

Ökobilanzen einer Wärmebereitstellung aus Getreideganzpflanzen: Einfluß von Getreideart und Stickstoff-Düngung an zwei Standorten

Ecobalances of Heat Supply through Whole Grain Crops: Effect of Cereal Species and N Rate at Two Locations

Iris Lewandowski & Andrea Bohn, Institut für Pflanzenbau und Grünland, Universität Hohenheim
M. Kaltschmitt & G. Weinrebe, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER),
Universität Stuttgart

Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluß der Getreideart (Winterweizen, -roggen und -triticale) und der Stickstoff (N)-Düngung an zwei verschiedenen Standorten auf den Energieertrag, die Qualität der Biomasse, die Entstehung von Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) und Emissionen mit versauernder Wirkung (SO₂-Äquivalente) zu untersuchen. Hierzu wurden Feldversuche angelegt und der Ganzpflanzenertrag sowie die Biomassequalität gemessen. Die CO₂- und SO₂-Äquivalente wurden anhand einer Ökobilanz ermittelt. Die meisten CO₂-Äquivalente waren der Phase der Pflanzenproduktion zuzurechnen. Ein wesentlicher Beitrag resultierte hier aus der N-Düngemittelproduktion. Demgegenüber wurden die SO₂-Äquivalente primär in der Phase der Verbrennung gebildet und waren auf die Konzentrationen der Elemente N, Chlor (Cl) und Schwefel (S) in der Biomasse zurückzuführen. Grundsätzlich führte die Erhöhung der N-Düngung zum Ansteigen der auf die bereitgestellte Nutzenergie bezogenen Emissionen an CO₂- und SO₂-Äquivalenten, gleichzeitig nahmen jedoch die flächenbezogenen Nettoenergieerträge sowie die flächenbezogenen CO₂-Äquivalente, die durch Verbrennung von Wintergetreideganzpflanzen anstatt von Heizöl eingespart werden könnten, zu. Bezüglich der CO₂-Äquivalente wurde für jede Variante eine Umweltentlastung im Vergleich zur Nutzung fossiler Energieträger ermittelt. Bei den SO₂-Äquivalenten kann dagegen die Verbrennung von Winterweizen, der intensiv mit N gedüngt wurden, zu einer Mehremission an SO₂-Äquivalenten gegenüber der fossilen Referenz Heizöl führen. Aufgrund seines hohen Ganzpflanzenertragspotentials und der niedrigen N- und Cl-Konzentrationen erwies sich Wintertriticale in den vorliegenden Versuchen als das günstigste Energiegetreide.

Schlüsselworte: Getreideganzpflanzen, Festbrennstoffe, Ökobilanz, Stickstoffdüngung

Summary

The objective of the study was to determine the effect of cereal species (winter wheat, winter rye and winter triticale) and nitrogen (N) fertilisation at two locations on energy yield, biomass quality, formation of greenhouse gas emissions (CO₂ equivalents) and emissions with acidifying effects (SO₂ equivalents). Therefore field experi-

ments were performed and biomass yield and quality assessed. The CO₂ and SO₂ equivalents were calculated using an ecobalance. The largest share of CO₂ equivalents was determined for the phase of plant production. Here a substantial contribution resulted from the production of the N fertilisers. SO₂ equivalents were released primarily during the phase of combustion. The amount depended on the contents of N, chlorine (Cl) and sulphur (S) in the biomass. In general, emissions of CO₂ and SO₂ equivalents, determined relative to utilisable energy, increased with increasing level of N fertilisation. However, at the same time net energy yields and the CO₂ saving potentials increased on a per hectare basis. In terms of CO₂ equivalents each experimental treatment implied an environmental benefit in comparison to fuel oil (the reference fossil fuel). In contrast, in some variants emission of SO₂ equivalents from whole grain crops were equal to or exceeded those from fuel oil when N-rich biomass was combusted. High N concentrations in the biomass were related to intensive N fertilisation particularly in the case of winter wheat. In the present trials winter triticale proved to be the most favourable energy crop due to its high whole crop yield potential and its low N and Cl concentrations.

Keywords: whole grain crops, solid biofuels, ecobalance, nitrogen fertiliser

Einleitung

Von der Nutzung regenerativer Energien wird erwartet, daß sie zu einer Verringerung der gegebenen energiebedingten Umwelt- und Klimaprobleme beitragen, insbesondere durch die Reduzierung des Ausstosses an anthropogenen CO₂-Emissionen. Große Hoffnungen werden dabei in biogene Festbrennstoffe gesetzt, da sie sowohl mit verfügbarer Technik genutzt werden können als auch im Vergleich zu einer Energiebereitstellung aus fossilen Energieträgern mit vergleichsweise geringen Mehrkosten verbunden sind (EC 1997).

Jedoch ist auch eine Energiebereitstellung aus biogenen Festbrennstoffen mit Auswirkungen auf die natürliche Umwelt verbunden (KALTSCHMITT & REINHARDT 1997). Beispielsweise können beim Anbau bzw. bei der Verbrennung biogener Festbrennstoffe klimawirksame bzw. human- und ökotoxisch wirkende Emissionen freigesetzt werden (STRUSCHKA 1993, IPCC 1997). Deshalb ist es von Bedeutung, unerwünschte Spurengas- und Staubfrei-

setzungen im Verlauf des gesamten Lebensweges der Bioenergieträger (d. h. Bereitstellung und Nutzung) zu minimieren. Dazu muß jedoch der Einfluß der im Verlauf des gesamten Lebensweges beeinflussbaren Größen (z. B. Pflanzenart, N-Düngungsniveau, Verdichtungstechnik, Verbrennungstechnik, Rauchgasreinigungstechnik) auf die verschiedenen ökologischen Kenngrößen bekannt sein.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel der folgenden Ausführungen, den Einfluß bestimmter pflanzenbaulicher Größen auf Emissionen mit Klimawirksamkeit und versauernder Wirkung für eine Wärmebereitstellung aus biogenen Festbrennstoffen aus Getreideganzpflanzen (GGP), ermittelt über den gesamten Lebensweg, zu untersuchen.

Winterweizen, -roggen und -triticale eignen sich zur Produktion von Biomasse insbesondere aufgrund ihres hohen Ganzpflanzenertragspotentials. Neben der Pflanzenart werden die Erträge ebenfalls durch die Höhe der N-Düngung bestimmt (RUCKENBAUER & REICHART 1996). Dabei liegt der N-Bedarf für optimale Ganzpflanzenerträge im Vergleich zur Produktion von Brot- und Futtergetreide niedriger, da frühe N-Gaben vor allem dem Strohertrag zugute kommen (KÜBLER & HOBELBERGER 1984) und der Kornertrag, der im Wesentlichen von späten und höheren N-Gaben profitiert, nur einen Teil des Ganzpflanzenertrages ausmacht (VETTER et al. 1995). Eine Erhöhung der N-Gabe kann mit einem Anstieg der N- und K-Konzentrationen der Getreidebiomasse verbunden sein (KÜBLER & HOBELBERGER 1984). Verbrennungstechnisch und emissionsbedingt werden jedoch niedrige N- und K-Konzentrationen angestrebt (LEWANDOWSKI & KICHERER 1997). Darüber hinaus ist sowohl die Produktion als auch der Einsatz von N-Düngern mit der Entstehung von klimarelevanten Gasen sowie Gasen mit versauernder Wirkung verbunden (ENQUETE-KOMMISSION 1994). Die Optimierung der N-Düngung ist damit bezüglich des Ertrages und der Biomassequalität von Relevanz und wirkt sich letztlich auf die Umweltverträglichkeit sowohl der Bereitstellung als auch der Verbrennung aus.

In Feldversuchen an zwei Standorten wurde der Einfluß des N-Düngungsniveaus auf den Ertrag und die chemische Zusammensetzung der Ganzpflanzen von Winterweizen, -roggen und -triticale untersucht. Anhand der Ertrags- und Qualitätsdaten sowie des Betriebsmittelaufwandes und eines Emissionsmodells für die Nutzung in einem Heizwerk wurden mit Hilfe der weitgehend genormten Ökobilanzmethodik die Emissionen über den gesamte Lebensweg ermittelt.

Material und Methoden

Anlage und Durchführung von Feldversuchen

Im Jahr 1996 wurden Feldversuche mit Winterweizen (Sorte Ritmo), Wintertriticale (Sorte Trimaran) und Winterroggen (Sorte Motto) auf den Versuchsstationen der Universität Hohenheim in Hohenheim (HOH) und auf dem Ihinger Hof (IHO) durchgeführt.

HOH liegt südöstlich von Stuttgart auf einer Höhe von 400 m. Die Jahresdurchschnittstemperatur betrug im Jahr 1996 8,2 °C, die Niederschlagssumme 670 mm. Der Boden ist eine schwach pseudovergleyte Parabraunerde. Die N_{\min} -Werte zu Vegetationsbeginn lagen bei durchschnittlich 25 kg $NO_3-N\ ha^{-1}$ (0–90 cm Tiefe). Der N_T -Gehalt des Bodens betrug 0,07%. Die Vorfrucht auf dem Standort HOH war Wintergerste.

Der IHO liegt südwestlich von Stuttgart auf einer Höhe von 450 bis 508 m. Die Jahresdurchschnittstemperatur

betrug im Jahr 1996 8,0 °C, die Niederschlagssumme 599 mm. Der Boden ist eine Rendzina aus Mergel. Die N_{\min} -Werte zu Vegetationsbeginn lagen bei durchschnittlich 45 kg $NO_3-N\ ha^{-1}$ (0–90 cm Tiefe). Der N_T -Gehalt des Bodens betrug 0,08%. Die Vorfrucht auf dem Standort IHO war Winterweizen.

Auf beiden Standorten wurden im Vegetationsjahr 1996 Versuche als Spaltanlagen mit dem Hauptfaktor Getreideart (Winterweizen, -roggen, -triticale) und dem Unterfaktor Stickstoff-Düngungsniveau (0 (N0), 70 (N70) und 140 (N140) kg $N\ ha^{-1}\ a^{-1}$) in vierfacher Wiederholung angelegt. Die Größe der Versuchspartellen war 2 × 5 m in HOH und 6 × 6 m auf dem IHO. Zeitpunkte und Höhe der Betriebsmittelaufwände in den Versuchen sind in Tab. 1 angegeben.

Die Ertragsermittlung erfolgte durch einen manuellen Schnitt des Getreides in 5 cm Höhe über der Erdoberfläche. Die Wasserkonzentrationen wurden durch Trocknung von Proben bei 60 °C für 3 Tage und anschließend bei 105 °C für 3 h ermittelt. Nach dem Drusch der Probe zur Ermittlung des Korn/Stroh-Verhältnisses wurden die Korn- und Strohproben durch zwei Mahlgänge auf eine Partikelgröße von 0,2 bis 0,5 mm gemahlen. Hieraus wurden die Aschekonzentration ermittelt, indem die Proben für 3 h bei 550 °C verascht wurden. Die Stickstoff- (N) Konzentrationen wurden mittels Leco-Gerät (Prinzip nach Dumas) analysiert. Die Analyse auf Chlor (Cl) erfolgte mittels wässrigem Aufschluß und HPLC (Methode siehe LEWANDOWSKI & KICHERER 1997). Die Bestimmung der Schwefel- (S), Kohlenstoff- (C) und Wasserstoff- (H) Konzentrationen erfolgte mittels oxidativem Verbrennungsaufschluß mit einem Elementaranalysator der Firma Elementar. Die Sauerstoff- (O) Konzentration wurde dabei als Differenz zu den Konzentrationen der durch die Elementaranalyse erfassten Elemente errechnet.

Der Primärenergieertrag errechnet sich aus dem Frischmasseeertrag und dem Heizwert der Biomasse. Unter Berücksichtigung von Trockenmasseverlusten von 13,5% bei Ernte, Lagerung und Transport der Biomasse und Netzwerkverlusten von 20% bei der energetischen Umwandlung wurde die daraus resultierende Endenergie frei Hausübergabestation berechnet.

Statistische Auswertung der Feldversuche

Die Auswertung der Daten, die in den Feldversuchen erhoben wurden, erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramm-SAS (FAULBAUM et al. 1983). Folgende Parameter wurden der Auswertung unterzogen: Ganzpflanzenerträge und die Konzentrationen an Wasser, Asche, N, Cl, S, C und H. Anhand der Varianzanalyse wurden die Wechselwirkungen zwischen Standort, Getreideart und N-Düngung ermittelt. Anschließend erfolgte eine einfaktorielles Auswertung der N-Stufen innerhalb der Getreideart am jeweiligen Standort. Grenzdifferenzen wurden anhand des multiplen t-Tests berechnet.

Methodischer Ansatz zur Ökobilanzierung

Das Ziel einer Produkt-Ökobilanz ist die vergleichende Bewertung der ökologischen Vor- und Nachteile verschiedener Alternativen. Dazu wird der gesamte Lebenszyklus des untersuchten Produktes oder der analysierten Dienstleistung von der Rohstofferschließung und -gewinnung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Entsorgung und etwaigen Wiederverwertung analysiert, um alle mit diesem Produkt bzw. dieser Dienstleistung verbundenen Umwelteffekte zu erfassen. Dies gilt ebenso für alle in

Tab. 1: Maßnahmen und Betriebsmitteleinsätze in den Feldversuchen mit Winterweizen (WW), Winterroggen (WR) und Wintertriticale (WT)

Management and consumable input in the field trials with winter wheat (WW), rye (WR) and triticale (WT)

	Hohenheim	Ihinger Hof
Bodenbearbeitung	1 × Grubber + Scheibenegge (4. 08. 95) 1 × Pflug (8. 09. 95) 1 × Kreiselegge (18. 09. 95 bzw. 10. 10. 95; jeweils zur Saat)	1 × Pflug (19. 09. 95) 1 × Kreiselegge, Walze, Kreiselegge (29. 09. 95 bzw. 10. 10. 95; jeweils zur Saat) 1 × Walze (18. 04. 96)
Aussaat	WW: 160 kg ha ⁻¹ , 400 Körner m ⁻² (10. 10. 95) WR: 105 kg ha ⁻¹ , 320 Körner m ⁻² (18. 09. 95) WT: 125 kg ha ⁻¹ , 320 Körner m ⁻² (10. 10. 95)	WW : 160 kg ha ⁻¹ , 400 Körner m ⁻² (11. 10. 95) WR : 105 kg ha ⁻¹ , 320 Körner m ⁻² (29. 09. 95) WT : 125 kg ha ⁻¹ , 320 Körner m ⁻² (11. 10. 95)
N-Düngung	0, 40 bzw. 90 kg ha ⁻¹ N als KAS (25. 03. 96 1. Gabe) 0, 30 bzw. 50 kg ha ⁻¹ N als KAS (29. 04. 96 2. Gabe)	0, 40 bzw. 90 kg ha ⁻¹ N als KAS (13. 03. 96 1. Gabe) 0, 30 bzw. 50 kg ha ⁻¹ N KAS (08. 05. 96 2. Gabe)
P-Düngung	24 kg ha ⁻¹ P als Phosphatkali (31. 07. 95)	18 kg ha ⁻¹ P als Superphosphat (22. 08. 95)
K-Düngung	70 kg ha ⁻¹ K als Phosphatkali (31. 07. 95)	186 kg ha ⁻¹ K als 40er Kali (23. 10. 95)
Cl-Düngung	65 kg ha ⁻¹ Cl als Phosphatkali (31. 07. 95)	171 kg ha ⁻¹ Cl als 40er Kali (23. 10. 95)
Ca-Düngung	86 kg ha ⁻¹ als Karbokalk am 11. 7. 95	560 kg ha ⁻¹ als Hüttenkalk 1993
Pflanzenschutz	2,5 l Stomp SC + 1,5 l IPU (9. 10. 95 WR; 25. 10. 95 WW, WT)	2 × Striegeln (18. 04. 96, 24. 05. 96)
Ernte	WW 20. 8. 96 WR 5. 8. 96 WT 16. 8. 96	WW 26. 8. 96 WR 20. 8. 96 WT 20. 8. 96

diesem Lebensweg verwendeten anderen Produkte (ISO 14040 1997, EN ISO 14041 1998).

Entsprechend den vorliegenden Normen erfolgt die Erstellung einer solchen Bilanz in vier Schritten: Ziel- und Systemdefinition, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung (ISO 14040 1997, EN ISO 14041 1998).

Ziel- und Systemdefinition

Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte der Umsetzung dieses Schrittes auf die hier zu untersuchende Fragestellung dargestellt.

Zieldefinition. Ziel ist es, für eine Wärmebereitstellung aus biogenen Festbrennstoffen (in Form von Ballen) aus GGP den Einfluß von Getreideart und N-Düngungsniveau an verschiedenen Standorten auf die Emissionen an Gasen mit Klimawirksamkeit und mit versauernder Wirkung im Verlauf des gesamten Lebensweges zu untersuchen. Dies wird im Rahmen von Feldversuchen unter definierten N-Düngungsniveaus an zwei unterschiedlichen Standorten für Winterweizen, Wintertriticale und Winterroggen realisiert. Als funktionale Einheit dient die bereitgestellte Wärme frei Hausübergabestation (d. h. Nutzenergie).

Festlegung der Lebenswege. Die Bewirtschaftung der GGP sowie die Betriebsmitteleinsätze bei der Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung und im Pflanzenschutz werden bei der Beschreibung der Feldversuchsmethoden aufgeführt. Für die Bilanzierung wird angenommen, daß die Ernte der GGP durch Mähen auf Schwad und eine anschließende Pressung mit einer Quaderballenpresse bei einer Wasserkonzentration von unter 20% erfolgt. Es werden Trockenmasse (TM)-Verluste von rund 8% bei der Ernte und von weiteren 1,5% beim Pressen unterstellt

(KLEMENS 1997). Es wird weiterhin angenommen, daß die GGP-Ballen anschließend 2 km zum Hof transportiert (ca. 1% TM-Verluste) und dort gelagert werden, wobei TM-Verluste von 3% infolge von Nagetierfraß auftreten (HARTMANN 1997). Als Heizwerk wird ein Zigarrenbrenner mit einer thermischen Leistung von 3,15 MW unterstellt (Tab. 2). Es wird mit 3500 Volllaststunden 20 Jahre lang betrieben.

Systemgrenzen. Für die Bilanzierung wird der landwirtschaftliche (d. h. gute fachliche Praxis) und feuerungstechnische Standard (d. h. gesetzliche Vorgaben) in Deutschland unterstellt. Produkte, die importiert werden, werden ebenfalls entsprechend bilanziert (z. B. Düngereimport, Rohölimport). Die dabei freigesetzten Emissionen entstehen damit nicht in Deutschland, sondern in den jeweiligen Herkunftsländern; sie sind aber der produzierten Wärme anzulasten. Bezugszeitraum ist „Ende der 90er Jahre“. Die Infrastruktur (d. h. Gebäude, Straßen, Maschi-

Tab. 2: Technische Kenngrößen der Feuerungsanlage (BECHER 1998)

Technical data of the combustion unit (BECHER 1998)

Thermische Leistung	3,15 MW
Jahresnutzungsgrad	83,5% ^a
Stromverbrauch	1,5% ^b
Netzeinspeisetemperatur	80 °C
Rücklauftemperatur	40 °C
Rauchgastemperatur	90 bis 120 °C
Brennstoffverbrauch	ca. 1 t h ⁻¹ bei Vollast

^a bezogen auf den Heizwert des feuchten Brennstoffs^b bezogen auf den Energieinhalt des feuchten Biobrennstoffs

nen) wird nicht in Betracht gezogen; sie beeinflusst die Ergebnisse aller Varianten im etwa gleichen Ausmaß und verändert damit nicht die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Varianten.

Sachbilanz

In der Sachbilanz werden die in der Ziel- und Systemdefinition festgelegten Bilanzgrößen differenziert nach einzelnen Lebenswegabschnitten erhoben. Dafür wird hier die Prozeßkettenanalyse verwendet (KALTSCHMITT & REINHARDT 1997). Entsprechend der Zieldefinition werden hier die gasförmigen Emissionen mit Klimawirksamkeit und versauernder Wirkung erhoben, die im Verlauf des gesamten Lebensweges freigesetzt werden. Dies beinhaltet die Emissionen aus technischen Prozessen an CO_2 aus fossilen Energieträgern (das bei der Verbrennung von Biomasse freigesetzte CO_2 wird als nicht zusätzlich klimawirksam angesehen, da es zuvor beim Pflanzenwachstum der Atmosphäre entzogen wurde), CH_4 , N_2O , HCl , NH_3 , NO_x und SO_2 . Im Folgenden werden die Freisetzungen aus den wesentlichen Emissionsquellen diskutiert.

Emissionen aus biologischen Prozessen. NH_3 , N_2O und NO werden u. a. aus biologischen Prozessen freigesetzt:

Ammoniak wird im Mittel zu rund 2% des applizierten Mineraldüngers, bezogen auf den durchschnittlichen deutschen Standarddünger, in Form von NH_3 , freigesetzt (ISERMANN 1994).

Nach BOWMAN et al. (1993) hängt die N_2O -Emission hauptsächlich von der Höhe der Stickstoffdüngung ab und kann mit 1,25% des gedüngten Stickstoff angesetzt werden.

Stickstoffoxide entstehen in Böden vor allem durch mikrobielle Prozesse der Nitrifikation und Denitrifikation (WILLIAMS et al. 1992, BEESE 1994). Hier wird von einem Emissionsfaktor für NO-N von ca. 0,6% des Dünger-N ausgegangen (nach BEESE 1994).

Emissionen aus der Feuerungsanlage. Emissionen aus Feuerungen werden aus den jeweiligen Inhaltsstoffen unter Berücksichtigung der entsprechenden Feuerungstechnik und der vorhandenen Rauchgasreinigung modelliert (BECHER 1998).

SO_2 -Emissionen werden anhand der S-Konzentrationen im Brennstoff und der zu erwartenden Ascheeinbindung errechnet.

HCl -Emissionen werden ebenfalls unter Berücksichtigung der Cl-Konzentrationen im Brennstoff modelliert.

Die NO_x -Emissionen werden hier nur in Abhängigkeit von der N-Konzentration des zugeführten Brennstoffs abgeschätzt und einheitlich als NO_2 ausgewiesen.

Die CH_4 -Emissionen werden hier als näherungsweise als konstant angenommen.

Da die N_2O -Bildung bei der Verbrennung bisher kaum bekannt ist (SCHOLZ & GLÄSER 1997), werden – für eine für den jeweiligen Brennstoff optimierte Feuerungsanlage – unabhängig vom Feuchtegehalt und den Elementargehalten der Ganzpflanzen die gleichen spezifischen N_2O -Emissionen angenommen.

Emissionen aus vorgelagerten Ketten. Produktion und Nutzung von GGP ist nur auf der Basis des Einsatzes von Betriebsmitteln wie Saatgut und Düngemitteln möglich. Zusätzlich werden Maschinen zur Bodenbearbeitung, Bestandespflege und Ernte benötigt. Der Einsatz derartiger Betriebsmittel ist, ebenso wie beispielsweise die Transporte der Bioenergieträger zur Feuerungsanlage, mit entsprechenden Emissionen verbunden. Sie werden hier aus Literaturwerten abgeleitet (FRITSCHKE et al. 1994, FRISCH-

KNECHT et al. 1996, KALTSCHMITT & REINHARDT 1997, RAUSCH et al. 1999).

Fossile Referenz. Als fossile Referenz wird leichtes Heizöl (mit 0,17 Gewicht-% S) herangezogen. Für die Wärmebereitstellung mit leichtem Heizöl wurden 124 kg CO_2 -Äquivalente GJ^{-1} und 286 g SO_2 -Äquivalente GJ^{-1} ermittelt, wieder bezogen auf die Wärme frei Hausübergabestation (siehe FRITSCHKE et al. 1994, FRISCHKNECHT et al. 1996, RAUSCH et al. 1999).

Wirkungsabschätzung

Bei der Wirkungsabschätzung werden die in der Ziel- und Systemdefinition festgelegten Umweltwirkungen bestimmt. Die in der Sachbilanz ermittelten Emissionen werden hier unter der Wirkungskategorie „Zusätzlicher anthropogener Treibhauseffekt“ und „Versauerung von Böden und Gewässern“ zusammengefaßt. Diese einzelnen Wirkungskategorien sind wie folgt definiert.

Zusätzlicher anthropogener Treibhauseffekt. Hier treten als direkt klimarelevante Spurengasemissionen vor allem CO_2 aus fossilen Energieträgern, CH_4 und N_2O auf (LAMMEL & GRASSL 1995). Aufgrund der unterschiedlichen Klimawirksamkeit der einzelnen Stoffe werden die jeweiligen Emissionen in CO_2 -Äquivalente überführt. Bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren und die in Deutschland gegebenen Verhältnisse werden dazu die direkt klimawirksamen CH_4 -Emissionen mit dem Faktor 21 kg CO_2 kg^{-1} CH_4 , die N_2O -Emissionen mit 310 kg CO_2 kg^{-1} N_2O nach HOUGHTON (1996) gewichtet.

Versauerung von Böden und Gewässern. Spurengasfreisetzungen mit versauernder Wirkung treten im wesentlichen als SO_2 , NO_x , NH_3 und HCl auf. Diese Stofffreisetzungen werden zu SO_2 -Äquivalenten zusammengefaßt (d. h. NO_x : 0,70 kg SO_2 kg^{-1} NO_2 , NH_3 : 1,88 kg SO_2 kg^{-1} NH_3 , HCl : 0,88 kg SO_2 kg^{-1} HCl (HEIJUNGS 1992)).

Ergebnisse

Ertrag und Qualität der Getreideganzpflanzen

Die Erträge und damit das nutzbare Energieaufkommen wurden im Wesentlichen durch die Höhe der N-Düngung beeinflusst (Tab. 3). Im Mittel über alle Getreidearten und die beiden Standorte stiegen die TM-Erträge von 8,59 t bei N0 auf 14,39 t TM bei N140 an. Eine signifikante Wechselwirkung wurde zwischen Standort und N-Düngung ermittelt (Tab. 3). Bei allen Getreidearten lag das Ertragsniveau auf den N0-Parzellen am Standort IHO deutlich höher als in HOH. Dasselbe galt für Winterweizen und Wintertriticale bei N70. Das Ertragsniveau lag um 1,43 t TM auf dem Standort IHO höher als in HOH. Zwischen den Getreidearten gab es, im Mittel über beide Standorte, keine signifikanten Ertragsunterschiede, wobei Wintertriticale tendenziell das höchste Ertragsniveau aufwies. Es bestand eine Wechselwirkung zwischen Getreideart und Standort. Während Winterroggen, gemittelt über alle N-Stufen, auf beiden Standorten ein ähnliches Niveau aufwies, lag der Ertrag von Winterweizen auf dem IHO um durchschnittlich 2,4 t und der von Wintertriticale um 1,7 t TM höher als in HOH.

Die Wasserkonzentrationen unterschieden sich im Mittel über alle Varianten nicht signifikant zwischen den Standorten und den Getreidearten, es wurde aber eine Wechselwirkung zwischen Standort und Getreideart ermittelt (Tab. 3). Winterweizen wies auf dem Standort IHO höhere Wasserkonzentrationen als in HOH auf, während

Tab. 3: Varianzanalyse für den Trockenmasse (TM)-Ertrag sowie die chemische Zusammensetzung der Biomasse der Wintergetreidearten 1996 an den Standorten Hohenheim (HOH) und Ihinger Hof (IHO)

Analysis of variance for dry matter (TM) yield and chemical composition of the biomass of three winter cereals in 1996 at the locations Hohenheim (HOH) and Ihinger Hof (IHO)

	TM- Ertrag	Wasser- Konz. ¹	Asche- Konz.	N- Konz.	Cl- Konz.	S- Konz.	C- Konz.	H- Konz.	O- Konz.
Standort	***	n.s.	***	***	***	n.s.	***	***	***
Getreideart	n.s.	n.s.	***	***	***	n.s.	***	n.s.	n.s.
Standort × Getreideart	**	***	***	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
N-Düngung	***	***	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Standort × N-Düngung	***	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Getreideart × N-Düngung	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Standort × Getreideart × N-Düngung	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.

* signifikant für $p < 0,05$; ** signifikant für $p < 0,01$; *** signifikant für $p < 0,001$; n.s. nicht signifikant¹ Konz. = Konzentration

Tab. 4: Trockenmasse (TM)-Ertrag sowie chemische Zusammensetzung der Biomasse der Wintergetreidearten 1996 an den Standorten Hohenheim (HOH) und Ihinger Hof (IHO)

Dry matter (TM) yield and chemical composition of the biomass of three winter cereals in 1996 at the locations Hohenheim (HOH) and Ihinger Hof (IHO)

	TM [t ha ⁻¹]	Wasser [% d. FM]	Asche	N	Cl	S – [% d.TM] –	C	H	O
Winterweizen (HOH)									
0 kg N ha ⁻¹	6,42	13,9	3,83	0,91	0,14	0,06	43,5	5,3	46,0
70 kg N ha ⁻¹	11,14	19,1	4,04	0,96	0,17	0,06	43,6	5,2	45,7
140 kg N ha ⁻¹	14,26	17,8	3,72	1,24	0,15	0,07	43,7	5,3	45,5
GD 0,05	1,50	2,6	0,30	0,08	0,02	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Winterweizen (IHO)									
0 kg N ha ⁻¹	10,66	19,8	4,51	1,02	0,24	0,07	44,2	5,3	44,6
70 kg N ha ⁻¹	13,89	29,1	4,82	1,16	0,32	0,12	44,4	5,4	43,7
140 kg N ha ⁻¹	14,46	32,0	4,85	1,38	0,31	0,09	44,3	5,3	43,6
GD 0,05	2,80	7,5	n.s.	0,08	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Winterroggen (HOH)									
0 kg N ha ⁻¹	7,25	20,8	3,55	0,69	0,34	0,06	44,4	5,1	45,6
70 kg N ha ⁻¹	12,68	27,3	3,40	0,78	0,29	0,06	44,3	5,2	45,8
140 kg N ha ⁻¹	14,46	33,2	3,34	1,01	0,25	0,07	44,5	5,3	45,3
GD 0,05	1,03	8,0	n.s.	0,12	0,07	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Winterroggen (IHO)									
0 kg N ha ⁻¹	9,82	17,6	3,62	0,82	0,27	0,06	45,4	5,3	44,5
70 kg N ha ⁻¹	11,72	19,6	3,37	0,96	0,24	0,06	45,2	5,4	44,6
140 kg N ha ⁻¹	13,56	16,0	3,44	1,05	0,30	0,06	45,4	5,3	44,3
GD 0,05	2,58	n.s.	n.s.	0,07	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Wintertriticale (HOH)									
0 kg N ha ⁻¹	6,61	20,1	3,69	0,80	0,14	0,06	44,0	5,3	45,7
70 kg N ha ⁻¹	12,64	20,4	3,88	0,89	0,12	0,07	44,0	5,3	45,7
140 kg N ha ⁻¹	15,29	23,0	3,78	1,06	0,12	0,07	43,9	5,3	45,9
GD 0,05	1,49	2,60	n.s.	0,04	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Wintertriticale (IHO)									
0 kg N ha ⁻¹	10,76	14,8	3,65	0,89	0,16	0,06	44,6	5,4	45,2
70 kg N ha ⁻¹	14,50	20,8	3,70	1,02	0,21	0,11	44,8	5,3	44,7
140 kg N ha ⁻¹	14,31	14,5	3,49	1,16	0,21	0,07	44,8	5,4	44,8
GD 0,05	3,74	n.s.	n.s.	0,10	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Wintergetreidearten im Mittel über beide Standorte und alle N-Stufen									
Winterweizen	11,81	21,9	4,29	1,11	0,22	0,08	44,0	5,3	44,9
Winterroggen	11,58	22,4	3,45	0,89	0,28	0,06	44,8	5,3	45,0
Wintertriticale	12,35	18,9	3,70	0,97	0,16	0,07	44,3	5,3	45,3
GD 0,05	n.s.	n.s.	0,44	0,07	0,06	n.s.	0,2	n.s.	n.s.
Standorte im Mittel über alle Wintergetreidearten und alle N-Stufen									
Hohenheim (HOH)	11,19	21,7	3,69	0,93	0,19	0,07	44,0	5,3	45,7
Ihinger Hof (IHO)	12,63	20,5	3,94	1,05	0,25	0,08	44,8	5,4	44,4
GD 0,05	1,34	n.s.	n.s.	0,05	0,04	n.s.	0,11	0,04	0,31
N-Stufen im Mittel über beide Standorte und alle Wintergetreidearten									
0 kg N ha ⁻¹	8,59	17,8	3,81	0,86	0,21	0,06	44,3	5,3	45,3
70 kg N ha ⁻¹	12,76	22,7	3,87	0,96	0,23	0,08	44,4	5,3	45,0
140 kg N ha ⁻¹	14,39	22,7	3,77	1,15	0,22	0,07	44,4	5,3	44,9
GD 0,05	2,05	4,8	n.s.	0,07	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

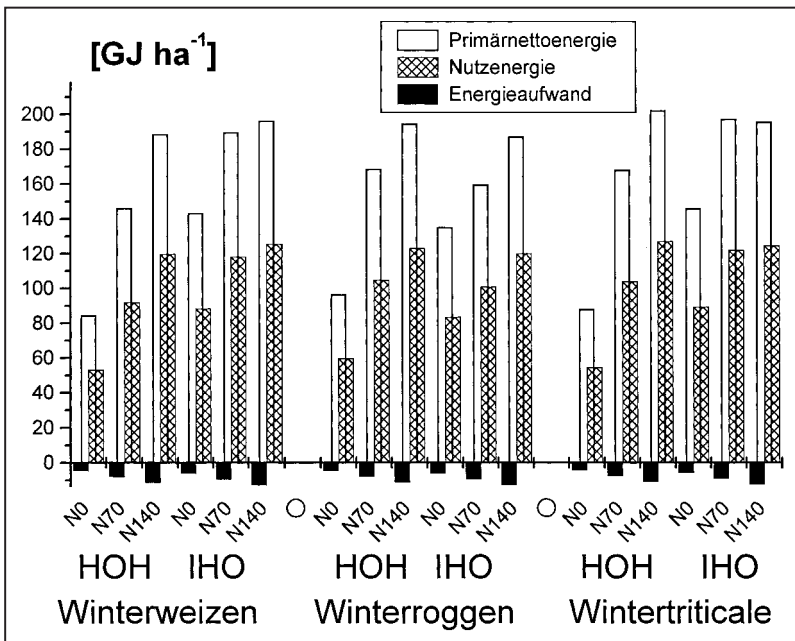


Abb. 1: Bruttoenergieerträge und Energieaufwand (dargestellt als negative Energieerträge) für die Ganzpflanzen von drei Wintergetreidearten bei drei N-Düngungsstufen an den Standorten Hohenheim (HOH) und Ihinger Hof (IHO)

Gross energy yields and energy expense (presented as negative energy yields) for the whole grain crops of three winter cereals on three N fertiliser levels at the locations Hohenheim (HOH) and Ihinger Hof (IHO)

für Winterroggen und -triticale höhere Wasserkonzentrationen auf dem Standort HOH gemessen wurden. Die Asche- und N-Konzentrationen von Winterweizen lagen auf beiden Standorten und bei allen N-Düngungsstufen, höher als die entsprechenden Konzentrationen in Winterroggen und -triticale (Tab. 4). Winterroggen zeichnete sich durch die höchsten, Wintertriticale durch die niedrigsten Cl-Konzentrationen aus. Die S-Konzentrationen unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Getreidearten. Die C-, H- und O-Konzentrationen unterschieden sich signifikant zwischen den Standorten, die C-Konzentrationen auch zwischen den Getreidearten. Diese Unterschiede lagen mit maximal 1,8% für C und H und 2,9% für O auf sehr niedrigem Niveau.

Die Erhöhung der N-Düngung führte bei allen Getreidearten zur signifikanten Zunahme der N-Konzentration in der Biomasse, wobei die N-Konzentration von Winterroggen in HOH stärker zunahm als auf dem IHO. Die Wasserkonzentrationen wurden am Standort HOH für alle Getreidearten sowie am Standort IHO für Weizen signifikant durch die N-Düngung erhöht. Die anderen Inhaltsstoffe blieben von der N-Düngung weitgehend unbeeinflusst. Auf dem IHO stiegen die Cl-Konzentrationen von Weizen leicht mit zunehmender N-Düngung an während sie bei Roggen deutlich abnahmen (Tab. 4).

Winterweizen und -triticale zeichneten sich durch höhere Cl-Konzentrationen am Standort IHO aus. Die N-Konzentration von Winterweizen und -roggen lagen in allen Düngungsstufen ebenfalls am Standort IHO höher. Dasselbe gilt für die Aschekonzentrationen von Winterweizen. Allerdings zeigte die Varianzanalyse nur für die Cl-Konzentrationen eine Wechselwirkung zwischen Standort und Getreideart (Tab. 3). Damit wurden die aus verbrennungstechnischer Sicht relevanten Inhaltsstoffe der Biomasse auch signifikant durch die jeweiligen Standortgegebenheiten beeinflusst.

Das erzielbare Primärenergieaufkommen der verschiedenen Wintergetreide lag zwischen 84 und 202 MJ ha⁻¹. Davon ist – werden die im Methodenkapitel angegebenen Verluste von 13,5% der TM bei Ernte, Transport und Lagerung berücksichtigt – eine Endenergie zwischen 61 und 145 GJ ha⁻¹ frei Heizwerk verfügbar. Bei Verteilverlusten von 20% entspricht dies einer Nutzenergie frei Hausübergabestation zwischen 48 und 116 GJ ha⁻¹ (Abb. 1).

Die Energieaufwendungen nahmen mit steigender N-Düngung von 4,2 auf 12,8 GJ ha⁻¹ zu. Da, mit Ausnahme von Wintertriticale auf dem IHO bei N140, die Bruttoenergieerträge erheblich stärker zunahm als der durch die N-Düngung bedingte zusätzliche Energieaufwand, führte die Steigerung der N-Düngung zu ansteigenden Nettoenergieerträgen. Die höchsten Nettoenergieerträge wurden mit 191 GJ von Wintertriticale bei einer Düngung von 140 kg N in HOH geerntet.

Ökobilanzergebnisse

Ausgehend von den bei den Methoden definierten Randbedingungen und den in Tab. 4 beschriebenen Brennstoffcharakteristika werden im Folgenden die Ergebnisse der Ökobilanzen dargestellt. Dabei wird jeweils unterschieden zwischen den Emissionen, die in der Phase der Bereitstellung der GGP (Produktion einschließlich vorgelagerter Ketten, Ernte, Transport und Lagerung) entstanden und denjenigen, die in der Phase der Verbrennung der Biomasse entstanden.

CO₂-Äquivalente

Aufgrund der noch nicht vollständig bekannten Zusammenhänge zwischen der Konzentration der verschiedenen Inhaltsstoffe in der Biomasse und der Menge der bei der Verbrennung entstehenden N₂O- und CH₄-Emissionen wurden diese Emissionen als konstant unterstellt (siehe Methodenkapitel); vereinbarungsgemäß wurde das bei der Biomasseverbrennung emittierte CO₂ nicht berücksichtigt. Daher unterschieden sich die während des Verbrennungsprozesses entstehenden CO₂-Äquivalente von 5,5 kg GJ⁻¹ Nutzenergie nicht für die verschiedenen Varianten der GGP-Produktion (Abb. 2). Sie resultierten im Wesentlichen (> 60%) aus den Emissionen des konventionellen Kraftwerksparks, der die elektrische Energie zum Betrieb des Heizwerks bereitstellt.

Die aus der Bereitstellung der Biomasse resultierenden CO₂-Äquivalente variierten in Abhängigkeit von der N-Düngungsstufe zwischen 4,6 (bei N0) und 22,6 kg GJ⁻¹ (bei N140). Damit nahmen die bei der Verbrennung freigesetzten Treibhausgasemissionen zwischen 18 und 53% der im Verlauf des gesamten Lebensweges der GGP frei

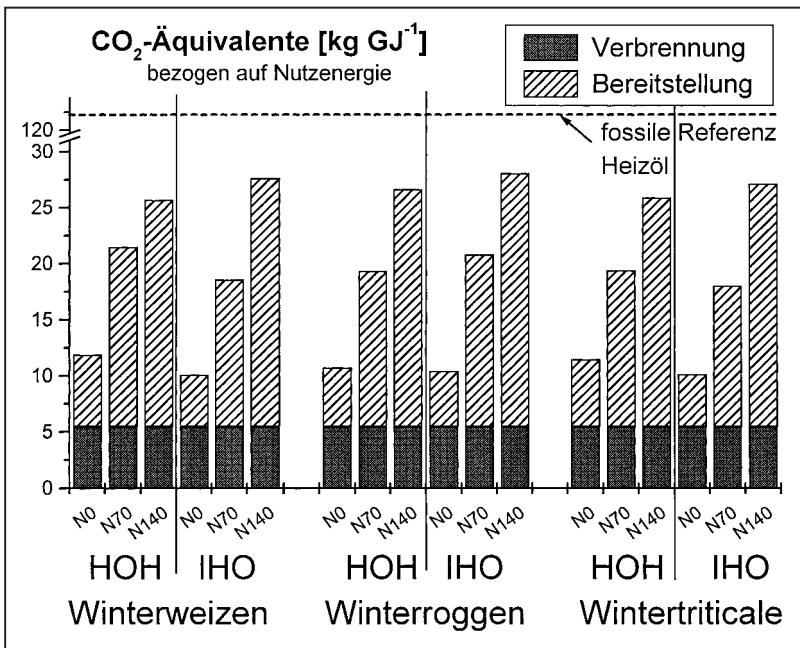


Abb. 2: CO₂-Äquivalente, errechnet für die Bereitstellung und Verbrennung der Ganzpflanzen von drei Wintergetreiden bei drei N-Düngungsstufen an den Standorten Hohenheim (HOH) und Ihinger Hof (IHO)

CO₂ equivalents calculated for the provision and combustion of whole grain crops of three winter cereals on three N fertilizer levels at the locations Hohenheim (HOH) and Ihinger Hof (IHO)

gesetzten CO₂-Äquivalente ein. Im Vergleich zu Heizöl mit 124 kg GJ⁻¹ lagen die CO₂-Äquivalente, die für die Wärmebereitstellung mittels GGP errechnet wurden, deutlich niedriger.

Die Emissionen an klimawirksamen Spurengasen je GJ Nutzenergie wurden im Wesentlichen durch die N-Düngungshöhe bestimmt. Beispielsweise wurden beim Winterroggenanbau die CO₂-Äquivalente bei einer N-Düngung von 70 kg ha⁻¹ zu 52 bis 60% und bei 140 kg ha⁻¹ zu 66 bis 72% durch den eingesetzten N-Dünger bestimmt. Der Dieserverbrauch durch landwirtschaftliche Maschinen und durch Ernte- und Transportprozesse verursachte dagegen nur 6,8% (bei N140) bis 25,5% (bei N0) der gesamten Treibhausgasemissionen (Abb. 3). Der Herbizideinsatz am Standort HOH verursachte mit 2,3 (N0) bzw. 0,6% (N140) nur einen geringen Anteil der Treibhausgasemissionen.

Die Unterschiede in den energiebezogenen CO₂-Äquivalenten zwischen den verschiedenen Getreidearten und an den zwei Standorten resultierten vor allem aus den Ertragsunterschieden. Da die Getreidearten bei gleicher N-Düngung ein ähnliches Ertragsniveau aufwiesen, unterschieden sich die Emissionen zwischen den unterschiedlichen Getreidearten nur wenig voneinander; dies gilt insbe-

sondere für den Standort HOH. Auf dem IHO bildeten Triticale und Weizen höhere TM-Erträge bei der mittleren und hohen N-Düngungsstufe und wiesen damit geringere CO₂-Äquivalente je GJ Nutzenergie als Roggen auf. Die geringsten Treibhausgasemissionen je GJ Nutzenergie waren für alle Getreidearten bei den Varianten ohne N-Düngung gegeben. Besonders gering waren die Emissionen bei den Varianten Triticale und Weizen auf dem Standort IHO, da sie ohne eine N-Düngung 10,8 bzw. 10,7 t TM bildeten und damit 146 bzw. 143 GJ ha⁻¹ Primärenergie bereitstellten.

SO₂-Äquivalente

Aus der Bereitstellung und Verbrennung von GGP wurden zwischen 188 und 301 g GJ⁻¹ SO₂-Äquivalente freigesetzt (Abb. 4). Im Gegensatz zu den CO₂-Äquivalenten wurden sie bei einem Anteil von 76 bis 86% hauptsächlich durch die Verbrennung der Biomasse im Heizwerk dominiert. Dabei bestand für die verbrennungsbedingten Emissionen an NO_x, HCl und SO₂ ein nahezu direkter Zusammenhang zwischen den N-, Cl- und S-Konzentrationen der Biomasse und der Höhe der resultierenden Stofffreisetzungen.

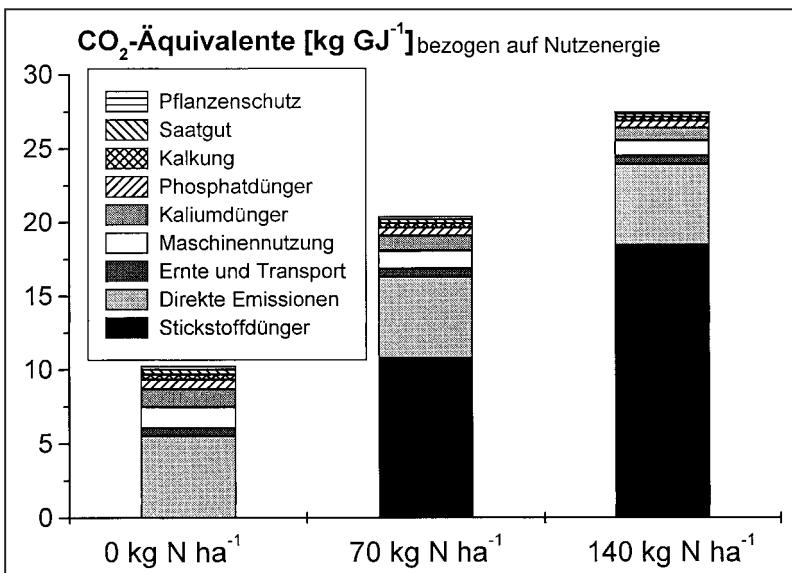


Abb. 3: Anteile verschiedener Prozesse der Getreideproduktion an der Freisetzung klimawirksamer Spurengase, exemplarisch dargestellt am Beispiel von Winterroggen auf dem Standort Ihinger Hof (IHO) bei einer Düngung von 0, 70 und 140 kg N ha⁻¹

Contributions of different processes of cereal production to the release of climatically relevant gases, shown exemplary for winter rye at the location Ihinger Hof (IHO) at N fertilizer amounts of 0, 70 and 140 kg N ha⁻¹

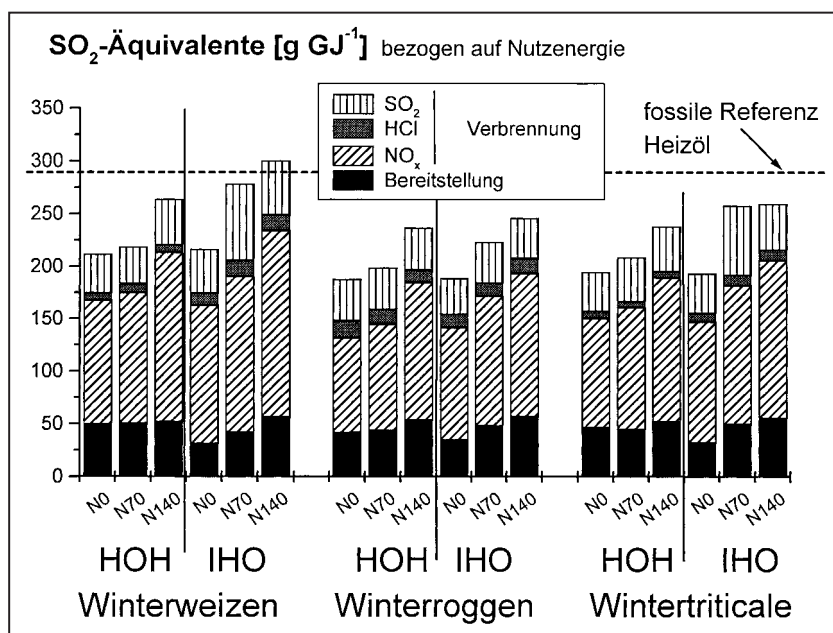


Abb. 4: SO₂-Äquivalente, errechnet für die Bereitstellung und Verbrennung der Ganzpflanzen von drei Wintergetreiden bei drei N-Düngungsstufen an den Standorten Hohenheim (HOH) und Ihinger Hof (IHO)

SO₂ equivalents calculated for the provision and combustion of whole grain crops of three winter cereals on three N fertiliser levels at the locations Hohenheim (HOH) and Ihinger Hof (IHO)

Rund 62 bis 76% der bei der Verbrennung entstehenden SO₂-Äquivalente resultierten aus den NO_x-Emissionen. Die HCl-Emissionen hatten mit 3 bis 11% im Vergleich dazu einen nur geringen Anteil und 21 bis 32% der bei der Verbrennung entstehenden SO₂-Äquivalente waren den SO₂-Emissionen zuzurechnen. Die NH₃-Emissionen trugen mit 0,001 g GJ⁻¹ kaum zu den SO₂-Äquivalenten aus der Biomasseverbrennung bei und wurden daher in Abb. 4 nicht dargestellt.

Mit einem Anstieg der N-Düngung von 0 auf 140 kg ha⁻¹ stieg die N-Konzentration von Winterweizen in HOH von 0,91 auf 1,24% der TM (Tab. 4); dadurch stiegen die NO_x-Emissionen aus der Verbrennung von 118 auf 161 g GJ⁻¹. Auch stiegen entsprechend den Unterschieden in den N-Konzentrationen die NO_x-Emissionen von Roggen über Triticale zu Weizen an; im Vergleich zu Weizen lagen sie bei Roggen um 20% und bei Triticale um 9% niedriger.

Die Cl-Konzentrationen der Biomassen wurden durch die N-Düngung meist nicht signifikant beeinflusst. Lediglich in HOH gab es einen geringfügigen An- oder Abstieg der Cl-Konzentrationen mit zunehmender N-Düngung (Tab. 4). Ebenso wurden die S-Konzentrationen nicht signifikant durch die N-Düngung beeinflusst; damit ergaben sich auch keine Veränderungen der HCl- und SO₂-Emissionen in Abhängigkeit der N-Düngung.

Die HCl-Emissionen variierten erheblich in Abhängigkeit von der gewählten Getreideart, da Roggen bzw. Weizen durchschnittlich 75 bzw. 38% höhere Cl-Konzentrationen als Triticale aufwies. Des Weiteren lag für die Cl-Konzentrationen eine signifikante Wechselwirkung zwischen Getreideart und Standort vor (Tab. 3). So wies Weizen auf dem IHO genauso hohe Cl-Konzentrationen auf wie Roggen; in HOH lagen dagegen die Cl-Konzentrationen von Weizen erheblich unter denen von Roggen.

Für alle Getreidearten und auf beiden Standorten lagen die S-Konzentrationen bei durchschnittlich 0,06 bis 0,08% der TM. Lediglich auf dem IHO wurden nach einer Düngung von 70 kg N ha⁻¹ zu Weizen und zu Triticale bis zu 0,12% S gefunden (Tab. 4). Dies bedingte für diese Varianten SO₂-Emissionen von 68 bis 71 g GJ⁻¹. Im übrigen bewegten sich die SO₂-Emissionen, unabhängig von Getreideart und Standort, zwischen 34 und 51 g GJ⁻¹.

Ein Teil der Emissionen mit versauernder Wirkung aus dem Lebenswegabschnitt „Bereitstellung“ resultierte aus dem Dieserverbrauch der für Saat bis einschließlich Ernte und Transport benötigten Maschinen. Bezogen auf die gesamten bei der Bereitstellung freigesetzten Emissionen, beispielsweise bei Roggen, trugen derartige Emissionsquellen zu rund 47% bei N0, ca. 35% bei N70 und knapp 26% bei N140 (IHO) bei. Zusätzlich trug der eingesetzte N-Dünger zu den Freisetzungen bei der Bereitstellung von Winterroggen mit rund 53% bei N70 und ca. 67% bei N140 (IHO) bei. Dabei können mit zunehmender N-Düngung die im Verlauf der Bereitstellung freigesetzten SO₂-Äquivalente sowohl zunehmen (z. B. Weizen auf dem IHO) als auch etwa konstant bleiben (z. B. Weizen in HOH) (Abb. 4). Dies resultierte aus zwei gegenläufigen Tendenzen. Da der Maschineneinsatz sich bei den verschiedenen Varianten kaum unterschied, gingen einerseits die Anteile der daraus resultierenden SO₂-Äquivalente um so stärker zurück, je höher der flächenbezogene Ertrag war. Andererseits stiegen gleichzeitig die aus der Produktion der N-Dünger resultierenden SO₂-Äquivalente. Damit waren – bezogen auf die bereitgestellte Nutzenergie – die mit steigender N-Düngung freigesetzten SO₂-Äquivalente um so niedriger, je höher durch die zusätzliche N-Gabe der Ertrag anstieg.

Im Vergleich zur Bereitstellung und Nutzung von Heizöl, der 286 g GJ⁻¹ zugerechnet wurden, lagen die SO₂-Äquivalente aus der Bereitstellung und Nutzung von GGP meist niedriger. Um 5 g GJ⁻¹ wurden die SO₂-Äquivalente von Weizen bei einer Düngung von 140 kg N ha⁻¹ am Standort IHO gegenüber Heizöl überschritten. Bei den anderen GGP-Varianten lagen die SO₂-Äquivalente um 13 bis 99 g GJ⁻¹ niedriger im Vergleich zu Heizöl (Abb. 4).

Diskussion

Einfluß pflanzenbaulicher Maßnahmen auf CO₂-Äquivalente

Die im Verlauf des gesamten Lebensweges freigesetzten CO₂-Äquivalente von Getreideganzpflanzen zur Wärmebereitstellung wird primär vom Energieaufwand für die Pflanzenproduktion bestimmt. Der größte Anteil davon resultiert aus der Herstellung der eingesetzten N-Dünger

(KALTSCHMITT & REINHARDT 1997, SCHOLZ & GLÄSER 1997, MAIER et al. 1998). Verglichen damit sind andere Emissionsquellen von untergeordneter Bedeutung.

Eine Erhöhung der N-Düngung bedingt – bezogen auf die bereitgestellte Nutzenergie – immer ein Ansteigen der CO_2 -Äquivalente, gleichzeitig nehmen aber bis zu einer bestimmten N-Düngermenge flächenbezogen die TM-Erträge und damit der flächenspezifische Energieertrag zu. Für eine Optimierung der zu verabreichenden N-Menge würde sich hierbei die Ermittlung eines Grenznutzens anbieten. Dieser Grenznutzen könnte nach KARPENSTEIN-MACHAN (1997), die den Grenznutzen des Einsatzes von Herbiziden und Fungiziden betrachtete, beispielsweise für den Energiezuwachs ermittelt werden. Hiernach sollte der durch eine zusätzliche N-Gabe gewonnene Energiezuwachs mindestens dem Energieaufwand zur Bereitstellung und Ausbringung der zusätzlichen N-Menge entsprechen. Analog könnte ein Grenznutzen für die CO_2 -Äquivalente ermittelt werden, wobei die Emissionen an CO_2 -Äquivalenten die der zusätzlichen N-Gabe anzulasten sind, höchstens dem CO_2 -Einsparungspotential der zusätzlich produzierten Biomasse entsprechen sollten. Wird leichtes Heizöl substituiert, sollte, nach den hier zugrunde gelegten Daten, je gedüngtem kg N mindestens ein Mehrertrag von 161 MJ Nettoenergie produziert werden, damit die durch diesen Düngeraufwand verursachten CO_2 -Emissionen nicht höher liegen als die Menge an CO_2 -Emissionen, die eingespart werden könnten. Dies entspricht einem Mehrertrag von ca. 12 kg Ganzpflanzen-TM bei einer Wasserkonzentration von 15%. Eine zusätzliche N-Gabe von 70 kg N müßte dementsprechend einen Ertragszuwachs von mindestens 0,84 t TM bringen. Diese Bedingung wurde bei einer N-Düngung von 70 kg N ha^{-1} von allen Getreidearten an beiden Standorten, bei einer Düngung von 140 kg N ha^{-1} jedoch nur auf dem Standort HOH erfüllt. Auf dem Standort IHO bildeten Winterweizen und -triticale bei N140 gegenüber N70 nur Mehrerträge von 0,57 t TM bzw. leichte Mindererträge (Unterschiede nicht signifikant, Tab. 4), so daß bei diesen Varianten kein positiver Grenznutzen der N-Düngung erreicht wurde.

Zur Minimierung der CO_2 -Emissionen sollte ein möglichst hoher Energieertrag je eingesetzter Energieeinheit erreicht werden. Hierzu sollte eine Pflanze mit einem für den Standort hohen Ertragspotential ausgewählt werden. Diesbezüglich zeigte Triticale an beiden Standorten einen leichten Vorteil, da er hohe Erträge bildete und so die auf die Nutzenergie bezogenen CO_2 -Äquivalente für die Bereitstellung etwas geringer waren.

Einfluß pflanzenbaulicher Maßnahmen auf SO_2 -Äquivalente

Nach dem hier zugrunde gelegten Emissionsmodell werden die bei der Verbrennung entstehenden SO_2 -Äquivalente direkt aus der chemischen Zusammensetzung der Biomasse abgeleitet. Hiernach stiegen die auf die bereitgestellte Nutzenergie bezogenen SO_2 -Äquivalente mit zunehmenden N-, S- und Cl-Konzentrationen in der Biomasse. Da Roggen durch die niedrigsten N-Konzentrationen gekennzeichnet war, lagen hier die NO_x -Emissionen im Vergleich zu Weizen um durchschnittlich 25% niedriger.

Die N-Konzentrationen der Biomasse können vom Pflanzenproduzenten vornehmlich über die Höhe und den Zeitpunkt der N-Gabe beeinflusst werden. Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde auf eine N-Spät Düngung verzichtet, da diese nur geringfügig den Ertrag, aber erheblich die N-Konzentrationen, vor allem der Körner, erhöht (KÜBLER & HOBELBERGER 1984). Neben der

N-Düngung hatte die standortspezifische N-Nachlieferung aus dem Boden Einfluß auf die N-Konzentrationen der Biomasse. Die höheren N_{\min} -Werte und N_t -Gehalte des Boden am Standort IHO sowie die hohen N-Entzüge ($8-109 \text{ kg N ha}^{-1}$) durch die GGP auf den NO-Parzellen lassen darauf schließen, daß hier den Getreidebeständen höhere N-Mengen zur Verfügung standen. Hierdurch wurde eine zusätzliche mineralische N-Düngung vor allem in höhere N-Konzentrationen umgesetzt und wirkte sich geringfügiger auf die TM-Ertragszuwächse aus als in HOH.

Nach RUCKENBAUER & REICHART (1996) sowie ALBRECHT (1997) kann bei GGP nur eine marginale Verringerung der S-Konzentration durch eine verminderte N-Düngung erreicht werden. Diese beträgt bei ALBRECHT (1997) – vergleichbar zu der vorliegenden Untersuchung – lediglich ca. 0,01 Prozentpunkte. Durch die Düngung oder Wahl der Getreideart konnten die S-Konzentrationen der Biomasse nicht signifikant beeinflusst werden. Das hohe Niveau der S-Konzentrationen von Winterweizen und -triticale bei einer N-Düngung von 70 kg ha^{-1} auf dem IHO, welches zu vergleichsweise hohen Emissionen an SO_2 -Äquivalenten führte (siehe Abb. 4), ließ sich nicht erklären.

Wie die Ergebnisse der Ökobilanz gezeigt haben, trägt Cl im Vergleich zu N und S nur zu einem geringen Anteil zur Entstehung der SO_2 -Äquivalente bei (Abb. 4). Die Relevanz des Inhaltsstoff Cl resultiert, neben verbrennungstechnischen Problemen (Korrosion) vor allem aus seinem Beitrag zur Entstehung anderer umweltrelevanter Emissionen wie HCl, Dioxinen oder Furanen (OBERNBERGER 1998). Für die Cl-Konzentrationen wurden, neben signifikanten Unterschieden zwischen den Getreidearten, auch signifikante Standorteinflüsse beobachtet (Tab. 3). Während in den vorliegenden Versuchen Winterroggen die höchsten und Winterweizen die niedrigsten Cl-Konzentrationen aufwies, zeigten Untersuchungen anderer Autoren (VETTER et al. 1995, RUCKENBAUER & REICHART 1996), daß Triticale sich im Vergleich zu Weizen durch höhere, Roggen durch niedrige Cl-Konzentrationen auszeichnen kann. Die Cl-Konzentrationen der Biomasse von GGP unterliegen vielfältigen Einflüssen. Von einem positiven Zusammenhang zwischen der Menge an gedüngtem Cl und den Cl-Konzentrationen der Biomasse von Getreide berichten VETTER et al. (1995), WIECK-HANSEN (1996) und MAIER et al. (1998). Des Weiteren werden Chloride durch Niederschläge aus der abgereiften Biomasse ausgewaschen, so daß die Cl-Konzentrationen der Biomassen von GGP ebenfalls durch den Reifegrad (abgeleitet aus dem Restwassergehalt), insbesondere des Strohs, beeinflusst werden (BAKKER & JENKINS 1996, SANDER 1996, WIECK-HANSEN 1996). Die höhere sowie später verabreichte Düngung von Cl in Form von Kalidünger auf dem IHO (Tab. 1) könnte daher zu den höheren Cl-Konzentrationen der Biomassen von Weizen und Triticale am IHO im Vergleich zum Standort HOH geführt haben. Gegen diese Überlegungen spricht, daß die Cl-Konzentrationen der Biomasse von Roggen an beiden Standorten auf gleichem Niveau lagen, wobei die Biomasse von Roggen am Standort HOH früher als die von Triticale und Weizen und „unreifer“, d. h. bei einer höheren Wasserkonzentration als am Standort IHO, geerntet wurde (Tab. 4).

Für den Einfluß pflanzenbaulicher Maßnahmen kann aus diesen Untersuchungen geschlossen werden, daß eine Minimierung der energiebezogenen SO_2 -Äquivalente durch die Wahl einer Getreideart mit geringen N-Konzentrationen (z. B. Roggen) und durch Beschränkung der

N-Düngung, insbesondere durch Berücksichtigung der zu erwartenden N-Nachlieferung aus dem Boden, erfolgen kann.

Bezugsgröße

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, daß mit zunehmendem N-Düngungs- und damit Ertragsniveau auch die Emissionen an CO₂- und SO₂-Äquivalenten, bezogen auf die bereitgestellte Nutzenergie, ansteigen. Würde hieraus der Schluß gezogen, daß möglichst extensiv – und das würde auf der Basis der hier durchgeführten Versuche einen Anbau ohne den Einsatz von Stickstoffdünger bedeuten – zu produzieren ist, würde vernachlässigt werden, daß die flächenbezogenen CO₂-Einsparungsmöglichkeiten mit steigender N-Düngung ebenfalls zunehmen. Bei einer CO₂-Emission von 124 kg GJ⁻¹ für die Energiebereitstellung aus leichtem Heizöl könnten durch Nutzung der Energie aus GGP nach den vorliegenden Ergebnissen im Durchschnitt über beide Standorte und alle Getreidearten bei N0 114 kg, bei N70 104 und bei N140 97 kg GJ⁻¹ CO₂-Äquivalente eingespart werden. Diese Werte wurden als Differenz zwischen dem Referenzwert (124 kg GJ⁻¹) und den jeweils der Bereitstellung und Verbrennung der GGP zuzurechnenden CO₂-Äquivalenten (10–28 kg GJ⁻¹), die in Abb. 2 dargestellt sind, ermittelt. Die Nutzenergieerträge lagen, wiederum im Durchschnitt über beide Standorte und alle Getreidearten, bei 66 GJ ha⁻¹ auf den N0-, bei 99 GJ auf den N70- und bei 112 GJ auf den N140-Varianten. Je Hektar würde durch das Ansteigen der Energieerträge mit steigender N-Düngung bei N0 ein durchschnittliches CO₂-Einsparungspotential von 7,5 t entstehen, bei N70 von 10,3 t und bei N140 von 10,8 t.

Unter den in Deutschland gegebenen Randbedingungen ist die für den Anbau nachwachsender Energieträger zur Verfügung stehende Fläche aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte begrenzt. Unter diesen Bedingungen stellt sich vor allem die Frage, welche Mengen an CO₂-Emissionen pro Hektar vermieden werden können. Unter diesem Aspekt führte die höchste der hier angewandten Intensitätsstufen, d. h. 140 kg N ha⁻¹, im Durchschnitt über alle Getreidearten und die beiden Standorte zu dem größten CO₂-Einsparungspotential.

Die energiebezogene Einsparung an SO₂-Äquivalenten sank bei allen Getreidearten mit zunehmender N-Düngung. Das flächenbezogene SO₂-Einsparungspotential nahm auf dem Standort IHO bei allen Getreidearten mit zunehmender N-Düngung von durchschnittlich 7,1 kg ha⁻¹ bei N0 auf 3,0 kg ha⁻¹ bei N140 ab. Auf dem Standort HOH lagen die höchsten SO₂-Einsparungspotentiale dagegen für alle Getreidearten bei N70. Im Durchschnitt über beide Standorte stieg das flächenbezogene SO₂-Einsparungspotential für Winterroggen und Wintertriticale von durchschnittlich 6,4 bei N0 auf 7,1 kg ha⁻¹ bei N70, wobei die Werte für Roggen jeweils höher als bei Triticale lagen. Bei N140 sank das SO₂-Einsparungspotential auf 5,7 kg ha⁻¹. Für Winterweizen wurde dagegen ein Absinken des SO₂-Einsparungspotentials mit steigender N-Düngung von 4,7 bei N0 über 3,8 bei N70 auf 1,4 kg ha⁻¹ bei N140 ermittelt.

Das Ziel größtmöglicher flächenbezogener SO₂-Einsparungspotentiale konnte auf dem Standort HOH durch eine Düngung von 70 kg N ha⁻¹ und auf dem IHO ohne N-Düngung erreicht werden. Dieses Ergebnis ist auf die hohe N-Verfügbarkeit auf dem Standort IHO zurückzuführen, wo durch die Biomasse der GGP ohne N-Düngung durchschnittlich 95 kg N und bei N70 141 kg N ha⁻¹, d. h. erheblich höhere N-Mengen als über die Düngung ange-

boten, entzogen wurden. Die N-Düngung muß demnach der N-Verfügbarkeit des Standortes entsprechend optimiert werden.

Diese Ergebnisse zeigen einen Zielkonflikt bei der gleichzeitigen Optimierung der flächenbezogenen CO₂- und SO₂-Einsparungspotentiale auf, da nach den vorliegenden Untersuchungen die höchste N-Stufe von 140 kg ha⁻¹ zur Maximierung der CO₂- und eine N-Düngung von 0–70 kg ha⁻¹ zur Maximierung der SO₂-Einsparungspotentiale führte.

Im Vergleich der drei Getreidearten erwies sich Winterweizen als Energiegetreide am ungeeignetsten. Wintertriticale ist mit dem Ziel hoher CO₂- und Winterroggen mit dem Ziel hoher SO₂-Einsparungspotentiale zu bevorzugen.

Literatur

- ALBRECHT, B., 1997: Untersuchungen zur züchterischen Verbesserung von Triticale bezüglich seiner Eignung als Energiepflanze. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Abschlußbericht.
- BAKKER, R. R. & B. M. JENKINS, 1996: Feasibility of fuel leaching to reduce ash fouling in biomass combustion systems. In: CHARTIER, P., G. L. FERRERO, U. M. HENIUS, S. HULTBERG, J. SACHAU & M. WINBLAD (edt.): Biomass for Energy and the Environment, 2, 980–985. Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference, Copenhagen, Denmark 24–27 June 1996. Pergamon, Oxford.
- BECHER, S., 1998: Biogene Festbrennstoffe als Substitut für fossile Brennstoffe – Energie- und Emissionsbilanzen. IER-Forschungsbericht.
- BEESE, F., 1994: Gasförmige Stickstoffverbindungen – Stickoxide und Distickstoffoxide. In: Landwirtschaft, Studienprogramm, Enquetekommission des 12. Deutschen Bundestages (Hrsg.), Economica Verlag, Bonn.
- BOWMAN, A. F., L. FUNG, E. MATTHEWS & J. JOHN, 1993: Global analysis of the potential for N₂O production in natural soils. Global Biogeochem. Cycles 7, 557–597.
- EC (Hrsg.), 1997: Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energieträger - Weißbuch für eine Gemeinschaftsstrategie und Aktionsplan. Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel.
- EN ISO 14041, 1998: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Goal and Scope Definition and Life Cycle Inventory Analysis.
- ENQUETE-KOMMISSION „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.), 1994: Schutz der grünen Erde, Klimaschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft und Erhalt der Wälder. Economia Verlag, Bonn.
- FAULBAUM, F., U. HANNIG, A. MERKEL, R. SCHUEMER & M. SENGER, 1983: Eine anwendungsorientierte Beschreibung des Statistikprogramms SAS. Statistik Analyse System Band 1. Fischer Verlag, Stuttgart.
- FRISCHKNECHT, R., P. HOFSTETTER & I. KNOEPFEL, 1996: Ökoinventare für Energiesysteme – Grundlagen für den ökologischen Bereich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. ETH Zürich/PSI Villingen.
- FRITSCHKE, U. R., J. LEUCHTNER, F. C. MATTHES, L. RAUSCH & K.-H. SIMON, 1994: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.0. ÖKO-Institut Büro Darmstadt Bereich Energie, GH Kassel Forschungsgruppe Umweltsystemanalyse im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten, Darmstadt, Freiburg, Kassel, Berlin.
- HARTMANN, H., 1997: Analyse und Bewertung der Systeme zur Hochdruckverdichtung von Halmgut, Reihe „Gelbes Heft“ 60. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Selbstverlag, München.
- HELJUNGS, R., 1992: Environmental Life Cycle Assessment of Products, Guide (Part 1) and Background (Part 2). CML, INO and B&G, Leiden.

- HOUGHTON, J. T., 1996: Climate Change 1995 – The Science of Climatic Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). University of Cambridge, ISBN 0 521 56436 0.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1997: Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook. Module 4: Agriculture. <http://www.iea.org/ipcc/general/invs5c.htm>.
- ISERMANN, K., 1994: Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share. *Environmental Pollution* **83**, 95–111.
- ISO 14040, 1997: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework.
- KALTSCHMITT, M & G. REINHARDT (Hrsg.), 1997: *Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung*. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden.
- KARPENSTEIN-MACHAN, M., 1997: Konzepte für den Energiepflanzenbau, Perspektiven eines pestizidfreien Anbaus von Energiepflanzen zur thermischen Verwertung im System der Zweikulturnutzung. DLG-Verlag, Frankfurt
- KLEMENS, M., 1997: Persönliche Mitteilung Herr Klemens, Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz, Lehr- und Versuchsanstalt Emmelshausen.
- KÜBLER, E. & A. HOBELSBERGER, 1984: Beeinflussung von Ertrag, Inhaltsstoffen und Nährstoffeinträgen bei Zuckerrüben, Winterweizen und Sommergerste durch gestaffelte N-Gaben während der neunjährigen Versuchsdauer des internationalen Stickstoffdüngungsversuches, Standort Ihinger Hof, II Winterweizen. *Kali-Briefe* **17**, 125–145.
- LAMMEL, G. & H. GRASSL, 1995: Greenhouse effect of NO_x. *Environmental Sci. & Pollution Res.* **2**, 40–45.
- LEWANDOWSKI, I. & A. KICHERER, 1997: Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus × giganteus*. *European J. of Agronomy* **6**, 163–177.
- MAIER, J., R. VETTER, V. SIEGLE & H. SPLIETHOFF, 1998: Anbau von Energiepflanzen – Ganzpflanzengewinnung mit verschiedenen Beerntungsmethoden (ein- und mehrjährige Pflanzenarten); Schwachholzverwertung. Ministerium Ländlicher Raum, Baden-Württemberg, Stuttgart.
- OBERNBERGER, I., 1998: Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen. Schriftenreihe Thermische Biomassenutzung, Band 1. dbv-Verlag für die Technische Universität Graz.
- RAUSCH, L., U. R. FRITSCHKE, M. BUCHERT, C. HOCHFELD, W. JENSEIT, F. C. MATTHES, K.-H. SIMON, H. STAHL & J. WITT, 1999: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 3.08. ÖKO-Institut Büro Darmstadt, Darmstadt, Freiburg, Kassel, Berlin.
- RUCKENBAUER, P. & A. REICHART, 1996: Einfluß des Standortes und pflanzenbaulicher Maßnahmen auf die Brennstoffeigenschaften von Getreidepflanzen. In: *Biomasse als Festbrennstoff*, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ (F. N. R. e.V., Hrsg.) **6**, 49–61.
- SANDER, B., 1996: Fuel data for Danish biofuels and improvement of the quality of straw and whole crops. In: CHARTIER, P., G. L. FERRERO, U. M. HENIUS, S. HULTBERG, J. SACHAU & M. WIINBLAD, (ed.): *Biomass for Energy and the Environment*, **1**, 490–494. Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference, Copenhagen, Denmark 24–27 June 1996. Pergamon, Oxford.
- SCHOLZ, V. & M. GLÄSER, 1997: Emissionen bei der Verbrennung von halbtrockener Biomasse. *Landtechnik*, **52** (4), 192–193.
- STRUSCHKA, M., 1993: Holzverbrennung in Feuerungsanlagen, Grundlagen – Emissionen – Entwicklung schadstoffarmer Kachelöfen. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- VETTER, A., P. WIESER, K. MÄUSEZAHN, M. LEITERER, B. RUDOLPH & A. WERNER 1995: Untersuchungen zum Einfluß der Brennstoffart und -qualität auf die Zusammensetzung der Reststoffe und deren Verwertung am Strohheizkraftwerk Schkölen zur Sicherung des Brennstoffeinsatzes. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena.
- WIECK-HANSEN, K., 1996: Parameters influencing Straw Quality important for Burning in Boilers. In: *Biomasse als Festbrennstoff*, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ (F. N. R. e.V., Hrsg.) **6**, 75–88.
- WILLIAMS, E. J., G. L. HUTCHINSON & F. C. FEHSENFELD, 1992: NO_x and N₂O emissions from soil. *Global Biogeochem. Cycles* **6**, 351–387.

Eingegangen am 23. August 1999;
angenommen am 02. Dezember 1999

Anschriften der Verfasser:

Dr. Iris Lewandowski, Andrea Bohn, Institut für Pflanzenbau und Grünland (340), Universität Hohenheim, Fruwirthstraße 23, D-70599 Stuttgart

Dr. M. Kaltschmitt, G. Weinrebe, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Heßbrühlstr. 49a, D-70565 Stuttgart