

Erhöhung von N-Entzug und Dünger-N-Ausnutzung bei Harnstoff-Düngung mit einem neuen Ureaseinhibitor

Increase of N Uptake and Nitrogen Use Efficiency of Urea Fertiliser with a New Urease Inhibitor

Carola Schuster, H. Wozniak & H.-J. Niclas
SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH

Zusammenfassung

In den Jahren 2005 und 2006 wurde der neue Ureaseinhibitor P 101/04 (Phosphorsäureamid) in Kombination mit granuliertem Harnstoff in 25 Feldversuchen mit Wintergetreide geprüft. Die Wirkungen auf N-Entzug, Dünger-N-Effizienz, N-Verwertung, Rohproteingehalt und Ertrag wurden quantifiziert. Signifikante Steigerungen der N-Entzüge um 5,7–38,1 kg N ha⁻¹ und deutliche Verbesserungen der Dünger-N-Effizienz um 4–32% gegenüber Harnstoff ohne Inhibitor waren nachweisbar. Unabhängig von Düngerform und Ureaseinhibitor-Anwendung wurden 70–95% des aufgenommenen N im Korn akkumuliert. Der durch Ureaseinhibitor-Einsatz zusätzlich verfügbare N diente der Kornbildung und bewirkte in 19 von 25 Versuchen eine Erhöhung des Rohprotein-Gehaltes um 0,5–2,3%. Eine Zunahme des Kornertrages wurde nur in begrenztem Umfang (0,3–5,6 dt ha⁻¹) festgestellt. Insgesamt kennzeichnen die Ergebnisse die hohe Wirksamkeit des neuen Ureaseinhibitors bei geringen Aufwandmengen (0,05–0,10% N-bezogen bzw. 0,023–0,046% Ware-bezogen) auf leichten, sandigen bis lehmigen Standorten. Dies ist ein indirekter Nachweis für verringerte Ammoniakemissionen. Somit wird durch Harnstoff-Düngung mit dem Ureaseinhibitor P 101/04 eine weitere Verbesserung der Umweltverträglichkeit vor allem auf sorptionschwachen Standorten mit geringer Pufferkapazität sowie bei länger anhaltender niederschlagsfreier Witterung mit erhöhten Temperaturen nach der Düngerapplikation ermöglicht.

Schlüsselworte: Harnstoff, Ureaseinhibitor, N-Entzug, Dünger-N-Effizienz

Summary

During 2005 and 2006 a total of 25 field trials with winter cereals were carried out to evaluate the performance of the new urease inhibitor P 101/04 (phosphoric acid amid) against both urea without inhibitor and calcium ammonium nitrate (CAN). Effects on nitrogen uptake, nitrogen recovery efficiency, nitrogen use efficiency, crude protein content, and yield were quantified. Significant increases of nitrogen uptake and nitrogen recovery efficiency as compared to the treatment of urea without inhibitor (5.7–38.1 kg N ha⁻¹ and 4–32%, respectively) were determined. 70–95% of the nitrogen taken up was accumulated in the grain, independent of fertiliser type and urease inhibitor use. Additionally recovered nitrogen was used for grain formation and resulted in improvement of crude protein

content by 0.5–2.3% in 19 of the 25 trials. Observed increases of grain yield were relatively small (0.03–0.56 t ha⁻¹). Overall, the results indicate the efficacy of the new urease inhibitor P 101/04 at low concentrations (0.05–0.10% N based, 0.023–0.046% product based) on light sandy to loamy soils. This is an indirect indication of reduced ammonia emissions. The results show the potential for reducing the environmental impact of urea fertilisers through application in conjunction with urease inhibitors. Combined treatments of urea fertiliser and urease inhibitor proved effective in promoting crop growth, especially at locations with low buffer capacity and/or with long periods of low rainfall and increased air temperatures after fertilisation.

Key words: urea, urease inhibitor, N uptake, nitrogen use efficiency

Einleitung

Innerhalb der letzten 50 Jahre hat die global zunehmende N-Düngung entscheidend zur Erhöhung der Lebensmittelproduktion beigetragen (DOBERMANN 2005). Aber lediglich rund 50% des anthropogenen N-Inputs in Agroökosysteme werden im Mittel durch Nutzpflanzen tatsächlich aufgenommen (CASSMAN et al. 2002, GALLOWAY et al. 2003, DOBERMANN 2005). Daraus resultiert ein zunehmender Eintrag von Stickstoff in terrestrische und aquatische Ökosysteme, der negative Effekte wie Nitratbelastung, Eutrophierung, Versauerung, klimarelevante N-Emissionen oder Verlust von Biodiversität verursacht (BEEVER et al. 2007). Dem muss durch eine Erhöhung der N-Effizienz entgegen gewirkt werden. Zu den unterschiedlichen Möglichkeiten der Verbesserung der Dünger-N-Effizienz (LADHA et al. 2005) zählt unter anderem die Optimierung des Dünger-N-Managements, was standortspezifische Düngungsstrategien, effiziente N-Applikationsmethoden und den Einsatz von neuen, verbesserten N-Düngern, die unter anderem mit Inhibitoren ausgestattet sind, einschließt (DOBERMANN 2005).

Die weltweit vorherrschende mineralische N-Düngerform ist Harnstoff mit einem Anteil von rund 50% (WATSON 2005). Bedingt durch seinen hohen N-Gehalt, vergleichsweise geringe Kosten für Produktion, Transport, Lagerung und Ausbringung und einfache Handhabung (ohne Brand- und Explosionsgefahr), steigt der Marktanteil von Harnstoff nicht nur weltweit (KISS & SIMIHAIAN 2002, IFA), sondern auch in Europa und Deutschland kontinuierlich (TROTT et al. 2006). Neben den genannten Vorteilen beste-

hen für Harnstoff aber auch gewisse Anwendungsbeschränkungen, da bei Oberflächenapplikation auf sorptionsschwachen Böden, auf Böden mit pH-Werten > 7 , bei warmer Witterung und ausbleibendem Niederschlag Ammoniakverluste nach der Harnstoff-Hydrolyse die Effizienz der Düngung verringern (HARRISON & WEBB 2001, WATSON 2005).

Gewisse Möglichkeiten der Verlustminderung und damit der Effizienzverbesserung bieten slow release systeme (TRENKEL 1997), chemische Additive (HARRISON & WEBB 2001), Vergrößerung der Düngergranalien (WATSON 2005) oder Einarbeitung des Harnstoffs in den Boden (WATSON 2000, EURICH-MENDEN 2003). Die genannten Methoden sind aber meist entweder aufwendig und kostenintensiv, nicht immer durchführbar oder nur unzureichend wirksam. Ein erfolgversprechender Weg zur Verbesserung der Effizienz der Harnstoff-Düngung bei gleichzeitiger Minderung von Ammoniakemissionen ist die Nutzung von Ureaseinhibitoren (HARRISON & WEBB 2001, WATSON 2005). Diese hemmen gezielt und temporär das im Boden ubiquitär vorhandene Enzym Urease (TRENKEL 1997), welches die Hydrolyse von Harnstoff katalysiert (MOBLEY & HAUSINGER 1989). Damit wird weniger Harnstoff pro Zeiteinheit umgesetzt. Mit der Harnstoff-Hydrolyse verbundene Veränderungen des pH-Wertes können besser gepuffert werden und das Ammoniakverlustpotential sinkt. Einziger in verschiedenen Ländern lizenziertes bzw. in Handelsprodukten enthaltener Ureaseinhibitor ist N-(n-butyl)-thiophosphorsäuretriamid (NBTP, WATSON 2000, 2005). In Europa ist NBTP gegenwärtig nur in Irland im Rahmen der Düngemittelgesetzgebung zugelassen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Wirksamkeit eines neuen Ureaseinhibitors (Phosphorsäureamid) unter differenzierten Standort- und Anbaubedingungen sowie bei unterschiedlichen Aufwandmengen einzuschätzen und zu quantifizieren. Bewertungsparameter stellen dabei die N-Aufnahme der Pflanzen, die Dünger-N-Ausnutzung, die N-Verwertung, der Rohproteingehalt sowie der Kornertrag dar.

Material und Methoden

Ein neu entwickelter Ureaseinhibitor P 101/04 aus der Gruppe der substituierten Phosphorsäureamide wurde in Kombination mit Harnstoff in 13 N-Düngungsversuchen im Jahr 2005 sowie in 12 Versuchen im Jahr 2006 an 6 bzw. 7 Standorten in den Kulturen Winterweizen, Winter-

gerste und Triticale geprüft. Alle agronomischen Maßnahmen wurden optimal entsprechend den jeweiligen Standortbedingungen gestaltet.

Standort- und Versuchsbedingungen

Die Versuchsstandorte Thyrow, Güterfelde, Sehlis, und Trossin sind charakterisiert durch leichte schluffige bis lehmige Sandböden, sehr geringe Kationenaustauschkapazität von 1,1–4,8 cmol kg^{-1} Boden und sehr niedrige Austauschacidität von 0,1–1,2 cmol kg^{-1} Boden (Tab. 1). Die Standorte Rosenow, Cunnersdorf und Dedelow besitzen stark sandige bis sandige Lehmböden bzw. einen schluffigen Sandboden, geringe bis mittlere Kationenaustauschkapazität vom 7,3, 8,0 bzw. 10,0 cmol kg^{-1} Boden und sehr niedrige Austauschacidität von 0,1–0,8 cmol kg^{-1} Boden. An den Standorten mit verbessertem Ammoniakabsorptionsvermögen (höhere Kationenaustauschkapazität) ist eine erhöhte Ureaseaktivität gegeben und vice versa. Bedingt durch die Bodeneigenschaften ist insgesamt von einer geringen Pufferkapazität auszugehen. Diese Annahme wird unterstützt durch Ergebnisse aus Laboruntersuchungen, bei denen nach Harnstoffapplikation in allen Böden der pH-Wert um 1,5–2,6 Einheiten auf 8,0–8,5 anstieg (Tab. 1).

Beide Versuchsjahre waren bis März durch eine winterliche Witterung gekennzeichnet. Hinzu kam im Jahr 2006 Staunässe durch Niederschläge auf bis in den Untergrund gefrorenen Boden. Erste Defizite in der Wasserversorgung der Pflanzen setzten in beiden Jahren ab April ein. Im Jahr 2005 ermöglichten dann Niederschläge im Mai und Juli bei meist durchschnittlichen Temperaturen ein weitgehend normales Wachstum und durchschnittliche bis leicht überdurchschnittliche Erträge. Ausbleibende Niederschläge ab Ende Mai 2006 sowie überdurchschnittliche Temperaturen ab Juni führten, begünstigt durch ein nicht sehr stark ausgebildetes Wurzelsystem der Pflanzen, zu einer beschleunigten Abreife und tendenziell unterdurchschnittlichen Erträgen.

N-Düngung

Die Höhe der Stickstoffdüngung wurde an den Pflanzenbedarf abhängig vom jeweiligen Ertragspotential der Standorte angepasst (Tab. 2). Neben Harnstoff-Düngung mit Ureaseinhibitor P 101/04 wurden die N-Düngung mit Harnstoff ohne Inhibitor bzw. Kalkammonsalpeter (KAS) zum Vergleich in die Versuche einbezogen. Unabhängig

Tab. 1: Charakteristik der Versuchsböden
Characteristics of soils

Standort	Bodenart	pH	pH nach HS-Applikation ¹⁾	KAK ²⁾ cmol kg^{-1}	Austauschacidität cmol kg^{-1}	C _{org} %	Ureaseaktivität ³⁾ $\mu\text{g NH}_4\text{-N g}^{-1}\text{Boden h}^{-1}$
Cunnersdorf	SL	6,3	8,4	8,0	0,8	1,10	21,0
Rosenow	SL	7,3	8,4	7,3	0,4	0,71	17,6
Dedelow	uS	6,4	8,0	9,9	n.b.	0,69	10,7
Sehlis	IS	5,3	8,3	4,8	1,2	1,20	14,7
Trossin	IS	6,4	8,4	3,7	0,1	1,04	16,1
Güterfelde	IS	6,0	8,4	2,3	0,2	0,78	8,0
Thyrow	uS	5,9	8,1	1,1	0,1	0,55	9,5

¹⁾ pH nach Harnstoff-Applikation, Labortest; *pH after urea application, laboratory test*

²⁾ Kationenaustauschkapazität; *cation exchange capacity (CEC)*

³⁾ Kandler & Gerber 1988

n.b.: nicht bestimmt; *not determined*

Tab. 2: Applizierte Stickstoff-Mengen (kg N ha⁻¹)
Amount of applied nitrogen (kg N ha⁻¹)

	2005			2006		
	Winterweizen	Wintergerste	Triticale	Winterweizen	Wintergerste	Triticale
	N-Düngung in kg N ha ⁻¹					
Cunnersdorf	170	150	150	170	150	150
Sehlis	170	150	-	170	-	150
Rosenow	-	150	150	-	-	-
Trossin	-	150	150	-	150	150
Güterfelde	-	120	120	-	120	120
Thyrow	-	120	120	150	-	-
Dedelow	-	-	-	170	150	-

vom eingesetzten N-Dünger erfolgte die N-Applikation in zwei Gaben im Mengenverhältnis 50:50 zu Vegetationsbeginn und innerhalb der Schossphase (EC 32-39). Die N-Dünger wurden stets zu Terminen ausgebracht, an denen die Niederschlagswahrscheinlichkeit in den folgenden 5 Tagen gering war. Meist wurden Ammoniakemissionen durch Wind begünstigt.

Ureaseinhibitor P 101/04

In den beiden Versuchsjahren wurde der Ureaseinhibitor P 101/04 jeweils in drei unterschiedlichen Wirkstoffkonzentrationen in einer Spanne von 0,03 bis 0,15%, bezogen auf die jeweils applizierte Dünger-N-Menge (N-bezogen), eingesetzt (Tab. 3). Die Differenzierung der Konzentration, auch zwischen den beiden Versuchsjahren, sollte zur möglichst genauen Quantifizierung der optimalen Ureaseinhibitorkonzentration in Verbindung mit Harnstoff beitragen.

Versuchsanlage

Die Versuche wurden an allen Standorten und in allen Kulturen einheitlich als einfaktorielles lateinisches Rechteck mit vier Wiederholungen angelegt. Weitere in den Versuchen geprüfte Inhibitoren finden in der vorliegenden Auswertung keine Berücksichtigung. Die Größe der Ernteparzellen variierte in Abhängigkeit der jeweils genutzten Versuchstechnik zwischen 9,0 und 13,5 m².

Tab. 3: Eingesetzte Konzentration des Ureaseinhibitors P 101/04
Concentration of urea inhibitor P 101/04 used in trials

	N-bezogen ¹⁾ %	Ware-bezogen ²⁾ %	applizierte Ureaseinhibitor-Menge g ha ⁻¹ bei 170 kg Dünger N ha ⁻¹
2005	0,03	0,014	51
	0,06	0,028	102
	0,12	0,055	204
2006	0,05	0,023	85
	0,10	0,046	170
	0,15	0,069	255

¹⁾ bezogen auf Dünger-N-Menge = Carbamid-N-Menge; based on amount of fertiliser N = carbamid N amount

²⁾ bezogen auf Düngermenge (w/w); based on amount of fertiliser (w/w)

Ermittelte und berechnete Parameter

Zum Zeitpunkt der Ernte wurden der Korn- und Stroh-ertrag sowie die N-Gehalte bestimmt. Basierend auf diesen Daten wurde der N-Entzug der Pflanzen mit Korn und Stroh errechnet. Zur Bewertung der Dünger-N-Ausnutzung wurde die scheinbare Dünger-N-Effizienz (apparent nitrogen recovery efficiency; SIELING & HANUS 1997, DOBERMANN 2005, RATHKE et al. 2006) sowie die N-Verwertungs-Effizienz (EHMELE 1994) kalkuliert:

$$\text{scheinbare Dünger-N-Effizienz} = \frac{\text{N-Entzug}_{\text{gedüngt}} - \text{N-Entzug}_{\text{ungedüngt}}}{\text{Dünger-N-Menge}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\text{N-Verwertungs-Effizienz} = \frac{\text{N-Entzug}_{\text{Korn}}}{\text{N-Entzug}_{\text{gesamt}}} \cdot 100 \quad (2)$$

Statistische Auswertung

Die Ergebnisse für Kornertrag und N-Entzug wurden varianzanalytisch mit der Prozedur PROC MIXED des Statistikprogramms SAS (SAS Institute Inc. Cary, NC, USA) jeweils als Versuchsserie je Getreideart und Jahr verrechnet. Dabei wurden die Orte als fix betrachtet. Versuche mit deutlich abweichender Restvarianz bzw. Prüfmerkmalswerten wurden separat als Einzelversuch verrechnet (THYROW 2005 Triticale, THYROW 2006 Winterweizen, SEHLIS 2006 Triticale). Da jeweils nur die Unterschiede in den Varianten mit Ureaseinhibitor gegenüber Harnstoff ohne Ureaseinhibitor bzw. KAS von Interesse waren, erfolgte ein paarweiser Mittelwertvergleich auf Basis des t-Tests mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$. Rohproteingehalt, scheinbare Dünger-N-Effizienz und N-Verwertungs-Effizienz sind berechnete, prozentuale Parameter, deren Werte 100 nicht übersteigen und so keiner zufälligen Normalverteilung folgen. Deshalb wurde auf eine varianzanalytische Verrechnung verzichtet. Da die scheinbare Dünger-N-Effizienz aus den jeweiligen Werten für den N-Entzug berechnet wurde, ergeben sich analoge Differenzierungen zwischen den Versuchsvarianten.

Ergebnisse

N-Entzug der Pflanzen

In 15 von insgesamt 25 Versuchen war der N-Entzug bei Düngung mit KAS signifikant und in 4 Versuchen tendenziell größer als bei Harnstoff-Düngung ohne Ureaseinhibitor (Tab. 4). Dies lässt auf eine verminderte N-Verfügbar-

Tab. 4: Mittlere N-Entzüge (kg N ha⁻¹) verschiedener Getreidearten (Korn + Stroh) bei Harnstoffdüngung ohne und mit Ureaseinhibitor bei unterschiedlichen Standortbedingungen, Mittelwertvergleich gegenüber Harnstoff ohne Ureaseinhibitor
Mean nitrogen uptake (kg N ha⁻¹) by urea fertilised cereal crops in the presence or absence of urea inhibitor under various site conditions, comparison of means against means of urea treatment without urease inhibitor

Kultur Standorte	KAS		Harnstoff		
		ohne Ureaseinhibitor	mit Ureaseinhibitor P 101/04 Konzentration % N-bezogen ¹⁾		
2005					
			0,03	0,06	0,12
Winterweizen					
Cunnersdorf	190,9*	202,1	211,6*	210,6*	235,4*
Sehlis	188,1	196,0	193,4	195,8	201,3
Wintergerste					
Cunnersdorf	209,0	204,3	210,0 *	218,8 *	213,6*
Sehlis	195,5*	183,5	200,4*	196,2*	190,8
Trossin	168,2	173,7	176,5	174,8	171,7
Güterfelde	202,1*	176,1	188,3*	197,4*	214,2*
Rosenow	181,8*	153,2	170,2*	172,5*	180,1*
Thyrow	108,4*	96,8	108,4*	106,5*	108,4*
Triticale					
Cunnersdorf	186,4*	175,7	177,9	188,1*	192,1*
Trossin	142,1	141,2	146,3	147,9	148,0
Güterfelde	172,5*	156,4	172,1*	173,6*	172,8*
Rosenow	192,4*	175,0	179,9	177,2	187,7*
Thyrow	112,2	110,0	115,6	120,9*	115,1
2006					
			0,05	0,10	0,15
Winterweizen					
Cunnersdorf	193,5*	170,9	185,1*	185,0*	181,5*
Sehlis	199,5*	186,8	182,9	197,7*	192,8
Thyrow	85,8	89,3	89,1	95,0	90,2
Dedelow	189,7	189,4	197,6	197,8	198,6*
Wintergerste					
Cunnersdorf	163,1	157,2	163,7	165,9*	169,2*
Trossin	186,6*	150,6	171,2*	175,6*	169,2*
Dedelow	219,8*	207,2	218,3*	215,7*	213,8
Güterfelde	113,9*	97,9	104,8*	111,5*	109,8*
Triticale					
Cunnersdorf	188,4*	178,1	194,1*	185,8*	185,0
Sehlis	168,3	164,4	170,6*	165,1	165,1
Trossin	156,9*	138,7	149,0*	150,5*	148,2*
Güterfelde	89,0*	79,1	94,3*	83,5	89,1*

¹⁾ Ureaseinhibitorkonzentration bezogen auf Dünger-N-Menge; *concentration of urease inhibitor based on amount of fertilizer N*

* signifikanter Unterschied gegenüber Harnstoff ohne Ureaseinhibitor, $p < 0,05$; *significant difference compared to urea without urease inhibitor, $p < 0.05$*

keit bei Harnstoff-Düngung ohne Inhibitor bedingt durch Ammoniakemissionen schließen.

Eine statistisch gesicherte Erhöhung der N-Aufnahme der Pflanzen durch den Einsatz von Harnstoff-Dünger mit Ureaseinhibitor P 101/04 gegenüber Harnstoff ohne P 101/04 wurde 2005 in 10 von 13 und 2006 in 11 von 12

Feldversuchen erreicht (Tab. 4). Die signifikanten Zunahmen der N-Akkumulation variierten 2005 und 2006 bei Winterweizen von 8,5–33,3 bzw. von 6,0–14,3 kg N ha⁻¹, bei Wintergerste von 5,7–38,1 bzw. von 6,9–12,5 kg N ha⁻¹ sowie bei Triticale von 10,9–17,2 bzw. von 6,2–16,0 kg N ha⁻¹. Unter Einbeziehung aller Versuche und Wirkstoff-

konzentrationen von P 101/04 wurde der N-Entzug 2005 und 2006 im Mittel um 11,0 bzw. 9,3 kg N ha⁻¹ gesteigert. Die stärkere Ureaseinhibitorwirkung im Jahr 2005 ist vor allem auf die meist günstigeren Witterungsbedingungen für N-Aufnahme, Wachstum, Entwicklung und Ertragsbildung der Getreide zurückzuführen. Wahrscheinlich haben sich jedoch auch während der Vegetationszeit 2005 am Standort Trossin geringere Niederschläge (68%) und erhöhte Temperaturen (105%) im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt stärker auf Wachstum und N-Entzug ausgewirkt als die optimale N-Versorgung. Doch auch in den Versuchen ohne signifikante Verbesserungen des N-Entzuges, 2005 bei Wintergerste sowie Triticale in Trossin und bei Winterweizen am Standort Sehlis und 2006 bei Winterweizen in Thyrow, wurden tendenzielle Verbesserungen der N-Aufnahme um 0,9–6,8 kg N ha⁻¹ erfasst (Tab. 4).

Durch die Kombination der Harnstoff-Düngung mit dem Ureaseinhibitor P 101/04 wurden meist N-Entzüge erreicht, die denen bei KAS-Düngung entsprachen. In insgesamt 7 Versuchen wurden in verschiedenen Kombinationen von Harnstoff mit Ureaseinhibitor sogar signifikant

um 8,7–44,5 kg N ha⁻¹ verbesserte N-Aufnahmen gegenüber KAS erzielt (Tab. 5). Allerdings wurden in 7 weiteren Versuchen auch einzelne Varianten mit P 101/04 ermittelt, in welchen die N-Entzüge 7,9–17,4 kg N ha⁻¹ unter denen der KAS-Variante lagen.

Im Jahr 2005 war eine deutlichere und stabilere Wirkung von P 101/04 bei den Konzentrationen 0,06 und 0,12%, verglichen mit 0,03% (N-bezogen), gegeben (Tab. 4). Signifikante Zunahmen des N-Entzuges durch P 101/04 wurden 2006 vor allem bei der Wirkstoffkonzentration 0,1% (N-bezogen) realisiert. Die Erhöhung des Wirkstoffeinsatzes auf 0,15% erbrachte keine zusätzlichen Vorteile hinsichtlich Wirkungssicherheit oder -höhe gegenüber 0,05 bzw. 0,10%. Auch aus dem Vergleich von Harnstoff-Düngung mit Ureaseinhibitor zu KAS-Düngung (Tab. 5) ist ableitbar, dass begrenzte Wirkungen vor allem bei den sehr niedrigen Wirkstoffkonzentrationen 0,03 und 0,05% zu erwarten sind. Basierend auf diesen Ergebnissen wird von einer Optimalkonzentration des Ureaseinhibitors P 101/04 in Verbindung mit Harnstoff im Bereich 0,05–0,10% (N-bezogen) ausgegangen.

Tab. 5: Mittlere N-Entzüge (kg N ha⁻¹) verschiedener Getreidearten (Korn+Stroh) bei Harnstoffdüngung mit Ureaseinhibitor unter unterschiedlichen Standortbedingungen, Mittelwertvergleich KAS zu Varianten Harnstoff mit Ureaseinhibitor
Mean nitrogen uptake (kg N ha⁻¹) by urea fertilised cereal crops in the presence of urease inhibitor under various site conditions, comparison of means from CAN treatment with means from urea with urease inhibitor treatments

Kultur Standorte	KAS	Harnstoff mit Ureaseinhibitor P 101/04 Konzentration % N-bezogen ¹⁾		
		2005		
		0,03	0,06	0,12
Winterweizen				
Cunnersdorf	190,9	211,6*	210,6*	235,4*
Sehlis	188,1	193,4	195,8	201,3*
Wintergerste				
Cunnersdorf	209,0	210,0	218,8*	213,6
Güterfelde	202,1	188,3	197,4	214,2*
Rosenow	181,8	170,2*	172,5*	180,1
Triticale				
Rosenow	192,4	179,9*	177,2*	187,7
Thyrow	112,2	115,6	120,9*	115,1
		2006		
		0,05	0,10	0,15
Winterweizen				
Cunnersdorf	193,5	185,1	185,0	181,5*
Sehlis	199,5	182,9*	197,7	192,8
Dedelow	189,7	197,6	197,8*	198,6*
Thyrow	85,8	89,1	95,0*	90,2
Wintergerste				
Trossin	186,6	171,2*	175,6*	169,2*
Güterfelde	113,9	104,8*	111,5	109,8
Triticale				
Trossin	156,9	149,0*	150,5	148,2*

¹⁾ Ureaseinhibitorkonzentration bezogen auf Dünger-N-Menge; concentration of urease inhibitor based on amount of fertilizer N

* signifikanter Unterschied gegenüber KAS, p < 0,05; significant difference compared to CAN, p < 0.05

Scheinbare Dünger-N-Effizienz

Bei N-Düngung mit KAS wurden 2005 und 2006 scheinbare Dünger-N-Effizienzen von 50–76% bzw. 38–84% erreicht (Tab. 6). Die entsprechenden Werte bei Harnstoff-

Düngung ohne Inhibitor variierten im Bereich 38–73% bzw. 30–64%. Somit wurde der Harnstoff-N besonders 2006 in scheinbar etwas geringerem Maß durch die Pflanzen genutzt als KAS-N. Deutlich war dies vor allem bei Harnstoff-Applikation ohne Inhibitor an den Standorten

Tab. 6: Mittlere scheinbare Dünger-N-Effizienz (%) bei Harnstoffdüngung ohne und mit Ureaseinhibitor unter unterschiedlichen Standortbedingungen, Mittelwertvergleich gegenüber Harnstoff ohne Ureaseinhibitor (*) und KAS (+)

Mean apparent crop N recovery efficiency (%) of urea fertiliser without and with urea inhibitor under various site conditions, comparison of means against means of urea without urease inhibitor (*) or CAN (+)

Kultur Standorte	KAS	Harnstoff mit Ureaseinhibitor P 101/04 Konzentration % N-bezogen ¹⁾			
		ohne Ureaseinhibitor	0,03	0,06	0,12
2005					
Winterweizen					
Cunnersdorf	61*	68	75**	74**	91**
Sehlis	50	55	53	55	58*
Wintergerste					
Cunnersdorf	76	73	77*	83**	79*
Sehlis	61*	53	64*	61*	58
Trossin	61	64	66	65	63
Güterfelde	69*	47	57*	65*	79**
Rosenow	60*	41	52**	54**	59*
Thyrow	59*	48	58*	57*	58*
Triticale					
Cunnersdorf	68*	61	63	69*	72*
Trossin	52	51	55	56	56
Güterfelde	51*	38	51*	52*	52*
Rosenow	71*	60	63 ⁺	61 ⁺	68*
Thyrow	63	61	66	71**	66
2006					
Winterweizen					
Cunnersdorf	55*	42	50*	50*	48**
Sehlis	46*	38	36 ⁺	45*	42
Thyrow	45	48	48	53 ⁺	49
Dedelow	64	64	69	69 ⁺	69**
Wintergerste					
Cunnersdorf	69	56	60	62*	64*
Trossin	84*	60	74**	77**	72**
Dedelow	52*	44	51*	50*	48
Güterfelde	48*	35	41**	48*	45*
Triticale					
Cunnersdorf	47*	40	51*	45*	45*
Sehlis	55	53	57*	53	53
Trossin	57*	45	52**	53*	52**
Güterfelde	38*	30	42*	33	38*

¹⁾ Ureaseinhibitorkonzentration bezogen auf Dünger-N-Menge; concentration of urease inhibitor based on amount of fertiliser N

* signifikanter Unterschied im N-Entzug gegenüber Harnstoff ohne Ureaseinhibitor, $p < 0,05$; significant difference of nitrogen uptake compared to urea without urease inhibitor, $p < 0.05$

+ signifikanter Unterschied im N-Entzug gegenüber KAS, $p < 0,05$; significant difference compared to CAN, $p < 0.05$

Thyrow, Güterfelde und Trossin mit leichten Sandböden, wo eine verringerte Dünger-N-Effizienz ermittelt wurde. Die teilweise geringere Dünger-N-Ausnutzung an den Standorten Cunnersdorf und Rosenow wurde wahrscheinlich neben den genannten Witterungs- und Applikationsbedingungen besonders durch die erhöhte Ureaseaktivität der Böden begünstigt. Die Anwendung des Ureaseinhibitors P 101/04 bewirkte 2005 und 2006 eine wesentliche Steigerung der Effizienz der Harnstoff-Düngung auf 51–91% bzw. 38–77% (Tab. 6). Daraus resultierten eindeutige Verbesserungen der Dünger-N-Ausnutzung im Winterweizen um 7–23 bzw. 5–8%, in Wintergerste um 4–32 bzw. 6–17% und in Triticale um 8–14 bzw. 4–12%. In beiden Jahren wurden damit bei Harnstoff-Düngung mit P 101/04 N-Effizienzen erreicht, die denen von KAS entsprachen. Einzelne Erhöhungen oder Verminderungen der Dünger-N-Ausnutzung im Vergleich zu KAS ergaben sich in Varianten mit Harnstoff-Düngung und Ureaseinhibitor (Tab. 6) in Analogie zu den bereits bei den N-Entzügen beschriebenen Differenzierungen (Tab. 5).

N-Verwertungs-Effizienz

Nachdem nachgewiesen wurde, dass durch Harnstoff-Düngung mit Ureaseinhibitor N-Entzug und Dünger-N-Effizienz unter spezifischen Bedingungen erhöht werden, war die Verwertung des zusätzlich aufgenommenen N von Interesse (Tab. 7). Zunächst wird deutlich, dass mit 70–95% in der Regel der weitaus größte Teil des aufgenommenen Stickstoffs der Kornbildung diene. Differenzierungen sind dabei stärker zwischen den einzelnen Versuchen an unterschiedlichen Standorten sowie zwischen den Versuchsjahren, als in Abhängigkeit von den N-Düngungsvarianten ausgeprägt. Niedrige Werte der N-Verwertung (63–73%) wurden vor allem in den Versuchen ermittelt, in denen die Ertragsbildung durch Standort- und Witterungsbedingungen limitiert war (Thyrow, Güterfelde 2005 Wintergerste). Die Unterschiede in der N-Verwertung zwischen den Varianten Harnstoff-Düngung ohne und mit Ureaseinhibitor P 101/04 sowie KAS betragen in den einzelnen Versuchen lediglich 0–5%. Es zeigt sich, dass die N-Verwertung in den Getreidepflanzen unabhängig von N-Düngerform und Einsatz des Ureaseinhibitors stets dem gleichen Verteilungsmuster folgte. Somit kam der bei Harnstoff-Düngung mit Ureaseinhibitor zusätzlich verfügbare und aufgenommene Stickstoff (Tab. 4) fast ausschließlich der Kornausbildung zu Gute. Im Ergebnis wurden Erhöhungen des Rohprotein-Gehaltes im Korn 2005 um 0,5–2,2% in 9 von 13 Versuchen und 2006 um 0,5–2,3% in 10 von 12 Versuchen erfasst (Tab. 8). In den verbleibenden 4 bzw. 2 Versuchen betrug die Zunahme des Rohproteingehaltes maximal 0,4%.

Kornertrag

Lediglich in 3 von insgesamt 25 Versuchen wurde eine signifikante Ertragssteigerung durch die Anwendung von KAS im Vergleich zu Harnstoff ohne Ureaseinhibitor ermittelt (nicht dargestellt). Auch die Anwendung des Ureaseinhibitors P 101/04 bewirkte nur in 3 von 13 Versuchen 2005 sowie in 4 von 12 Versuchen 2006 statistisch gesicherte Ertragssteigerungen um 4,0–5,3 bzw. 3,1–5,6 dt ha⁻¹ gegenüber Harnstoff-Düngung ohne Inhibitor. In allen anderen Versuchen 2005 und 2006 ergaben sich in der Regel tendenzielle Ertragszunahmen von 0,3–5,3 bzw. 0,3–3,6 dt ha⁻¹. Insgesamt wurde in den vorliegenden Versuchen der Kornertrag nur in relativ geringem Maß durch Düngerform und Ureaseinhibitor-Anwendung beeinflusst.

Diskussion

Es ist bekannt, dass unter spezifischen Bedingungen in Verbindung mit Harnstoff-Düngung Ammoniakemissionen auftreten können, die zu einer Verringerung der Dünger-N-Ausnutzung und negativen Umwelteinflüssen wie Versauerung und Eutrophierung führen (BEEVER et al. 2007). Als eine wirksame Maßnahme zur Reduzierung von Ammoniakemissionen wird die Anwendung von Ureaseinhibitoren gesehen. Dem entsprechend wird eine Reihe von potentiellen Ureaseinhibitoren beschrieben (TRENKEL 1997, KISS & SIMIHAIAN 2002). Die meisten sind aber auf Grund von geringer Wirksamkeit (Hydroxamsäuren), unzureichenden physikalisch-chemischen Eigenschaften (Phenylphosphorsäurediamid) oder gesundheitsgefährdendem Potential (Hydrochinon) nicht für eine Anwendung in der landwirtschaftlichen Praxis geeignet. Lediglich der Ureaseinhibitor N-(n-butyl)-thiophosphorsäuretriamid (NBTPT) ist gegenwärtig in Form unterschiedlicher Handelsprodukte (u.a. AGROTAIN, UFLEX, UMAXX, SuperN, SuperU) in einigen Ländern, insbesondere in den USA, von kommerzieller und praktischer Bedeutung (WATSON 2000, 2005). Ziel der vorliegenden Untersuchungen war, den neu entwickelten Ureaseinhibitor P 101/04 (Phosphorsäureamid) hinsichtlich Wirksamkeit und optimaler Aufwandmenge in der landwirtschaftlichen Praxis zu prüfen.

Die mit dem Ureaseinhibitor P 101/04 erzielten Ergebnisse entsprechen weitgehend den Resultaten vergleichbarer Versuche mit NBTPT, wo nach die Anwendung des Ureaseinhibitors unter spezifischen Bedingungen zu einer signifikanten Verbesserung der N-Effizienz der Harnstoff-Düngung führt. Im Besonderen kommt es zu einer statistisch gesicherten Erhöhung der N-Aufnahme und resultierend daraus zur Steigerung der Dünger-N-Ausnutzung (HARRISON & WEBB 2001, WATSON 2005, 2000). Auch in den vorliegenden Versuchen wurde bei Anwendung des Ureaseinhibitors P 101/04 in der Regel eine scheinbare Dünger-N-Effizienz von 51–91% (= 0,5–0,9 kg N-Aufnahme pro kg Dünger-N) erreicht, wie sie von DOBERMANN (2005) für günstige Anbausysteme definiert wird. Werte um 35–45% waren vor allem auf den leichten Standorten durch Trockenheit im Jahr 2006 bedingt. Die Dünger-N-Ausnutzung wurde mit P 101/04 (0,03–0,15% N-bezogen) um 4–32% gegenüber Harnstoff-Düngung ohne Inhibitor erhöht. Diese Spanne schließt den Wert von 20% ein, der von WATSON (2000, 2005) für die Verbesserung der N-Wiederfindungsrate bei Harnstoff-Düngung mit NBTPT (0,5% w/w = 1,07% N-bezogen) angegeben wird. Die größten Vorteilswirkungen eines Ureaseinhibitors werden bei hohem Ertragspotential der Pflanzen, geringem pflanzenverfügbarem Boden-N sowie unter Boden- und Umweltbedingungen, die hohe Ammoniakemissionen begünstigen, erreicht (WATSON 2000). Diese Bedingungen waren in den vorliegenden Versuchen, bedingt durch teilweise aufgetretenen Trockenstress, nicht vollständig gegeben.

Es ist davon auszugehen, dass die Verbesserung der Dünger-N-Ausnutzung vor allem auf der signifikanten Reduzierung von Ammoniakemissionen beruht. Dies wurde durch direkte Messungen der Ammoniakfreisetzung in Feldversuchen nachgewiesen. Dabei variieren sowohl die Ammoniakemissionen mit rund 1–30% des Dünger-N als auch die Minderungsraten mit etwa 20–70% sowohl innerhalb als auch zwischen verschiedenen Versuchen recht stark (HARRISON & WEBB 2001, EURICH-MENDEN et al. 2003, WEBER et al. 2004, SCHRAML et al. 2005, WATSON 2005). Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ammoniakfreisetzung nach Harnstoff-Düngung unter anderem direkt durch die Witterung während der Messperioden beeinflusst wird (WEBER et al. 2004, WATSON 2005). Hohe Temperaturen

Tab. 7: Mittlere N-Verwertungs-Effizienz (%) bei Harnstoffdüngung ohne und mit Ureaseinhibitor unter unterschiedlichen Standortbedingungen

Mean N use efficiency (%) of urea fertiliser without and with urea inhibitor under various site conditions

Kultur Standorte	KAS	Harnstoff mit Ureaseinhibitor P 101/04 Konzentration % N-bezogen ¹⁾			
		ohne Ureaseinhibitor	0,03	0,06	0,12
2005					
Winterweizen					
Cunnersdorf	92	90	91	92	92
Sehlis	87	89	87	89	87
Wintergerste					
Cunnersdorf	89	90	87	88	89
Sehlis	90	90	90	90	91
Trossin	86	87	86	86	86
Güterfelde	70	76	74	74	67
Rosenow	84	87	88	86	86
Thyrow	78	78	74	78	77
Triticale					
Cunnersdorf	89	89	89	91	89
Trossin	87	88	87	87	85
Güterfelde	84	84	87	85	84
Rosenow	89	90	90	90	88
Thyrow	76	80	79	78	79
2006					
Winterweizen					
Cunnersdorf	86	88	86	86	89
Sehlis	90	91	90	90	90
Thyrow	64	64	73	63	72
Dedelow	89	90	89	90	89
Wintergerste					
Cunnersdorf	89	86	86	89	88
Trossin	81	80	81	80	85
Dedelow	82	84	85	86	83
Güterfelde	94	94	95	94	93
Triticale					
Cunnersdorf	87	85	87	87	88
Sehlis	88	89	88	89	89
Trossin	78	83	81	81	82
Güterfelde	90	91	91	90	91

¹⁾ Ureaseinhibitorkonzentration bezogen auf Dünger-N-Menge; concentration of urease inhibitor based on amount of fertilizer N

führen zu hohen Ammoniakverlusten. Dieser Temperatureffekt wird durch Niederschlag in Abhängigkeit von Menge und Verteilung modifiziert (WEBER et al. 2004, WATSON 2005, SCHRAMML et al. 2005). Deutlich vermindert werden Ammoniakemissionen, wenn unmittelbar nach der Düngerapplikation Niederschläge auftreten.

Signifikante Ertragssteigerungen konnten in einigen Feldversuchen mit Ureaseinhibitoren (vornehmlich NBTPT) er-

mittelt werden. In anderen Versuchen war jedoch, wie in den vorliegenden Untersuchungen, eine Ertragsverbesserung nicht oder nur in geringem Maß vorhanden (KISS & SIMIHAIAN 2002, WATSON 2005). Dies ist zunächst damit zu erklären, dass neben der N-Ernährung auch Anbaumanagement und Klima einen sehr großen Einfluss auf die Ertragshöhe ausüben (CASSMAN et al. 2002). Ein positiver Ertragseffekt tritt nur ein, wenn Wachstumsbedingungen

Tab. 8: Rohprotein-Gehalt im Korn (% TS) verschiedener Getreidearten bei Harnstoffdüngung ohne und mit Ureaseinhibitor unter unterschiedlichen Standortbedingungen

Crude protein in the grain (% DM) of different cereals with urea fertilisation without and with urea inhibitor under various site conditions

	KAS	ohne Ureaseinhibitor	Harnstoff mit Ureaseinhibitor P 101/04 Konzentration % N-bezogen ¹⁾		
2005					
			0,03	0,06	0,12
Winterweizen					
Cunnersdorf	12,2	12,4	13,0	13,1	14,6
Sehlis	12,6	13,4	13,3	13,6	13,5
Wintergerste					
Cunnersdorf	11,4	11,1	11,2	11,9	11,5
Sehlis	12,5	11,9	12,5	12,6	12,7
Trossin	13,8	13,9	13,9	14,0	13,8
Güterfelde	12,0	11,5	11,6	12,2	12,1
Rosenow	12,8	11,4	12,5	12,3	12,7
Thyrow	11,9	11,3	12,7	12,6	12,2
Triticale					
Cunnersdorf	12,5	11,7	12,0	12,8	12,5
Trossin	13,8	13,9	13,9	14,0	13,8
Güterfelde	11,3	10,7	11,6	11,5	11,4
Rosenow	12,0	11,8	12,0	12,1	11,8
Thyrow	15,1	13,9	14,5	14,3	14,4
2006					
			0,05	0,10	0,15
Winterweizen					
Cunnersdorf	14,0	12,9	13,5	13,4	13,7
Sehlis	14,5	14,0	13,7	14,1	14,0
Thyrow	17,9	17,5	19,0	18,2	18,0
Dedelow	13,3	13,3	13,7	14,0	14,0
Wintergerste					
Cunnersdorf	11,8	11,2	11,7	11,8	11,9
Trossin	14,3	11,9	13,8	14,0	14,2
Dedelow	14,3	13,8	14,8	14,8	14,5
Güterfelde	12,9	12,2	12,4	12,9	13,0
Triticale					
Cunnersdorf	13,5	12,8	13,6	13,6	13,5
Sehlis	13,1	12,8	13,2	13,2	13,0
Trossin	13,3	12,4	12,9	13,1	13,1
Güterfelde	13,9	13,6	14,1	13,9	14,1

¹⁾ Ureaseinhibitorkonzentration bezogen auf Dünger-N-Menge; concentration of urease inhibitor based on amount of fertiliser N

gegeben sind, unter denen die Pflanzen den zusätzlich verfügbaren N für die Ertragsbildung verwerten können (NASTRI et al. 2000). Darüber hinaus wird vermutet, dass auch physiologische Prozesse durch den Ureaseinhibitor beeinflusst werden könnten (WATSON 2005). Dafür liegen in den dargestellten Versuchen aber keine Hinweise vor, da

die N-Verwertungs-Effizienz durch die Ureaseinhibitor-Anwendung nicht beeinflusst worden ist. Dies steht in Übereinstimmung mit Untersuchungsergebnissen von HERBST et al. (2006), wonach weder der Chlorophyll-Gehalt noch die N-Fractionen in der Pflanze durch einen Ureaseinhibitor verändert wurden. Allerdings wurden diese Untersuchun-

gen nur bis zum Beginn des Schossens (EC 30) durchgeführt.

Für den Ureaseinhibitor NBPT werden durch AGROTAIN International Aufwandmengen von 1,1–1,4 kg Aktivsubstanz pro Tonne Harnstoff empfohlen (WATSON 2005). Das entspricht bei einem N-Gehalt des Harnstoffs von 46% einer Konzentration von 0,24–0,30% Carbamid-N-bezogen. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse belegen eine hohe biologische Wirksamkeit des neuen Ureaseinhibitors P 101/04 bei noch geringerem Wirkstoffeinsatz von 0,05–0,10% Carbamid-N-bezogen. Bei einem N-Gehalt von 46% des Düngeharnstoffs liegt damit der Wirkstoffaufwand bei 0,023–0,046% Ware-bezogen.

Insgesamt zeigen die vorliegenden Versuchsergebnisse, dass bei Einsatz eines granulierten Harnstoff-Düngers, der den Ureaseinhibitor P 101/04 enthält, eine deutliche Verbesserung der Dünger-N-Ausnutzung ohne zusätzlichen zeitlichen oder technischen Aufwand für den Landwirt vor allem unter Bedingungen mit erhöhtem Verlustpotential erreicht werden kann.

Danksagung

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033 0201A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor. Wir danken allen an der Planung, Vorbereitung, Organisation, Durchführung und Auswertung der Versuche beteiligten Mitarbeitern der SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH. Besonderer Dank gilt Frau Dr. Kristina Warnstoff für die Unterstützung bei der biostatistischen Analyse der Ergebnisse.

Literatur

- BEEVER, D., F. BRENTROP, P. EVEILLARD, P. FIXEN, P. HEFFER, B. HERZ, R. LARSON & C. PALLIÈRE, 2007: Sustainable Management of the Nitrogen Cycle in Agriculture and Mitigation of Reactive Nitrogen Side Effects. International Fertilizer Industry Association, ISBN 2-9523139-1-1. http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/pdf/2007_ifa_reactive_nitrogen.pdf
- CASSMAN, K.G., A. DOBERMANN & D.T. WALTERS, 2002: Agroecosystems, nitrogen use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* **31** (2), 132-140.
- DOBERMANN, A., 2005: Nitrogen Use Efficiency – State of the Art. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers. http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/PDF/2005_ag_frankfurt_dobermann.pdf
- EHMELE, F.-P., 1994: Vergleich der Stickstoff-Nutzungseffizienz von Weizen und Roggen unter unterschiedlichen Standortbedingungen. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* **7**, 93-94.
- EURICH-MENDEN, B., V. BRÄUTIGAM, M. ANGER, W. BERG, J. CLEMENS, C. BERNS, H. DÖHLER, E. HARTUNG, H. SPIEKERS & H. VAN DEN WEGHE, 2003: Ammoniak-Emissionen in der Landwirtschaft mindern. *aid-Schriftenreihe* 1454/2003, ISBN 3-8308-0341-9.
- GALLOWAY, J.N., J.H. ABER, J.W. ERISMAN, S.P. SEITZINGER, R.W. HOWARTH, E.B. COWLING & B.J. COSBY, 2003: The Nitrogen Cascade. *BioScience* **53** (4), 341-356.
- HARRISON, R. & J. WEBB, 2001: A review of the effect of N fertilizer type on gaseous emissions. *Advances in Agronomy* **73**, 65-108.
- HERBST, F., W. GANS & W. MERBACH, 2006: Einfluss eines Urease-Inhibitors bei Harnstoff-Düngung auf den Stickstoff-Umsatz im Boden, die Ammoniak-Verflüchtigung und die Verwertung des Stickstoffs durch Hafer. *Pflanzenbauwiss.* **10** (1), 37-43.
- IFA: International Fertilizer Industry Association. http://www.fertilizer.org/ifa/statistics/pit_public/2005_urea_public.xls
- KANDELER, E. & H. GERBER, 1988: Short-term assay of soil urease activity using colorometric determination of ammonium. *Biol. Fert. Soils* **6**, 68-72.
- KISS, S. & M. SIMIHAIAN, 2002: Improving efficiency of urea fertilizers by inhibition of soil urease activity. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.
- LADHA, J.K., H. PATHAK, T. J. KRUPNIK, J. SIX & C. VAN KESSEL, 2005: Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Advances in Agronomy* **87**, 85-156.
- MOBLEY, H.L. & R.P. HAUSINGER, 1989: Microbial ureases: Significance, regulation and molecular characterization. *Microbiological Review* **53**, 85-108.
- NASTRI, A., G. TODERI, E. BERNATI & G. GOVI, 2000: Ammonia volatilization and yield response from urea applied wheat with urease (NBPT) and nitrification (DCD) inhibitors. *Agrochimica* **XLIV** (5-6), 231-239.
- RATHKE, G.-W., T. BEHRENS & W. DIEPENBROCK, 2006: Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **117**, 80-108.
- SCHRAML, M., A. WEBER, R. GUTSER & U. SCHMIDHALTER, 2005: Abatement of gaseous nitrogen losses from surface applied urea with a new urease inhibitor. In: C.J. Li et al. (Eds): *Plant Nutrition for Food Security, Human Health and Environment Protection*, 1012-1013. Tsinghua University Press, Beijing, China.
- SELING, K. & H. HANUS, 1997: N-Aufnahme und N-Verwertungseffizienz zweier Weizensorten bei variierter mineralischer N-Düngung. *Pflanzenbauwiss.* **1** (2), 57-62.
- TRENKEL, M.E., 1997: Improving fertilizer use efficiency, controlled-released and stabilized fertilizers in agriculture. International Fertilizer Industry Association, Paris.
- TROTT, H., H.-P. WODSAK, H.-J. WISSMANN & F. MESTER, 2006: *Industrieverband Agrar, Wichtige Zahlen, Düngemittel 2005–2006*. http://www.duengung.net/downloads/Wichtige_Zahlen_2005_2006.pdf
- WATSON, C.J., 2000: Urease activity and inhibition – Principles and practice. The International Fertiliser Society, Proceeding No. 454, ISBN 085310090X.
- WATSON, C., 2005: Urease inhibitors. IFA International Workshop on Enhanced – Efficiency Fertilizers. http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/PDF/2005_ag_frankfurt_watson.pdf
- WEBER, A., R. GUTSER & U. SCHMIDHALTER, 2004: Effect of new urease inhibitors on gaseous N emissions (NH₃, NO_x, N₂O) following surface application to arable soil. International Conf. Greenhouse gas emissions from agriculture – Mitigation options and strategies, February 10-12, 2004, Leipzig, Germany, 271-272.

Eingegangen am 20. März 2007;
angenommen am 08. Mai 2007

Anschrift des Verfassers: Dr. Carola Schuster, SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH, Landwirtschaftliche Anwendungsforschung Cunnersdorf, Am Wieseneck 7, 04451 Cunnersdorf, Carola.Schuster@skwp.de