Reduktionspotenzial für den gesamten Ackerbau auf 14 % bis 24 %.

Zudem stellt sich die Frage, wann eine ausreichende und verlässliche Versorgung mit erneuerbaren Energien erreicht werden kann. Auf Grundlage der aktuell verfügbaren Mengen und Preise grüner Energie- und Rohstoffquellen und der bestehenden politischen Rahmenbedingungen wäre eine Umstellung der Produktion wirtschaftlich kaum realisierbar.

Damit der Weg zu Düngemitteln aus erneuerbarer Energie fortgesetzt werden kann, bedarf es jedoch einer Reihe von Rahmenbedingungen: Planbare verlässliche Versorgung mit erneuerbaren Energien bzw. zu wettbewerbsfähigen Preisen.

- ➔ **Förderung von Investitionen für eine erfolgreiche Transformation der Mineraldünger-Industrie**
- ➔ **Beschleunigung und Vereinfachung von Genehmigungsverfahren sowie gezielte Netzanbindung für Produktionsanlagen**
- ➔ **Sicherstellung der Verfügbarkeit von regenerativ erzeugter Energie und grünem Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen**
- ➔ **Maßnahmenmix, der sowohl die Produktion als auch die Verwendung von Düngemitteln aus erneuerbaren Energien und CCS und CCU (Carbon Capture and Storage, Carbon Capture and usage) fördert.**

4.6 Pflanzenzüchtung beschleunigen

Die heutigen Sorten wichtiger Kulturpflanzen, wie. z. B. Weizen, Raps oder Mais, sind den Sorten vergangener Jahrzehnte bezüglich Nährstoffeffizienz (z. B. Stahl et al. 2017), Krankheitsresistenz und Ertragsfähigkeit um Längen überlegen (Voss-Fels et al. 2019). Dies ist das Resultat jahrzehntelanger züchterischer Arbeit.

Neue genomische Techniken (NGT), wie z. B. CRISPR-Cas, haben durch die Editierung einzelner funktionaler Gene eine bisher nicht gekannte Möglichkeit zur gezielten Erweiterung der genetischen Variabilität als eine unverzichtbare Voraussetzung für erfolgreiche Züchtung (Friedt 2019). **NTG bieten erhebliche Potenziale zur Steigerung der Effizienz der Pflanzenzüchtung im Hinblick auf den Zeitbedarf und somit auf den Zuchtfortschritt.**

Eine Erhöhung des Zuchtfortschritts durch neue Züchtungsmethoden bietet einen unmittelbaren Nutzen, weil die Nährstoffeffizienz und der Ertrag sowie die Widerstandsfähigkeit gegen biotischen und abiotischen Stress schneller erhöht werden können. NGT-Sorten können die Umweltwirkung und die Wirtschaftlichkeit im Ackerbau gleichzeitig verbessern.

Sponagel et al. (2024) leiten mittels Literaturanalyse ab, dass der flächendeckende Einsatz von NGT-Sorten in Deutschland zu Ertragssteigerungen von 1 bis 2 % führen könnte, bei gleichzeitiger N₂O-Minderung von 5 bis 10 %. Zudem schätzen sie, dass der Fungizideinsatz um 30 % reduziert werden könnte und dass die Saatgutkosten um 15 bis 25 % erhöht würden. So könnten zwischen 3,4 und 6,8 % der THG-Emissionen im Ackerbau bei THG-Vermeidungskosten von -94 bis -1 €/t CO₂eq (Sponagel et al. 2024), also Kosteneinsparungen bei gleichzeitiger Verbesserung der Klimabilanz, gemindert werden. **NGT stellen somit eine vorzügliche Option zur Verbesserung der Klimabilanz im Ackerbau dar.**

Während die Genehmigung dieser Verfahren auf europäischer Ebene noch immer nicht erfolgt ist, sind diese Techniken in vielen anderen Staaten als unbedenklich und nicht den Gentechnikregelungen unterliegend eingestuft worden (Duensing et al., 2018).

➔ **Zustimmung der Bundesregierung zu dem von der EU-Kommission im Juli 2023 vorgelegten Verordnungsentwurf 2023/0226 (COD) über mit bestimmten neuen genomischen Techniken gewonnene Pflanzen und die aus ihnen gewonnenen Lebens- und Futtermittel sowie zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/625.**

4.7 Pflanzenschutz erhalten und weiterentwickeln

Pflanzenschutzmittel sichern Erträge. Weltweit schützen Pflanzenschutzmittel die Ernten und verhindern 30 % der Ernteverluste (EPRS 2019). In der Regel werden Pflanzenschutzmittel in Gramm bis wenige Kilogramm pro Hektar appliziert. Daher sind die THG-Emissionen aus der Pflanzenschutzmittelherstellung an den Gesamtemissionen des Ackerbaus sehr gering. Z. B. fallen bei der Weizenproduktion mit 24 kg CO₂eq/ha lediglich 1 % der THG-Emissionen der Herstellung von Pflanzenschutzmitteln an. Dabei entfallen ca. 5 kg CO₂eq auf die Herstellung von Herbiziden und 5 kg CO₂eq auf Fungizide.

Der Verzicht auf Herbizide zugunsten mechanischer Unkrautregulierung durch zweimaliges Striegeln hätte geringfügige negative Effekte auf THG-Bilanz (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: THG-Emissionen (CO₂eq) bei Unkrautregulierung mit Herbizid und Striegel im Weizenanbau. (Eigene Beispielrechnung anhand von Daten des [LfL-Klimarechners](#))

	Herbizid	Zweimaliges Striegeln
Dieserverbrauch für Anwendung (l/ha)	1,3	4,4 (2 x 2,2 l)
Emissionsfaktor für Diesel Herstellung und Verbrennung (kg CO ₂ eq/l)		3,15
Emissionen aus Dieserverbrauch (kg CO ₂ eq/ha)	4,1	13,9
Herstellung Pflanzenschutzmittel (CO ₂ /ha)	5	
Gesamt (kg CO₂eq/ha)	9,1	13,9

Zusätzliche negative Effekte, wie verstärkte Mineralisierung von organischem Boden-Kohlenstoff, erhöhte Maschinenabnutzung und Ertragsminderung aufgrund der geringeren Wirksamkeit des Striegels, können nicht ausgeschlossen werden.

Deutlich schwerwiegendere Konsequenzen hätte der Verzicht auf Fungizide. Im Durchschnitt der deutschen Ackerkulturen kann von Ertragsverlusten von ca. 11 % ausgegangen werden (siehe Tabelle 2). Hieraus ergeben sich 10 % höhere produktbezogene Emissionen und zusätzlich ca. 260 Mio. t CO₂eq durch Landnutzungsänderungen, also die Kultivierung von Naturflächen (von Witzke & Noleppa 2012). Allein der Verzicht auf Fungizide würde also im Zuge der Freisetzung von THG aus den ehemaligen Naturflächen zusätzliche Emissionen induzieren, die dem vierfachen der jährlichen Gesamtemissionen des Sektors Landwirtschaft in Deutschland entsprechen.

Tabelle 2: Ertragsverluste (%) durch Fungizid-Verzicht im deutschen Ackerbau. (Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus von Witzke & Noleppa 2011)

Kultur	Ertragsverlust (%) durch Fungizid-Verzicht	Kultur	Ertragsverlust (%) durch Fungizid-Verzicht
Winterweizen	12,1	Wintergerste	11,6
Sommerweizen	13,3	Sommergerste	9,8
Wintertriticale	8,3	Winterraps	6,4
Sommertriticale	9,2	Kartoffeln	21,9
Winterroggen	13,5	Zuckerrüben	4,7

Das Sichern von Erträgen und die Möglichkeit zur reduzierten Bodenbearbeitung durch Pflanzenschutz haben einen erheblichen Nutzen für die Klimabilanz der Pflanzenproduktion.

Jedoch besteht das Problem des zunehmenden Wegfalls zugelassener Wirkstoffe: Während der Landwirtschaft 1993 noch etwa 700 chemische Wirkstoffe zur Verfügung standen, sind es aktuell nur noch etwa 200. Im Bereich der biologischen Pflanzenschutzmittel ist ebenfalls ein Rückgang zu verzeichnen¹².

Der Engpass zeigt sich aktuell schon bei weitverbreiteten Feldkulturen. In einzelnen Kulturen (bspw. Gemüse, Obst, Hopfen, Kartoffel, Raps, Rüben und sog. Lückenindikationen) wird mittelfristig der Ernteschutz nur noch sehr schwer zu gewährleisten sein.¹³ So gibt es im Kartoffel-, Raps- und Obstanbau beispielsweise nur noch einzelne zugelassene Insektizide. Aufgrund der fehlenden Auswahl können die Ernten bei Resistenzen oder neu auftretenden Schaderregern nicht effektiv geschützt werden.¹⁴

Um das Ertragsniveau zu halten, im besten Fall zu steigern, und sichere Ernten zu garantieren, ist eine breite Palette wirksamer Pflanzenschutzmittel notwendig. Der sukzessive Wegfall von Wirkstoffen bzw. Wirkmechanismen für spezifische Indikationen begünstigt Schädlinge und Krankheiten in einzelnen Kulturen und stellt ein erhebliches Problem dar.

- ➔ **Förderung von innovativen Produkten: Aktive Forschungs- und Entwicklungsförderung für Innovationen im Pflanzenschutz – gleichermaßen für den ökologischen und den konventionellen Anbau.**
- ➔ **Innovationsfreundlichere Zulassung: Angepasste Datenanforderungen, eine praxisgerechte Risikoprüfung sowie europaweit einheitliche und verbindliche Leitlinien und Standards für innovative Produkte jedweder Art.**
- ➔ **Beschleunigte Zulassungsverfahren: Bei der Bewertung von biologischen Pflanzenschutzmitteln und Low-Risk-Produkten bedarf es angepasster Anforderungen im Zulassungsverfahren („parallel stream“), um den unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungen der jeweiligen Stoffe gerecht zu werden.**
- ➔ **Das Zulassungsverfahren muss so ausgerichtet sein, dass bereits im Regelverfahren für alle Anwendungsgebiete ausreichend Pflanzenschutzmittel als *Ultima Ratio* für eine effektive**

¹² Detaillierte Informationen finden sich in der amtlichen Datenbank [PS-Info](#)

¹³ Ebenda

¹⁴ Der [Nationale Aktionsplan Pflanzenschutz](#) (NAP) fordert die Verfügbarkeit von mindestens drei verschiedenen Wirkmechanismen für 80% der Anwendungsgebiete.

Kontrolle zur Verfügung stehen. Damit wird die Notwendigkeit von Notfallzulassungen drastisch gesenkt – denn diese sollten nur die absolute Ausnahme darstellen.

- ➔ **Verhältnismäßigkeit und wissenschaftlich fundierte Risiko-Nutzen-Abwägungen: Zusätzlich zum meist ausschließlich betrachteten Risiko-Aspekt muss ebenso der Nutzen-Aspekt bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln berücksichtigt werden. Zusätzliche Prüfanforderungen, die mit sehr hohen Kosten verbunden sind, sollten nur bei tatsächlich absehbarem Erkenntnisgewinn gelten.**

5. Schlussbetrachtung

Im Ackerbau in Deutschland gibt es trotz eines inzwischen hohen Einsparungsniveaus weitere **Potenziale zur Treibhausgas-Minderung**. Produktbezogene Emissionen sind das geeignete Maß zum Vergleich von Anbauverfahren und zur Bewertung der Effekte von Verbesserungspotenzialen. Bevor auf innovative Maßnahmen zur Verbesserung der THG-Bilanz eingegangen wird, erfolgt zunächst noch eine Aufzählung grundlegender Feststellungen sowie Entwicklungen, die eine Bedrohung für klimateffiziente Produktion darstellen.

Aufgrund der erheblichen THG-Freisetzung bei **Landnutzungsänderungen** von weltweit durchschnittlich 200 t/ha ist es von großer Relevanz, die Ertragsleistung am Gunststandort Deutschland zu erhalten und zu steigern (Abschnitt 4.2).

Ökolandbau ist keine geeignete Option zur Reduktion der produktbezogenen THG-Emissionen (Abschnitt 4.3). Unter Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen aufgrund der erheblichen Ertragslücke von durchschnittlich 50 % zum konventionellen Ackerbau, schneidet der ökologische Ackerbau sogar deutlich schlechter ab.

Die **Substitution mineralischer Düngemittel** durch Wirtschaftsdünger hätte keine Vorteile für die Klimabilanz des Ackerbaus (siehe Abschnitt 4.5.1).

Chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel sichern in der globalen Betrachtung 30 % der Erträge (siehe Abschnitt 4.7). Im deutschen Ackerbau würde der Verzicht auf Herbizide zugunsten mechanischer Unkrautregulierung zu einer (leichten) Verschlechterung führen. Ein verminderter Einsatz von Fungiziden hätte äußerst negative Folgen.

Die Anzahl zugelassener Pflanzenschutz-Wirkstoffe hat in den letzten Jahrzehnten dramatisch abgenommen. Hierdurch liegen bereits für einige wichtige Kulturen, wie z. B. Raps, Zuckerrüben und Kartoffeln, aber auch viele Obst- und Gemüsekulturen, nicht mehr genügend Wirkmechanismen vor, um die Pflanzen ausreichend schützen und ein angemessenes Resistenzmanagement betreiben zu können. Dies bedroht die Wirksamkeit der verbliebenen Wirkstoffe und verschärft das Problem zusätzlich. Da keine Trendumkehr abzusehen ist, droht ein Dauerzustand – für weitere Kulturarten ist ein Mangel an Behandlungsmöglichkeiten abzusehen. Daher bedarf es dringend einer stärkeren Abwägung der Verhältnismäßigkeit in der Zulassung. Hierbei muss der Nutzen von Pflanzenschutzmitteln sowie das tatsächliche Risiko wieder angemessener berücksichtigt werden.

Die europäische **Düngemittel-Industrie** hat weltweit den geringsten THG-Fußabdruck (Abschnitt 4.5.2). Die strukturell hohen Gaspreise sowie der extreme Preisanstieg infolge des Angriffskriegs auf die Ukraine und das weiterhin erhöhte Preisniveau führen zu erheblichen Wettbewerbsnachteilen. Die Substitution der einheimisch produzierten Düngemittel durch Importe führt annähernd zu einer Verdopplung der Emissionen aus der Düngemittelherstellung und verschlechtert so die Klimabilanz im Ackerbau erheblich.

Starre **Düngevorgaben** nach § 4 der Düngeverordnung (DüV) auf Basis der fünfjährigen Durchschnittserträge lassen den tatsächlichen Pflanzenbedarf außer Acht (Abschnitt 4.4.2). Erhöhte oder geminderte Ertragspotenziale durch feldspezifische und saisonale Einflussfaktoren werden nicht berücksichtigt. In Jahren mit niedrigen Erträgen droht folglich ein Nährstoffüberschuss, während das Ertragspotenzial in Jahren mit guten Bedingungen nicht ausgeschöpft werden kann. Anstelle bzw. ergänzend zu der in der DüV beschriebenen (starren) Methode zur Düngebedarfsermittlung sollte insbesondere in Roten Gebieten eine dynamische Düngebedarfsermittlung ermöglicht werden. So könnten Gewässer- und Klimaschutzziele effizienter erreicht werden - und dies bei besseren Verdienstmöglichkeiten für die Landwirtschaft.

Damit THG-Minderungen der vergangenen Jahre fortgesetzt werden können, müssen die oben beschriebenen Probleme gelöst werden. Um den positiven Trend fortsetzen zu können, bedarf es **weiterer Optimierungen der Produktionssysteme** wie nachfolgend am Beispiel Weizenproduktion vergleichend dargestellt wird:

THG-Minderungspotenziale und -Vermeidungskosten werden am Beispiel der Weizenproduktion deutlich: 77 dt B-Weizen erzeugen mit „Standard“-Produktionstechnik etwa 2.300 kg CO₂eq pro Hektar an (siehe Tabelle 3 und Anhang). Dabei werden zunächst die Effekte der einzelnen Maßnahmen gezeigt (siehe auch Tabelle 3) und abschließend die Gesamtwirkung aus der Kombination der Maßnahmen dargestellt (siehe auch Tabelle 4).

Teilflächenspezifische Düngemittelapplikation (Abschnitt 4.4.1)

Unter Berücksichtigung durchschnittlicher Verfahrenskosten von 30 €/ha und Einsparungen von insgesamt 129 kg CO₂eq durch um 6,5 % reduzierte Düngergaben pro Hektar ergeben sich bei der Weizenproduktion durch teilflächenspezifische Stickstoffapplikation THG-Vermeidungskosten von ca. 127 €/t CO₂eq.

Stabilisierte Stickstoffdünger (Abschnitt 4.4.3)

Durch die Minderung von direkten und indirekten N₂O-Emissionen aus der N-Düngung reduzieren sich die THG-Emissionen um 427 CO₂eq pro Hektar. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Kosten ergeben sich THG-Vermeidungskosten von 54 €/t CO₂eq.

NGT-Sorten (Abschnitt 4.6)

Die Minderung von N₂O-Emissionen aus Stickstoffdüngern um 7,5 % und eine Fungizidreduktion von 30 % sowie Ertragssteigerungen von 1,5 % stehen zusätzlichen Saatgutkosten von 20 %

gegenüber. Hieraus ergeben sich THG-Einsparungen von 74 kg CO₂eq und Vermeidungskosten von - 271 €/t CO₂eq. Unberücksichtigt sind dabei weitere theoretische THG-Reduktionen durch die Vermeidung von Landnutzungseffekten aufgrund der erhöhten Erträge.

Grüne Stickstoff-Düngemittel (Abschnitt 4.5.3)

Durch die Minderung der THG-Emissionen bei der Herstellung von Stickstoffdüngern um 90 % könnten im Weizenanbau 587 kg CO₂eq eingespart werden. Unter der Annahme einer Preissteigerung für Stickstoff um 150 % und aktuellen Kosten von 1,20 €/kg N ergeben sich THG-Vermeidungskosten von 617 €/t CO₂eq.

Abgesehen von NGT-Sorten, die derzeit in Deutschland nicht zugelassen sind, führt die Umsetzung der Maßnahmen unter den getroffenen Annahmen zu sinkenden Deckungsbeiträgen, also ökonomischen Nachteilen für die Landwirtschaft. Während diese Nachteile bei Teilflächenspezifischer Applikation und stabilisierten-N-Düngern mit ca. 20 €/ha noch überschaubar sind, würde der Einsatz von Grünen Düngemitteln den Deckungsbeitrag um 75 % auf etwa 100 €/ha mindern. Während bei den beiden erstgenannten Maßnahmen bereits eine moderate finanzielle Förderung die Anwendung attraktiv machen würde, bedürfte es bei grünen Stickstoffmineraldüngern sehr hohe Förderätze, damit die ökonomischen Nachteile ausgeglichen werden können. Dies zeigt die herausragende Bedeutung der Energiepolitik und der Aufgabe, erneuerbare Energien zu wettbewerbsfähigen Preisen bereitzustellen. Gelingt dies, können die Preise für grüne Stickstoff-Mineraldüngemittel unter die hier getroffenen Annahmen fallen und so die Wirtschaftlichkeit dieser effektiven Maßnahme zur THG-Reduktion verbessern.

Tabelle 3: Effekte der einzelnen THG-Vermeidungsmaßnahmen am Beispiel der Weizenproduktion (Eigene Darstellung, Berechnung siehe Anhang)

	Standard	Teilflächenspez. DM-Applikation	Stabilisierte N-Dünger	NGT	Grüne N-Dünger
		-6,5 % N-Bedarf (MW aus Sponagel et al 2024)	-44 % N ₂ O aus N-Düngung (MW aus Grados et al. 2022)	+20 % Saatgut- kosten	+150 % Kosten für N-Dünger
Annahmen		Verfahrenskosten: +30 € (Kühl et al. 2019 zzgl. 10 € wegen Teuerung bei Maschinen)	+11 % Kosten für N-Düngemittel (Sponagel et al. 2024)	- 7,5 % N ₂ O	-90% THG bei N-Produktion (jeweils MW aus Sponagel et al. 2024)
Deckungsbeitrag (€/ha)	467,5	451,1	444,4	487,6	105,3
Änderung Deckungsbeitrag (€, zu Standard)		-16,3	-23,1	+20,2	-362,2
THG (kg CO ₂ eq/ha)	2.341	2.212	1.914	2.267	1.754
THG kg/kg Weizen	0,30	0,29	0,25	0,29	0,22
THG-Einsparung zu Standard (kg CO ₂ eq)		129	427	74	587
Vermeidungskosten (€/t CO ₂ eq)		127	54	-272	617

Für die klimapolitische Bewertung sind insbesondere die THG-Vermeidungskosten von Bedeutung. Während der Einsatz von NGT negative Kosten erzeugen würde, verursacht der Einsatz stabiler N-Dünger sehr geringe und die teilflächenspezifische Düngemittel-Applikation moderate THG-Vermeidungskosten. Besonders „teuer“ erscheinen im Vergleich zu den anderen Maßnahmen CO₂-Einsparungen unter den getroffenen Annahmen durch den Einsatz von grünem Stickstoffmineraldünger.

Jedoch relativiert ein Blick auf andere Klimaschutzmaßnahmen diese Einschätzung. So verursacht der Einbau von Wärmepumpen in Wohngebäude zwischen 600 und 1.700 €/t CO₂eq (Weimann 2021) und die Förderung von E-Autos mit einer Spanne von 230- 1.700 €/t CO₂eq (Zapf et al. 2021, Obermüller 2019) deutliche höhere Kosten.

Treibhausgasemissionen (kg CO₂eq/ha) im Weizenanbau mit einzelnen THG-Minderungsmaßnahmen

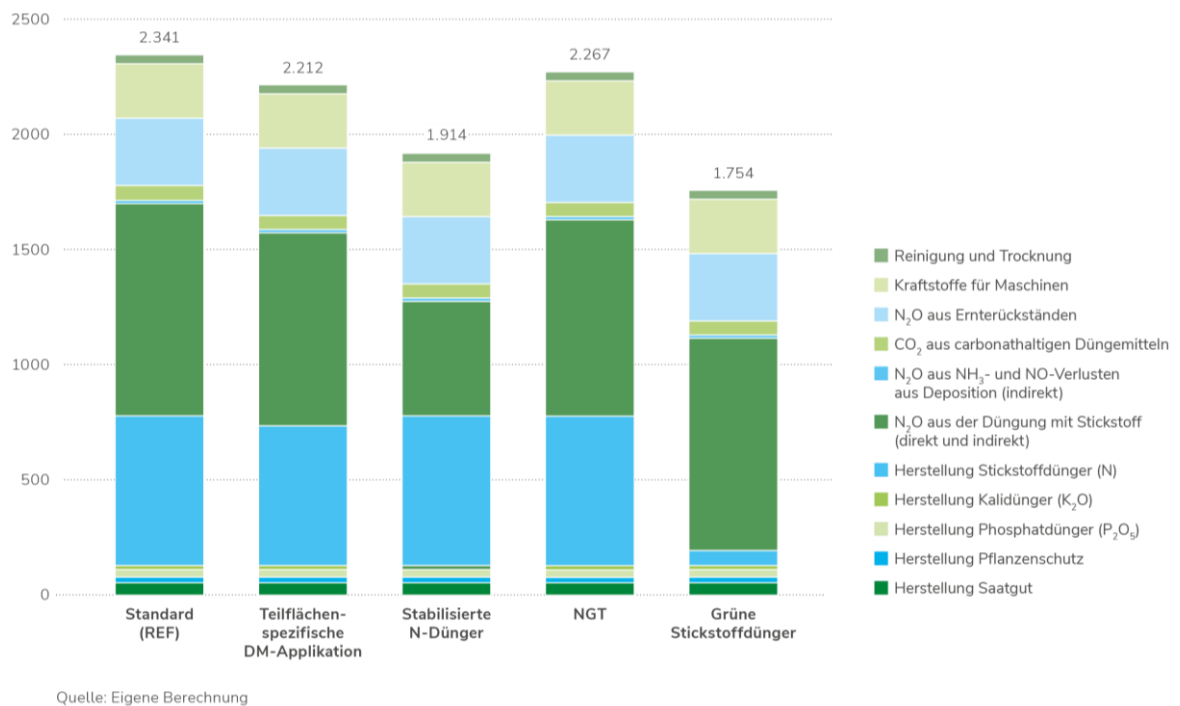


Abbildung 10: Effekte der Anwendung einzelner THG-Minderungsmaßnahmen am Beispiel der Weizenproduktion (Quelle: Eigene Darstellung Berechnung siehe Anhang)

Zur Ermittlung des gesamten THG-Reduktionspotenzials können die Effekte der vier Einzelmaßnahmen nicht ohne Weiteres addiert werden. Dies liegt daran, dass einzelne Maßnahmen Parameter beeinflussen, die wiederum einen Effekt auf die Minderungswirkung anderer Maßnahmen haben. So führt z. B. die Anwendung von Teilflächen-N-Applikation dazu, dass die Menge N-Düngung sinkt. Folglich ist z. B. der absolute Effekt des gleichzeitigen Einsatzes von N-Stabilisatoren geringer, weil die prozentuale Minderung der N₂O-Emissionen, im Vergleich zur Standardproduktion, auf eine geringere Menge an gedüngtem N wirkt. Umgekehrt fallen die zusätzlichen Kosten niedriger aus, weil geringere Mengen des im Vergleich zu Standarddüngern hochpreisigen stabilisierten N-Düngers eingesetzt werden müssen.

Unter Berücksichtigung dieser Effekte ergibt sich in der THG-optimierten Variante, in der alle vier Maßnahmen umgesetzt werden, eine THG-Einsparung von 1.079 kg/ha und produktspezifische Emissionen von 0,16 kg CO₂/kg Weizen. Dies entspricht einer THG-Minderung von annähernd 50 % (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Optimierte Weizenproduktion. Kombinierte Effekte der vier TGH-Minderungsmaßnahmen Teilflächenspezifische Düngemittel-Applikation, stabilisierte N-Dünger, NGT und Grüne N-Dünger. (Quelle: Eigene Darstellung, Berechnung siehe Anhang)

	Standard	Optimiert
Deckungsbeitrag (€/ha)	467,5	104,9
Änderung Deckungsbeitrag (€, zu Standard)		-362,6
THG (kg CO ₂ eq/ha)	2.341	1.262
THG kg/kg Weizen	0,3	0,16
THG-Einsparung zu Standard (kg CO ₂ eq)		1.079
CO ₂ -Vermeidungskosten (€/t CO ₂ eq)		336,1

Treibhausgasemissionen (kg CO₂eq/ha) im Weizenanbau Standard vs. optimiert

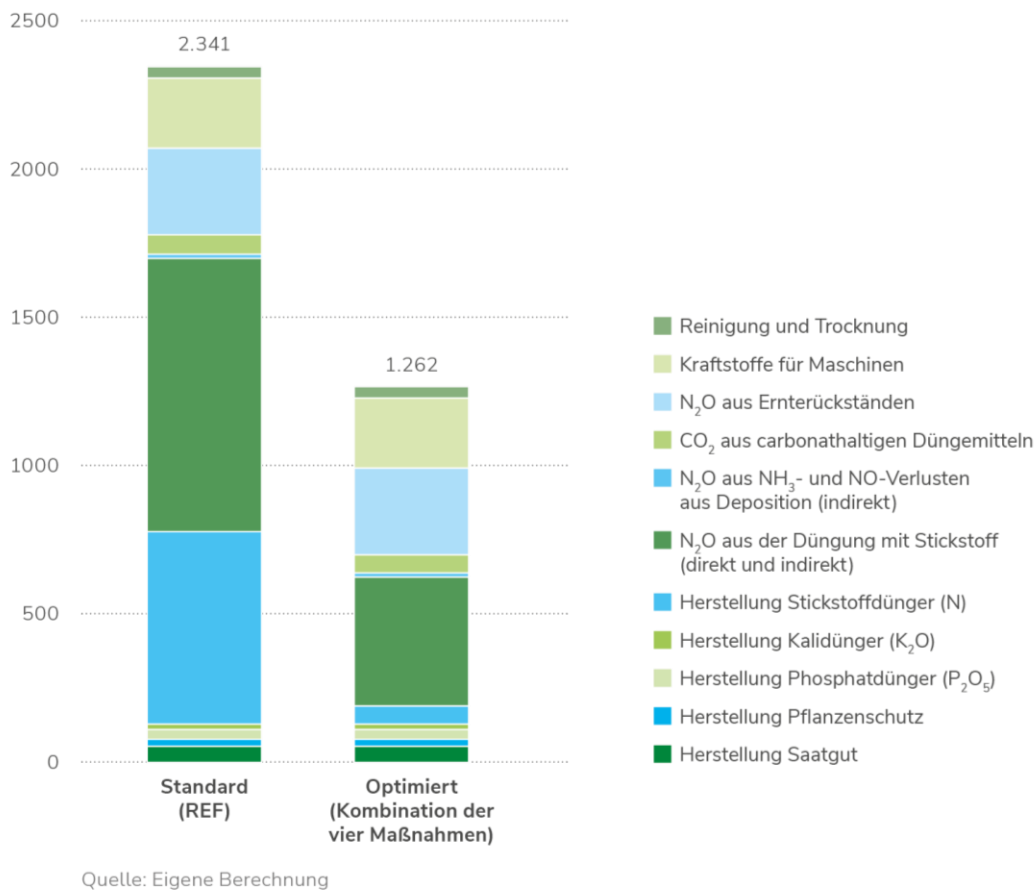


Abbildung 11: Treibhausgas-Emissionen bei optimierter Weizenproduktion. Kombinierte Effekte der vier TGH-Minderungsmaßnahmen Teilflächenspezifische Düngemittel-Applikation, stabilisierte N-Dünger, NGT und Grüne N-Dünger. (Quelle: Eigene Darstellung, Berechnung siehe Anhang)

Kontakt

Dr. Theresa Krato
Wissenschaft und Innovation
Pflanzenernährung
+49 172 250 2973
krato.iva@vci.de

Dr. Jörg Müller
Wissenschaft und Innovation
Pflanzenschutz
+49 173 216 8242
mueller.iva@vci.de

Stand: September 2024

6. Literatur

- Achten, W.M.J. and Van Acker, K. (2016): EU-Average Impacts of Wheat Production: A Meta-Analysis of Life Cycle Assessments. *Journal of Industrial Ecology*, 20: 132-144.
<https://doi.org/10.1111/jiec.12278>
- Alexandratos, N., Bruinsma, J. (2012): World Agriculture Towards 2030/2050. The 2012 Revision. ESA Working Paper, 12-03. Hg. v. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom
- Argento, F., Liebisch, F., Anken, T., Walter, A., El Benni, N. (2022): Investigating two solutions to balance revenues and N surplus in Swiss winter wheat. *Agricultural Systems*, 201, 103451.
- Beckman, J., Ivanic, M., Jelliffe, J. L., Baquedano, F. G., Scott, S. G. (2020): Economic and food security impacts of agricultural input reduction under the European Union Green Deal's Farm to Fork and biodiversity strategies.
- Brentrup, F., Lammel, J., Stephani, T., Christensen, B. (2018): Updated carbon footprint values for mineral fertilizer from different world regions. 11th International Conference on Life Cycle Assessment of Food 2018 (LCA Food)
- Breunig, P., Mergenthaler, M. (2022): Besonderheiten des Klimaschutzes im Agrar- und Ernährungssystem – was müssen wir neu denken? *Berichte über Landwirtschaft* 100 (2), S. 1-50. DOI: 10.12767/buel.v100i2.425
- Burney, J. A., Davis, S. J., Lobell, D. B. (2010): Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, 107(26), 12052-12057.
- Drücker, H.: (2016): Precision Farming. Sensorgestützte Stickstoffdüngung. Hg. v. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., KTBL-Heft 113, Darmstadt
- Duensing, N., T. Sprink, W.A. Parrott, M. Fedorova, M.A. Lema, J.D. Wolt, D. Bartsch (2018): Novel features and considerations for ERA and regulation of crops produced by genome editing. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 6, 79, DOI: 10.3389/fbioe.2018.00079.
- Egerer, J., Grimm, V., Niazmand, K., Runge, P. (2023): The economics of global green ammonia trade – “Shipping Australian wind and sunshine to Germany”.
- ERPS, European Parliamentary Research Service (2019): Farming without Plant Protection Products—Can we Grow without Using Herbicides, Fungicides and Insecticides? Scientific Foresight Unit (STOA), In-Depth Analysis, Panel for the Future of Science and Technology. 2019. Available online: [https://www.europarl.europa.eu/Reg-DATA/etudes/IDAN/2019/634416/ERPS_IDA\(2019\)634416_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/Reg-DATA/etudes/IDAN/2019/634416/ERPS_IDA(2019)634416_EN.pdf)
- FAO, Food and Agricultural Organization (2024): FAOSTAT. Online abrufbar unter: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>

- Fan, D., He, W., Smith, W. N., Drury, C. F., Jiang, R., Grant, B. B., et al. (2022): Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 28(17), 5121–5141. <https://doi.org/10.1111/gcb.16294>
- Fried, W. (2019): Zuchtfortschritt bei Weizen: Ergebnis der Optimierung von Kornertrag, Ertragssicherheit und Qualität. Online verfügbar unter: https://www.bdp-online.de/de/Service/Downloads/Bericht_Zuechtungserfolg_Getreide.pdf
- Fuchs R, Brown C, Rounsevell M (2020): Europe's Green Deal offshores environmental damage to other nations. *Nature* ;586(7831):671-673. doi: 10.1038/d41586-020-02991-1. PMID: 33106645.
- Gao, Y., Cabrera Serrenho, A. (2023): Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizers could be reduced by up to one-fifth of current levels by 2050 with combined interventions. *Nature Food*, 4(2), 170–178. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00698-w>
- Gate, P., Soenen, B., Closset, M., Benamou, N., Poilvé, H., Feuga, M. (2019): La cartographie des parcelles agricoles et les services associés à Farmstar. In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement* (No. 2, pp. 61-65). Cairn/Softwin.
- Grados, D., Butterbach-Bahl, K., Chen, J., van Groenigen, K. J., Olesen J. E., van Groenigen, J. W., Abalos, D. (2022): Synthesizing the evidence of nitrous oxide mitigation practices in agroecosystems, *Environmental Research Letters* 17, 114024
- Hülsbergen, K.-J.; Schmid, H.; Chmelikova, L.; Rahmann, G.; Paulsen, H.M.; Köpke, U. (2023): Umwelt- und Klimawirkungen des Ökologischen Landbaus. Weihenstephaner Schriften Ökologischer Landbau und Pflanzenbausysteme; Verlag Dr. Köster: Berlin, Germany
- IEA, International Energy Agency (2021): Ammonia Technology Roadmap, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>.
- Kage, H., Rübiger, T., & Sieling, K. (2022): Stickstoffdüngung zu Winterraps und Winterweizen: Eine Evaluierung der Düngeverordnung und methodischer Aspekte der Auswertung von Düngeversuchen. *Berichte über Landwirtschaft-Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*.
- Kühl, R., Müller, J., Kruse, J., Monath, J., Paul, L.-M. (2021): Green Deal: Wie und zu welchem Preis können die Ziele von der deutschen Agrar- und Ernährungswirtschaft erreicht werden. *Schriftenreihe der Rentenbank*, 37.
- Martin, R. M. (2008): Deforestation, land-use change and REDD In: Land use. Unasylva 230, Food and Agriculture Organization of the United Nations Vol. 59, 2008
- Müller, A., Schader, C., El-Hage Scialabba, N. et al. (2017): Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nat Commun* 8, 1290 <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01410-w>
- Ni, K., Vietinghoff, M., Pacholski, A. (2023): Targeting yield and reducing nitrous oxide emission by use of single and double inhibitor treated urea during winter wheat season in Northern

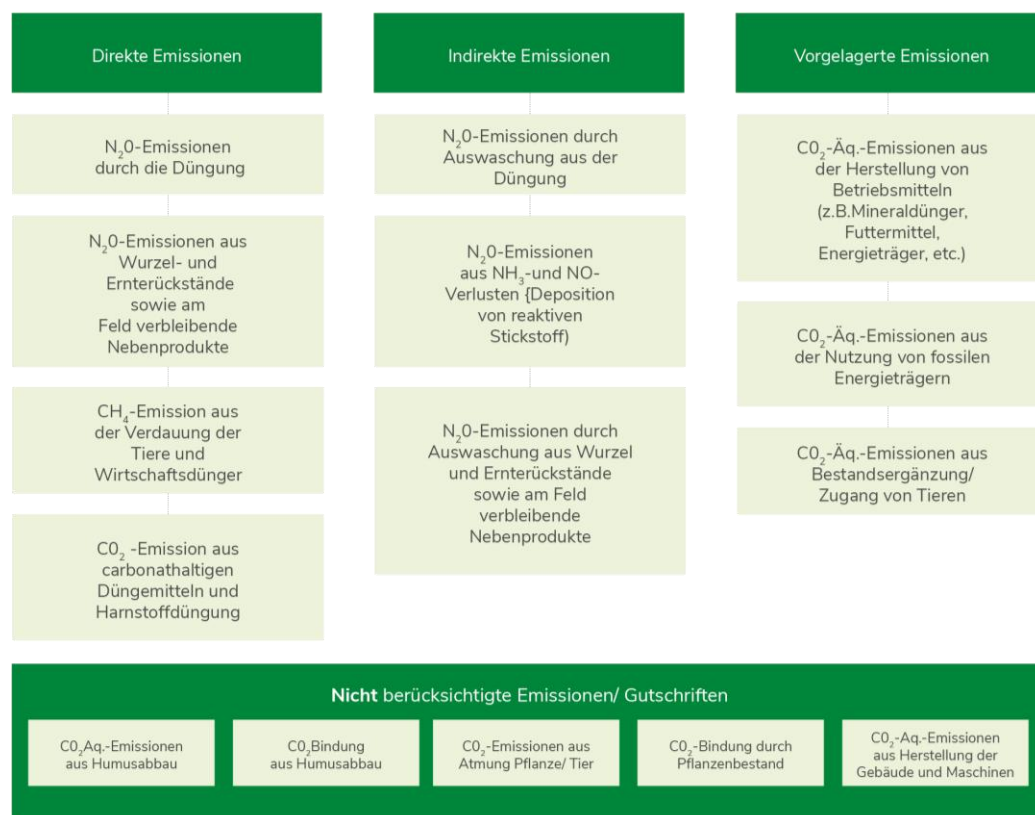
- Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, 108391. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108391>
- Noleppa, S. (2017): Der Nutzen von Pflanzenschutz als wesentlicher Bestandteil moderner Landwirtschaft in Deutschland. Online verfügbar unter: <https://www.iva.de/publikationen/der-nutzen-von-pflanzenschutz>
- Noleppa, S. (2016): Pflanzenschutz in Deutschland und Biodiversität, Auswirkungen von Pflanzenschutzstrategien der konventionellen und ökologischen Landbewirtschaftung auf die regionale und globale Artenvielfalt, HFFA Research GmbH
- Pasda, G, Zerulla W., Wissemeier, A.H. (2018): Effekte einer N-Steigerung auf verschiedenen Standorten, deren Teilflächen ein unterschiedliches N-Nachlieferungsvermögen aufwiesen, in: Heyn, J., Ols, H.W.: Wirkungen reduzierter N-Düngung auf Produktivität, Bodenfruchtbarkeit und N-Austragsgefährdung – Beurteilung anhand mehrjähriger Feldversuche, VDLUFA-Schriftenreihe 72/2018, VDLUFA-Verlag Darmstadt, 213-251
- Richards, P., R. Walker, and E. Y. Arima. (2014): Spatially complex land change: The Indirect effect of Brazil's agricultural sector on land use in Amazonia. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 29: 1–9.
- Ruser, R., Schulz, R. (2015): The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils—a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178(2), 171–188. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400251>
- Obermüller, F., Puls, T., Schaefer, T. (2019): CO₂-Vermeidung im Straßenverkehr: Optionen, Kosten, Verteilungswirkungen– IW-Gutachten.
- Pendrill F., Persson U. M., Godar J., Kastner T., Moran D., Schmidt S., Wood R. (2019): Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions *Glob. Environ. Change* 56 1–10
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Yu, T. H. et al. (2008): Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319(5867), 1238-1240.
- Searchinger, T., Hanson, C., Ranganathan, J., Lipinski, B., Waite, R., Winterbottom, R., Chemineau, P. et al (2014): A menu of solutions to sustainably feed more than 9 billion people by 2050. *World Resources Institute (WRI)*, 2013-14.
- Smith, C., Nicholls, Z. R., Armour, K., Collins, W., Forster, P., Meinshausen, M., et al. (2021): The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity supplementary material. *Climate change*, 1850-2005.
- Sponagel, C., Weik, J., Back, H., Witte, F. Wagner, M., Bahrs, E. (2024): Klimaschutzpotenzial und ökonomische Bewertung exemplarischer technischer Adaptationsmaßnahmen sowie Innovationen im konventionellen Ackerbau Deutschlands.

- Stahl A., Pfeifer M., Frisch M., Wittkop B., Snowdon R. J. (2017): Recent Genetic Gains in Nitrogen Use Efficiency in Oilseed Rape. *Front Plant Sci.*; 8:963. doi: 10.3389/fpls.2017.00963. PMID: 28638399; PMCID: PMC5461335.
- Ströbel, H. (2024): Is More Organic Farming a Responsible Strategy? An Appeal for Responsible (Sustainably Intensive) Agriculture. *Sustainability*, 16, 4114.
<https://doi.org/10.3390/su16104114>
- Styczen, M., Abrahamsen, P., Hansen, S. Knudsen, L. (2020): Model analysis of the significant drop in protein content in Danish grain crops from 1990-2015. *European Journal of Agronomy*
- Tyner, W. E., Taheripour, F., Zhuang, Q., Birur, D., & Baldos, U. (2010): Land use changes and consequent CO2 emissions due to US corn ethanol production: A comprehensive analysis. *Department of Agricultural Economics, Purdue University*, 1-90.
- von Witzke, H., Noleppa, S. (2012): Klimaeffekte des Pflanzenschutzes in Deutschland. Online verfügbar unter: https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/daoe/bk/ihe/Veroeff/IVA_120122-mit%20Schutz.pdf
- von Witzke, H., Noleppa, S. (2011): Der gesamtgesellschaftliche Nutzen von Pflanzenschutz in Deutschland – Darstellung des Projektansatzes und von Ergebnissen zu Modul 1: Ermittlung von Markteffekten und gesamtwirtschaftlicher Bedeutung. Online verfügbar: https://www.agrar.hu-berlin.de/de/institut/departments/daoe/bk/ihe/Veroeff/psm_markteffekte_final.pdf
- Vos C, Rösemann C, Haenel H-D, Dämmgen U, Döring U, Wulf S, Eurich-Menden B, Freibauer A, Döhler H, Steuer B, Osterburg B, Fuß R (2024): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2022: Report on methods and data (RMD) Submission 2024. Online verfügbar unter: [Home · Wiki · Cora Vos / EmissionsAgriculture2024 · GitLab \(thuenen.de\)](https://thuenen.de/Home/Wiki/CoraVos/EmissionsAgriculture2024/GitLab)
- Voss-Fels, K.P., Stahl, A., Wittkop, B. et al. (2019): Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels. *Nat. Plants* 5, 706–714 <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0445-5>
- Weckenbrock, P., Sanchez-Gellert H. L., Gattinger, A. (2019): Klimaschutz. In anders J, Heß J (eds): Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft. 2. überarbeitete und ergänzte Auflage. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 398 p, Thünen Rep 65, DOI:10.3220/REP1576488624000
- Weimann, J. (2021): CO2-Preise und Kosten der CO2-Vermeidung bei Anwendung ordnungsrechtlicher Maßnahmen im Vergleich zur Erweiterung des EUETS.
- Zapf, M. Pengg, H., Bütler, T. Bach, C., Weindl, C. (2021): Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile. Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft. Springer Fachmedien Wiesbaden

7. Anhang

Anhang 1: Übersicht berücksichtigender Emissionen bei der Berechnung der Treibhausgasbilanz mit dem LfL-Klimarechner

Berücksichtigte und nicht berücksichtigte Emissionen



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Anhang 2: Annahmen zum Produktionsverfahren Winterweizen „Standard“

B-Weizen		
Erntejahr	2024	
Intensität	mittel	
Schlaggröße (ha)	5	
Strohbergung	nein	
Ertrag	77	
Preis	19,71	
	Nach DBE: 175 kg (bei 40 kg Nmin und Vorfrucht Raps = 10 kg N),	
Düngung		
Düngung		Kosten (€ je kg Nährstoff)
	175 kg N aus Kalkammonsalpeter	1,20
Stickstoff		
Phosphat (P2O5)	61,6 aus Triple-Superphosphat	1,21
Kali (K2O)	42,4 aus 40er Kornkali	1,16

Anhang 3: Effektberechnung einzelner Maßnahmen zur THG-Reduktion im Produktionsverfahren „Winterweizen“

Variante	Standard	Teilflächenspez. DM-Applikation	Stabilisierte N-Dünger	NGT	Grüne N-Dünger
Effekte		-6,5 % N-Bedarf (MW aus Sponagel et al 2024) - Verfahrenskosten: + 30 € (Kühl et al. 2019 zzgl. 10 € wegen Teuerung bei Maschinen)	-44 % N₂O-aus N-Düngung (MW aus Grados et al. 2022) +11 % Kosten für N-Düngemittel (Sponagel et al. 2024)	+20 % Saatgutkosten (MW aus Sponagel et al. 2024) - 7,5 % N₂O (MW aus Sponagel et al. 2024)	+150 % Kosten für N-Dünger (MW aus Sponagel et al. 2024)
kg CO ₂ eq/ha					
Saatgut	54	54	54	54	54
Pflanzenschutz	24	24	24	23	24
Phosphatdünger (P ₂ O ₅)	33	33	33	33	33
Kalidünger (K ₂ O)	18	18	18	18	18
Stickstoffdünger (N)	648	605	648	648	65
N ₂ O aus der Düngung mit Stickstoff (direkt und indirekt)	920	837	497	851	920
N ₂ O aus NH ₃ - und NO-Verluste aus Deposition (indirekt)	14	14	14	14	14
CO ₂ aus carbonathaltigen Düngemitteln	65	61	61	61	61
N ₂ O aus Ernterückständen	292	292	292	292	292
Kraftstoffe für Maschinen	235	235	235	235	235
Reinigung und Trocknung	39	39	39	39	39
Gesamt	2.341	2.212	1.914	2.267	1.754
Einsparung (kg CO ₂ eq)		129	427	74	587
Einsparung zu REF (%) %		6	19	4	26
Produktbezogene Emissionen (kg CO₂eq/kg Weizen)	0,30	0,29	0,25	0,29	0,22

Ökonomische Effekte					
Variante	Standard	€/ha			
		Teilflächenspez. DM-Appli- kation	Stabilisierte N-Dün- ger	NGT	Grüne N-Dünger
Saatgut	107,3	107,3	107,3	128,8	154,5
Pflanzenschutz	178,7	178,7	178,7	151,9	178,7
Phosphatdünger (P ₂ O ₅)	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0
Kalidünger (K ₂ O)	48,7	48,7	48,7	48,7	48,7
Stickstoffdünger (N)	210,0	196,4	233,1	217,9	525,0
Variable Maschinen- kosten (inkl. Diesel)	329,7	359,7	329,7	329,7	329,7
Reinigung und Trock- nung	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8
Gesamt	1.050,2	1.066,6	1.073,3	1.052,8	1.412,4
Ertrag (dt)	77,0	77,0	77,0	78,2	77,0
Preis (€ inkl. 9% MwSt.)	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7
Erlös	1.517,7	1.517,7	1.517,7	1.540,4	1.517,7
DB	467,5	451,1	444,4	487,6	105,3
Änderung zu REF		- 16,3	- 23,1	20,2	- 362,2
CO ₂ -Vermeidungs- kosten (€/t CO ₂ eq)		- 126,6	- 54,1	271,5	- 617,1

Anhang 4: Herleitung des Effekts eines auf THG-Minderung optimierten Weizenanbaus, bei dem die vier Maßnahmen Teilflächenspezifische, DM-Applikation, Stabilisierte- N-Dünger, NGT und Grüne N-Dünger kombiniert eingesetzt werden. Die Annahmen entsprechen denen aus Anhang 2.

	Standard	Optimiert
Saatgut	54	54
Pflanzenschutz	24	23
Phosphatdünger (P ₂ O ₅)	33	33
Kalidünger (K ₂ O)	18	18
Stickstoffdünger (N)	648	61
N ₂ O aus der Düngung mit Stickstoff (direkt und indirekt)	920	434
N ₂ O aus NH ₃ - und NO-Verluste aus Deposition (indirekt)	14	14
CO ₂ aus carbonathaltigen Düngemitteln	65	61
N ₂ O aus Ernterückständen	292	292
Kraftstoffe für Maschinen	235	235
Reinigung und Trocknung	39	39
 Gesamt	 2.341	 1.262
 Einsparung		 1.079
Produktbezogene Emissionen (kg CO₂eq/kg Weizen)	0,30	0,16

Ökonomische Effekte		
	Standard	Optimiert
		€/ha
Saatgut	107,3	154,5
Pflanzenschutz	178,7	152,0
Phosphatdünger (P ₂ O ₅)	75,0	75,0
Kalidünger (K ₂ O)	48,7	48,7
Stickstoffdünger (N)	210,0	544,9
Variable Maschinenkosten (inkl. Diesel)	329,7	359,7
Reinigung und Trocknung	100,8	100,8
Gesamt	1.050,2	1.435,6
Ertrag (dt)	77,0	78,2
Preis (inkl. 9% MwSt.)	19,7	19,7
Erlös	1.517,7	1.540,4
DB	467,5	104,9
THG-Einsparung (kg CO ₂ eq)		587
Änderung Deckungsbeitrag (€)		- 362,6
CO₂-Vermeidungskosten (€/tCO₂eq)		336,1