

Gefährdungspotenzial und Risikoabschätzung

Auswirkungen der NI/UI auf die Emission klimarelevanter Spurengase

Dr. Andreas Pacholski

Thünen-Institut für Agrarklimaschutz



Gliederung

- 1. Klimarelevante Spurengasemissionen aus der Landwirtschaft**
 - Welche Treiber gibt es?
- 2. Wirkung von UI/NI – Wirkungsweise**
 - Welche Effekte auf klimarelevante Spurengasemissionen sind zu erwarten
- 3. Wirkung von UI/NI auf THG Emissionen– Erfahrungen international/national**
- 4. Zusammenfassung**
- 5. Offene Fragen**

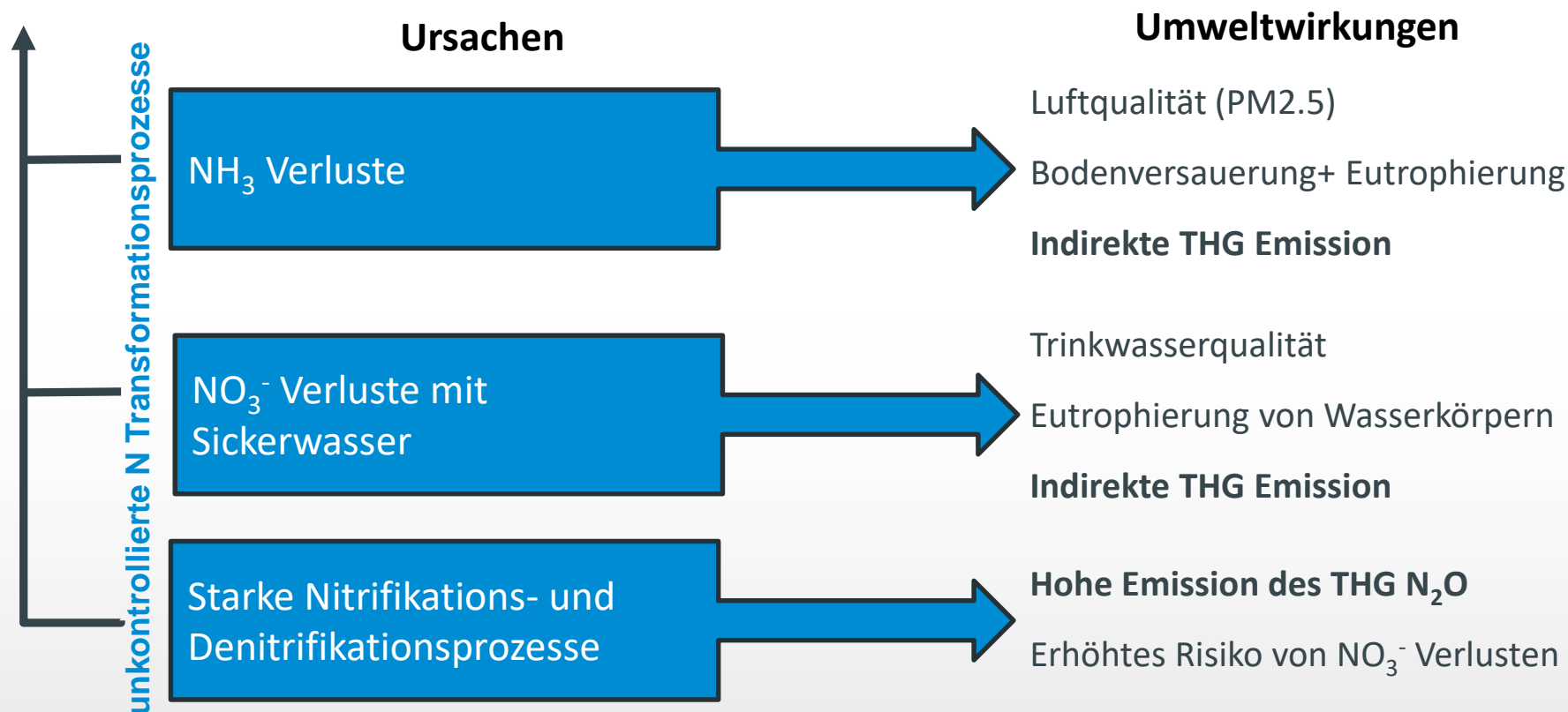
Klimarelevante Spurengasemissionen aus der Landwirtschaft

Gas	Bedeutung Landwirtschaft (% deutsche Emissionen)	Treibhauspotenzial	Treiber (Quellen/Senken)
CO ₂	3-4	1	<ul style="list-style-type: none"> - Humusabbau/-aufbau (v.a. org. Böden)* - Kalkung - Kraftstoffverbrauch - Düngerproduktion**
N ₂ O	81 (¾ davon aus Böden)	298	<ul style="list-style-type: none"> - Bodengehalt min. N ← Düngung - Hohe Bodenfeuchte/Temperatur - Indirekt: Freisetzung aus NO₃⁻-Sickerung (Denitrifikation) - Lagerung/Management org. Dünger
CH ₄	63	25	<ul style="list-style-type: none"> - Viehhaltung (enterische Fermentation) - Lagerung/Management org. Dünger - Oxidation im Boden
NH ₃ (indirekt als N ₂ O)	95 *LULUCF **Nicht bei Landwirtschaft berichtet	3	<ul style="list-style-type: none"> - Ammoniakalische organische und synthetische Dünger - Ställe - Lagerung/Management org. Dünger

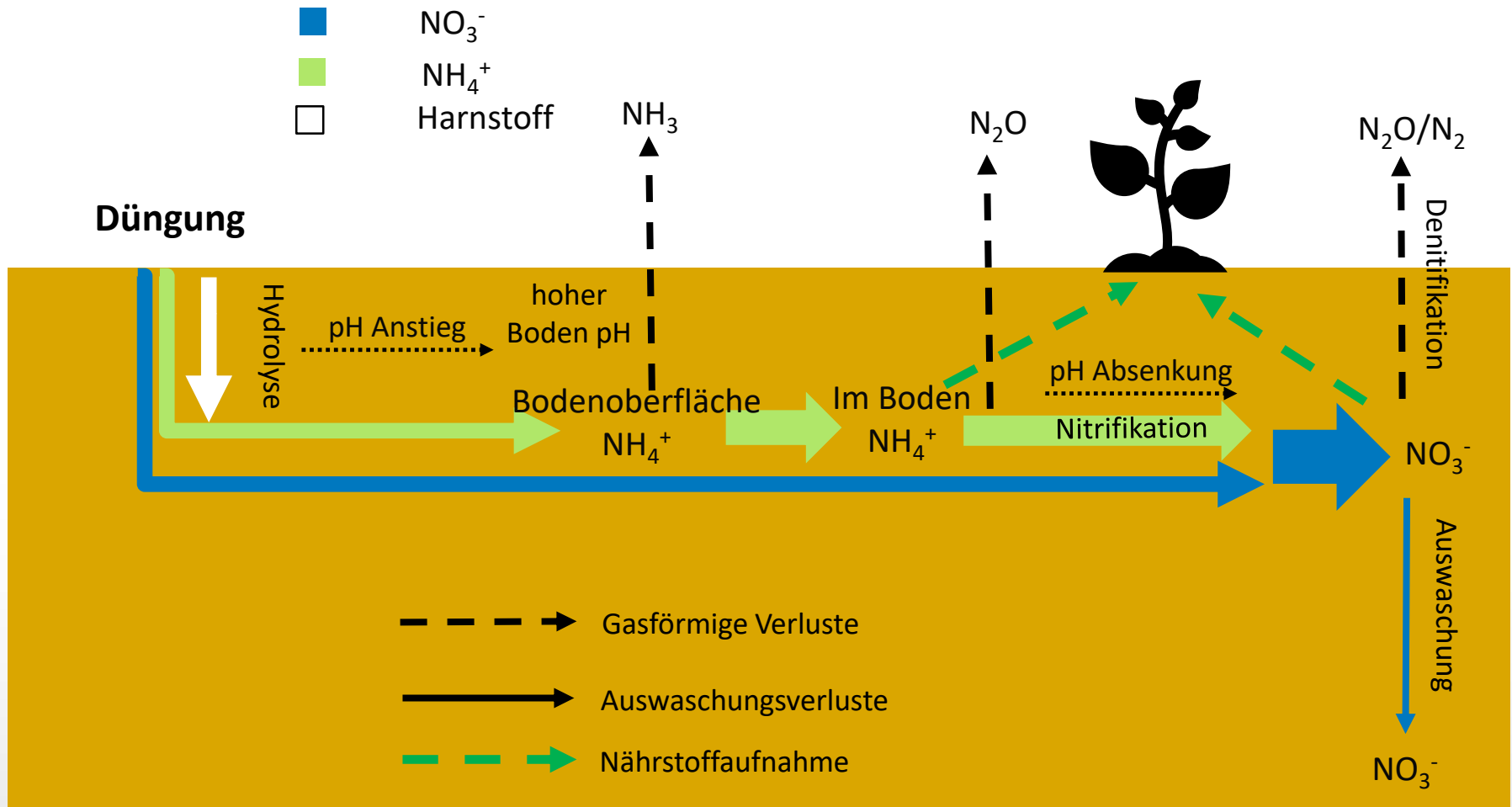
Ursachen und Auswirkungen einer geringen Stickstoff-Effizienz auf Wirtschaftlichkeit und Umwelt

Hohe N Verluste von applizierten Düngern

- Geringe N Effizienz
- Unwirtschaftlicher Düngereinsatz



N-Transformation und N-Verluste nach Düngung



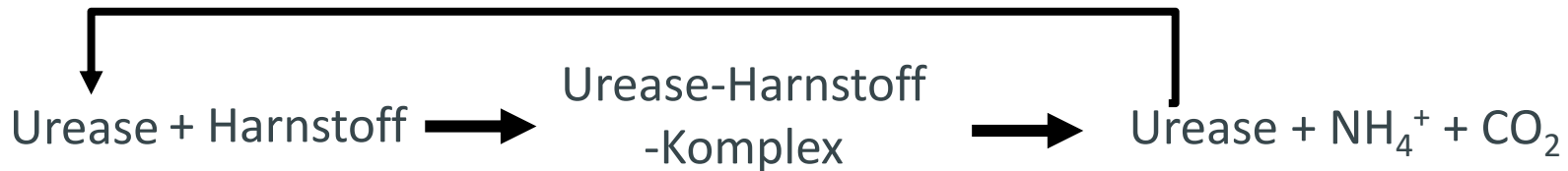
Düngerzusatzstoffe zur besseren Kontrolle der N-Transformation

Mit Zusatzstoffen behandelte Dünger: 'Enhanced Efficiency Fertilizers' (EEF)

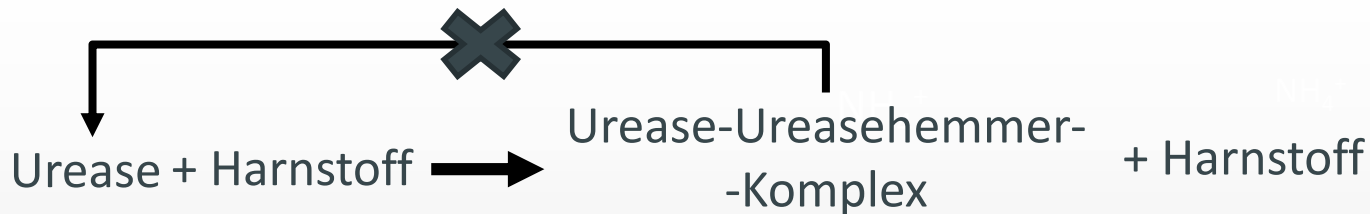
- **Nitrifikationsinhibitoren (NI)**
- **Ureaseinhibitoren (UI, nur bei Düngern mit relevantem Harnstoffanteil)**
- **Harnstoff behandelt mit NI und UI (DI)**
- Polymerumhüllung (+/- bioabbaubar), Harnstoff mit Schwefelumhüllung: in Deutschland kaum eingesetzt (Golfplätze, Ornamentals etc.)
- Biostimulanzien -> zur Verbesserung der Nährstoffmobilität und-aufnahme und/oder Stressresilienz der Pflanzen (Nischenprodukte)

Wirkungsweise: Ureaseinhibitoren verlangsamen Harnstoffhydrolyse

Normale Reaktion von Harnstoff mit dem Exo-Enzym Urease



Irreversible, kompetitive Hemmung der Urease mit **Ureaseinhibitor (UI)** :



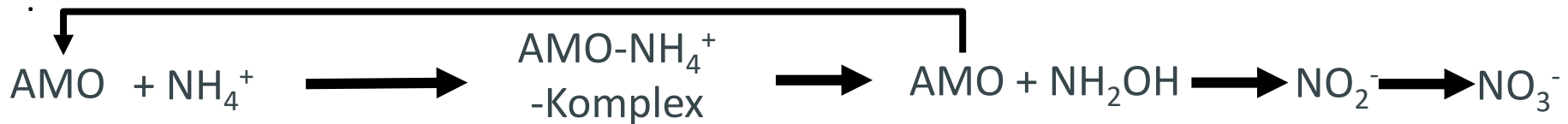
Langsamere Harnstoffhydrolyse
Bessere Harnstoffverteilung im Boden

Geringer pH-Erhöhung
durch Hydrolyse

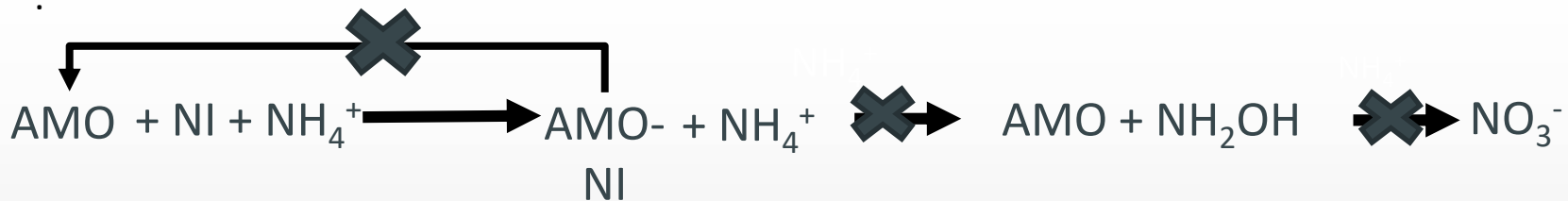
NH_3 -Verlust

Wirkungsweise: Nitrifikationsinhibitoren verlangsamen die mikrobielle NH_4^+ -Transformation

Der erste Schritt der bakteriellen Nitrifikation von Ammonium umfasst die Oxidation von NH_4^+ zu Hydroxylamin (NH_2OH) durch das Enzym **Ammonia Monooxygenase (AMO)** (z.B. in Nitrosomonas)



Nitrifikationsinhibitoren (NI) chelatisieren konformierende Metall-Ionen (Cofaktoren) des AMO-Enzyms: das Enzym wird irreversibel inaktiv.



Langsamere Nitrifikation

Geringer Nitratanteil/
hoher Ammonium-
anteil an mineral. N

N_2O -Verlust
Nitrat auswaschung

Postulierte Wirkungen von Hemmstoffen auf THG Emissionen im Pflanzenbau

THG Effekt	Inhibitor typ			Erläuterung
	UI	NI	DI	
Direkte Emissionen				
N ₂ O	(↓)	↓	↓	
CH ₄	-	(-)	(-)	
CO ₂	(-)	(↓)	(↓)	Hemmung der mikrobiellen Aktivität
Indirekte Emissionen				
NH ₃	↓	↑	↓	
NO ₃ -Auswaschung	-	↓	↓	NH ₄ ⁺ weniger auswaschungsgefährdet
Düngerverbrauch	↓	↓	↓	Geringere CO ₂ Emissionen durch Düngereinsparung (N-Effizienz↑/Ertrag↑)
Überfahrten	-	↓	↓	Geringere Kraftstoff CO ₂ -Emissionen

() höchst unsicher, - keine Wirkung, ↓ Reduktion, ↑ Stimulation

Zugelassene und eingesetzte Hemmstoffe in Deutschland (DüMV)

Die meisten Wirkstoffe lassen sich nur auf bestimmten Düngern formulieren → verschiedene Wirkstoffe, verschiedene Basisdünger

	Hemmstoffe	Mindestanteil in %, Ammonium-, Carbamid- und Cyanamidstickstoff	Aktuell am Markt
2.1 Nitrifikationshemmstoffe			
2.1.1	Dicyandiamid	10,0	Nein
2.1.2	Gemisch aus Dicyandiamid und Ammoniumthiosulfat		Nein
	Dicyandiamid	7,7	
	Ammoniumthiosulfat	4,8	
2.1.3	Gemisch aus Dicyandiamid und 3-Methylpyrazol	2,0	Nein
2.1.4	Gemisch aus Dicyandiamid und 1 H-1,2,4-Triazol	2,0	Nein
2.1.5	3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP)	0,8	Ja
2.1.6	Gemisch aus 1H-1,2,4-Triazol und 3-Methylpyrazol	0,2	Nein
2.1.7	N-((3(5)-Methyl-1H-pyrazol-1-yl)methyl)acetamid (MPA)	0,05	Ja
2.1.8	Nitrapyrin [2-chloro-6-(trichloromethyl)pyridin]		Ja
2.1.9	Isomergemisch von 2-(3,4-Dimethyl-1H-pyrazol-1-yl)bernsteinsäure und 2-(4,5-Dimethyl-1H-pyrazol-1-yl)bernsteinsäure (DMPSA)	0,8	Nein
2.2 Ureasehemmstoffe			
2.2.1	N-(2-Nitrophenyl)phosphorsäuretriamid (2-NPT)	Carbamidstickstoff: 0,04 % bis 0,15 %	Ja
2.2.2	Gemisch aus N-Butyl-thiophosphortriamid und N-Propyl-thiophosphortriamid (NBPT/NPPT)	Carbamidstickstoff: 0,02 % bis 0,2 %	Ja

Berechnung der THG Minderungswirkung von Hemmstoffen

Berücksichtigung der ungedüngten Kontrolle (IPCC2019)

$$EF_{1i} = \frac{N_2O_{Ti} - N_2O_{Ci}}{N_i}$$

- alle Quellen von THG Emissionen werden separat mit Emission Factor (**EF**) berücksichtigt
- THG (N₂O) Emissionen im Feld setzen sich aus Emissionen verschiedener Quellen zusammen
- Die Emissionen aus der (aktuell) ungedüngten Kontrolle sollten nach IPCC von den Emissionen der gedüngten Varianten abgezogen werden → unklar inwieweit dies in Metastudien berücksichtigt wurde

Berechnung von Emissionsfaktoren nach IPCC 2019

N_2O_{Ti} = Menge N₂O aus definiertem N Input + andere Quellen

N_2O_{Ci} = Menge N₂O ungedüngte Kontrolle (=andere Quellen)

N_i = Menge N Input (Dünger)

Ganzjährige Messung der N₂O Emissionen zur Bestimmung von EF erforderlich (Shang et al. 2020)



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Environmental Pollution

journal homepage: www.elsevier.com/locate/envpol



Measurement of N₂O emissions over the whole year is necessary for estimating reliable emission factors[☆]



Ziyin Shang^{a,*}, Mohamed Abdalla^a, Matthias Kuhnert^a, Fabrizio Albanito^a, Feng Zhou^b, Longlong Xia^c, Pete Smith^a

^a Institute of Biological and Environmental Sciences, University of Aberdeen, 23 St Machar Drive, Aberdeen, AB24 3UU, UK

^b Sino-France Institute of Earth Systems Science, Laboratory for Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing, 100871, PR China

^c Institute for Meteorology and Climate Research (IMK-IFU), Karlsruhe Institute of Technology, Garmisch-Partenkirchen, 82467, Germany

EFs für das annuelle Emissionen sind signifikant größer als EFs der Vegetationsperiode:

Nassreis +~30%

alle Fruchtarten +~10%

Wirkung von Zusatzstoffen auf THG Emissionen

In den letzten ~10 Jahren wurden einige Metastudien veröffentlicht

- N_2O , NH_3 , Nitratauswaschung (Akiyama et al. 2010, Kim et al. 2012, Ruser & Schulz 2015, Yang et al. 2016, Pan et al. 2016, Gilsanz et al. 2016, Lam et al. 2017, Li et al. 2018, Kanter & Searchinger 2018, Cowan et al. 2020, Wu et al. 2021)
 - Ertrag + N-Effizienz (Abalos et al. 2014, Li et al. 2018, Yang et al. 2016, Sha et al 2020)
- Keine Meta-Studien zu THG Effekten bzgl. mitteleuropäischer Verhältnissen vorhanden
- Starke Überlappung bei der Datenbasis der verschiedenen Studien, unterschiedliche Auswertungsansätze → nicht immer konsistente Effektgrößen
- In der Regel keine ganzjährigen Messungen der N_2O -Emissionen in den berichteten Studien, kein Abzug der Werte der ungedüngten Kontrolle

Die erste Metastudie zur N₂O-Minderung durch Nitrifikationsinhibitoren

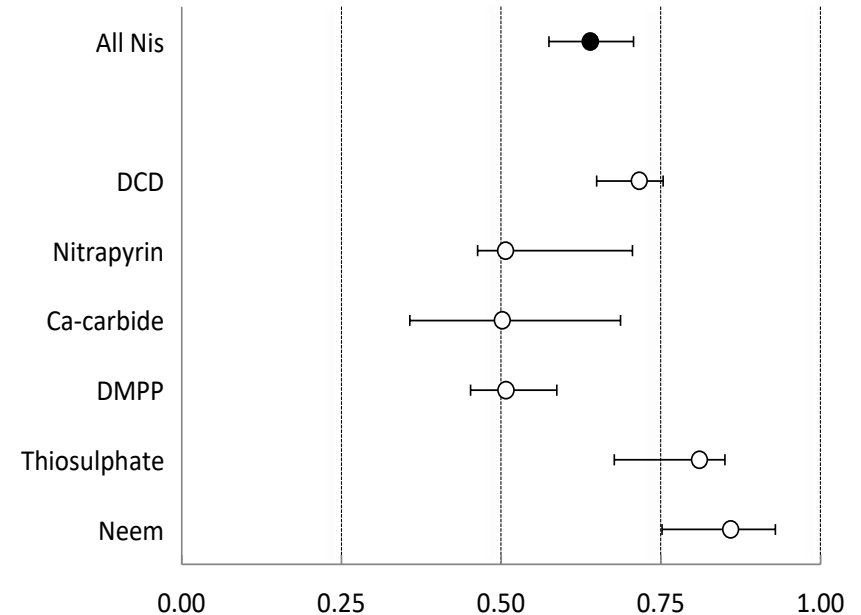
Akiyama et al. 2010:

- Nur Feldmessungen, hauptsächlich in der Vegetationsperiode
- Kein Abzug von Emissionen aus der ungedüngten Kontrolle

→ Im Mittel über alle Wirkstoffe ~35% Reduktion der N₂O Emissionen

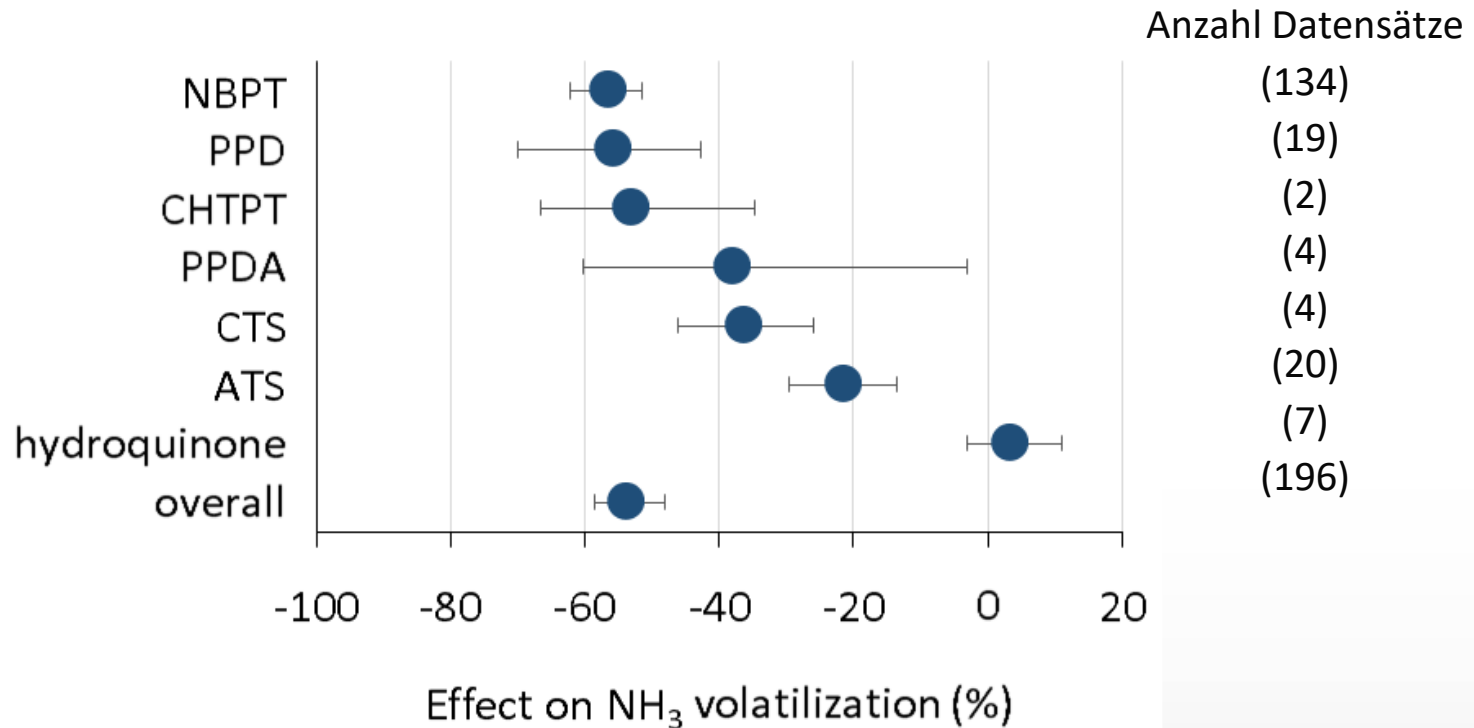
(Bestätigt von Ruser & Schulz (2015) mit etwas erweiterter Datengrundlage)

→ Kein signifikanter Effekt von UI auf N₂O Emissionen



**N₂O Emissionen von Düngern mit NI
im Verhältnis zu unbehandelten Düngern**

Effekt verschiedener Ureasehemmstoffe auf Ammoniakemissionen (Pan et al. 2016)

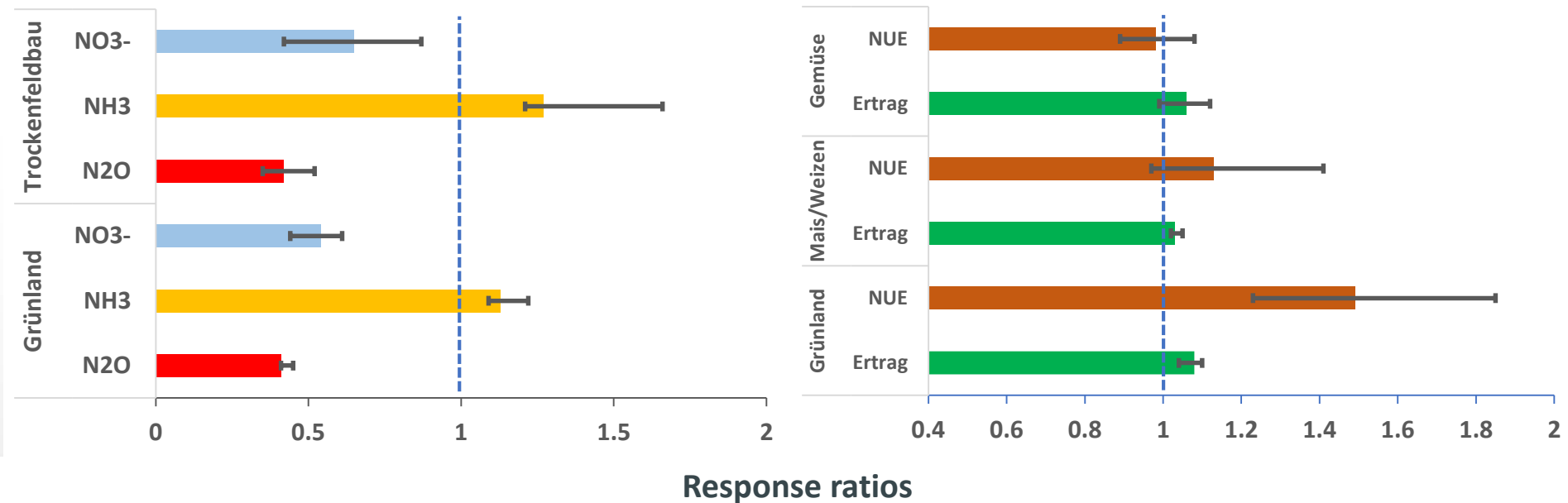


- Reduktion der NH₃ Emissionen mit dem gebräuchlichsten UI NBPT um ~60%
- Wirkstoffe NPPT und 2-NPT strukturanalog zu NBPT (nicht in Meta-Studien aufgeführt)

Umfassende globale Meta-Studie (Li et al. 2018)

Wirkung von NI auf N-Verluste und Ertrag

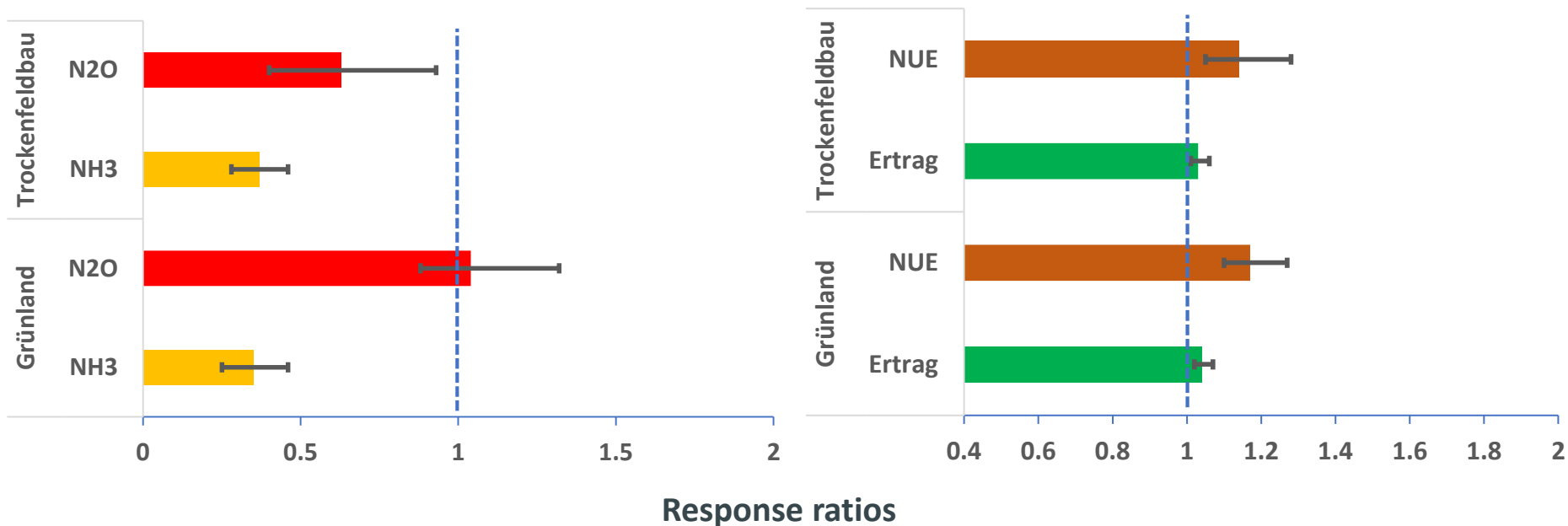
- Reduktionswirkung von NI auf N₂O Emissionen anderer Studien bestätigt
- NI erhöhen NH₃-Emissionen und verringern Nitratauswaschung signifikant
- Ertragseffekte und NUE in Getreide und Gemüse schwach/nicht signifikant.
Mais/Weizen: Ertrag + ca. 3%, NUE + ca. 13%
- Jahresdurchschnittstemperaturen <10°C NUE +30%, sonst 12%



Umfassende globale Meta-Studie (Li et al. 2018)

Wirkung von UI auf N-Verluste und Ertrag

- Reduktionswirkung von UI auf NH_3 Emissionen der vorherigen Studien weitestgehend bestätigt,
- UI verringern signifikant N_2O Emissionen im Trockenfeldbau, nicht im Gemüse
- Signifikante Ertrags- und Stickstoffnutzungseffekte. Trockenfeldbau: Ertrag + ca. 3%, NUE +ca. 15%



Bedeutung der NI Wirkung auf Ammoniak-Verflüchtigung und N₂O EF (Wu et al. 2021)

- Globale Metastudie zu Wirkung von NI in Kombination mit Harnstoff und Gülle auf NH₃ Emissionen, angerechnet auf den N₂O EF
- Bei Berücksichtigung von NH₃ Emissionen als indirekte N₂O-Emissionen sinkt die N₂O-Minderungswirkung von NI von 48,0 % auf 39,7 % (*EF = 1 %) bzw. 28,2 % (EF = 5 %).
- Unterschiede zwischen Wirkstoffen

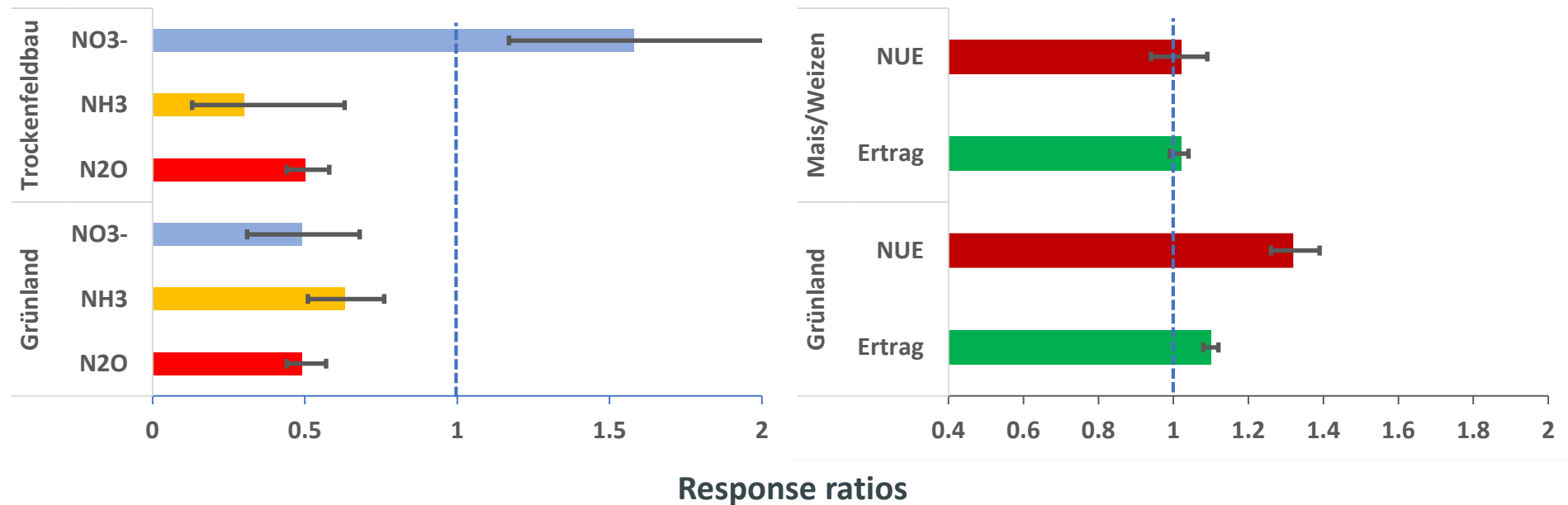
→ Doppeltinhibierung von Harnstoff erforderlich

*EF → Anteil der Ammoniak-Emissionen der als N₂O reemittiert wird (IPCC2006 1-5%)

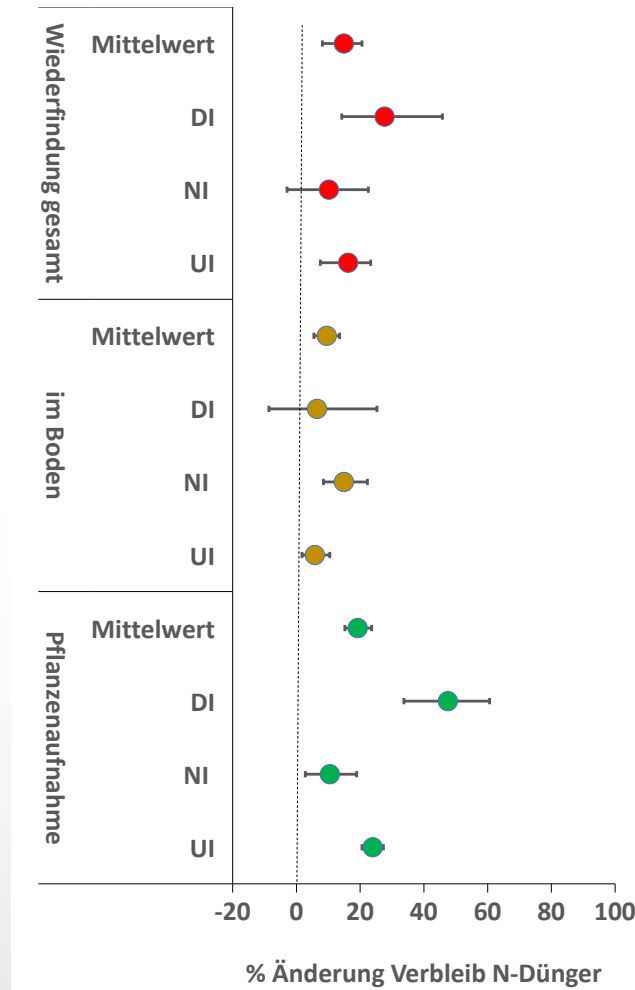
Umfassende globale Meta-Studie (Li et al. 2018)

Wirkung von DI auf N-Verluste und Ertrag

- DI reduzieren signifikant NH_3 und N_2O Emissionen, gemischtes Ergebnis bzgl. NO_3^-
- Hohe, signifikante Ertrags- und Stickstoffnutzungseffekte im Grünland, aber nicht im Trockenfeldbau
- Im Trockenfeldbau Ertrag und NUE + ca. 2%



Meta-Studie: Wirkung von UI, NI und DI auf die Stickstoffeffizienz



Einsatz von Hemmstoffen erhöht

- pflanzliche N-Aufnahme
- N-Wiederfindung insgesamt

aus Sha et al. 2020

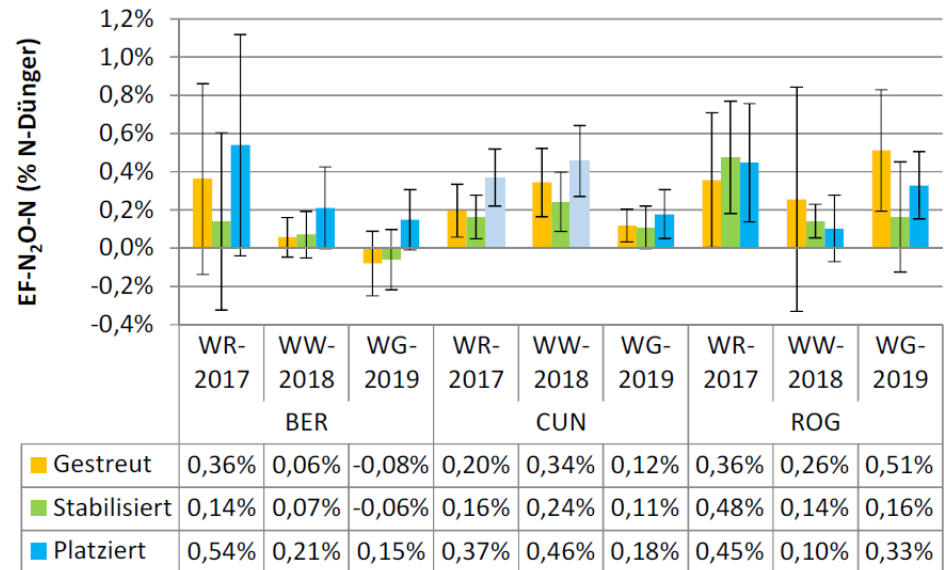
Metastudie: Ertrags- und N-Nutzungseffizienzeffekte von NI in Deutschland (Hu et al. 2014)

- kein signifikanter Effekt auf Erträge und N-Aufnahme bei allen getesteten Kulturen und Trägerdüngern (max +2% Ertrag)
- Zusammenfassung von Düngergaben mit Applikation von NI lieferte die gleichen Erträge, bei signifikanter Reduktion der Rohprotein-Konzentration in Winterweizen
- kein Test gegenüber Zusammenfassung von Düngergaben der nicht behandelten Dünger, deshalb Bewertung der Gabenzusammenfassung noch unsicher

StaPlaRes: Spurengasemissionen, Ertrags- und N-Nutzungseffizienzeffekte von DI in Deutschland

Projekt **Staplares (BLE) (2017-2020)**: DI im Vergleich zu Harnstoff in dreigliedriger Fruchtfolge mit statischen Parzellen an 3 Standorten: Untersuchung annueller N₂O Emissionen, NH₃ Emissionen, Nitratauswaschung, Erträge und N-Effizienz

- Stabilisiert (DI) hatte gegenüber Harnstoff gestreut weder für einen Standort noch für eine Fruchtart einheitlichen Effekt auf den N-Entzug oder den Ertrag
- Signifikante Reduktion der NH₃-Emissionen (~70%)
- Keine Verringerung der berechneten Nitratauswaschung mit DI
- Nur in wenigen Versuchsjahren signifikante Reduktion der N₂O Emissionen, tendenziell Verringerung der Emissionen ← sehr geringes Emissionsniveau aufgrund von Dürrejahren



Kreuter et al. 2020

(vorläufiger Abschlussbericht)

Zusammenfassung: mittlere Wirkung von Zusatzstoffen auf THG Emissionen im Pflanzenbau

Allgemein:

Noch große Unsicherheiten bei den Wirkungen und v.a. Wirkungsgrößen (numerische Werte der EF) und bei der Berechnungsmethode

Variation der Wirkung aufgrund von Witterungsbedingungen, z.B. geringe Wirkung in Situationen mit geringem Emissionsniveau

Nitrifikationsinhibitoren:

- konsistente mittlere Reduktion düngerbürtiger N₂O Emissionen um ca. 35%
- Verringerte Nitrat Auswaschung in der Vegetationsperiode
- in Kombination mit Gülle und Harnstoff erhöhte NH₃-Emissionen
- Erhöhte Erträge und v.a. N-Effizienz mit Unterschieden zwischen den Kulturen
- Ertrags- und N-Effizienzeffekte unter mitteleuropäischen Bedingungen noch unsicher
- Unterschiede zwischen Wirkstoffen, aber eher unsicher (direkte Vergleiche fehlen)

Zusammenfassung: mittlere Wirkung von Zusatzstoffen auf THG Emissionen im Pflanzenbau

Ureaseinhibitoren:

- mittlere Reduktion düngerbürtiger NH_3 Emissionen um ca. 60%
- Erträge und N-Effizienzwirkung unter mitteleuropäischen Bedingungen (Getreide) wahrscheinlich signifikant erhöht (Unsicherheiten)
- Wirkung auf direkte N_2O Emissionen unklar, Widersprüche zwischen Meta-Studien

Harnstoff mit Doppelinhibitoren:

- Vereinen die Wirkungen von UI und NI
- Ertragswirkung geringer, NUE gleich UI und NI, Zahl der Studien eher gering
- Erste Ergebnisse in Deutschland zeigen eher geringe Ertragswirkung und geringe Minderung direkter annueller THG Emissionen

Offene Fragen: THG Wirkung von Hemmstoffen unter Bedingungen Mitteleuropas

Unter den Bedingungen Mitteleuropas:

- Emissionsfaktoren für annuelle N_2O -Emissionen und Nitratauswaschung unter Berücksichtigung der ungedüngten Kontrolle?
- Einfluss von Kulturarten und Umweltbedingungen auf direkte und indirekte THG Emissionen?
- Stabilität der Hemmstoffwirkungen nach mehrjähriger, kontinuierlicher Anwendung?
- Reduktion von N_2O Emissionen durch Einsatz von UI?
- Umfassende Bewertung der Klimaschutzwirkung über Ertragseffekte und N-Effizienz sowie betriebswirtschaftlichen Effizienz des Hemmstoffeinsatzes steht aus

