Energieeinsatz und Energieeffizienz von Winterweizen bei unterschiedlicher mineralischer Stickstoffdüngung im Marchfeld

Energy input and energy efficiency of winter wheat with different mineral fertilizers in the Marchfeld plain

Gerhard Moitzi^{1*}, Heide Spiegel², Taru Sandén², Francesco Vuolo³, Laura Essl³,
Reinhard W. Neugschwandtner⁴, Helmut Wagentristl¹

¹ Universität für Bodenkultur Wien, Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf, Schloßhofer Straße 31, 2301 Groß-Enzersdorf, Österreich

² Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH, AGES, Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion, Abteilung Bodengesundheit und Pflanzenernährung, Spargelfeldstraße 191, 1220 Wien, Spargelfeldstraße 191, Österreich

³ Universität für Bodenkultur Wien, Department für Raum, Landschaft und Infrastruktur, Institut für Geomatik, Peter-Jordan Straße 82, 1190 Wien, Österreich

⁴ Universität für Bodenkultur Wien, Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Institut für Pflanzenbau, Konrad-Lorenz-Straße 24, 3430 Tulln an der Donau, Österreich

* Korrespondierender Autor: gerhard.moitzi@boku.ac.at

Einreichung: 16. Oktober 2019, überarbeitete Einreichung: 24. Februar 2020, Annahme: 2. März 2020

Zusammenfassung

Die Korn- und Stroherträge, der Energie-Input (Kraftstoff, Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel, Maschinen) und die Kennzahlen zur Energieeffizienz (Energie-Output, Netto-Energie-Output, Energieintensität, Energienutzungseffizienz) in Abhängigkeit der mineralischen Stickstoffdüngermenge (0 kg, 60 kg, 120 kg und 180 kg N ha⁻¹) und der Düngerstrategie (unterschiedliche Mineraldüngerformen und Gabenteilungen) wurden auf zwei Standorten im Marchfeld (Engelhartstetten und Groß-Enzersdorf) auf Basis von zwei zweijährigen Feldversuchen analysiert. Dabei sollte die Frage beantwortet werden, welche mineralische N-Düngung (N-Form, N-Menge und Splitting der N-Menge) die höchste Energieeffizienz aufweist. Mit zunehmender mineralischer N-Menge (60 kg, 120 kg bzw. 180 kg N ha⁻¹) nahm der energetische Anteil des Mineraldüngers am Gesamtenergie-Input um 24 %, 38 % bzw. 48 % zu. Durch das Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachses wurde in Engelhartstetten bei einer N-Düngermenge von 180 kg N ha⁻¹ eine signifikant verringerte Energieeffizienz im Vergleich zu 60 kg N ha⁻¹ und 120 kg N ha⁻¹ festgestellt. Eine Aufteilung der N-Düngermenge auf drei Gaben erhöhte den Kraftstoffverbrauch um 4 % gegenüber einer einmaligen Applikation der gesamten Düngermenge. Die Kennzahlen der Energieeffizienz wurden durch die Gabenteilung kaum beeinflusst. Die N-Düngung mit Kalkammonsalpeter war energieeffizienter als die Harnstoffdüngung (rein, stabilisiert, eingearbeitet). Die Energieeffizienzanalyse kann somit einen wertvollen Beitrag leisten, um pflanzenbauliche Maßnahmen hinsichtlich ihren Umweltauswirkungen zu bewerten.

Schlagerworte: Energieeffizienz, Winterweizen, Kalkammonsalpeter, Harnstoff, Ammonium-Harnstofflösung

Summary

The grain and straw yield, the energy input (fuel, fertilizer, pesticides, machinery) and energy efficiency parameters (energy output, net-energy output, energy intensity, energy use efficiency) as affected by the amount of mineral nitrogen fertilizer (0 kg, 60 kg, 120 kg und 180 kg N ha⁻¹) and mineral fertilizer strategies (different mineral N-fertilizer, splitting) were analyzed on two sites in the Marchfeld plain (Engelhartstetten und Groß-Enzersdorf) in two two-year experiments. The question should be answered which mineral nitrogen fertilizations (N form, N amount and N splitting) has the highest energy efficiency. With increasing N-fertilizer amount (60 kg, 120 kg und 180 kg N ha⁻¹), the share of fertilizer energy to total energy increased: 24%, 38% and 48%. Due to the law of decreasing yield increments, the energy efficiency for the nitrogen amount of 180 kg ha⁻¹ was statistically significant lower than for 60 kg ha⁻¹ and 120 kg ha⁻¹ in Engelhartstetten. Splitting the amount of N fertilizer into three doses increased fuel consumption by 4 % compared to a single application of the total amount of fertilizer. The energy efficiency parameters were hardly influenced by splitting. N-fertilization with calcium ammonium nitrate was more energy efficient than with urea (pure, stabilized, soil incorporated). The energy efficiency analyses can contribute to the assessment of environmental effects of management practices.

Keywords: energy efficiency, winter wheat, calcium ammonium nitrate, urea, urea ammonium nitrate

1. Einleitung

Mit der Verfügbarkeit von fossilen Kraft- und Brennstoffen stieg der Energieeinsatz in der Landwirtschaft an (Boxberger und Moitzi, 2008). Durch die Verknappung von fossilen Energieträgern und aufgrund des fortschreitenden Klimawandels erlangen Ressourcenschonung und Energieeffizienz zunehmend an Bedeutung (Pimentel et al., 1999; von Weizsäcker et al., 2009). Die Intensität landwirtschaftlicher Produktionsprozesse kann durch den direkten und indirekten Energieeinsatz ausgedrückt werden. Der direkte Energieeinsatz ist auf den Einsatz von Kraftstoff, Strom und Heizöl zurückzuführen, während der indirekte Energieeinsatz durch die Prozessenergie für die Herstellung von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln (Landmaschinen, Kraftfutter, Saatgut, Dünger- und Pflanzenschutzmitteln, etc.) bestimmt ist (Hülsbergen et al., 2001). Für einen landwirtschaftlichen Betrieb ist sowohl ein hoher Energie-Input als auch ein verminderter Energiesaldo, der zu Ertragsminderung führt, wirtschaftlich und ökologisch unerwünscht. Sie bewirken zum einen eine vermehrte CO_2 -Emission aus fossilen Energieträgern und zum anderen eine unzureichende Effizienz der Produktionsfaktoren infolge energetisch ungünstiger Verfahrensabläufe (Hege und Brenner, 2004).

Die Verfügbarkeit mineralischer N-Dünger trägt bedeutend zur Steigerung der pflanzenbaulichen Erträge bei. Zahlreiche Untersuchungen (Hülsbergen et al., 2001; Hoepfner et al., 2005; Moitzi et al., 2015; Lin et al., 2017; Moitzi et al., 2019) zeigen, dass unter konventionellen Produktionsbedingungen beim indirekten Energieeinsatz der mineralische N-Dünger den größten Anteil am fossilen Energieeinsatz hat. Mit zunehmender mineralischer N-Düngung nimmt die Energieeffizienz in der Weizenproduktion ab (Uhr und Vasileva, 2016). Neben dem Niveau der mineralischen N-Düngung bestimmt auch die Art des N-Mineraldüngers den flächenbezogenen Energieeinsatz. Der Energieverbrauch in der Produktion von mineralischem N-Düngermittel ist je nach Düngerart und Produktionstechnik sehr unterschiedlich (Jenssen und Kongshaug, 2003; Brentrup und Küsters, 2008). So ist der N-Energieaufwand für die Herstellung von Harnstoff mit $41,7 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ N}$ um ca. 34 % höher als für Kalkammonsalpeter mit $31,1 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ N}$ (Jenssen und Kongshaug, 2003). Ammoniak (NH_3) wird aus Luftstickstoff (N_2) und Erdgas, das zu etwa 70 % als Prozessgas und zu 30 % als Brennstoff verwendet wird, synthetisiert (Brentrup und Küsters, 2008). Heutige moderne Produktionsanlagen sind in der

Lage, Ammoniak mit einem Energieaufwand von etwa $35 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ NH}_3\text{-N}$ im optimierten Haber-Bosch-Verfahren mit *Steam reforming* zu produzieren.

Eine weitere wichtige Komponente in der N-Düngerproduktion ist die Salpetersäure (HNO_3). Die HNO_3 -Produktion läuft exotherm ab – die überschüssige Energie wird als Dampf exportiert oder zur Elektrizitätsgewinnung verwendet. Mit moderner Produktionstechnik lassen sich heute $11 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ HNO}_3\text{-N}$ gewinnen, im Durchschnitt sind es $7 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ HNO}_3\text{-N}$ (Jenssen und Kongshaug, 2003; Brentrup und Küsters, 2008; KTBL, 2008). Je höher der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Anteil (Kalkammonsalpeter/Kalksalpeter > Ammoniumnitrat-Harnstofflösung (AHL)) im Dünger ist, umso niedriger ist der Energieverbrauch bei der Produktion dieser Dünger.

Die Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) des N-Düngers in pflanzenbaulichen Produktionssystemen beeinflusst neben der Wirtschaftlichkeit vorwiegend auch die Umweltrelevanz (N-Verluste in das Grundwasser und die Atmosphäre) (Oenema, 2015; Plošek et al., 2017). Untersuchungen von Claupein (1994) zeigten, dass die Wirksamkeit der N-Düngung durch den chemischen Pflanzenschutz meist deutlich verbessert wurde und damit auch die Ausnutzung der mit fossiler Energie gewonnenen Ressource „Stickstoff“ erhöht. Durch den Einsatz von Harnstoff mit Ureaseinhibitoren kann die NUE durch verringerte Nitratverlagerung, Lachgasemission und Ammoniakverflüchtigung in die Atmosphäre erhöht werden (San Francisco et al., 2010).

Auf Grundlage von zwei Versuchen zur mineralischen N-Düngung im Marchfeld wurden der direkte und indirekte Energieeinsatz sowie die Kennzahlen der Energieeffizienz (Energie-Output, Netto-Energie-Output, Energieintensität, Energienutzungseffizienz) bei Winterweizen analysiert. Dabei sollte die Frage beantwortet werden, welche mineralische N-Düngung (N-Form, N-Menge und Splittung der N-Menge) die höchste Energieeffizienz aufweist.

2. Material und Methoden

2.1. Versuchsstandorte

Die Standorte Engelhartstetten ($48^{\circ}11'08.0''\text{N}$, $16^{\circ}55'09.2''\text{E}$) und Groß-Enzersdorf ($48^{\circ}12'1.79''\text{N}$, $16^{\circ}33'33.75''\text{E}$) sind 28 km voneinander entfernt und haben ähnliche klimatische Verhältnisse. Die langjährigen Mittelwerte sind beim Jahresniederschlag 568 mm und bei der Jahrestemperatur $10,8^{\circ}\text{C}$ (ZAMG-Station Groß-Enzersdorf,

Beobachtungszeitraum: 1995–2018; ZAMG, 2019). Die langjährigen monatlichen Mittelwerte und die Abweichungen davon in den Versuchsjahren 2015/16–2017/18 sind in Tabelle 1 dargestellt. Die langjährigen Mittelwerte in der Vegetationsperiode von Oktober bis Juni lagen beim Niederschlag bei 361 mm und bei der Temperatur bei 8,0 °C. Die Abweichungen in den Vegetationsperioden waren 2015/16 bei +1,0 °C und +88 mm, 2016/17 bei 0,0 °C und –48 mm und 2017/18 bei +1,1 °C und +10 mm. Die Vegetationsperiode 2015/16 war damit feuchter und die Vegetationsperiode 2016/17 trockener als der langjährige Durchschnitt.

Der Versuch am Standort Engelhartstetten wurde im Rahmen des europäischen Projektes FATIMA (Farming Tools for external nutrient Inputs and water Management) in den Jahren 2016 und 2017 durchgeführt (Vuolo et al., 2019; Spiegel et al., 2018). Der Versuch in Groß-Enzersdorf wurde in den Jahren 2017 und 2018 durchgeführt. Die Böden zeichnen sich aufgrund ihrer Bodentextur durch eine gute Wasserspeicherkraft aus und sind repräsentativ für das Marchfeld (Tabelle 2).

2.2. Versuchsaufbau und Management

Beim Feldversuch in Engelhartstetten wurden neben der ungedüngten Kontrolle drei unterschiedliche Stickstoffdüngermengen an Kalkammonsalpeter (0 kg, 60 kg, 120 kg und 180 kg N ha⁻¹) aufgeteilt in drei gleiche Düngegaben zur Bestockung, beim Schossen und beim Ährenschieben ausgebracht. Die Parzellengröße betrug 1 ha (100 × 100 m), der Versuch wurde als randomisierte Blockanlage in dreifacher Wiederholung angelegt.

Der Feldversuch an der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf wurde mit den Faktoren Düngerform (unge- düngt [Kontrolle], Kalkammonsalpeter – 27 % N [KAS], Harnstoff – 46 % N [HAS], stabilisierter Harnstoff – 46 % N [HAS stab.], Kalkammonsalpeter – 27 % N und Ammoniumnitrat-Harnstofflösung – 32 % N [KAS+AHL], Harnstoff eingearbeitet – 46 % N [HAS einge.]) und Gabenteilung (1 ×: Bestockung, 2 ×: Bestockung und Schossen und 3 ×: Bestockung, Schossen und Ährenschieben) bei einer gesamten N-Menge von 160 kg ha⁻¹ anlegt (Tabelle 3). Die Parzellengröße betrug 18 m² (6 × 3 m), der Versuch wurde als randomisierte Blockanlage in dreifacher Wiederholung angelegt.

Im Versuchsjahr 2017 musste am Standort Groß-Enzersdorf aufgrund des Niederschlagsdefizits eine Bewässerungsgabe im Ausmaß von 30 L m⁻² am 23.5.2017 durchgeführt werden (Dieselaggregat: 0,8 L Dieselöl mm⁻¹ und ha⁻¹: 24 L ha⁻¹). Die Bodenbearbeitung wurde konventionell wendend auf 25 cm mit dem Pflug durchgeführt. Am Standort Engelhartstetten wurde die Winterweizensorte Capo am 6.11.2015 bzw. am 15.11.2016 angebaut. Am Standort Groß-Enzersdorf wurde die Winterweizensorte Bernstein am 20.10.2016 bzw. am 17.10.2016 angebaut. Die Saatstärke betrug 370 keimfähige Körner m⁻², der Reihenabstand 12,5 cm und die Ablagetiefe 3–4 cm. Für die Bekämpfung von zweikeimblättrigen Unkräutern wurde einmalig ein systemisches Herbizid (Broadway®) aus der HRAC-Gruppe B (Acetolactat-Synthase-Hemmer) eingesetzt. Die Ernte in Engelhartstetten erfolgte mittels Mähdescher am 26.7.2016 bzw. am 20.7. 2017. In Groß-Enzersdorf erfolgte die Ernte händisch am 5.7.2017 bzw. am 27.6.2018 durch das Abschneiden der Getreidehalme

Tabelle 1. Langjährige durchschnittliche monatliche Temperatur und durchschnittlicher monatlicher Niederschlag (1995–2018) und die Abweichungen in den Vegetationsperioden 2015/16, 2016/17 und 2017/18 (Wetterstation: Groß-Enzersdorf)

Table 1. Long-term average monthly temperature and precipitation (1995–2018) and deviations during the growing seasons 2015/16, 2016/17 and 2017/18 (weather station: Groß-Enzersdorf)

	Temperatur (°C)				Niederschlag (mm)			
	1995–2018	2015/16	2016/17	2017/18	1995–2018	2015/16	2016/17	2017/18
Oktober	10,4	-0,7	-0,8	+1,7	39	+39	+25	+13
November	5,8	+2,0	-1,0	+0,4	33	-13	+3	-2
Dezember	1,2	+2,3	-0,4	+1,7	30	-15	-17	-3
Januar	0,3	-0,2	-4,1	+3,6	27	+14	-15	+7
Februar	2,0	+4,6	+0,9	-2,9	22	+27	+1	-3
März	5,7	+0,6	+3,2	-2,4	35	-17	-6	+5
April	11,2	-0,4	-1,2	+4,1	41	+1	+14	-28
Mai	16,0	-0,3	+0,5	+2,5	63	+42	-18	+18
Juni	19,5	+0,8	+2,5	+1,6	71	+10	-35	+3

Tabelle 2. Bodenbeschreibung der Versuchsstandorte
Table 2. Soil description of the experimental sites

	Engelhartstetten	Groß-Enzersdorf
Humus (%)	4,1	2,8
pH-Wert (CaCl ₂)	7,5	8,0
Sand (%)	18	36
Schluff (%)	49	44
Ton (%)	33	20
Bodenart	Lehm	Sandiger Lehm
Bodentyp	Kalkhaltiger Tschernosem WRB ¹ : Calcaric Chernozem	Tschernosem aus Donauesedimenten der quartären Prater-Schotterterrasse WRB: Calcaric Chernozem

¹ World Reference Base for Soil Resources

auf einer Fläche von einem Quadratmeter. Die Getreidehalme wurden gebündelt, getrocknet und mittels Parzellendrescher gedroschen.

2.3. Energetische Kennzahlen

Für die energetische Beurteilung des Produktionssystems „Winterweizen“ wurden energetische Kennzahlen nach der Methode von Hülsbergen et al. (2001) und Lin et al. (2017) berechnet (Tabelle 4). Der Energie-Input wurde aus den Mengen der Betriebsmittelaufwendungen und den Energieäquivalenten berechnet (Tabelle 5). Die

oberirdischen Biomasseerträge (Stroh und Körner) wurden energetisch mit dem Bruttoenergiewert für Weizenkörner mit 18,6 MJ kg⁻¹ Trockenmasse und für Weizenstroh mit 18,2 MJ kg⁻¹ Trockenmasse nach den DLG-Futterwerttabellen (DLG, 1997) bewertet.

2.4. Statistische Auswertung

Die statistische Datenauswertung wurde mit dem Statistikpaket SPSS 21.0 durchgeführt. Neben der deskriptiven Statistik wurde mit dem strukturprüfenden Verfahren der Varianzanalyse (ANOVA) der N-Düngungseinfluss

Tabelle 3. N-Düngungsvarianten an den Standorten Engelhartstetten und Groß-Enzersdorf
Table 3. N-fertilization treatments at the experimental sites Engelhartstetten and Groß-Enzersdorf

Standort	Düngung	N	Düngezeitpunkt			N-Menge gesamt
			Bestockung ³	Schossen ⁴	Ährenschieben ⁵	
		(%)	(kg N ha ⁻¹)			(kg N ha ⁻¹)
Engelhartstetten	Kontrolle	-	0	0	0	0
	3 × KAS	27	20	20	20	60
	3 × KAS	27	40	40	40	120
	3 × KAS	27	60	60	60	180
Groß-Enzersdorf	Kontrolle	-	0	0	0	0
	3 × KAS1	27	50	50	60	160
	3 × HAS stab. ²	46	50	50	60	160
	3 × HAS	46	50	50	60	160
	2 × KAS	27	100	60	0	160
	2 × HAS stab.	46	100	60	0	160
	2 × HAS	46	100	60	0	160
	1 × HAS stab.	46	160	0	0	160
	2 × KAS + 1 × AHL ⁶	27/32	50 (KAS)	50 (KAS)	60 (AHL)	160
	1 × HAS einge. + 1 × HAS ⁷	46	100	60	0	160

¹ Kalkamonsalpeter (27 % N), ² stabilisierter Harnstoff (46 % N) mit Nitrifikationshemmstoffen (DCD-Dicyandiamid und 1 H-1,2,4 Triazol) – Alzon*,

³ BBCH: 22-23, ⁴ BBCH: 31/32, ⁵ BBCH: 52, ⁶ AHL wurde als Flüssigdünger, die restlichen Dünger als Granulat ausgebracht, ⁷ Einarbeitung mittels Egge nur bei der 1. Gabe zur Bestockung

Tabelle 4. Definition der Kennzahlen der Energieeffizienz
Table 4. Definition of energy-efficiency parameters

	Definition	Einheit
Direkter Energie-Input (Ed)	Input von Diesel und Schmiermittel	GJ ha ⁻¹
Indirekter Energie-Input (Ei)	Input von Saatgut ¹ , Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel, Maschinen	GJ ha ⁻¹
Energie-Input (E)	$E = E_d + E_i$	GJ ha ⁻¹
Energie-Output (EO)	Energie (Brennwert) im geernteten Korn und Stroh minus Energie im Saatgut	GJ ha ⁻¹
Netto-Energie-Output (NEO)	$NEO = EO - E$	GJ ha ⁻¹
Energieintensität (EI)	$EI = E/\text{Kornertrag}$	MJ kg ⁻¹
Energienutzungseffizienz (EUE)	$EUE = EO/E$	GJ GJ ⁻¹

¹ Energie-Input für Bearbeitung, Lagerung und Verkauf des Saatgutes

auf pflanzenbauliche (Korn- und Strohertrag, Ernteindex) und energetische (Energie-Output, Netto-Energie-Output, Energieintensität und Energienutzungseffizienz) Kennwerte getestet. Anschließend an die ANOVA wurde der multiple Gruppenvergleich ($p < 0,05$) nach dem Student-Newman-Keuls-Test (SNK-Test) durchgeführt.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Energieeinsatz

Auf Basis von mehrjährigen Aufzeichnungen an der Betriebsstätte Fuchsenbigl der Landwirtschaftlichen Bundesversuchswirtschaften wurde am Versuchsstandort Engelhartstetten bei der Kontrollvariante ein mittlerer Kraftstoffverbrauch von 73 L ha⁻¹ und bei den mineralischen N-Düngungsvarianten zwischen 84,1 und 85,4 L

ha⁻¹ ermittelt (Tabelle 6). Der Mehrverbrauch ergab sich einerseits aus den Arbeitsgängen „Düngerstreuen“ zu den drei Zeitpunkten „Bestockung“, „Schossen“, „Ährenschieben“) und andererseits durch den ertragsabhängigen Mehrverbrauch beim Mähdrusch, Strohpressen und Körner- und Strohtransport.

Der Energieeinsatz stieg mit zunehmender mineralischer N-Düngung von 5,8 GJ ha⁻¹ auf 12,1 GJ ha⁻¹ an (Tabelle 7). Nach Lin et al. (2017) werden ackerbauliche Produktionssysteme bei einem Gesamtenergieeinsatz von < 10 GJ ha⁻¹ als „Low-Input-Systeme“ bezeichnet. Demzufolge sind die Produktionssysteme mit den mineralischen N-Düngungsniveaus von 120 und 180 kg N ha⁻¹ als „High-Input-Systeme“ zu bezeichnen, im Gegensatz zu den Düngungsstufen 0 kg N und 60 kg N ha⁻¹. Der energetische Anteil des Mineraldüngers am Gesamtenergie-Input nimmt von 24 % bei der Variante mit 60 kg N ha⁻¹ auf 48 % bei der Variante mit 180 kg N ha⁻¹ zu.

Tabelle 5. Energieäquivalente von landwirtschaftlichen Betriebsmitteln
Table 5. Energy equivalents for production facilities

	Einheit	Energieäquivalent	Quelle
Direkter Energie-Input			
Dieseldieselkraftstoff	MJ L ⁻¹	39,6	Hülsbergen et al. (2001), Sørensen et al. (2014), Lin et al. (2017)
Schmiermittel	MJ L ⁻¹	39,0	Sørensen et al. (2014)
Indirekter Energie-Input			
Mineraldünger			
• Kalkammonsalpeter (27 % N)	MJ kg ⁻¹	32,2	Jenssen und Kongshaug (2003), Arvidsson (2010)
• Harnstoff (46 % N), stabilisierter Harnstoff (46 % N)	MJ kg ⁻¹	41,7	Jenssen und Kongshaug (2003)
• AHL (32 % N)	MJ kg ⁻¹	41,8	Jenssen und Kongshaug (2003)
Herbizid	MJ kg ⁻¹	288	Green (1987), Deike et al. (2008), Lin et al. (2017)
Saatgut	MJ kg ⁻¹	5,5	Kalk et al. (1995), Hülsbergen et al. (2001)
Maschinen ¹	MJ ha ⁻¹	1253	Biedermann (2009)

¹ Konventionelles Bodenbearbeitungssystem mit Pflug (Getreidefläche: 200 ha)

Tabelle 6. Kraftstoffverbrauch (L ha⁻¹) im Produktionssystem „Winterweizen“, Standort Engelhartstetten
 Table 6. Fuel consumption (L ha⁻¹) in the production system “winter wheat”, site Engelhartstetten

Arbeitsgang	Technik	Kontrolle	60 kg N ha ⁻¹	120 kg N ha ⁻¹	180 kg N ha ⁻¹
Pflügen (25 cm)	9-x-9-Volldrehpflug, Allradtraktor (250 kW)	20,0	20,0	20,0	20,0
Saatbettbereitung ¹ (5–7 cm)	Saatbettkombination (9,3 m), Knickschlepper (370 kW)	7,0	7,0	7,0	7,0
Aussaat ²	Pneumatische Drillsaat ² (6,0 m), Allradtraktor (250 kW)	7,0	7,0	7,0	7,0
Herbizidapplikation ³ (1 ×)	Feldspritze, Allradtraktor (59 kW)	2,0	2,0	2,0	2,0
N-Düngerapplikation ³ (3 ×)	Schleuderdüngerstreuer, Allradtraktor (59 kW)		9,0	9,0	9,0
Mähdrusch ³	Mähdrescher	21,0	22,0	22,0	22,0
Korntransport (5 km) ³	Anhänger, Allradtraktor (88 kW)	1,4	2,1	2,6	2,7
Strohpressen	Großpackenpresse (Quaderballen), Allradtraktor (147 kW)	4,7	5,0	5,3	5,3
Ballenladen und Transport (5 km) ³	Dreiseitenkippanhänger, Allradtraktor (88 kW) mit Frontlader und Ballenspieß	4,2	4,4	4,7	4,7
Stoppelbearbeitung (12 cm)	Kurzscheibenegge (10 m), Allradtraktor (250 kW)	5,7	5,7	5,7	5,7
Summe		73,0	84,1	85,2	85,4

¹ Dablo® Rollomaximum 930, ² Horsch® Pronto 6 DC, ³ ÖKL-Richtwerte 2017

Am Versuchsstandort Groß-Enzersdorf wurde im trockenen Jahr 2017 der Versuch mit 30 mm Wasser berechnet, wodurch sich für alle Varianten ein um 24 L ha⁻¹ erhöhter Kraftstoffverbrauch ergab (Tabelle 8). Eine Aufteilung der N-Düngermenge auf drei Gaben erhöht den Kraftstoffverbrauch um 4 % (= 2,9 L ha⁻¹) gegenüber einer einmaligen Applikation der gesamten Düngermenge. Die N-Düngungsvariante, in der die erste Harnstoffgabe mittels Striegel eingearbeitet wurde, zeigte den höchsten Kraftstoffverbrauch mit 74,5 L ha⁻¹. Allerdings ist die Einarbeitung von Harnstoff auf den alkalischen Böden eine wichtige Maßnahme, um umweltschädliche Ammoniak-Emissionen zu vermindern (UNECE, 2015).

Mit der mineralischen Düngung von 160 kg N ha⁻¹ wurde der Gesamtenergieeinsatz je nach Düngervariante

zwischen 84 % und 111 % im Vergleich zur Kontrolle erhöht (Tabelle 9). Es handelt sich dann um High-Input-Systeme, da der gesamte Energieeinsatz >10 GJ ha⁻¹ ist. Die N-Düngungsvarianten mit Harnstoff und stabilisiertem Harnstoff zeigten aufgrund des höheren Energieaufwands in der Herstellung (vgl. Tabelle 5) den höchsten Energie-Input. Die Düngungsvarianten mit Kalkammonsalpeter sind weniger energieintensiv als die Harnstoffdüngervarianten. Das Düngungssystem 2 × KAS + 1 × AHL liegt im Gesamtenergieeinsatz dazwischen.

3.2. Energieeffizienz

Für die Beurteilung der Energieeffizienz in Abhängigkeit vom N-Einsatz haben die unterschiedlichen

Tabelle 7. Energieeinsatz pro Hektar bei unterschiedlicher mineralischer N-Düngung am Standort Engelhartstetten
 Table 7. Energy input per hectare in different mineral N-fertilization at the site Engelhartstetten

	Energieeinsatz							
	0 kg N ha ⁻¹		60 kg N ha ⁻¹		120 kg N ha ⁻¹		180 kg N ha ⁻¹	
	(GJ ha ⁻¹)	(%)	(GJ ha ⁻¹)	(%)	(GJ ha ⁻¹)	(%)	(GJ ha ⁻¹)	(%)
Kraftstoff	2,9	49,8	3,3	40,6	3,4	33,1	3,4	28,0
Saatgut	1,0	17,6	1,0	12,4	1,0	10,0	1,0	8,4
N-Dünger	0,0	0,0	1,9	23,5	3,9	37,8	5,8	47,9
Herbizid	0,4	6,6	0,4	4,6	0,4	3,7	0,4	3,7
Maschinen	1,5	26,3	1,5	18,6	1,5	15,0	1,5	12,6
Summe	5,8		8,2		10,2		12,1	

Tabelle 8. Kraftstoffverbrauch (L ha⁻¹) im Produktionssystem „Winterweizen“, Standort Groß-Enzersdorf
 Table 8. Fuel consumption (L ha⁻¹) in the production system “winter wheat”, site Groß-Enzersdorf

Arbeitsgang	Technik	Kontrolle	1 × HAS stab.	2 × KAS; 2 × HAS	3 × KAS; 3 × HAS	2 × KAS + 1 × AHL	1 × HAS einge. + 1 × HAS
Pflügen (25 cm) ¹	4- $\times$ -4-Volldrehpflug, Allradtraktor (92 kW)	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
Aussaat ²	Pneumatische Drillsaat (3 m) Allradtraktor (92 kW)	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
Herbizidapplikation ³ (1 $\times$)	Feldspritze, Allradtraktor (59 kW)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
N-Düngerapplikation ³ (Bestockung)	Schleuderdüngerstreuer, Allradtraktor (59 kW)	0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Harnstofffeinarbeitung ³	Striegel, Allradtraktor (59 kW)						3,5
N-Düngerapplikation ³ (Schossen)	Schleuderdüngerstreuer, Allradtraktor (59 kW)	0		1,5	1,5	1,5	1,5
N-Düngerapplikation ³ (Ährenschieben)	Schleuderdüngerstreuer, Feldspritze, Allradtraktor (59 kW)	0			1,5	2,0	
Beregnung (30 mm am 23. Mai 2017)	Dieselaggregat (0,8 L Dieselöl mm ⁻¹ und ha ⁻¹)	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
Mähdrusch ³	Mähdrescher	21,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
Korntransport (5 km) ³	Anhänger, Allradtraktor (92 kW)	1,82	2,12	2,25	2,39	2,33	2,25
Strohpressen ³	Großpackenpresse (Quaderballen), Allradtraktor (147 kW)	5,00	5,78	5,62	5,62	5,99	5,62
Ballenladen und Transport ³	Dreiseitenkippanhänger, Allradtraktor (88 kW) mit Frontlader und Ballenspieß	4,7	5,2	5,0	5,0	5,3	5,0
Stoppelbearbeitung ¹ (5–8 cm)	Flügelschargrubber, Allradtraktor (92 kW)	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
Summe mit Beregnung		89,6	93,7	95,0	96,6	97,7	98,5
Summe ohne Beregnung		65,6	69,7	71,0	72,6	73,7	74,5

¹ Szalay et al. (2015), ² Moitzi et al. (2013), ³ ÖKL-Richtwerte 2017, ⁴ AHL wurde als Flüssigdünger, die restlichen Dünger als Granulat ausgebracht.

Energiekennzahlen (z. B.: Energieintensität [MJ kg⁻¹ Kornertrag], Netto-Energie-Output [GJ ha⁻¹] oder Energienutzungseffizienz) eine unterschiedliche Aussagekraft, welche wesentlich von Standort (Boden und Klima) und der Bewirtschaftungsintensität beeinflusst werden (Hülsbergen, 2008; Moitzi et al., 2019).

3.2.1. Effekt der N-Düngermenge – Standort Engelhartstetten

Die N-Düngermenge beeinflusst den Korn- und Strohertrag und somit auch die Kennzahlen zur Energieeffizienz. Wie bereits in Moitzi et al. (2019) für einen langjährigen Bodenbearbeitungsversuch am Standort Groß-Enzersdorf dargestellt, haben die klimatischen Bedingungen während der Vegetationszeit einen wesentlichen Einfluss auf die Kornerträge und somit die Energieeffizienz.

Am Standort Engelhartstetten unterschieden sich die Kornerträge im Mittel über beide Jahre zwischen allen Düngestufen (Tabelle 10). Das Ertragsgesetz des abnehmenden Ertragszuwachses nach Mitscherlich (1948), das besagt, dass bei steigendem Angebot des Wachstumsfaktors „N-Dünger“ die Zunahme pro Einheit Dünger geringer wird, lässt sich in beiden Untersuchungsjahren ablesen. Im Trockenjahr 2017 war die Kornertragszunahme zwischen den N-Düngungsstufen 120 kg N ha⁻¹ und 180 kg N ha⁻¹ nicht statistisch abgesichert. Die geringeren Erträge im Jahr 2017 im Vergleich zum Jahr 2016 sowie die geringe Ertragszunahme mit steigender N-Düngung sind auf das Niederschlagsdefizit in dieser Vegetationsperiode zurückzuführen. Dadurch wurde der angebotene mineralische N-Dünger nur teilweise ertragswirksam. Der geringe Niederschlag in der Vegetationsperiode 2016/17

Tabelle 9. Energieeinsatz pro Hektar bei unterschiedlicher mineralischer N-Düngung am Standort Groß-Enzersdorf, mit Beregnung
 Table 9. Energy input per hectare in different mineral N-fertilization at the site Groß-Enzersdorf, with irrigation

	Energieeinsatz							
	Kontrolle		3 × KAS		3 × HAS, 3 × HAS stab.		2 × KAS	
	(GJ ha ⁻¹)	(%)	(GJ ha ⁻¹)	(%)	(GJ ha ⁻¹)	(%)	(GJ ha ⁻¹)	(%)
Kraftstoff	3,5	55,0	3,8	32,2	3,8	28,6	3,8	32,0
Saatgut	1,0	15,8	1,0	8,6	1,0	7,6	1,0	8,6
N-Dünger	0,0	0,0	5,2	43,4	6,7	49,8	5,2	43,5
Herbizid	0,4	5,9	0,4	3,2	0,4	2,8	0,4	3,2
Maschinen	1,5	23,3	1,5	12,6	1,5	11,2	1,5	12,7
Summe	6,4		11,9		13,4		11,9	
	2 × HAS, 2 × HAS stab.		1 × HAS stab.		2 × KAS + 1 × AHL		1 × HAS einge. + 1 × HAS	
	(GJ ha ⁻¹)	(%)	(GJ ha ⁻¹)	(%)	(GJ ha ⁻¹)	(%)	(GJ ha ⁻¹)	(%)
Kraftstoff	3,8	28,3	3,7	27,8	3,9	31,0	3,9	28,9
Saatgut	1,0	7,6	1,0	7,5	1,0	8,2	1,0	7,6
N-Dünger	6,7	50,0	6,7	50,4	5,7	45,8	6,7	49,6
Herbizid	0,4	2,8	0,4	3,0	0,4	3,0	0,4	2,8
Maschinen	1,5	11,2	1,5	11,3	1,5	12,0	1,5	11,1
Summe	13,4		13,3		12,5		13,5	

im Vergleich zu 2015/16 führte zu einem durchschnittlichen Kornertragsminderertrag von 30 %. Bei den einzelnen Düngungsstufen (0 kg, 60 kg, 120 kg und 180 kg N ha⁻¹) war der Kornertrag im Jahr 2017 um 34 %, 29 %, 26 % bzw. 30 % niedriger als im 2016 (Tabelle 10).

Auch die Kennzahlen der Energieeffizienz waren bei den Versuchsjahren unterschiedlich. Im trockenen Jahr 2017 war die Energieeffizienz unabhängig von der N-Düngungsstufe deutlich geringer als im Jahr 2016, in dem es genügend Niederschläge in der Vegetationsperiode gab. Mit zunehmender N-Düngung im Jahr 2016 stieg die Energieintensität für Korn und Stroh. Insbesondere in der N-Düngungsstufe 180 kg N ha⁻¹ wurde eine statistisch abgesichert erhöhte Korn-Energieintensität und eine tendenziell erhöhte Stroh-Energieintensität festgestellt. In beiden Versuchsjahren war die Energienutzungseffizienz im Korn und in der gemeinsamen Betrachtung von Korn mit Stroh am geringsten. Das pflanzenbauliche Ertragsgesetz vom abnehmenden Ertragszuwachs bei steigendem Angebot des Wachstumsfaktors „Stickstoff“ zeigt sich somit auch in der abnehmenden Energieeffizienz.

3.2.2. Effekt der N-Düngerstrategie – Standort Groß-Enzersdorf

Durch die Beregnung von 30 mm im Trockenjahr 2017 waren der Korn- und Strohertrag und somit die

Energieeffizienz am Standort Groß-Enzersdorf (Tabelle 11) höher als am Standort Engelhartstetten (Tabelle 10).

Vergleicht man die Mittelwerte von 2018 mit jenen von 2017 am Standort Groß-Enzersdorf, so zeigten sich signifikante Unterschiede im Korn- und Strohertrag, Ernteindex, Energie-Output und Netto-Energie-Output von Korn+Stroh und Energieintensität vom Stroh (Tabelle 11). Hingegen wurden die Energieintensität vom Korn und die Energienutzungseffizienz nicht beeinflusst.

Im Jahr 2017 unterschieden sich der Kornertrag, der Ernteindex und die Energieintensität vom Korn nicht zwischen den Düngungsvarianten und auch nicht zwischen den Düngungsvarianten und der Kontrolle. Der Strohertrag, der Energie-Output und Netto-Energie-Output von Korn+Stroh, die Energieintensität vom Stroh und die Energienutzungseffizienz von Korn und Korn+Stroh waren in allen Düngungsvarianten höher als in der Kontrolle, wobei es zwischen den Düngungsvarianten keine Unterschiede gab.

Im Jahr 2018 hatten die Düngungsvarianten mit dem stabilisierten Harnstoff und die Variante mit der Harnstofffeinarbeitung signifikant höhere Kornerträge als die Kontrolle, die anderen Düngungsvarianten lagen dazwischen. Der Strohertrag und der Ernteindex unterschieden sich nicht zwischen den Varianten. Der Energie-Output und Netto-Energie-Output von Korn+Stroh war in der

Tabelle 10. Korn- und Strohertrag, Ernteindex und die Kennzahlen der Energieeffizienz für Winterweizen bei unterschiedlicher mineralischer N-Düngermenge (kg N ha^{-1}) im Marchfeld, Standort EngelhartstettenTable 10. Cereal- and straw yield, harvest index and energy-efficiency parameter for winter wheat in different N-fertilizer amount (kg N ha^{-1}) in Marchfeld, site Engelhartstetten

kg N ha ⁻¹	Ertrag ¹		Ernteindex	EO	NEO	EI		EUE	
	Korn	Stroh		Korn+Stroh		Korn	Stroh	Korn	Korn+Stroh
	(kg ha ⁻¹)		(%)	(GJ ha ⁻¹)		(MJ kg ⁻¹)		(MJ MJ ⁻¹)	
2016									
0	3791 ^{a2}	4358	47,0	127,7 ^a	121,9 ^a	0,34 ^a	0,38	11,1	22,0 ^a
60	5399 ^b	4671	53,7	158,3 ^b	150,1 ^b	0,44 ^{ab}	0,38	11,1	19,3 ^{ab}
120	6532 ^c	5516	54,5	189,6 ^c	179,5 ^c	0,46 ^{ab}	0,38	10,7	18,6 ^{ab}
180	7134 ^d	5368	57,1	197,0 ^c	184,9 ^c	0,55 ^b	0,42	9,7	16,3 ^b
2017									
0	2495 ^a	1570 ^a	61,7	63,5 ^a	57,6 ^a	0,88	0,55	7,1	10,9
60	3811 ^b	2840 ^{ab}	58,0	104,3 ^b	96,1 ^b	0,72	0,51	7,7	12,7
120	4814 ^c	3907 ^b	55,7	137,0 ^c	126,9 ^c	0,65	0,52	7,8	13,5
180	4983 ^c	4366 ^b	54,0	146,9 ^c	134,8 ^c	0,71	0,60	6,7	12,1
Mittel ³									
0	3143 ^a	2964	54,3	95,6 ^a	89,8 ^a	0,61	0,46	9,1	16,4 ^b
60	4605 ^b	3755	55,8	131,3 ^{ab}	123,1 ^{ab}	0,58	0,45	9,4	16,0 ^b
120	5673 ^c	4711	55,1	163,0 ^b	153,2 ^b	0,56	0,45	9,3	16,1 ^b
180	6058 ^d	4867	55,5	172,0 ^c	159,9 ^b	0,63	0,51	8,2	14,2 ^a

¹ 14 % Feuchte, ² signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsstufen sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet, ³ Mittelwert über beide Jahre.

Düngungsvariante mit Harnstoffearbeitung am niedrigsten und in den Varianten 1 × HAS stab. und 2 × KAS + 1 × AHL. Die weiteren Varianten lagen inklusive der Kontrolle dazwischen. Die Energieintensität vom Korn und von Stroh waren in der Kontrolle signifikant geringer als in den Düngungsvarianten, bei denen es keine signifikanten Unterschiede gab.

Die Energienutzungseffizienz von Korn und Korn+Stroh war in der Kontrolle höher als in den Düngungsvarianten, bei der die Variante mit Harnstoffearbeitung die niedrigsten Werte hatte.

Auffallend war der Effekt beim Vergleich der Düngungsvarianten mit Kalkammonsalpeter (zweifach geteilt und dreifach geteilt) mit Harnstoff (rein und stabilisiert). Die Düngung mit Kalkammonsalpeter zeigte höhere Werte bei der Energieeffizienz als die Harnstoffdüngung (nicht signifikant). Dies war auf den erhöhten Energie-Input der Harnstoffdüngung durch den erhöhten Energieaufwand in der Harnstoffdüngerproduktion (vgl. Tabelle 5; Jenssen und Kongshaug, 2003) zurückzuführen.

Im Mittel über beide Jahre gab es keine Unterschiede beim Korn- und Strohertrag, dem Ernteindex, beim

Energie-Output und Netto-Energie-Output von Korn+Stroh, der Energieintensität vom Stroh und der Energienutzungseffizienz von Korn+Stroh. In den gedüngten Varianten war die Energieintensität vom Korn höher und die Energienutzungseffizienz vom Korn war niedriger, wobei es bei beiden Parametern keine Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten gab. Auch Neugschwandtner et al. (2013; 2015) haben am gleichen Standort für die Sommerungen von Kichererbse, Erbse, Gerste und Hafer beim Kornertrag keine Unterschiede zwischen der ungedüngten Kontrolle, einem Depotdünger und KAS festgestellt, während jedoch mit Düngung der Strohertrag und der N-Gehalt im Korn zugenommen haben.

4. Schlussfolgerungen

Ab einem Düngungsniveau von 120 kg N ha^{-1} nimmt die Energieeffizienz ab, was im Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachses begründet ist. Somit lassen sich mit dem Konzept der Energieeffizienzanalyse im Pflanzenbau energetisch optimale N-Düngermengen ableiten.

Tabelle 11. Korn- und Strohertrag, Ernteindex und die Kennzahlen der Energieeffizienz für Winterweizen bei unterschiedlichen Düngerformen bei einer Gesamt-N-Düngermenge von 160 kg ha⁻¹ im Marchfeld, Standort Groß-Enzersdorf

Table 11. Cereal- and straw yield, harvest index and energy-efficiency parameter for winter wheat in different N-fertilization with a total N-fertilizer amount of 160 kg ha⁻¹ in Marchfeld, site Groß-Enzersdorf

Düngung	Ertrag ¹		Ernteindex	EO	NEO	EI		EUE		
	Korn	Stroh				Korn+Stroh	Korn	Stroh	Korn	Korn+Stroh
	(kg ha ⁻¹)	(%)								
2017										
Kontrolle	6036	4969 ^{a2}	55,0	174 ^a	168 ^a	0,33	0,27 ^a	14,7 ^b	26,9 ^b	
3 × KAS	7013	7585 ^b	48,0	232 ^b	220 ^b	0,39	0,42 ^b	9,3 ^a	19,5 ^a	
3 × HAS stab.	7316	7949 ^b	48,1	243 ^b	229 ^b	0,43	0,46 ^b	8,6 ^a	18,1 ^a	
3 × HAS	7164	7061 ^b	50,4	226 ^b	213 ^b	0,48	0,47 ^b	8,5 ^a	16,8 ^a	
2 × KAS	6122	7901 ^b	43,8	222 ^b	221 ^b	0,37	0,47 ^b	8,1 ^a	18,8 ^a	
2 × HAS stab.	6596	7704 ^b	46,2	227 ^b	214 ^b	0,43	0,50 ^b	7,8 ^a	17,0 ^a	
2 × HAS	7163	6912 ^b	51,5	224 ^b	210 ^b	0,50	0,46 ^b	8,5 ^a	16,7 ^a	
1 × HAS stab.	7004	7840 ^b	46,9	236 ^b	222 ^b	0,42	0,48 ^b	8,3 ^a	17,7 ^a	
2 × KAS + 1 × AHL	7454	7918 ^b	48,4	244 ^b	232 ^b	0,39	0,42 ^b	9,4 ^a	19,5 ^a	
1 × HAS einge. + 1 × HAS	6317	7919 ^b	44,4	226 ^b	212 ^b	0,42	0,53 ^b	7,4 ^a	16,7 ^a	
Mittelwert	6819 ^B	7376 ^B	48,3 ^B	225 ^B	213 ^B	0,42	0,45 ^A	9,1	18,8	
2018										
Kontrolle	3173 ^a	6296	34,3	211 ^{ab}	206 ^{ab}	0,21 ^a	0,39 ^a	20,1 ^c	38,8 ^c	
3 × KAS	4697 ^{ab}	6506	41,9	220 ^{ab}	209 ^{ab}	0,41 ^b	0,57 ^b	10,6 ^b	20,1 ^{ab}	
3 × HAS stab.	5157 ^b	5004	50,7	193 ^{ab}	181 ^{ab}	0,63 ^b	0,61 ^b	9,1 ^b	15,5 ^{ab}	
3 × HAS	4940 ^{ab}	5870	44,9	190 ^{ab}	178 ^{ab}	0,54 ^b	0,62 ^b	7,8 ^b	15,2 ^{ab}	
2 × KAS	4587 ^{ab}	5925	44,2	199 ^{ab}	188 ^{ab}	0,49 ^b	0,60 ^b	9,6 ^b	18,3 ^{ab}	
2 × HAS stab.	5347 ^b	5387	49,9	199 ^{ab}	187 ^{ab}	0,58 ^b	0,58 ^b	9,2 ^b	16,1 ^{ab}	
2 × HAS	4408 ^{ab}	7041	38,5	223 ^{ab}	211 ^{ab}	0,42 ^b	0,67 ^b	9,0 ^b	17,9 ^{ab}	
1 × HAS stab.	3747 ^{ab}	7101	35,2	231 ^b	219 ^b	0,42 ^b	0,75 ^b	9,6 ^b	18,7 ^{ab}	
2 × KAS + 1 × AHL	4340 ^{ab}	7810	36,5	224 ^b	213 ^b	0,36 ^b	0,60 ^b	8,6 ^b	19,4 ^{ab}	
1 × HAS einge. + 1 × HAS	5081 ^b	5715	46,8	143 ^a	131 ^a	0,54 ^b	0,62 ^b	4,2 ^a	11,4 ^a	
Mittelwert	4548 ^{A3}	6265 ^A	42,4 ^A	203 ^A	192 ^A	0,46	0,60 ^B	9,8	19,1	
Mittel ⁴										
Kontrolle	4604	5632	44,6	193	187	0,27 ^a	0,33	17,4	32,6 ^b	
3 × KAS	5855	7045	45,0	226	214	0,40 ^b	0,50	10,0	20,0 ^a	
3 × HAS stab.	6236	6476	49,4	218	205	0,53 ^b	0,54	8,9	16,8 ^a	
3 × HAS	6052	6466	48,1	208	195	0,51 ^b	0,55	8,1	16,0 ^a	
2 × KAS	5354	6913	44,0	210	199	0,43 ^b	0,54	8,9	18,5 ^a	
2 × HAS stab.	5971	6545	48,0	213	200	0,50 ^b	0,54	8,5	16,5 ^a	
2 × HAS	5786	6976	45,0	223	210	0,46 ^b	0,56	8,7	17,4 ^a	
1 × HAS stab.	5375	7471	41,1	234	221	0,42 ^b	0,62	9,0	18,2 ^a	
2 × KAS + 1 × AHL	5897	7864	42,5	234	222	0,38 ^b	0,51	9,0	19,4 ^a	
1 × HAS einge. + 1 × HAS	5699	6817	45,6	185	172	0,48 ^b	0,58	5,8	14,1 ^a	
Mittelwert	5683	6821	45,3	214	203	0,44	0,53	9,4	18,9	

¹ 14 % Feuchte, ² signifikante Unterschiede zwischen den Düngungsstufen sind durch unterschiedliche Kleinbuchstaben gekennzeichnet, ³ signifikante Unterschiede zwischen den Jahresmittelwerten sind durch unterschiedliche Großbuchstaben gekennzeichnet. ⁴ Mittelwert über beide Jahre.

Durch die Beregnung werden der flächenbezogene Energieeinsatz und der Biomasseertrag erhöht. Ob eine Beregnung die Energieeffizienz erhöht, hängt im Wesentlichen vom generierten Mehrertrag ab. Durch die Beregnung im Jahr 2017 konnte die Energienutzungseffizienz nur geringfügig verbessert werden.

Durch die Gabenteilung der Mineraldüngung können keine eindeutigen Tendenzen hinsichtlich Energieeffizienz abgeleitet werden, außer dass der Energie-Input (aufgrund des höheren Kraftstoffverbrauches durch die N-Düngeranbringung) anstieg.

Sowohl die N-Düngung mit Harnstoff als auch mit stabilisiertem Harnstoff zeigten einen erhöhten Energieeinsatz mit verminderter Energieeffizienz im Vergleich zu Kalkammonsalpeter bei der Winterweizenproduktion. Da der mineralische N-Dünger ein energieintensives Betriebsmittel im Pflanzenbau darstellt, welches zielgerichtet eingesetzt werden soll, um die Verluste (Nitratauswaschung ins Grundwasser, Lachgasemission und Ammoniakverflüchtigung in die Atmosphäre) zu reduzieren, kommt der N-Effizienz eine große Bedeutung zu. Die Energieeffizienzanalysen können durch die Ergänzung der N-Effizienzbeurteilung wertvolle Erkenntnisse für einen umweltgerechten Pflanzenbau liefern.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Versuchsdurchführung bei Rudolf Kurta von der Betriebsstätte Fuchsenbigl der Landwirtschaftlichen Bundesversuchswirtschaften und Herrn Thomas Miksch von der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES). Für die Datenerhebung an der Versuchswirtschaft Groß-Enzersdorf seien die Studierenden Caroline Gass, Anton Gingl, Stefan Havranek, Tobias Wittmann, Tanja Gruber, Christina Kainz, Laura Messemer, Florian Schraivogl und David Tischler gedankt. Ein Dank gilt auch der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) für die Bereitstellung der Wetterdaten.

Literaturverzeichnis

Arvidsson, J. (2010): Energy use efficiency in different tillage systems for winter wheat on a clay and silt loam in Sweden. *European Journal of Agronomy* 33, 250–256.

Biedermann, G. (2009): Kumulierter Energieaufwand (KEA) der Weizenproduktion bei verschiedenen Produktionssystemen (konventionell und ökologisch) und verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen (Pflug, Mulchsaat, Direktsaat). Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.

Boxberger, J. und G. Moitz (2008): Energieeinsatz in der Landwirtschaft im Wandel. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (Hrsg.): KTBL-Tagung „Energieeffiziente Landwirtschaft“ vom 8. bis 9. April 2008 in Fulda, KTBL-Schrift 463, S. 7–16.

Brentrup, F. und J. Küsters (2008): Energiebilanz der Erzeugung und Verwendung von mineralischen Düngemitteln – Stand der Perspektiven. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (Hrsg.): KTBL-Tagung „Energieeffiziente Landwirtschaft“ vom 8. bis 9. April 2008 in Fulda, KTBL-Schrift 463, S. 56–64.

Claupen, W. (1994): Möglichkeiten und Grenzen der Extensivierung im Ackerbau. Wirkungen der Bewirtschaftungsintensität auf die langfristige Produktivität und Stabilität von Agrarökosystemen und deren Umweltwirkungen. Habilitationsschrift, Universität Göttingen, Deutschland.

DLG (1997): DLG Futterwerttabellen Wiederkäuer. 7. erweiterte und überarbeitete Auflage. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main, Deutschland.

Deike, S., Pallutt, B., Melander, B., Strassemer, J. und O. Christen (2008): Long-term productivity and environmental effects of arable farming as affected by crop rotation, soil tillage intensity and strategy of pesticide use: a case study of two long-term field experiments in Germany and Denmark. *European Journal of Agronomy* 29, 191–199.

Green, M. B. (1987): Energy in pesticide manufacture, distribution and use. In: Helsel, Z. R. (Hrsg.): Energy in plant nutrition and pest control. *Energy in World Agriculture*. Vol. 2, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, S. 165–195.

Hege, U. und M. Brenner (2004): Kriterien umweltverträglicher Landwirtschaft (KUL). Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz, Freising-Weihenstephan, Deutschland.

Hoepfner J. W., Entz, M. H., McConkey, B. G., Zentner, R. P. und C. N. Nagy (2005): Energy use and efficiency in two Canadian organic and conventional crop

- production systems. *Renewable Agriculture and Food Systems* 21, 60–67.
- Hülsbergen, K.-J., Feil, B., Biermann, S., Rathke G.-W., Kalk, W.-D. und W. Diepenbrock (2001): A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. *Agriculture, Ecosystem & Environment* 86, 303–321.
- Hülsbergen, K.-J. (2008): Energieeffizienz ökologischer und integrierter Anbausysteme. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (Hrsg.): KTBL-Tagung „Energieeffiziente Landwirtschaft“ vom 8. bis 9. April 2008 in Fulda, KTBL-Schrift 463, S. 87–99.
- Jenssen, T. K. und G. Kongshaug (2003): Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production. *Proceedings* 509, The International Fertiliser Society, Colchester, UK.
- Kalk, W.-D., Biermann, S. und K.-J. Hülsbergen (1995): Standort und betriebsbezogene Energiebilanzen zur Charakterisierung der Landnutzungsintensität. ATB-Berichte 10/95, Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim.
- Lin, H.-C., Huber, J. A., Gerl, G. und K.-J. Hülsbergen (2017): Effects of changing farm management and farm structure on energy balance and energy-use efficiency – A case study of organic and conventional farming systems in southern Germany. *European Journal of Agronomy* 82, 242–253.
- Moitzi, G., Thünauer, G., Robier, J. und A. Gronauer (2015): Energieeinsatz und Energieeffizienz in der Körnermaisproduktion bei unterschiedlicher Stickstoffdüngung in der Südsteiermark. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 66, 25–37.
- Moitzi, G., Neugschwandtner, R. W., Kaul, H.-P. und H. Wagentristsl (2019): Energy efficiency of winter wheat in a long-term tillage experiment under Pannonian climate conditions. *European Journal of Agronomy* 103, 24–31.
- Moitzi, G., Wagentristsl, H., Aschauer, C., Schulmeister, K. und A. Gronauer (2013): Influence of different soil preparations and vehicle speed on process parameters at seeding of peas (*Pisum sativum*) with a trailed pneumatic universal seed drill. *Proceedings of the 41st International Symposium on Agricultural Engineering “Actual Tasks on Agricultural Engineering”*, Opatija, 19th–22nd February 2013, 106–117.
- Mitscherlich, E. A. (1948): *Die Ertragsgesetze*. Akademie-Verlag, Berlin, Deutschland.
- Neugschwandtner, R. W., Wagentristsl, H. und H.-P. Kaul (2015): Nitrogen yield and nitrogen use of chickpea compared to pea, barley and oat in Central Europe. *International Journal of Plant Production* 9, 291–304.
- Neugschwandtner, R. W., Wichmann, S., Gimplinger, D. M., Wagentristsl, H. und H.-P. Kaul (2013): Chickpea performance compared to pea, barley and oat in Central Europe: Growth analysis and yield. *Turkish Journal of Field Crops* 18, 179–184.
- Oenema, O. (2015): Nitrogen Use Efficiency (NUE) – An indicator for the utilization of nitrogen in agricultural and food systems. *Proceedings* 773, The International Fertiliser Society, Colchester, UK.
- ÖKL (2017): ÖKL-Richtwerte für die Maschinenselbstkosten 2017. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung, Wien.
- Pimentel, D., Pimentel, M. und M. Karpenstein-Machan (1999): Energy use in agriculture – an overview. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 1, 1–32.
- Plošek, L., Elbl, J., Lošák, T., Kužel, S., Kintl, A., Juříčka, D., Kynický, J., Martensson, A. und M. Brtnický (2017): Leaching of mineral nitrogen in the soil influenced by addition of compost and N-mineral fertilizer. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science* 67, 607–614.
- San Francisco, S., Urrutia, O., Martin, V., Peristeropoulos, A. und J. M. Garcia-Mina (2010): Efficiency of urease and nitrification inhibitors in reducing ammonia volatilization from diverse nitrogen fertilizers applied to different soil types and beat straw mulching. *Journal of the Science of Food & Agriculture* 91, 1569–1575.
- Sørensen, C. G., Halberg, N., Oudshoorn, F. W., Petersen, B. M. und R. Dalgaard (2014): Energy inputs and GHG emissions of tillage systems. *Biosystems Engineering* 120, 2–14.
- Spiegel, H., Wenng, H., Essl, L., Sandén, T. und F. Vuolo (2018): Nachhaltige N-Düngung mit Hilfe von Satelliten- und Sensormessungen – Ergebnisse des FATIMA-Projektes und Anwendungen in der Praxis. ALVA-Tagungsband, Ökologische und soziale Aspekte des innovativen Gartenbaues. Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel-, Veterinär- und Agrarwesen, S. 211–213.
- Szalay, T., Moitzi, G., Weingartmann, H. und P. Liebhard (2015): Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf Kraftstoffverbrauch und Arbeitszeitbedarf für den Winterweizenanbau im semiariden Produktionsgebiet. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 66, 39–48.

- Uhr, Z. und E. Vasileva (2016): Energy productivity, fertilization rate and profitability of wheat production after various predecessors II. Profitability of wheat production. *Agricultural Science and Technology* 8, 41–45.
- UNECE (2015): Framework Code for Good Agricultural Practice for Reducing Ammonia Emissions. United Nations Economic Commission for Europe. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution.
- Von Weizsäcker, E., Hargroves, K., Smith, H. M., Desha, C. und P. Stasinopoulos (2009): Factor Five – Transforming the Global Economy through 80 % Improvement in Resource Productivity. A Report to the Club of Rome, London, UK.
- Vuolo, F., Essl, L., Sandén, T. und H. Spiegel (2019): Multidisziplinäre Überlegungen zur nachhaltigen N-Düngung unter Berücksichtigung der Möglichkeiten der satellitengestützten Präzisionslandwirtschaft. Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich – Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 28, Wien.
- ZAMG (2019): Klimaübersichten. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch>. Abgerufen am 14.10.2019.