

# 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**

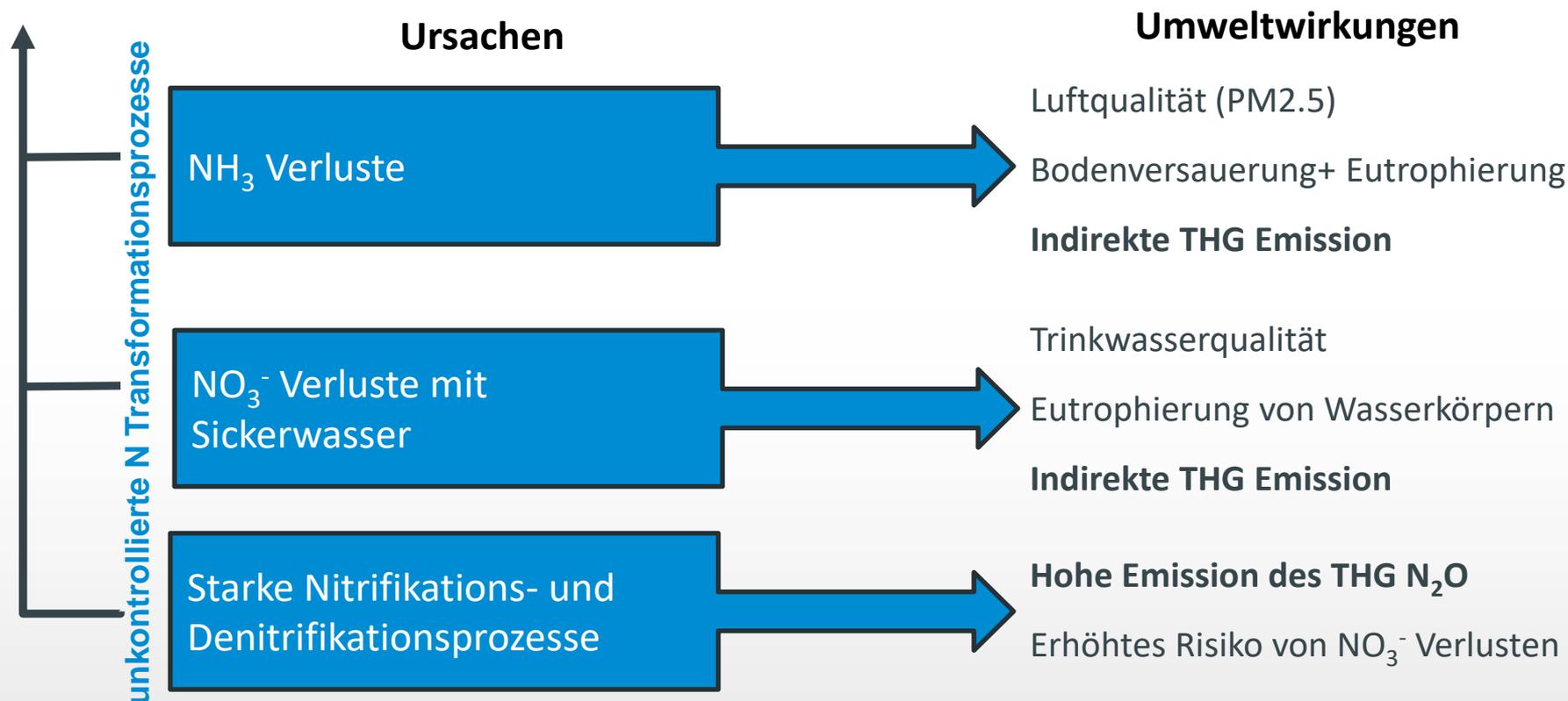
# Klimarelevante Spurengasemissionen aus der Landwirtschaft

Gas	Bedeutung Landwirtschaft (% deutsche Emissionen)	Treibhauspotenzial	Treiber (Quellen/Senken)
CO <sub>2</sub>	3-4	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Humusabbau/<b>-aufbau</b> (v.a. org. Böden)*</li> <li>- Kalkung</li> <li>- Kraftstoffverbrauch</li> <li>- Düngerproduktion**</li> </ul>
N <sub>2</sub> O	81 (¾ davon aus Böden)	298	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bodengehalt min. N ← Düngung</li> <li>- Hohe Bodenfeuchte/Temperatur</li> <li>- Indirekt: Freisetzung aus NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Sickerung (Denitrifikation)</li> <li>- Lagerung/Management org. Dünger</li> </ul>
CH <sub>4</sub>	63	25	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Viehhaltung (enterische Fermentation)</li> <li>- Lagerung/Management org. Dünger</li> <li>- <b>Oxidation im Boden</b></li> </ul>
NH <sub>3</sub> (indirekt als N <sub>2</sub> O)	95  *LULUCF **Nicht bei Landwirtschaft berichtet	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ammoniakalische organische und synthetische Dünger</li> <li>- Ställe</li> <li>- Lagerung/Management org. Dünger</li> </ul>

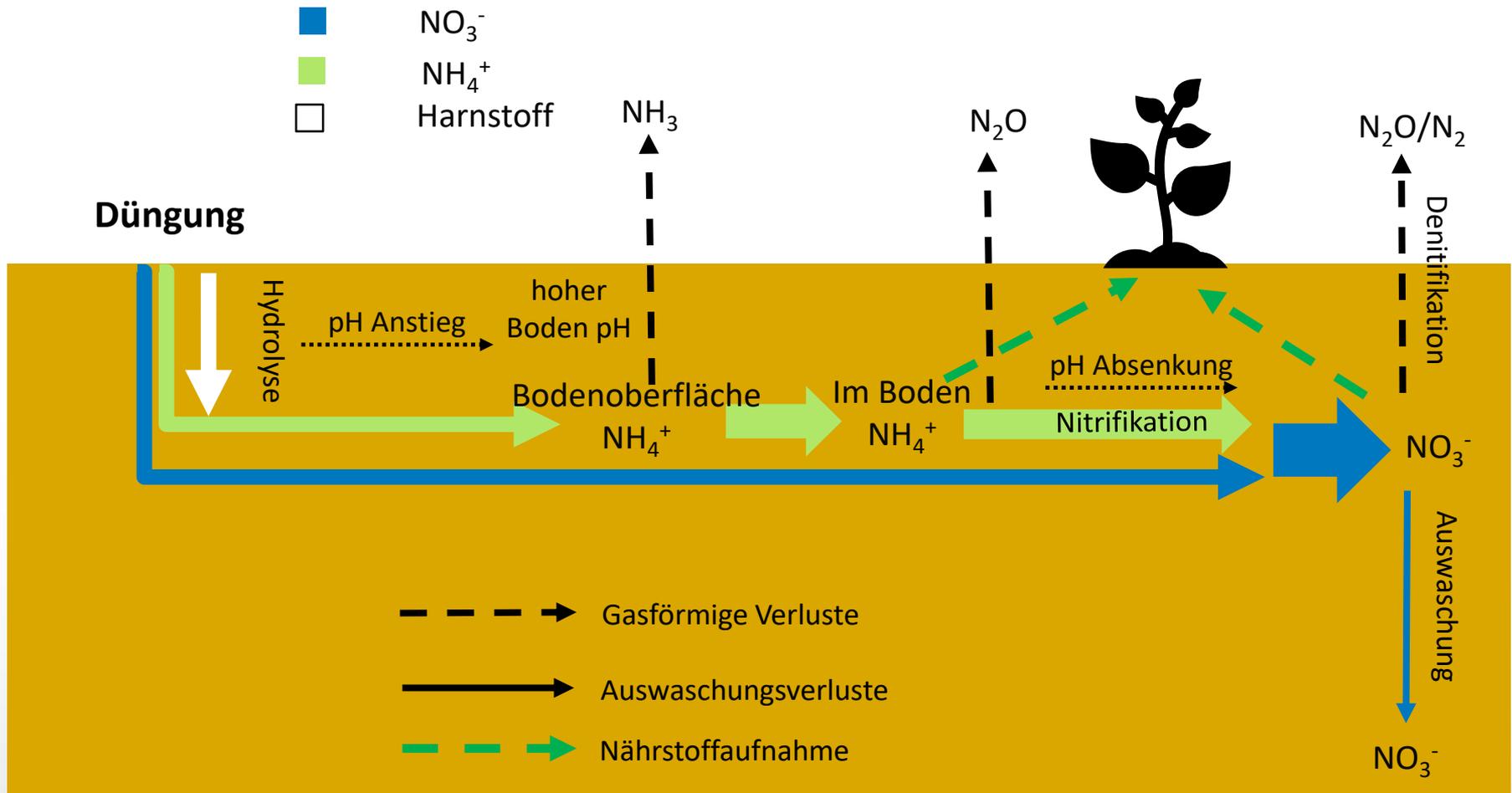
# Ursachen und Auswirkungen einer geringen Stickstoff-Effizienz auf Wirtschaftlichkeit und Umwelt

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)

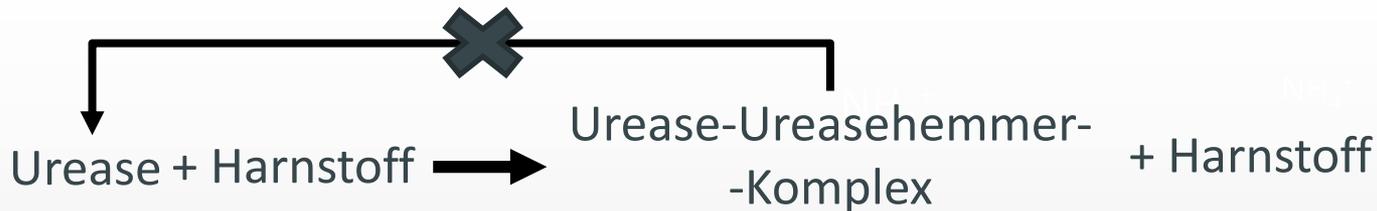
- **Nitrifikationsinhibitoren (NI)**
- **Ureaseinhibitoren (UI, nur bei Düngern mit relevantem Harnstoffanteil)**
- **Harnstoff behandelt mit NI und UI (DI)**
- Polymerumhüllung (+/- bioabbaubar), Harnstoff mit Schwefelumhüllung: in Deutschland kaum eingesetzt (Golfplätze, Ornamentals etc.)
- Biostimulanzien -> 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)** :



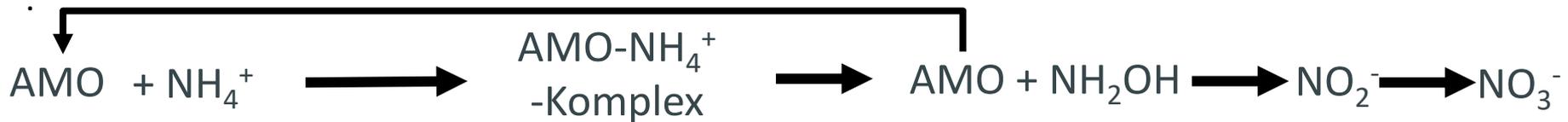
Langsamere Harnstoffhydrolyse  
Bessere Harnstoffverteilung im Boden

Geringer pH-Erhöhung  
durch Hydrolyse

$\text{NH}_3$ -Verlust

# Wirkungsweise: Nitrifikationsinhibitoren verlangsamen die mikrobielle $\text{NH}_4^+$ -Transformation

Der erste Schritt der bakteriellen Nitrifikation von Ammonium umfasst die Oxidation von  $\text{NH}_4^+$  zu Hydroxylamin ( $\text{NH}_2\text{OH}$ ) 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

$\text{N}_2\text{O}$ -Verlust  
Nitrat auswaschung

# Postulierte Wirkungen von Hemmstoffen auf THG Emissionen im Pflanzenbau

THG Effekt	Inhibitorotyp			Erläuterung
Direkte Emissionen	UI	NI	DI	
N <sub>2</sub> O	(↓)	↓	↓	
CH <sub>4</sub>	-	(-)	(-)	
CO <sub>2</sub>	(-)	(↓)	(↓)	Hemmung der mikrobiellen Aktivität
Indirekte Emissionen				
NH <sub>3</sub>	↓	↑	↓	
NO <sub>3</sub> -Auswaschung	-	↓	↓	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> weniger auswaschungsgefährdet
Düngerverbrauch	↓	↓	↓	Geringere CO <sub>2</sub> Emissionen durch Düngereinsparung (N-Effizienz↑/Ertrag↑)
Überfahrten	-	↓	↓	Geringere Kraftstoff CO <sub>2</sub> -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 (N<sub>2</sub>O) 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 N<sub>2</sub>O aus definiertem N Input + andere Quellen

$N_2O_{Ci}$  = Menge N<sub>2</sub>O ungedüngte Kontrolle (=andere Quellen)

$N_i$  = Menge N Input (Dünger)

# Ganzjährige Messung der N<sub>2</sub>O Emissionen zur Bestimmung von EF erforderlich (Shang et al. 2020)



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Environmental Pollution

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/envpol](http://www.elsevier.com/locate/envpol)



Measurement of N<sub>2</sub>O emissions over the whole year is necessary for estimating reliable emission factors<sup>☆</sup>



Ziyin Shang<sup>a,\*</sup>, Mohamed Abdalla<sup>a</sup>, Matthias Kuhnert<sup>a</sup>, Fabrizio Albanito<sup>a</sup>, Feng Zhou<sup>b</sup>, Longlong Xia<sup>c</sup>, Pete Smith<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Biological and Environmental Sciences, University of Aberdeen, 23 St Machar Drive, Aberdeen, AB24 3UU, UK

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

<sup>c</sup> 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 N<sub>2</sub>O-Minderung durch Nitrifikationsinhibitoren

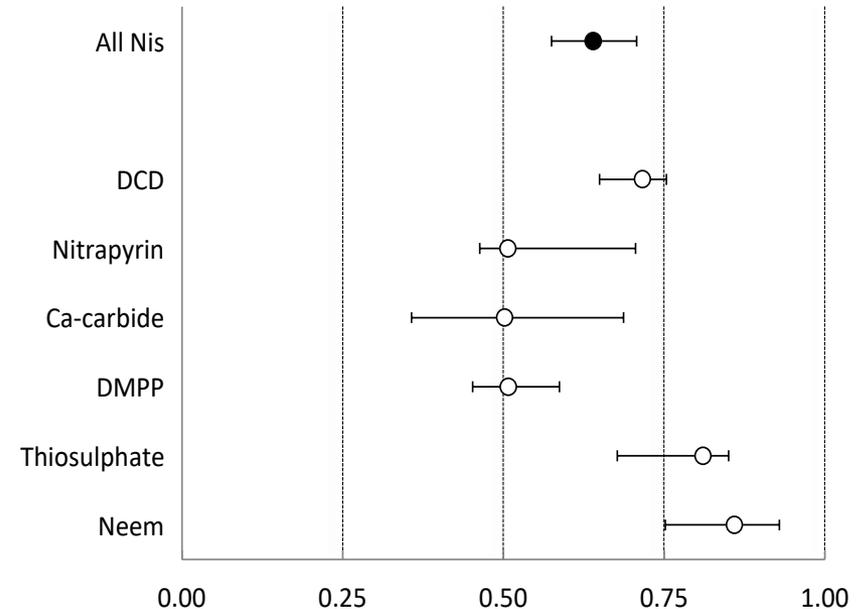
Akiyama et al. 2010:

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

→ Im Mittel über alle Wirkstoffe ~35% Reduktion der N<sub>2</sub>O Emissionen

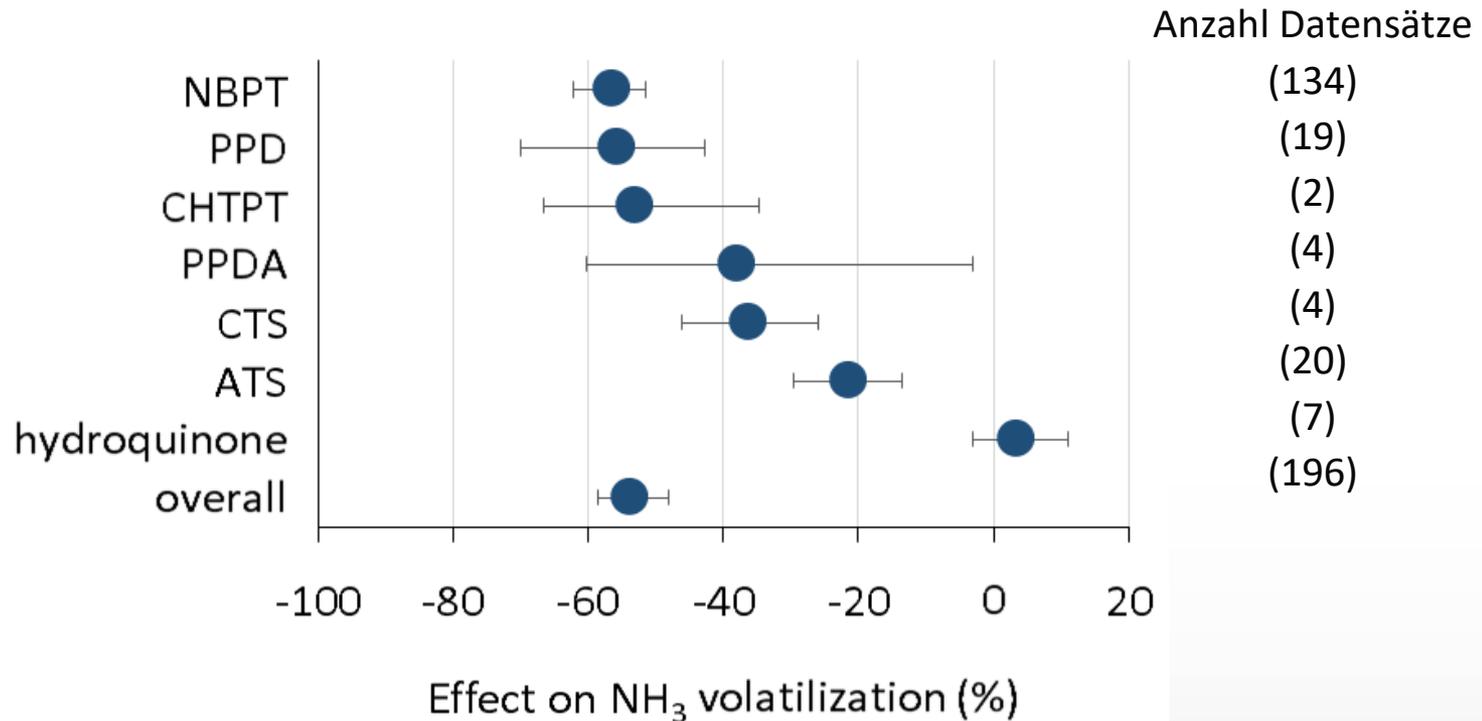
(Bestätigt von Ruser & Schulz (2015) mit etwas erweiterter Datengrundlage)

→ Kein signifikanter Effekt von UI auf N<sub>2</sub>O Emissionen



**N<sub>2</sub>O Emissionen von Düngern mit NI  
im Verhältnis zu unbehandelten Düngern**

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

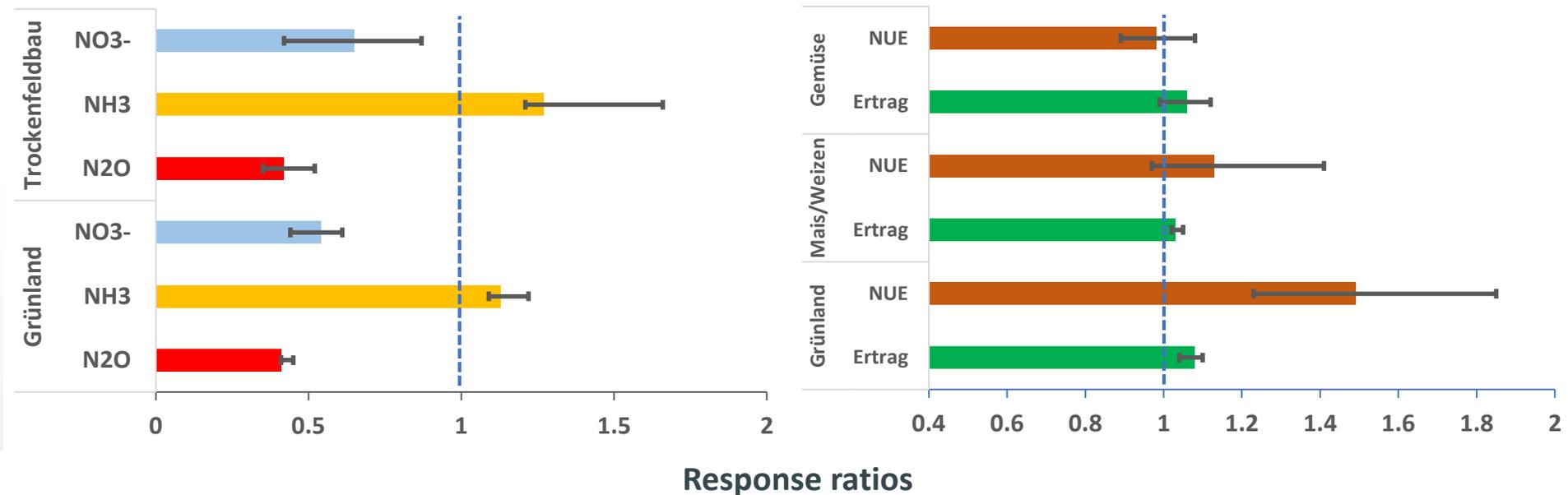


- Reduktion der NH<sub>3</sub> Emissionen mit dem gebräuchlichsten UI NBPT um ~60%
- Wirkstoffe NPPT und 2-NPT strukturanalog zu NBPT (nicht in Meta-Studien aufgeführt)

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

## Wirkung von NI auf N-Verluste und Ertrag

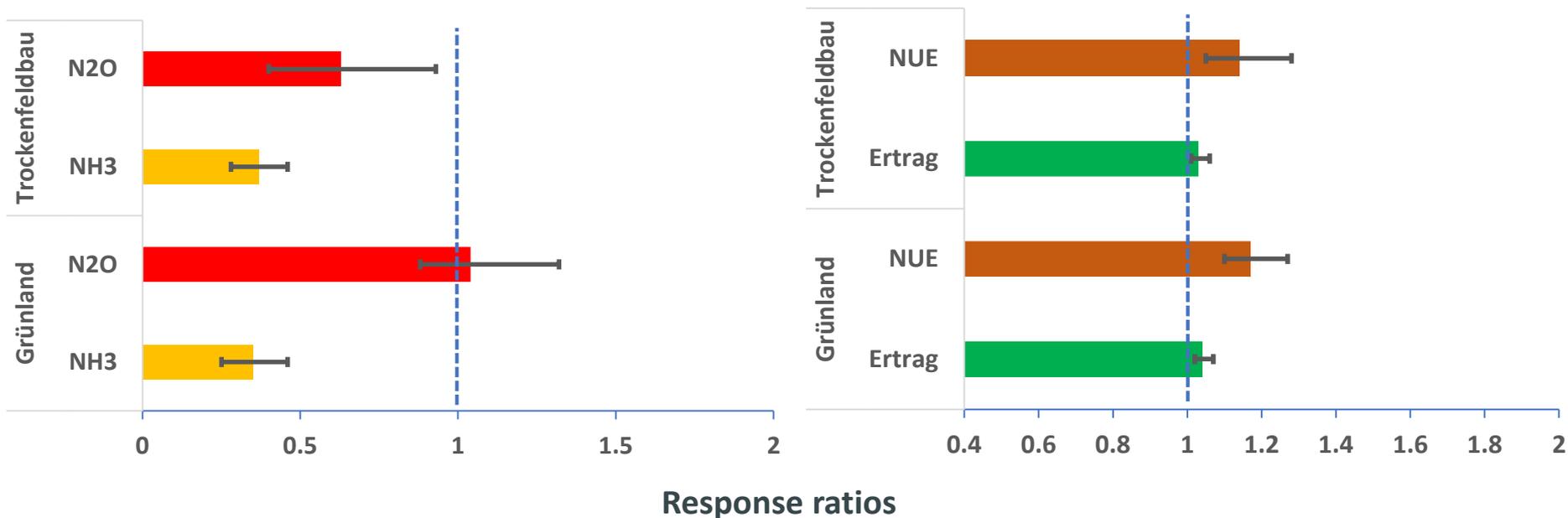
- Reduktionswirkung von NI auf  $N_2O$  Emissionen anderer Studien bestätigt
- NI erhöhen  $NH_3$ -Emissionen und verringern Nitratauswaschung signifikant
- Ertragseffekte und NUE in Getreide und Gemüse schwach/nicht signifikant.  
Mais/Weizen: Ertrag + ca. 3%, NUE + ca. 13%
- Jahresdurchschnittstemperaturen  $<10^\circ C$  NUE +30%, sonst 12%



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

## Wirkung von UI auf N-Verluste und Ertrag

- Reduktionswirkung von UI auf  $\text{NH}_3$  Emissionen der vorherigen Studien weitestgehend bestätigt,
- UI verringern signifikant  $\text{N}_2\text{O}$  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 N<sub>2</sub>O EF (Wu et al. 2021)

- Globale Metastudie zu Wirkung von NI in Kombination mit Harnstoff und Gülle auf NH<sub>3</sub> Emissionen, angerechnet auf den N<sub>2</sub>O EF
- Bei Berücksichtigung von NH<sub>3</sub> Emissionen als indirekte N<sub>2</sub>O-Emissionen sinkt die N<sub>2</sub>O-Minderungswirkung von NI von 48,0 % auf 39,7 % (\*EF = 1 %) bzw. 28,2 % (EF = 5 %).
- Unterschiede zwischen Wirkstoffen

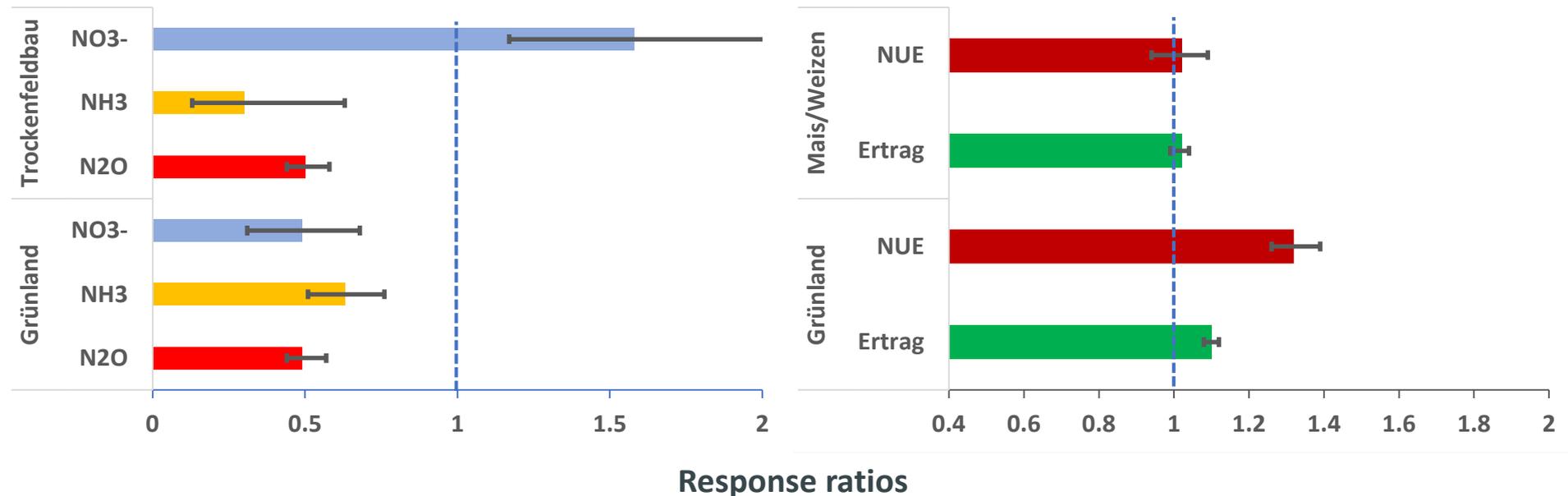
→ Doppeltinhibierung von Harnstoff erforderlich

\*EF → Anteil der Ammoniak-Emissionen der als N<sub>2</sub>O reemittiert wird (IPCC2006 1-5%)

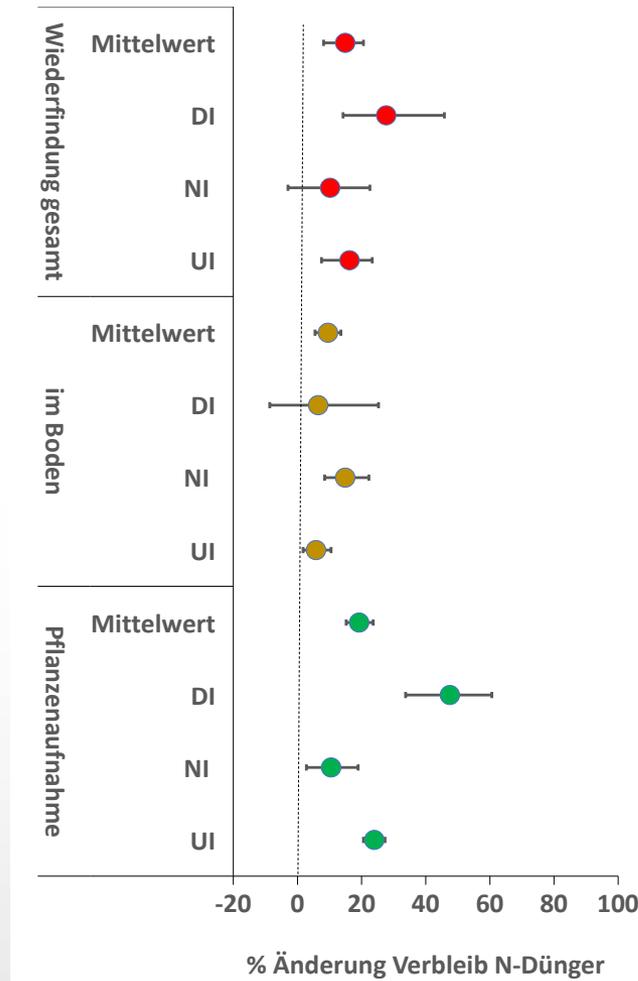
# Umfassende globale Meta-Studie (Li et al. 2018)

## Wirkung von DI auf N-Verluste und Ertrag

- DI reduzieren signifikant  $\text{NH}_3$  und  $\text{N}_2\text{O}$  Emissionen, gemischtes Ergebnis bzgl.  $\text{NO}_3^-$
- 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

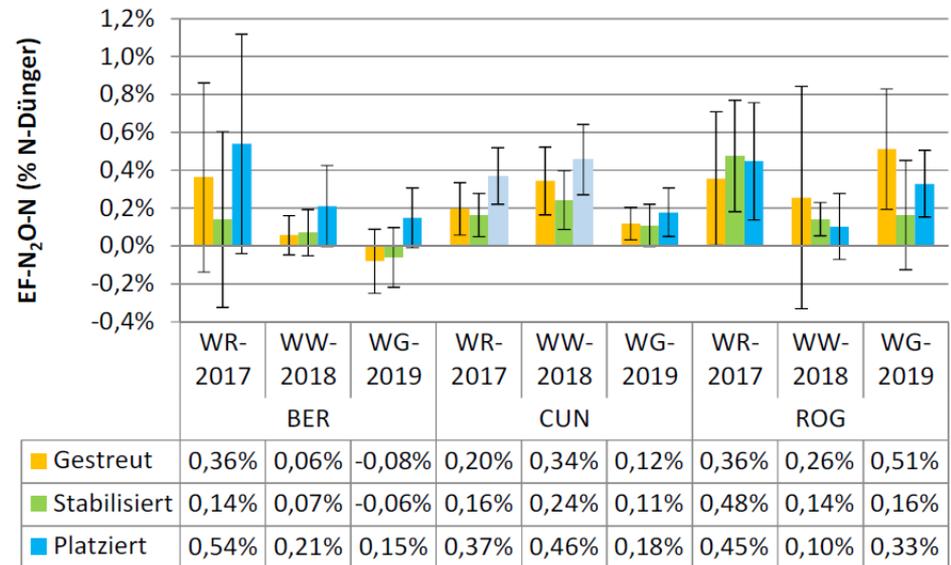
# Metastudie: Ertrags- und N-Nutzungseffizienzeffekte von NI in Deutschland (Hu et al. 2014)

- 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 N<sub>2</sub>O Emissionen, NH<sub>3</sub> 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 NH<sub>3</sub>-Emissionen (~70%)
- Keine Verringerung der berechneten Nitratauswaschung mit DI
- Nur in wenigen Versuchsjahren signifikante Reduktion der N<sub>2</sub>O 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 N<sub>2</sub>O Emissionen um ca. 35%
- Verringerte Nitrat Auswaschung in der Vegetationsperiode
- in Kombination mit Gülle und Harnstoff erhöhte NH<sub>3</sub>-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  $\text{NH}_3$  Emissionen um ca. 60%
- Erträge und N-Effizienzwirkung unter mitteleuropäischen Bedingungen (Getreide) wahrscheinlich signifikant erhöht (Unsicherheiten)
- Wirkung auf direkte  $\text{N}_2\text{O}$  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

