

Analyse verschiedener Ernteverfahren zur Maisstrohbergung

Monika Fleischhut, Kurt-Jürgen Hülsbergen, Stefan Thurner, Joachim Eder

Körnermaisstroh ist mit einem jährlichen Strohaufkommen von rund 3,8 Mt Trockenmasse ein mögliches Substrat für die Produktion von Bioenergie in Deutschland. Grundlage für eine künftige Nutzung ist jedoch die Kenntnis der Stroherträge und eines geeigneten Ernteverfahrens bei der Strohbergung. Ziel der Untersuchung war es, mithilfe von Feldexperimenten für acht Ernteverfahren und variierende Erntebedingungen die Abfuhraten und Ernteverluste bei der Maisstrohbergung zu quantifizieren. Bei einem durchschnittlichen Maisstrohpotenzial von 103,2 dt ha⁻¹ Trockenmasse wurden im zweijährigen Mittel 55,6 dt ha⁻¹ geschwadet und 46,8 dt ha⁻¹ geborgen, sodass die Ernteverluste in Höhe von 56,4 dt ha⁻¹ größer waren als die abgefahrenen Stroherträge. In Abhängigkeit von der Schwadtechnik wurden Abfuhraten von 41,4 bis 49,1% ermittelt, wobei signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken, aber nicht zwischen den Bergungstechniken bestanden. Eine längere Feldliegezeit des Maisstrohs nach der Körnerernte hatte überwiegend negative Effekte auf die Abfuhraten, während unterschiedliche Sorten keinen Einfluss zeigten. In Bezug auf die Qualitätsparameter Trockensubstanzgehalt und Rohaschegehalt des Maisstrohs wurden Durchschnittswerte von 50,4 bzw. 7,0% ermittelt.

Schlüsselwörter

Maisstrohertrag, Schwadtechniken, Abfuhrate, Erntereste, Rohaschegehalt

Unter den erneuerbaren Energien hat die Bioenergie einen substanziellen Anteil, sowohl global mit 75% (IEA 2015) als auch in Deutschland mit 59% (FNR 2015). Die zur Biomasseerzeugung verfügbare Fläche ist jedoch begrenzt, weshalb es zu Nutzungskonkurrenzen kommt, insbesondere mit der Nahrungsmittelproduktion. Eine Möglichkeit, weitere Biomassepotenziale bei limitierter Fläche zu erschließen, besteht – neben Ertragssteigerungen – in der Ernte bisher nicht genutzter Biomasse. Pflanzliche Reststoffe stellen in diesem Zusammenhang ein bedeutendes und wirtschaftlich interessantes Bioenergiepotenzial dar, sofern ihre Nutzung so begrenzt wird, dass ausreichende Mengen organischer Substanz für die Stroh- und Gründüngung zum Erhalt der Bodenfunktionen verfügbar bleiben (ANTON und STEINICKE 2012).

Mit einem weltweiten Anfall von 204 Mt Trockenmasse (TM) ist Maisstroh als landwirtschaftliches Koppelprodukt nach Reis- und Weizenstroh der drittbedeutendste pflanzliche Reststoff bezüglich Quantität und Energiegehalt (KIM und DALE 2004). Maisstroh ist ein geeignetes Substrat für die energetische Verwertung, das Potenzial wurde bereits für verschiedene Regionen untersucht (PAVLISKA et al. 2012, JIANG et al. 2012, COSIC et al. 2011, SCARLAT et al. 2010). Die Anbaufläche von Körnermais einschließlich Corn-Cob-Mix lag in Deutschland im Jahr 2015 bei 455.500 ha (STATISTISCHES BUNDESAMT 2016). Mit einem durchschnittlichen Kornenertrag von 96,2 dt ha⁻¹ für die Jahre 2006–2015 bei 14% Kornfeuchte (STATISTISCHES BUNDESAMT 2016) und einem mittleren Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1, wie

es zumeist in der Literatur angenommen wird (SHINNERS et al. 2012, SOKHANSANJ et al. 2002, LEASK UND DAYNARD 1973), fallen in Deutschland relevante Maisstrohmengen von 3,8 Mt TM pro Jahr an. In Deutschland verbleibt das Maisstroh bisher zur Humusreproduktion und Nährstoffrückführung auf dem Feld und wird keiner nennenswerten Nutzung zugeführt. In anderen Boden-Klima-Regionen, wie z. B. in den USA, wird Maisstroh bereits zur Produktion von Bioenergie, vorwiegend für die Erzeugung von Ethanol, genutzt und wurde in diesem Zusammenhang vielfältig untersucht (QIANG und THOMSEN 2012, ZUO und YANG 2011, SHEEHAN et al. 2003, SOKHANSANJ et al. 2002). Dagegen ist die Nutzung von Maisstroh zur Biogasproduktion wenig bekannt und verbreitet. In ersten Untersuchungen zur Methanertragsfähigkeit von Körnermaisstroh im Labormaßstab konnten die spezifischen Methanausbeuten auf durchschnittlich 318 l CH₄ je kg organische Trockenmasse (oTM) unter Normbedingungen beziffert werden (FLESCHHUT et al. 2015). DJATKOV et al. (2015) ermittelten ebenfalls Methanausbeuten von bis zu 301 l CH₄ (kg oTM)⁻¹ unter Normbedingungen. Somit ist Körnermaisstroh eine vielversprechende Substratvariante, gerade für Deutschland, das mit 8.726 Biogasanlagen und einer installierten elektrischen Nennleistung von 3.905 Megawatt (FACHVERBAND BIOGAS e.V. 2016) eine hohe Dichte an Biogasanlagen aufweist.

Voraussetzung für eine umfangreiche Maisstrohnutzung ist neben der grundsätzlichen Eignung die Kenntnis der vorhandenen und nutzbaren Biomassepotenziale. Diese Potenziale werden von Standortfaktoren und pflanzenbaulichen Parametern, die den Kornertrag und den Strohanfall beeinflussen, vor allem aber von der Effizienz der Ernte- und Konservierungstechnik und damit verbundenen technischen Restriktionen bei der Strohbergung bestimmt. Weil mit der Abfuhr von Maisstroh auch vielfältige Effekte auf die Bodenfruchtbarkeit auftreten, z. B. Wirkungen auf den Humus- und Nährstoffgehalt oder physikalische und biologische Bodenparameter (KARLEN et al. 2011, BLANCO-CANQUI und LAL 2009, LINDSTROM 1986), ist eine genaue Erfassung der Ernteverluste Grundlage für die Einschätzung ökologischer Effekte und die Ableitung nachhaltig nutzbarer Abfuhraten.

Verschiedene Ernteverfahren wurden bereits hinsichtlich ihrer Effizienz und Ökonomie untersucht (VADAS und DIGMAN 2013, SOKHANSANJ et al. 2010, PETROLIA 2008). Die Ernteverfahren werden nach Anzahl und Kombination der Verfahrensschritte Dreschen, Schwaden und Bergen in absetzige und kombinierte bzw. in ein-, zwei-, drei- und mehrstufige Verfahren unterteilt.

Bei den einstufigen Verfahren erfolgt die Ernte von Korn und Maisstroh bzw. von einzelnen Fraktionen der Restpflanze simultan mit umgebauten Mähdreschern, bei denen Körner und Restpflanze den Mähdrescher in getrennten Stoffströmen passieren. Dabei wird die Restpflanze in einer integrierten Häckseleinrichtung am Mähdrescher zerkleinert und anschließend in Silierwagen gesammelt oder in einer nachgezogenen Ballenpresse weiterverarbeitet (SHINNERS et al. 2009, HOSKINSON et al. 2007, SHINNERS et al. 2007a). Diese Verfahren sind durch geringe Ernteverluste und eine verminderte Verschmutzung des Erntegutes gekennzeichnet und haben dazu noch den Vorteil, dass nur eine Überfahrt erforderlich ist. Maschinenbelastung und -verschleiß sind jedoch deutlich erhöht und die Schlagkraft beim Körnerdrusch reduziert (VADAS und DIGMAN 2013). SHINNERS et al. (2012 und 2007a) ermittelten eine um 39% geringere Flächenleistung im Vergleich zum Maisdrusch ohne Strohbergung.

Um die Flächenleistung beim Maisdrusch nicht übermäßig zu verringern, ist die Ernte von Stroh und Korn zumeist entkoppelt. Zweistufige Verfahren erlauben das Dreschen der Körner und das Schwaden des Maisstrohs in einem Arbeitsgang, während die Bergung separat erfolgt. Dabei kommen modifizierte Pflücker zum Einsatz (STRAETER 2011, SHINNERS et al. 2012), die zusätzlich zur

Pflückfunktion mit einer Schwadvorrichtung ausgestattet sind, die die Strohablage unterhalb des Mähdreschers ermöglicht. Lieschen und Spindeln fallen von den Schüttlern und Sieben ebenfalls auf die Schwade. Da mit Ausnahme der Kolben keine weiteren Anteile der Restpflanze den Mähdrescher passieren, verringerte sich die Flächenleistung in den Untersuchungen von SHINNERS et al. (2012) nur um 9%. Erfolgen die Verfahrensschritte Schwaden und Bergen des Maisstrohs ebenfalls separat, sind drei Arbeitsgänge (Überfahrten) für die Ernte von Korn und Maisstroh notwendig, beim Einsatz eines Mulchers vor dem Schwadern sogar vier oder mehr. Nach dem Schwaden erfolgt die Bergung des Maisstrohs in Abhängigkeit von der Verwertungsrichtung und den Lagermöglichkeiten mit einer Ballenpresse oder seltener mit dem Feldhäcksler oder Ladewagen.

Die Wahl des Ernteverfahrens hat einen wesentlichen Einfluss auf den Strohertrag und die Stroqualität. So ermittelten SHINNERS et al. (2007b) für drei- bzw. vierstufige Ernteverfahren (Mulcher mit integrierter Schwadfunktion bzw. Mulcher und Kreiselschwader) in Kombination mit einem Feldhäcksler Stroherträge von durchschnittlich 54 dt ha⁻¹, was einer Abfuhrate von durchschnittlich 55% des vorhandenen Maisstrohs entsprach. SOKHANSANJ et al. (2002) erfassten für ein dreistufiges Ernteverfahren bei einem theoretischen Strohanfall von 78 und 119 dt ha⁻¹ Stroherträge von 54 und 59 dt ha⁻¹ und damit eine Abfuhrate von 60% im zweijährigen Durchschnitt.

In einer zweijährigen Untersuchung in Wisconsin zum Vergleich verschiedener Ernteverfahren ermittelten SHINNERS et al. (2012) ermittelten für einstufige Verfahren die höchsten Abfuhraten in Höhe von 67 und 71 % des Strohanfalls mit Stroherträgen von 61 und 65 dt TM ha⁻¹. Unter gleichen Bedingungen wurden mit einem zweistufigen Verfahren (Schwadablage des Maisstrohs während des Körnerdrusches und nachfolgende Strohbergung mit einem Feldhäcksler) zwischen 41 und 48 dt TM ha⁻¹ (Abfuhraten von 41 bis 56%) und mit einem vierstufigen Verfahren (Dreschen, Mulchen, Schwaden und Bergen mit einem Feldhäcksler) 38 bis 46 dt TM ha⁻¹ (Abfuhraten von 41 bis 46%) geerntet. Dabei wurde angenommen, dass der Strohanfall jeweils den ermittelten Kornerträgen entsprach. Die Rohaschegehalte lagen je nach Ernteverfahren zwischen 4,9 und 9,8% der TM; der Schmutzanteil nahm mit steigender Zahl an Verfahrensschritten signifikant zu (VADAS und DIGMAN 2013). GOLUB et al. (2012) berechneten für verschiedene Maisstroh-Ernteverfahren (zwei- und mehrstufig) Stroherträge von 62 bis 71 dt TM ha⁻¹, was Abfuhraten von 60 bis 68% entsprach.

Die Untersuchungen zu Strohertrag und -qualität in Abhängigkeit vom Ernteverfahren wurden überwiegend in den USA, in geringerem Umfang in Serbien durchgeführt. Unter den dortigen klimatischen Bedingungen erreicht Maisstroh höhere Trockensubstanz(TS)-Gehalte und unterscheidet sich qualitativ deutlich von Maisstroh, das unter mitteleuropäischen Verhältnissen erzeugt wird. WOMAC et al. (2005) ermittelten für Maisstroh im Südosten der USA TS-Gehalte von 59 bis 76% bei früher Ernte (Kornfeuchte ca. 25%) und 78 bis 89% bei später Ernte (Kornfeuchte ca. 15%). Bei höheren Feuchtegehalten wird das Stroh auf dem Feld häufig nachgetrocknet, um es als trockenes Erntegut in Form von Maisstrohballen zu bergen und zu konservieren (SHINNERS et al. 2007b).

Unter den Standortbedingungen Deutschlands sind die Feuchtegehalte zur Ernte in Korn und Restpflanze höher. Im Hinblick auf eine Verwertung in der Biogasproduktion wird als Konservierungsverfahren die Silierung angestrebt, weshalb abweichend von anderen Klimaregionen geringere TS-Gehalte des Maisstrohs zur Ernte erzielt und andere Ernteverfahren eingesetzt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei aktuell auf dreistufigen Verfahren. Einstufige Verfahren sind derzeit in Deutschland bzw. Mitteleuropa nicht verfügbar, mit Ausnahme von sogenannten „Aftermarket-Lösungen“, die jedoch nicht kommerziell vertrieben werden. Aus Untersuchungen vorliegende Erkenntnisse zu bestimmten

Ernteverfahren und technischen Restriktionen sind deshalb nicht ohne Weiteres übertragbar. Den meisten Studien liegen außerdem nur Schätzungen zum Strohanfall nach dem Maisdrusch – abgeleitet von den Kornerträgen – oder aber geschätzte Ernteverluste zugrunde, weshalb die ermittelten Abfuhrdaten und Ernterückstände fehlerbehaftet sein können.

Als Grundlage für eine künftige Nutzung von Maisstroh in Deutschland und vergleichbaren Boden-Klima-Regionen sind deshalb Untersuchungen zur Eignung verschiedener Ernteverfahren, insbesondere die genaue Quantifizierung der Abfuhrdaten und Ernteverluste bei der Strohernte erforderlich. Weil Verluste in allen Verfahrensschritten der Strohernte auftreten, ist eine exakte Massenbilanzierung der Stroherträge über die gesamte Prozesskette durchzuführen.

Im Hinblick auf eine Verwertung in Biogasanlagen spielen außerdem eine schmutzarme Bergung und möglichst geringe TS-Gehalte für eine erfolgreiche Silierung eine entscheidende Rolle. Ziel der Untersuchungen war es daher, in Feldexperimenten verschiedene Ernteverfahren unter variierenden Bedingungen zu analysieren und die Ernteleistung und -qualität anhand der Stroherträge, der TS-Gehalte und Rohaschegehalte zu bewerten.

Material und Methoden

Für die vergleichende Analyse und Bewertung von Ernteverfahren zur Maisstrohbergung wurden in den Jahren 2014 und 2015 Feldversuche im Praxismaßstab an der Versuchsstation Grub (Landkreis Erding) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft durchgeführt. Der Versuchsstandort liegt 494 m über NN; der Jahresniederschlag beträgt durchschnittlich 864 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur 9,0 °C. Die Versuchsflächen lagen in beiden Jahren nebeneinander, sodass von nahezu einheitlichen Standorteigenschaften auszugehen ist (anmooriger Boden, Bodenart Lößlehm).

In Großparzellen von mindestens 0,063 ha wurde Körnermais ausgesät (Saattermine: 24.04.2014 und 23.04.2015; Saatstärke: 9 Pflanzen je m²; Reihenabstand: 0,75 m). Die Parzellenbreite war bestmöglich auf die Arbeitsbreite der jeweiligen Schwadtechnik abgestimmt und entsprach jeweils einem Vielfachen der Mährescherbreite (6 m). Demzufolge wurden für die Parzellenbreiten 6, 9 und 12 m gewählt. Nach Erreichen der Druschreife (maximale Kornfeuchte von 35 %) wurden alle Parzellen mit einem 8-reihigen Mährescher (Claas Lexion 670) geerntet. Als Erntetechnik für die Strohbergung wurden zwei- und dreistufige Verfahren getestet. Insgesamt wurden acht verschiedene Erntevarianten (Faktor 1: vier Schwadtechniken in Kombination mit Faktor 2: zwei Bergetechniken mit Felhdäcksler bzw. Kurzschnittladewagen) unter variierenden Erntebedingungen (Faktor 3: zwei Feldliegezeiten im Jahr 2014 bzw. drei Sorten im Jahr 2015) untersucht. Alle Prüfglieder wurden in vierfacher Wiederholung auf insgesamt 64 Großparzellen in einer Spaltanlage mit vollständiger Blockbildung geprüft. Die Faktoren Feldliegezeit bzw. Sorten wurden als Großteilstücke angelegt und die Schwadtechniken innerhalb der Großteilstücke zufällig verteilt.

Ernteverfahren

Für das zweistufige Ernteverfahren, bei welchem das Schwaden des Maisstrohs zeitgleich zum Körnerdrusch und lediglich die nachfolgende Strohbergung separat erfolgt, wurde der „Mais Star* Collect“ (Carl Geringhoff Vertriebsgesellschaft mbH & Co.KG, Deutschland) an den Mährescher angebaut. Dabei handelt es sich um einen modifizierten Pflücker mit gekröpften Häckselmessern, wodurch die Restpflanze stärker zerkleinert und ohne Bodenkontakt in eine unterhalb des Pflückers eingebaute Auffangwanne geworfen wird. Anschließend wird das Substrat über eine integrierte Förderschnecke

zur Mitte des Pflückers befördert und als Schwad auf dem Boden abgelegt. Auf den Schwad fallen dann auch die ausgedroschenen Spindeln und Lieschen. Im Versuch wurde ein achtreihiger Mais Star* Collect eingesetzt und mit einer Geschwindigkeit von ca. 4,3 bis 4,5 km h⁻¹ gedroschen.

Als absetzige Schwadtechniken, die nach dem konventionellen Maisdrusch (Mähdresch: Claas Lexion 670; Maispflücker: Capello Quasar) eingesetzt werden und insgesamt drei Verfahrensschritte für die Ernte von Korn und Maisstroh erfordern, kamen der „BioChipper“ (BioG GmbH, Österreich), der „Schwadhäcksler UP-6400“ (Uidl Biogas GmbH/Agrinz Technologies GmbH, Österreich) und der „Merge Maxx 900“ (2014) bzw. der „Merge Maxx 902“ (2015) (Kuhn S.A., Frankreich) zum Einsatz. Der BioChipper und der Schwadhäcksler UP-6400 sind modifizierte Mulcher, die mit einer zusätzlichen Schwadfunktion ausgestattet sind. Mithilfe der rotierenden Schlegelwelle werden je nach eingestellter Arbeitstiefe zusätzliche Anteile der Maisstoppeln über dem Boden abgeschlagen, das Erntegut zerkleinert und durch den Sog der Schlegelwelle aufgenommen. Mit einer Querfördereinrichtung wird das Substrat anschließend seitlich im Schwad abgelegt. Die Arbeitsbreite betrug beim BioChipper 6 m und beim Schwadhäcksler UP-6400 6,4 m, sodass durch Hin- und Rückfahrt das Stroh von 12 bzw. 12,8 m Arbeitsbreite auf einen Doppelschwad abgelegt wurde. Unter Versuchsbedingungen wurde eine Fahrgeschwindigkeit von durchschnittlich 5 bis 6 km h⁻¹ erreicht.

Beim Merge Maxx 900/902 wird das Maisstroh ohne weitere Zerkleinerung über Pick-ups aufgenommen und mithilfe von Leitzinken auf ein Förderband befördert. Die Position der Schwadablage ist beim Merge Maxx 900/902 variabel; gewählt wurde bei einer Arbeitsbreite von 9,1 m die mittige Ablage. Die Arbeitsgeschwindigkeit lag in den Versuchen bei etwa 7 km h⁻¹.

Die Bergung des geschwadeten Maisstrohs erfolgte jeweils mit einem Feldhäcksler (Claas Jaguar 960, 3 m Pick-up-Breite) und einem Kurzschnittladewagen (Krone ZX 400 GL, 2,1 m Pick-up-Breite bzw. Claas Cargos 8400, 2,0 m Pick-up-Breite).

Variation der Erntebedingungen

Weil Maisstroh unter Praxisbedingungen nach dem Körnerdrusch oftmals für längere Zeit, teilweise mehrere Tage, breit verstreut auf dem Feld liegen bleibt, bevor es geschwadet und geborgen wird, wurde im Versuchsjahr 2014 als zusätzlicher Faktor der Einfluss einer längeren Feldliegezeit im Vergleich zu einer kurzen Feldliegezeit untersucht. Für die kurze Feldliegezeit erfolgte eine unmittelbare Ernte des Maisstrohs innerhalb von 15 bis 30 h nach dem Maisdrusch, während bei der langen Feldliegezeit zwischen dem Körnerdrusch und dem Einsatz der Schwadtechniken zwei Tage und weitere eineinhalb bis zwei Tage bis zur tatsächlichen Bergung mit dem Feldhäcksler bzw. Kurzschnittladewagen vergingen (Tabelle 1). Da beim Mais Star* Collect die Arbeitsschritte Dreschen und Schwaden zeitgleich erfolgen, ist zu berücksichtigen, dass sich die längere Feldliegezeit lediglich auf die Aufnahme mit Feldhäcksler bzw. Ladewagen auswirkt.

Als Maissorte wurde die mittelfrühe Sorte LG 32.58 (S 250/K 250) angebaut und im Versuchsjahr 2015 auf der Hälfte der Parzellen – anstelle der längeren Feldliegezeit – zusätzlich die mittelfrühe Sorte SY Talisman (S 220/K 230) mit geringerer Reifezahl und die mittelspäte Sorte KWS 9361 (S 290/K 280) mit höherer Reifezahl geprüft, um eine Variationsbreite an unterschiedlichen Strohfeuchten und Strohmengen zu erhalten. Für eine zweijährige Prüfung der Ernteleistung unter gleichen Bedingungen (gleiche Sorte, kurze Feldliegezeit, Bergung sowohl mit Feldhäcksler als auch Ladewagen) wurde wie im Versuchsjahr 2014 eine Strohbergung innerhalb von 15 bis 30 h nach dem Maisdrusch bei der Sorte LG 32.58 angestrebt.

Der Erntetermin für die Strohbergung war im Wesentlichen vom optimalen Erntezeitpunkt des Kornes bestimmt, wobei eine maximale Kornfeuchte von 35 % angestrebt wurde. Demzufolge begann die Ernte 2014 am 27. Oktober und im Jahr 2015, aufgrund der ungewöhnlich warmen Vegetationsperiode, bereits am 29. September (Tabelle 1). In beiden Versuchsjahren waren nahezu niederschlagsfreie Erntebedingungen gegeben.

Tabelle 1: Zeitlicher Überblick über die Verfahrensschritte Dreschen, Schwaden und Bergen des Maisstrohs in den Versuchsjahren 2014 (zwei Feldliegezeiten) und 2015 (drei Sorten); grau hinterlegt: Varianten, die in beiden Jahren konstant gehalten wurden

	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 4	Tag 5
	27.10.	28.10.	29.10.	30.10.	31.10.
2014	Dreschen <i>lange Feldliegezeit</i> (Sorte LG 32.58) ¹⁾		Dreschen <i>kurze Feldliegezeit</i> (Sorte LG 32.58) ¹⁾ Schwaden aller Parzellen ²⁾	Bergen <i>kurze Feldliegezeit</i> mit Häcksler/Ladewagen	Bergen <i>lange Feldliegezeit</i> mit Häcksler/Ladewagen
2015	28.09.	29.09. Dreschen Sorte <i>SY Talisman/KWS 9361</i> ¹⁾	30.09. Dreschen Sorte <i>LG 32.58</i> (kurze Feldliegezeit) ¹⁾ Schwaden aller Parzellen ²⁾	01.10. Bergen Sorte <i>LG 32.58</i> mit Häcksler/Ladewagen	02.10. Bergen Sorte <i>SY Talisman/KWS 9361</i> mit Ladewagen

¹⁾ Einsatz der Schwadtechnik Mais Star* Collect.

²⁾ Einsatz der Schwadtechniken BioChipper, Schwadhäcksler UP-6400 und Merge Maxx 900/902.

Untersuchte Ertrags- und Qualitätsparameter

Zielgröße der Untersuchungen waren die Stroherträge bei den verschiedenen Ernteverfahren. Dazu wurden – ausgehend von der Strohmenge nach dem Maisdrusch – die Stroherträge und Ernteverluste nach dem Schwaden und Bergen in Abhängigkeit von der Erntetechnik ermittelt.

Für die Bestimmung des Maisstropotenzials, welches die gesamte oberirdische Restpflanzenbiomasse nach dem Dreschen widerspiegelt, wurden vor dem Dreschen aus jeder Wiederholung des Versuches (unter Berücksichtigung der Feldliegezeit/Sorte sowie Schwadtechnik) an acht zufällig ausgewählten Teilflächen je 20 Pflanzen (= 2,3 m²) von Hand geerntet (Schnitthöhe direkt über der Bodenoberfläche) und mithilfe eines stationären Dreschers (LD 350, Wintersteiger AG, Österreich) in Körner und Restpflanze (= Maisstroh) getrennt. Anschließend wurden für beide Fraktionen die Massenanteile und die TS-Gehalte ermittelt. Damit konnten die Parameter Kornertrag und Maisstropotenzial weitestgehend verlustfrei bestimmt werden.

Um die Ernteverluste entlang der gesamten Verfahrenskette beurteilen zu können, wurde nach dem Einsatz der Schwadtechniken in einem ersten Schritt der auf Schwad gelegte Strohertrag der vier Schwadtechniken quantifiziert. Dafür wurde aus jeder Parzelle die Strohmenge von einer Teilfläche der Schwade (Schwadbreite × 1 m) von Hand aufgesammelt und unter Berücksichtigung der

TS-Gehalte des Stroh und der Arbeitsbreite der jeweiligen Schwadtechnik der auf Schwad gelegte Strohertrag in dt ha⁻¹ berechnet.

Zur Ermittlung der abgefahrenen Stroherträge wurde anschließend aus jeder Großparzelle das geschwadete Stroh einer Teilfläche von 0,036 ha mit dem Feldhäcksler bzw. Kurzschnittladewagen geborgen. Die Teilfläche wurde dabei mittig innerhalb der Großparzellen positioniert, um unerwünschte Einflüsse beim Anfahren des Mähreschers und der einzelnen Schwadtechniken ausschließen zu können.

Die geborgenen Strohmenngen der einzelnen Parzellen wurden in Großkisten abgeladen und mittels einer Bodenwaage (ELC3, Dini Argeo s.r.l., Italien, Messunsicherheit bis zu 0,008%) gewogen. Für die Ermittlung der Strohfeuchte wurde während des Abladens eine repräsentative Mischprobe auf Basis von 20 bis 30 Stichproben entnommen und aus dieser Mischprobe insgesamt 3 Stichproben für die exakte Ermittlung der TS-Gehalte gezogen.

Aus dem Verhältnis des abgefahrenen Strohertrages zum Maisstrohpotenzial konnte nachfolgend die Abfuhrate in Prozent berechnet werden. Die Ernteverluste ergaben sich aus der Differenz des Maisstrohpotenzials und dem abgefahrenen Strohertrag, die Bergungsverluste aus der Differenz des auf Schwad gelegten Strohertrages und des abgefahrenen Strohertrages.

Der Rohaschegehalt (VDLUF 1976) als Maß für den Schmutzeintrag während der Ernte wurde für sämtliche Stichproben untersucht.

Auf Basis der abgefahrenen Stroherträge und Rohaschegehalte konnte abschließend der organische TM-Ertrag (oTM-Ertrag) berechnet werden, der die Grundlage für die Methanbildung darstellt.

Statistische Analysen

Alle Faktoren wurden mit einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse unter Berücksichtigung der Spaltenlage geprüft. Dabei wurden sowohl die Haupteffekte als auch die Interaktionen auf Signifikanz untersucht. Für den Vergleich der Faktorstufen wurde als multipler Mittelwertvergleich der Student-Newman-Keuls-Test (SNK) auf einem Signifikanzniveau von 95% durchgeführt. Die Daten wurden mit dem Statistikprogramm SAS 9.3 (SAS Institute Inc., USA) analysiert.

Ergebnisse

Im Jahr 2014 betrug der verlustfreie TM-Kornerträge 115,9 dt ha⁻¹ (für die Sorte LG 32.58) und im Jahr 2015 im Mittel über alle drei Sorten 122,2 dt ha⁻¹ bzw. 115,7 dt ha⁻¹ für die Sorte LG 32.58 (Abbildung 1). Das Maisstrohpotenzial (oberirdische Restpflanzenbiomasse, die nach dem Körnerdrusch auf dem Feld zurückbleibt) belief sich 2014 auf einen TM-Ertrag von 97,6 dt ha⁻¹ und 2015 auf 115,8 dt ha⁻¹ bzw. 108,4 dt ha⁻¹ für die Sorte LG 32.58. Der Anbau verschiedener Sorten im Versuchsjahr 2015 führte zu einer stärkeren Variation beider Parameter im Vergleich zu 2014. Dabei war der Unterschied zwischen Kornertrag und dem Maisstrohpotenzial 2014 mit 18 dt ha⁻¹ größer als 2015 mit nur 6 dt ha (bei allen drei Sorten) bzw. 7 dt ha (bei der Sorte LG 32.58). Die Korn-Stroh-Verhältnisse lagen demnach bei 1 : 0,84 (2014) und 1 : 0,95 (2015).

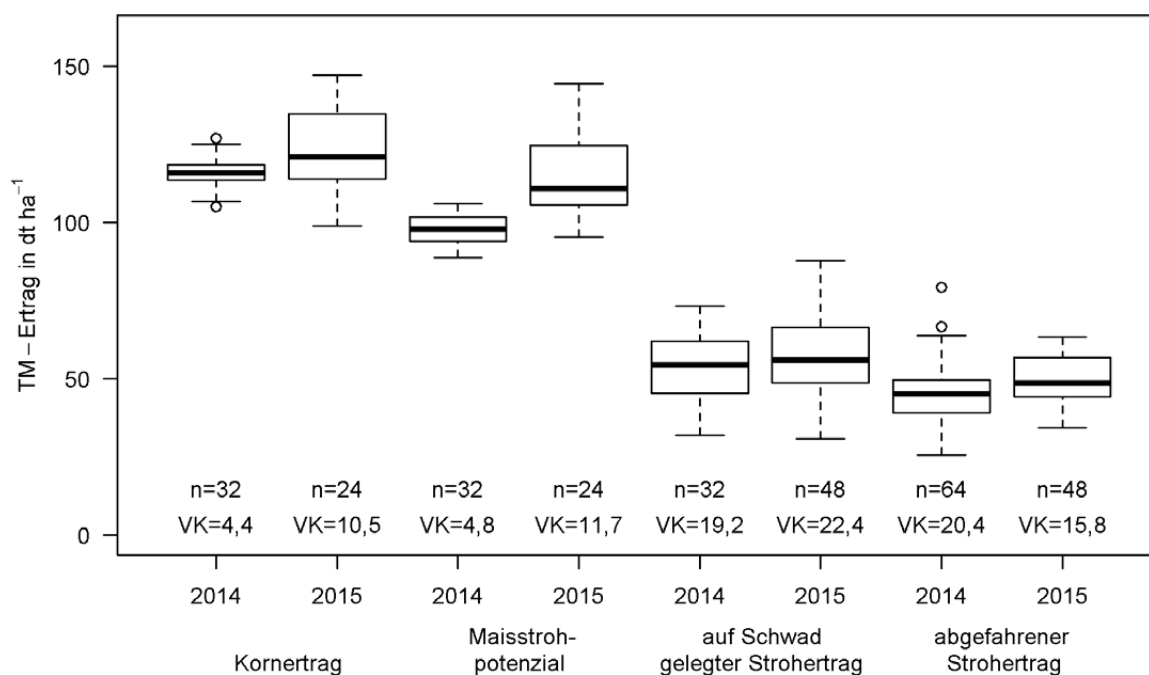


Abbildung 1: TM-Erträge in dt ha^{-1} von Korn und Maisstroh nach den Verfahrensschritten Dreschen, Schwaden und Bergen in den Versuchsjahren 2014 und 2015 (Mittel über alle Feldliegezeiten/Sorten und alle Ernteverfahren); n = Anzahl an Beobachtungen; VK = Variationskoeffizient in %; ; Boxplot: Whisker markieren Minimal- und Maximalerträge innerhalb der Werte ohne Ausreißer (max. 1,5-facher Interquartilsabstand), Balken = Median

Im Mittel über alle Ernteverfahren und Erntebedingungen wurden $53,1$ bzw. $57,2 \text{ dt ha}^{-1}$ auf Schwad gelegt. Somit sind 46 bzw. 51% des Maisstrohpotenzials nicht geschwadet worden. Durch die nachfolgende Bergung mit dem Feldhäcksler bzw. Kurzschnittladewagen kam es zu weiteren Verlusten, die mit 14% (2014) und 13% (2015) der auf Schwad gelegten Strohmenge in beiden Jahren vergleichbar waren. Der abgefahrene Strohertrag, der einer nachfolgenden Nutzung zur Verfügung steht, betrug demzufolge $45,6$ bzw. $49,6 \text{ dt ha}^{-1}$. Somit lag die Abfuhrate (abgefahrener Strohertrag/Maisstrohpotenzial) bei $46,7\%$ (2014) bzw. $42,8\%$ (2015). Das höhere Ertragsniveau im Versuchsjahr 2015 resultierte in geringfügig höheren Stroherträgen hinsichtlich des auf Schwad gelegten wie auch abgefahrenen Strohertrags. Mit Variationskoeffizienten zwischen $15,8$ und $22,4\%$ zeigten die Stroherträge eine große Variationsbreite.

Bei den Varianten, die über beide Jahre konstant gehalten wurden (Tabelle 1, Sorte LG 32.58, Ernte nach kurzer Feldliegezeit), waren die auf Schwad gelegten Stroherträge mit durchschnittlich $55,6$ und $55,5 \text{ dt ha}^{-1}$ sowie die abgefahrenen Stroherträge mit durchschnittlich $47,4$ und $46,1 \text{ dt ha}^{-1}$ in den beiden Versuchsjahren nahezu identisch. Allerdings konnten Unterschiede zwischen den Ernteverfahren auf Basis von Ertrags- und Qualitätsparametern festgestellt werden (Tabelle 2). Während bei den Schwadtechniken BioChipper, Schwadhäcksler UP-6400 und Merge Maxx 900/902 vergleichbare Stroherträge geschwadet wurden ($51,7$ bis $53,8 \text{ dt ha}^{-1}$), waren die auf Schwad gelegten Stroherträge beim Mais Star* Collect mit $64,8 \text{ dt ha}^{-1}$ tendenziell ($p = 0,0712$) höher. Mit dem Mais Star* Collect wurde auch der höchste abgefahrene Strohertrag von $50,7 \text{ dt ha}^{-1}$ erzielt, wobei die Bergungsverluste bei der Aufnahme mit Feldhäcksler bzw. Ladewagen in Höhe von 14 dt ha^{-1} bzw. 22% des auf Schwad gelegten Strohertrages ebenfalls am größten waren. Wurde das Stroh mit dem BioChipper bzw. dem Merge Maxx 900/902 geschwadet, waren die Bergungsverluste bei der nachfolgenden Aufnahme mit

Feldhäcksler und Ladewagen für beide Schwadtechniken ähnlich (11 bzw. 9 %) und demzufolge auch die erzielten Erträge mit 46,4 und 47,4 dt ha⁻¹ gleich. Die Bergungsverluste beim Schwadhäcksler UP-6400 waren mit 11 dt ha⁻¹ bzw. 21 % der Schwadmenge verhältnismäßig hoch, weshalb trotz vergleichbarer auf Schwad gelegter Stroherträge die geringsten Stroherträge von 42,7 dt ha⁻¹ abgefahren wurden.

Beim Feldhäcksler und Ladewagen traten bei den unterschiedlichen Schwadtechniken vergleichbare Bergungsverluste auf. Somit wurden mit beiden Bergungsarten gleiche Stroherträge von 46,1 und 47,4 dt ha⁻¹ erzielt.

Die Abfuhraten bezüglich der untersuchten Schwadtechniken unterschieden sich signifikant und beliefen sich im zweijährigen Mittel auf 41,4 % mit dem Schwadhäcksler UP-6400, auf 45,0 % mit dem BioChipper, auf 45,9 % mit dem Merge Maxx 900/902 sowie auf 49,1 % mit dem Mais Star* Collect.

Zwischen den beiden Versuchsjahren ergaben sich bei unterschiedlichen Strohpotenzialen (97,6 dt ha⁻¹ im Jahr 2014 und 108,4 dt ha⁻¹ im Jahr 2015) und vergleichbaren abgefahrenen Stroherträgen jedoch deutliche Unterschiede in den Abfuhraten (48,6 bzw. 42,5 %).

Tabelle 2: Ertrags- und Qualitätsparameter in Abhängigkeit der eingesetzten Ernteverfahren (Mittelwerte ± Standardabweichung; Mittel der Versuchsjahre 2014 und 2015 für die Varianten „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken, unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bergungsarten; Student-Newman-Keuls-Test, $\alpha = 0,05$; n = Anzahl an Beobachtungen)

	auf Schwad gelegter Maisstroh-TM-Ertrag in dt ha ⁻¹ n = 8	abgefahrener Maisstroh-TM-Ertrag in dt ha ⁻¹ n = 16	TS-Gehalt Maisstroh in % n = 16	Rohaschegehalt Maisstroh in % TM n = 16	organischer Maisstroh-TM-Ertrag in dt ha ⁻¹ n = 16
BioChipper	52,1 ± 9,6 a	46,4 ± 5,0 ab	52,5 ± 9,9 a	7,4 ± 2,2 a	42,9 ± 4,5 ab
Schwadhäcksler UP-6400	53,8 ± 10,0 a	42,7 ± 4,6 b	51,6 ± 11,5 a	7,6 ± 1,6 a	39,4 ± 4,3 b
Mais Star* Collect	64,8 ± 12,7 a	50,7 ± 7,1 a	46,5 ± 11,0 b	5,7 ± 1,1 b	47,8 ± 6,8 a
Merge Maxx 900/902	51,7 ± 10,1 a	47,4 ± 8,5 ab	51,1 ± 9,8 a	7,1 ± 2,1 a	43,9 ± 7,8 ab
p-Wert	0,0712	0,0111	0,017	0,0077	0,0035
	-	n = 32	n = 32	n = 32	n = 32
Feldhäcksler	-	46,1 ± 6,8 A	49,4 ± 10,3 A	7,0 ± 1,9 A	42,9 ± 6,4 A
Ladewagen	-	47,4 ± 7,2 A	51,4 ± 10,9 A	6,9 ± 2,0 A	44,2 ± 6,9 A
p-Wert	-	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1

Bezüglich der Qualitätsparameter TS-Gehalt und Rohaschegehalt unterschied sich lediglich der Mais Star* Collect von den anderen Schwadtechniken. Eine Ernte mit dem Mais Star* Collect führte zu signifikant geringeren TS-Gehalten (46,5 %) und auch Rohaschegehalten (5,7 %) im Erntegut, während die übrigen Schwadtechniken auf einem vergleichbaren Niveau lagen (TS-Gehalte von 51,1 bis 52,5 %; Rohaschegehalten von 7,1 bis 7,6 %). Im Gegensatz zur Schwadtechnik hatte die Bergungsart keinen Einfluss auf den TS-Gehalt und Rohaschegehalt. Der organische Maisstroh-TM-Ertrag war in beiden Versuchsjahren mit 43,7 dt ha⁻¹ (2014) und 43,3 dt ha⁻¹ (2015) nahezu gleich und erlaubte lediglich eine Differenzierung zwischen dem Mais Star* Collect mit dem höchsten organischen Strohertrag.

ertrag von 47,8 dt ha⁻¹ und dem Schwadhäcksler UP-6400 mit dem geringsten organischen Strohertrag von 39,4 dt ha⁻¹.

Unterschiede in den Stroherträgen sind nicht nur durch die Schwadtechniken bedingt, sondern auch auf Einflüsse durch verschiedene Erntebedingungen zurückzuführen. Eine längere Feldliegezeit des Maisstrohs – vor dem Schwaden wie auch vor der Bergung – reduzierte den abgefahrenen Strohertrag signifikant ($p = 0,0499$) von durchschnittlich 47,4 auf 43,9 dt ha⁻¹, wobei zudem signifikante Interaktionen ($p = 0,0088$) zwischen den Schwadtechniken und den untersuchten Feldliegezeiten nachgewiesen werden konnten (Tabelle 3). Während beim BioChipper bei einer verzögerten Ernte signifikante Ertragseinbußen in Höhe von 11 dt ha⁻¹ auftraten, waren negative Einflüsse einer längeren Feldliegezeit beim Schwadhäcksler UP-6400 und beim Mais Star* Collect nur tendenziell vorhanden. Für den Merge Maxx 900/902 ergab sich ein gegenteiliger, aber nicht signifikanter Effekt. Diese Zusammenhänge konnten tendenziell auch für die auf Schwad gelegten Stroherträge beobachtet werden, wobei eine statistische Absicherung nicht möglich war. Beim Mais Star* Collect war lediglich die nachfolgende Bergung von der längeren Feldliegezeit beeinflusst, während keinerlei Unterschiede in dem auf Schwad gelegten Strohertrag zwischen der langen und der kurzen Feldliegezeit festgestellt wurden. Zwischen dem höchsten Ertrag (55,6 dt ha⁻¹) und dem geringsten Ertrag (35,0 dt ha⁻¹) konnte unter den Bedingungen der längeren Feldliegezeit ein Ertragsunterschied von 20,6 dt ha⁻¹, für die kurze Feldliegezeit nur ein Unterschied von 7,4 dt ha⁻¹ ermittelt werden.

Tabelle 3: Stroherträge der unterschiedlichen Schwadtechniken bei Variation der Feldliegezeit im Versuchsjahr 2014 (Mittelwerte ± Standardabweichung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Faktorkombinationen Schwadtechnik × Feldliegezeit; Student-Newman-Keuls-Test, $\alpha = 0,05$; n = Anzahl an Beobachtungen)

		auf Schwad gelegter Stroh-TM-Ertrag in dt ha ⁻¹ n = 4	abgefahrener Stroh-TM-Ertrag in dt ha ⁻¹ n = 8
Lange Feldliegezeit	BioChipper	42,8 ± 7,3 a	35,0 ± 2,6 d
	Schwadhäcksler UP-6400	43,6 ± 8,2 a	38,9 ± 8,8 cd
	Mais Star* Collect	58,4 ± 5,5 a	46,0 ± 4,6 bc
	Merge Maxx 900/902	57,5 ± 6,2 a	55,6 ± 12,7 a
Kurze Feldliegezeit	BioChipper	55,1 ± 13,7 a	46,0 ± 5,9 bc
	Schwadhäcksler UP-6400	54,1 ± 10,7 a	43,6 ± 4,8 bc
	Mais Star* Collect	58,1 ± 11,8 a	49,1 ± 4,3 ab
	Merge Maxx 900/902	55,3 ± 8,5 a	51,0 ± 9,5 ab
p-Werte			
Schwadtechnik		> 0,1	< 0,0001
Feldliegezeit		> 0,1	0,0499
Schwadtechnik × Feldliegezeit		> 0,1	0,0088

Die gewählten Sorten zeigten zur Ernte eine tendenzielle Staffelung hinsichtlich des vorhandenen Maisstrophotenzials und z. T. signifikant unterschiedliche TS-Gehalte im geborgenen Maisstroh (Tabelle 4). Diese Unterschiede führten jedoch nicht zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen der auf Schwad gelegten Stroherträge in Abhängigkeit von der Sorte. Für die einzelnen Schwad-

techniken konnten signifikante Unterschiede ($p = 0,0020$) in dem auf Schwad gelegten Strohertrag gezeigt werden. Für das Merkmal abgefahrener Strohertrag wurden signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Kombinationen (Schwadtechnik \times Sorte) festgestellt, die aber nicht auf signifikante Wechselwirkungen ($p > 0,1$), sondern lediglich auf den signifikanten Einfluss der Schwadtechniken ($p = 0,0049$) zurückgeführt werden können. Der höchste abgefahrene Strohertrag von $58,8 \text{ dt ha}^{-1}$ wurde dabei vom Mais Star* Collect bei der Sorte KWS 9361 erzielt. Signifikant geringer waren die geernteten Stroherträge der Schwadtechniken Schwadhäcksler UP-6400 und des Merge Maxx 900/902 beim Anbau der Sorte LG 32.58 ($41,8$ bzw. $43,7 \text{ dt ha}^{-1}$). Im Mittel aller Schwadtechniken konnte jedoch kein signifikanter Sorteneffekt auf den abgefahrenen Strohertrag nachgewiesen werden.

Tabelle 4: Stroherträge der unterschiedlichen Schwadtechniken in Abhängigkeit von verschiedenen Sorten im Versuchsjahr 2015 (Mittelwerte \pm Standardabweichung; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Sorten, unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Faktorkombinationen Schwadtechnik \times Sorte; Student-Newman-Keuls-Test, $\alpha = 0,05$; $n =$ Anzahl an Beobachtungen)

Sorte	Maisstrohpotenzial in dt ha^{-1} $n = 8$	TS-Gehalt Maisstroh in % $n = 8$		auf Schwad gelegter Stroh-TM-Ertrag in dt ha^{-1} $n = 4$			abgefahrener Stroh-TM-Ertrag in dt ha^{-1} $n = 4$		
LG 32.58	$108,4 \pm 5,4$ A	$59,5 \pm 5,8$ AB	BioChipper	$49,2 \pm 1,8$	a	$46,7 \pm 4,0$	ab		
			Schwadhäcksler UP-6400	$53,6 \pm 10,9$	a	$41,8 \pm 4,3$	b		
			Mais Star* Collect	$71,4 \pm 11$	a	$52,4 \pm 8,9$	ab		
			Merge Maxx 900/902	$48,0 \pm 11,5$	a	$43,7 \pm 5,8$	b		
SY Ta- lisman	$114,8 \pm 13,0$ A	$65,4 \pm 6,3$ A	BioChipper	$53,2 \pm 9,1$	a	$54,4 \pm 5,6$	ab		
			Schwadhäcksler UP-6400	$56,3 \pm 20,5$	a	$51,2 \pm 9,6$	ab		
			Mais Star* Collect	$67,7 \pm 8,2$	a	$51,3 \pm 6,7$	ab		
			Merge Maxx 900/902	$55,2 \pm 12,8$	a	$46,6 \pm 7,9$	ab		
KWS 9361	$124,3 \pm 16,0$ A	$53,6 \pm 4,4$ B	BioChipper	$59,0 \pm 9,8$	a	$51,9 \pm 7,9$	ab		
			Schwadhäcksler UP-6400	$46,4 \pm 9,1$	a	$48,4 \pm 8,6$	ab		
			Mais Star* Collect	$70,1 \pm 6,4$	a	$58,8 \pm 2,4$	a		
			Merge Maxx 900/902	$55,9 \pm 14,4$	a	$47,6 \pm 10,7$	ab		
p-Werte									
Sorte	0,0728	0,0030	Schwadtechnik	0,0020		0,0049			
			Sorte	$> 0,1$		$> 0,1$			
			Schwadtechnik \times Sorte	$> 0,1$		$> 0,1$			

Diskussion

Ertragsstruktur und Abfuhraten

Mit Korn-TM-Erträgen über 115 dt ha^{-1} wurde in beiden Versuchsjahren ein hohes Ertragsniveau erreicht. Obwohl die Maiserträge im Trockenjahr 2015 in der Untersuchungsregion sehr gering waren (durchschnittlicher Korn-TM-Ertrag in Bayern 2015: $70,9 \text{ dt ha}^{-1}$, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK 2016), wurden 2015 am Versuchsstandort nahezu identische Erträge wie 2014 erzielt.

Das Maisstrohpotenzial war in beiden Jahren niedriger als der Kornertrag und ließ im Gegensatz zu den Kornerträgen einen deutlichen Jahreseffekt erkennen. Demzufolge wurden bei stabilen Kornerträgen sehr variable Korn-Stroh-Verhältnisse berechnet. Da die Erträge beider Fraktionen mittels Handernte erfasst wurden, ist von nahezu verlustfreien Maximalerträgen auszugehen, sodass die Kornerträge vermutlich überschätzt wurden und demzufolge die Korn-Stroh-Verhältnisse auf der Grundlage des gedroschenen Kornertrages enger wären. Dennoch zeigt sich, dass die Restpflanzbiomasse stark von den Wachstumsbedingungen geprägt ist und vielfältigen Einflussfaktoren, wie z. B. dem Erntezeitpunkt (PORDESIMO et al. 2004) oder auch dem Ertragsniveau (SCARLAT et al. 2010) unterliegt. Eine Abschätzung des vorhandenen Strohpotenzials über ein Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1, wie es oftmals vereinfacht angenommen wird, ermöglicht deshalb nur einen groben Anhaltspunkt für die nach dem Körnerdrusch vorhandene und somit potenzielle Erntemenge an Maisstroh. Zu dieser Einschätzung kommen auch SOKHANSANJ et al. (2002). Eine Messung des Strohpotenzials und genaue Kenntnisse über die Ertragsphysiologie der Restpflanze sind deshalb unverzichtbar, um eine korrekte Berechnung der Ernterückstände nach der Bergung von Maisstroh vorzunehmen.

Bei abgefahrenen Stroherträgen von durchschnittlich $47,4$ und $46,1 \text{ dt ha}^{-1}$ (Sorte LG 32.58, Ernte nach kurzer Feldliegezeit) in den beiden Versuchsjahren waren die Ernteverluste jeweils größer als die abgefahrenen Stroherträge. Der Anteil an Ernterückständen setzt sich dabei aus den zurückgebliebenen stehenden Stoppeln, der von der Schwadtechnik nicht erfassten Strohmenge und weiteren Verlusten bei der Bergung des geschwadeten Strohs zusammen, wobei die weitaus größten Verluste auf technische Restriktionen beim Prozessschritt Schwaden entfallen. Die abgefahrenen Stroherträge in den vorliegenden Untersuchungen lagen etwas unterhalb der von SHINNERS et al. (2007b) erfassten Erträge in Höhe von 54 dt ha^{-1} . Sie unterschritten z. T. deutlich die von SOKHANSANJ et al. (2002) ermittelten Erträge von 54 bis 59 dt ha^{-1} sowie insbesondere die bei GOLUB et al. (2012) berechneten Erträge in Höhe von 62 bis 71 dt ha^{-1} . Dagegen lagen sie teilweise über den von SHINNERS et al. (2012) erhobenen Maisstroherträgen von 38 bis 48 dt ha^{-1} für verschiedene Ernteverfahren. Wie in den vorliegenden Untersuchungen konnten SHINNERS et al. (2012) mit dem zweistufigen Verfahren höhere Erträge als mit den mehrstufigen Verfahren erzielen.

Ein direkter Vergleich der Abfuhraten ist nicht zielführend, da die Abfuhrate wesentlich vom vorhandenen Strohpotenzial beeinflusst wird. Damit ergeben sich auch bei ähnlichen abgefahrenen Stroherträgen deutliche Unterschiede in der Abfuhrate, bedingt durch Unterschiede im Maisstrohpotenzial. Bei einer Schätzung des Strohpotenzials auf Basis des Kornertrages kann die Abfuhrate außerdem mit weiteren Unsicherheiten behaftet sein. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird darüber hinaus erschwert, wenn andere Erntetechniken eingesetzt wurden und gegebenenfalls unterschiedliche Erntebedingungen vorlagen.

Einfluss der Ernteverfahren auf Ertrags- und Qualitätsparameter

Die Parameter „auf Schwad gelegter Strohertrag“ wie auch „abgefahrener Strohertrag“ zeigten in den Einzeljahren eine große Variation (Abbildung 1), sodass für die Varianten, die gleichbleibend über beide Versuchsjahren getestet wurden, Effekte der Schwadtechnik auf die abgefahrene Strohmenge nachgewiesen werden konnten (Tabelle 1). Dies ergab sich, obwohl zwischen den Parzellen der vier Schwadtechniken keine signifikanten Unterschiede im Maisstrohpotenzial festgestellt werden konnten und damit die Annahme gleicher Ausgangsbedingungen gerechtfertigt scheint. Signifikante Unterschiede wurden jedoch lediglich zwischen dem Mais Star* Collect und dem Schwadhäcksler UP-6400 mit einer Ertragsdifferenz von 8 dt ha⁻¹ festgestellt (Tabelle 2). Bei den geschwadeten Stroherträgen war der Unterschied mit 11 bis 13,1 dt ha⁻¹ zwischen dem Mais Star* Collect und den anderen drei Schwadtechniken noch größer. Diese Ertragsunterschiede konnten jedoch aufgrund der hohen Standardabweichungen nicht statistisch abgesichert werden. Problematisch war die nur kleinflächige Erhebung dieses Merkmals (Schwadbreite × 1 m), weil die Schwadleistung in Abhängigkeit von der Fahrweise sehr variabel sein kann. Eine Erhöhung der Beprobungslänge könnte hier zu eindeutigeren Ergebnissen führen. Da sich der auf Schwad gelegte Strohertrag sowohl aus der tatsächlich geschwadeten Strohmenge als auch einem gewissen Anteil an Stroh, der bereits vor dem Schwadvorgang im Schwadbereich liegt, zusammensetzt, beeinflusst außerdem das Verhältnis aus Schwad- zu Arbeitsbreite der jeweiligen Schwadtechnik den auf Schwad gelegten Strohertrag. Für Schwadtechniken, bei denen die Schwadbreite einen größeren Anteil an der Arbeitsbreite einnimmt (z. B. 36 % beim Mais Star* Collect, hingegen nur 12 % beim BioChipper; Daten nicht gezeigt) ist der Anteil an Stroh, der bereits vor dem Schwaden im Schwadbereich liegt, naturgemäß höher. Das könnte eine Erklärung für die höheren auf Schwad gelegten Stroherträge beim Mais Star* Collect im Vergleich zu den anderen Schwadtechniken sein. Die Ermittlung des auf Schwad gelegten Strohertrages ist dadurch beeinträchtigt, weshalb sich dieser Parameter nur bedingt für die Beurteilung des Schwaderfolges eignet.

Das Verhältnis aus abgefahrener und auf Schwad gelegtem Strohertrag, das mit 91 % beim Merge Maxx 900/902 am größten und mit nur 78 % beim Mais Star* Collect am kleinsten war, lässt zudem – unabhängig von der Schwadleistung – Einflüsse der Schwadtechnik auf die nachfolgende Bergung vermuten. Denkbare Einflussfaktoren sind die Schwadbreite und die Stoppelhöhe. Für den Mais Star* Collect wurden im Vergleich zu den anderen Schwadtechniken signifikant längere Stoppeln und auch größere Schwadbreiten ermittelt (Daten nicht gezeigt), wodurch höhere Verluste bei der Bergung entstehen können. Ein weiterer Erklärungsansatz für das unterschiedliche Verhältnis aus abgefahrener und auf Schwad gelegtem Strohertrag von 89 % beim BioChipper, aber nur 79 % beim Schwadhäcksler UP-6400, trotz vergleichbarer Schwadleistung und Stoppellänge, könnte der Zerkleinerungsgrad des geschwadeten Strohs sein. So scheint sich ein hoher Zerkleinerungsgrad, der beim Schwadhäcksler UP-6400 am größten ist, nachteilig auf die Aufnahme mit der Pick-up auszuwirken.

Für eine umfassende Analyse verschiedener Ernteverfahren spielen neben den realisierten Stroherträgen auch verschiedene Qualitätsparameter eine wichtige Rolle. Im Hinblick auf eine ausreichende Verdichtung im Silo und einen guten Siliererfolg sind hohe TS-Gehalte zu vermeiden. Während die TS-Gehalte in der Restpflanze (Gesamtpflanze ohne Körner) unmittelbar vor dem Drusch im Mittel bei 36,9 % (2014) bzw. 34,2 % (2015) lagen, konnte nach der Bergung ein Anstieg auf 41,4 % (2014) bzw. 59,4 % (2015) verzeichnet werden. Der Unterschied von fast 20 %-Punkten zwischen den Versuchsjahren kann auf die Witterungsverhältnisse während der Ernte zurückgeführt werden. Dabei war die Nachtrocknung 2015 aufgrund der frühen Ernte (einen Monat früher als 2014) in Kombination mit

hohen Tagestemperaturen und einer höheren Windgeschwindigkeit wesentlich stärker als 2014. Im Vergleich zum Witterungseinfluss ist der Effekt der Schwadtechnik auf den TS-Gehalt mit Unterschieden von maximal 6 %-Punkten nur von untergeordneter Bedeutung. Die signifikant geringeren TS-Gehalte im geborgenen Maisstroh beim Mais Star* Collect können auf die unmittelbare Schwadablage des Maisstrohs während des Dreschens zurückgeführt werden. Dadurch ist die Nachtrocknung im Vergleich zu einem separaten Verfahrensschritt für das Schwaden reduziert.

Mit einem durchschnittlichen Rohaschegehalt von 7,0% ist die Verschmutzung beispielsweise geringer als bei der Ernte von Grasanwelkgut vom Grünland (THURNER et al. 2015), das als Biogassubstrat etabliert ist, und kann somit als unproblematisch eingestuft werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass in beiden Versuchsjahren weitestgehend niederschlagsfreie Erntebedingungen vorlagen. Die ermittelten Rohaschegehalte lagen in dem von SHINNERS et al. (2012) erhobenen Bereich von 5,8 bis 9,8% der TM. Wie von VADAS und DIGMAN (2013) und SHINNERS et al. (2012) beschrieben, konnte auch in den vorliegenden Untersuchungen ein klarer Zusammenhang zwischen der Verschmutzung und der Anzahl an Verfahrensschritten bestätigt werden. So wurden mit dem Mais Star* Collect signifikant geringere Rohaschegehalte als bei allen dreistufigen Ernteverfahren ermittelt. Da der Rohascheanteil den abgefahrenen Strohertrag beeinflusst und zugleich im Silo wie auch in der Biogasanlage unerwünscht ist, sollte der oTM-Ertrag die wesentliche Zielgröße für eine Vergleichsanalyse verschiedener Ernteverfahren sein, wobei hier die gleiche Differenzierung wie für den Parameter abgefahrterer Strohertrag beobachtet werden konnte.

Zwischen den Bergungsvarianten Feldhäcksler und Ladewagen konnten keinerlei Unterschiede hinsichtlich der erhobenen Ertrags- und Qualitätsparametern festgestellt werden, was vor dem Hintergrund einer ähnlichen Bergungsweise (Aufnahme über einen Pick-up) nachvollziehbar ist.

Einfluss verschiedener Erntebedingungen auf die Ernteleistung

Eine Verzögerung der Ernte um vier Tage nach dem Korndrusch, wie es unter Praxisbedingungen aus arbeitswirtschaftlichen Gründen als realistisch eingeschätzt werden kann, führte im Versuch zu signifikant geringeren Stroherträgen, wobei die einzelnen Schwadtechniken davon unterschiedlich beeinflusst wurden (Tabelle 3). Bleibt das Stroh nach dem Drusch breit verteilt auf dem Feld zurück, ist anzunehmen, dass es sich mit zunehmender Feldliegezeit stärker setzt und damit eine höhere Lagerungsdichte erreicht. Da es sich bei der Funktionsweise von BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400 um eine Sogwirkung auf der Grundlage einer rotierenden Schlegelwelle handelt, könnte es durch die Effekte der längeren Feldliegezeit zu einer erschwerten Aufnahme des Maisstrohs beim Schwaden kommen, was die teilweise signifikanten Ertragseinbußen von BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400 unter diesen Bedingungen erklären kann. Dagegen ist der Mais Star* Collect an den Einsatz des Mähdreschers gekoppelt, wodurch sich die Ernteverzögerung lediglich auf die nachfolgende Bergung auswirken konnte (Tabelle 1). Erwartungsgemäß wurden daher für den Mais Star* Collect keinerlei Unterschiede in dem auf Schwad gelegten Strohertrag zwischen der langen und der kurzen Feldliegezeit festgestellt und nur geringfügige, nicht signifikante Unterschiede im abgefahrenen Strohertrag. Beim Merge Maxx 900/902 wurden unter den Bedingungen der längeren Feldliegezeit sogar tendenziell größere Stroherträge geschwadet wie auch geborgen. Es wäre denkbar, dass eine höhere Lagerungsdichte den Substratfluss bei der Aufnahme mit der Pick-up des Merge Maxx 900/902 verbessert. Da diese Effekte nicht signifikant waren und zugleich hohe Standardabweichungen erfasst wurden, könnte der ermittelte Unterschied auch dem Versuchsfehler geschuldet sein.

Eine veränderte physikalische Beschaffenheit des Maisstrohs zur Ernte kann nicht nur durch unterschiedliche Feldliegezeiten verursacht werden, sondern auch durch die Sortenwahl beim Körnermaisbau. Wesentliche Merkmale, die durch den Genotyp beeinflusst werden, sind die Menge und der TS-Gehalt des Maisstrohs, woraus sich unterschiedliche Strohverhältnisse zur Ernte ergeben können, die teilweise mit den gewählten Sorten auch erreicht wurden. Trotz des enormen Anstiegs der TS-Gehalte während der Ernte konnten nach der Bergung noch signifikante Unterschiede im Stroh-TS-Gehalt von fast 12% zwischen der Sorte SY Talisman mit der geringsten Reifezahl und der Sorte KWS 9361 mit der höchsten Reifezahl erreicht werden (Tabelle 4). Da keine signifikante Differenzierung der Restpflanzenbiomasse zwischen den drei Sorten bestand, war die sortenbedingte Variation des Maisstrohs eher gering. Außerdem werden durch die Sortenwahl zeitgleich der Feuchtegehalt, das Strohpotenzial und gegebenenfalls weitere Eigenschaften des Maisstrohs beeinflusst, wodurch ein singulärer Effekt der Strohfeuchte bzw. des Strohpotenzials auf die Abfuhraten nur schwer messbar ist. Dies sind mögliche Gründe, warum keine eindeutigen Effekte auf die Stroherträge (auf Schwad gelegter und abgefahrener Strohertrag) messbar waren.

Wie zu erwarten, scheint jedoch ein positiver Zusammenhang zwischen dem Maisstrohpotenzial und dem abgefahrenen Strohertrag zu bestehen. So wurden im Mittel über alle Schwadtechniken bei der Sorte KWS 9361 mit dem höchsten Strohpotenzial auch der höchste Ertrag von 51,6 dt ha⁻¹ erzielt und umgekehrt für die Sorte LG 32.58 mit dem geringsten Strohpotenzial der kleinste Ertrag von 46,1 dt ha⁻¹ abgefahren – obwohl sich die Strohernte der Sorten SY Talisman und KWS 9361 aus versuchstechnischen Gründen über einen Zeitraum von vier Tagen erstreckte und somit die Ernteverluste gegebenenfalls größer waren als bei einer unmittelbar auf den Drusch folgenden Ernte wie bei der Sorte LG 32.58. Andererseits waren die abgefahrenen Stroherträge der Sorte LG 32.58 im Jahr 2015 trotz eines höheren Strohpotenzials im Vergleich zu 2014 nicht größer. Die Untersuchungen von SOKHANSANJ et al. (2002), die bei dem enormen Unterschied von 41 dt ha⁻¹ im Strohpotenzial zwischen zwei Jahren nur eine Differenz von 5 dt ha⁻¹ im Strohertrag fanden, lassen vermuten, dass nur ein schwach ausgeprägter Zusammenhang zwischen dem Strohpotenzial und dem Strohertrag besteht.

Zudem konnte beobachtet werden, dass mit den Schwadtechniken BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400 jeweils die größten Stroherträge bei der Sorte SY Talisman mit dem geringsten Stroh-TS-Gehalt geborgen wurden. Möglicherweise besteht hier – ähnlich wie bei der Feldliegezeit – ein Zusammenhang mit der Strohfeuchte bzw. Lagerungsdichte, der dem Funktionsprinzip der Sogwirkung dieser Schwadtechniken geschuldet ist. Umgekehrt wurden beim Mais Star* Collect höhere Stroherträge für die Sorte KWS 9361 mit dem höchsten Feuchtegehalt erzielt. Bei dieser Schwadtechnik wird das Maisstroh während des Drusches in eine Auffangwanne unter dem Pflücker geworfen, weshalb die Verluste bei trockenerem Stroh höher sein könnten. Beim Merge Maxx 900/902 variierte die Abfuhrleistung in Abhängigkeit von den Sorteneigenschaften am wenigsten. Eine isolierte Veränderung beider Parameter könnte zu deutlicheren Effekten führen und weitere Erkenntnisse über die maschinenspezifisch optimalen Erntebedingungen liefern.

Allgemein ist zu berücksichtigen, dass während der Ernte von Maisstroh sehr unterschiedliche Witterungsverhältnisse herrschen können. Im vorliegenden Versuch war das Wetter zur Ernte in beiden Versuchsjahren sehr gut. Schlechtes Wetter, insbesondere Niederschläge, könnten zu ähnlichen, aber auch deutlich stärkeren Effekten, wie sie durch die Feldliegezeit und die Sortenwahl simuliert wurden, führen. Eine Abschätzung der Ernteleistung unter verschiedenen Witterungsverhältnissen oder auch in anderen Boden-Klima-Regionen ist deshalb nicht ohne Weiteres möglich.

Schlussfolgerungen

Beim Anbau von Körnermais fallen große Mengen an Maisstroh an, die für eine energetische Nutzung interessant sind. Bei der Ernte von Maisstroh kommt es jedoch zu technischen Restriktionen, wodurch die nutzbare Strohmenge wesentlich begrenzt wird. So konnten bei einem Maisstrohpotenzial von 103,2 dt ha⁻¹ nur 55,6 dt ha⁻¹ an Maisstroh geschwadet und 46,8 dt ha⁻¹ geborgen werden. Damit stehen immer noch relevante Mengen an Maisstroh zur Verfügung, wobei mit Abfuhraten von 45% der Anteil an Ernteresten den Strohertrag aktuell übersteigt. Aus ökologischer Sicht sind demnach die Effekte der Strohabfuhr auf die Humus- und Nährstoffrückführung ebenfalls abgeschwächt. Grundlage für eine genaue Einschätzung der ökologischen Effekte ist neben der Kenntnis der Stroherträge insbesondere die der Erntereste. Eine Abschätzung des Maisstrohpotenzials und damit auch der Erntereste über ein Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1 ist wenig geeignet, weil das Strohpotenzial stark variieren kann und somit das Korn-Stroh-Verhältnis nicht konstant ist.

Entlang der Erntekette verursacht der Prozessschritt Schwaden die höchsten Ernteverluste und ist somit die wohl wichtigste Stellschraube, um die nutzbare Menge an Körnermaisstroh zu erhöhen. Pflanzenbauliche wie züchterische Optimierungen können vermutlich nur einen weitaus geringeren Beitrag leisten. Die Analyse verschiedener Ernteverfahren hat dabei gezeigt, dass die Schwadtechnik einen signifikanten Einfluss auf den geborgenen Strohertrag hat, wohingegen die Bergetechnik (Feldhäcksler und Ladewagen) keine Unterschiede zeigte. Da es sich bei den aktuell verfügbaren Schwadtechniken überwiegend um neue technische Entwicklungen handelt, sind zumeist Optimierungsmöglichkeiten noch nicht voll ausgeschöpft, weshalb die Abfuhraten in Zukunft noch steigen könnten. Neben der Wahl des Ernteverfahrens beeinflussen aber auch die vorherrschenden Erntebedingungen bzw. Strohverhältnisse die Ernteleistung. Eine längere Feldliegezeit reduziert dabei größtenteils die Abfuhraten, wohingegen der Anbau verschiedener Sorten keinen Effekt zeigte. Inwiefern sich unterschiedliche Witterungsverhältnisse auf die Abfuhrate der Ernteverfahren auswirken, ist aktuell jedoch noch nicht geklärt. Deshalb sind weitere Untersuchungen zu den Haupteinflussfaktoren auf die Ernteleistung der verschiedenen Verfahrenskombinationen erforderlich, um die Verfahren entsprechend optimieren zu können. Welche Stroherträge mit neuen Ernteverfahren, wie dem Strohmax 5000 (M & R/Maschinen- und Fahrzeughandel GmbH, Deutschland) erzielt werden, bei dem das Maisstroh ebenfalls über eine rotierende Schlegelwelle aufgenommen, aber direkt über eine Schwad-einrichtung dem Feldhäcksler zugeführt wird, ist ebenfalls zu untersuchen.

Mit Rohaschegehalten von durchschnittlich 7,0% im Maisstroh ist die Verschmutzung unproblematisch. Der TS-Gehalt, der im Mittel 50,4% betrug, wurde im Wesentlichen von den Witterungsbedingungen während der Ernte beeinflusst. Für beide Qualitätsmerkmale bestanden zudem signifikante Unterschiede zwischen dem zweistufigen und den dreistufigen Ernteverfahren.

Für eine umfassende Analyse der Ernteverfahren zur Maisstrohbergung sind neben den hier untersuchten Parametern weitere Merkmale zu erfassen. Wesentliche Kriterien für die Praktikabilität sind beispielsweise die Flächenleistung und die Wirtschaftlichkeit des Ernteverfahrens. Auch die mechanische Belastung bzw. der Verschleiß für die Bergungstechnik spielen eine Rolle. Hier wäre ein Zusammenhang mit der Stoppelhöhe nach dem Schwaden denkbar, der jedoch unter den kleinflächigen Versuchsbedingungen nicht geklärt werden konnte. In Bezug auf die Strohqualität sind weitere Einflüsse des Ernteverfahrens auf den Anteil geborgener Strohfraktionen und damit gegebenenfalls auf die stoffliche Zusammensetzung des Maisstrohs denkbar. Außerdem könnten Untersuchungen

zur Häcksellänge weitere notwendige Erkenntnisse zur Verdichtung im Silo oder der Vergärbarkeit in der Biogasanlage liefern.

Literatur

- Anton, C.; Steinicke, H. (Hrsg.) (2012): Bioenergy – chances and limits. Statement. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, Halle (Saale)
- Bayerisches Landesamt für Statistik (2016): GENESIS-Online Datenbank. Erntestatistiken. <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=3&levelid=1469684203407&step=3>, Zugriff am 28.07.2016
- Blanco-Canqui, H.; Lal, R. (2009): Corn Stover Removal for Expanded Uses Reduces Soil Fertility and Structural Stability. *Soil Science Society of America Journal* 73(2), pp. 418–426, <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2008.0141>
- Cosic, B.; Stanic, Z.; Duic, N. (2011): Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: Case study Croatia. *Energy* 36(4), pp. 2017–2028, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.009>
- Djatkov, D.; Viskovic, M.; Rajcetic, J.; Golub, M.; Martinov, M. (2015): Investigation on possibilities of biomethane production from corn stover in Vojvodina. In: Kovačev, I. (Hrsg.): Proceedings of the 43rd International Symposium on Agricultural Engineering. Actual Tasks on Agricultural Engineering, 24th–27th February 2015, Opatija, Croatia, Croatia, pp. 635–644
- Fachverband Biogas e.V. (2016): Biogas Segment Statistics 2014/2015. http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de_branchenzahlen, Zugriff am 28.07.2016
- Fleischhut, M.; Ostertag, J.; Thurner, S.; Eder, J. (2015): Körnermaisstroh für die Biogasproduktion. In: Biogas in der Landwirtschaft. Stand und Perspektiven, FNR/KTBL-Kongress vom 22. bis 23. September 2015 in Potsdam. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, S. 328
- FNR (2015): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2015. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. <https://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/biogas/basisdaten-bioenergie.html>, Zugriff am 07.05.2016
- Golub, M.; Bojic, S.; Djatkov, D.; Mickovic, G.; Martinov, M. (2012): Corn Stover Harvesting for Renewable Energy and Residual Soil Effects. *Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America* 43(4), pp. 72–79
- Hoskinson, R.; Karlen, D.; Birrell, S.; Radtke, C.; Wilhelm, W. (2007): Engineering, nutrient removal, and feedstock conversion evaluations of four corn stover harvest scenarios. *Biomass and Bioenergy* 31, pp. 126–136, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.07.006>
- IEA (2015): Renewables Information. International Energy Agency, Paris
- Jiang, D.; Zhuang, D.; Fu, J.; Huang, Y.; Wen, K. (2012): Bioenergy potential from crop residues in China. Availability and distribution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(3), pp. 1377–1382, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.012>
- Karlen, D.; Birell, S.; Hess, J. (2011): A five-year assessment of corn stover harvest in central Iowa, USA. *Soil and Tillage Research* 115–116, pp. 47–55, <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2011.06.006>
- Kim, S.; Dale, B. (2004): Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy* 26(4), pp. 361–375, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.002>
- Leask, W.; Daynard, T. (1973): Dry matter yield, in vitro digestibility, percent protein, and moisture of corn stover following grain maturity. *Canadian Journal of Plant Science* 53, pp. 515–522
- Lindstrom, M. (1986): Effects of residue harvesting on water runoff, soil erosion and nutrient loss. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 16, pp. 103–112, [http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809\(86\)90097-6](http://dx.doi.org/10.1016/0167-8809(86)90097-6)
- Pavliska, O.; Theuretzbacher, F.; Bauer, A.; Amon, B.; Amon, T.; Kaul, H. (2012): Efficient utilization of lignocellulosic crop residues for biogas production using an optimized process chain. In: 20th European Biomass Conference and Exhibition. Conference 18–22 June 2012, exhibition 18–21 June 2012, Milano, ETA-Florence Renewable Energies, Florence, pp. 673–678

- Petrolia, D. (2008): The economics of harvesting and transporting corn stover for conversion to fuel ethanol. A case study for Minnesota. *Biomass and Bioenergy* 32(7), pp. 603–612, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.012>
- Pordesimo, L.; Edens, W.; Sokhansanj, S. (2004): Distribution of aboveground biomass in corn stover. *Biomass and Bioenergy* 26(4), pp. 337–343, [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00124-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00124-7)
- Qiang, Z.; Thomsen, A. (2012): Fuel Ethanol Production from Wet Oxidised Corn Stover by *S. Cerevisiae*. *Materials for Environmental Protection and Energy Application*, PTS 1, 2 343–344, pp. 963–967
- Scarlat, N.; Martinov, M.; Dallemand, J.-F. (2010): Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use. *Waste Management* 30(10), pp. 1889–1897, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.016>
- Sheehan, J.; Aden, A.; Paustian, K.; Killian, K.; Brenner, J.; Walsh, M.; Nelson, R. (2003): Energy and Environmental Aspects of Using Corn Stover for Fuel Ethanol. *Journal of Industrial Ecology* 7(3-4), pp. 117–146, <http://dx.doi.org/10.1162/108819803323059433>
- Shinners, K.; Adsit, G.; Binversie, B.; Digman, M.; Muck, R.; Weimer, P. (2007a): Single-pass, split-stream harvest of corn grain and stover. *Transactions of the ASABE* 50(2), pp. 355–363
- Shinners, K.; Bennett, R.; Hoffman, D. (2012): Single- and two-pass corn grain and stover harvesting. *Transactions of the ASABE* 55(2), pp. 341–350, <http://dx.doi.org/10.13031/2013.41372>
- Shinners, K.; Binversie, B.; Muck, R.; Weimer, P. (2007b): Comparison of wet and dry corn stover harvest and storage. *Biomass and Bioenergy* 31(4), pp. 211–221, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.04.007>
- Shinners, K.; Boettcher, G.; Hoffman, D.; Munk, J.; Muck, R.; Weimer, P. (2009): Single-Pass Harvest of Corn Grain and Stover: Performance of Three Harvester Configurations. *Transactions of the ASABE* 52(1), pp. 51–60, <http://dx.doi.org/10.13031/2013.22143>
- Sokhansanj, S.; Mani, S.; Tagore, S.; Turhollow, A. (2010): Techno-economic analysis of using corn stover to supply heat and power to a corn ethanol plant – Part 1: Cost of feedstock supply logistics. *Biomass and Bioenergy* 34(1), pp. 75–81, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.001>
- Sokhansanj, S.; Turhollow, A.; Cushman, J.; Cundiff, J. (2002): Engineering aspects of collecting corn stover for bioenergy. *Biomass and Bioenergy* 23(5), pp. 347–355, [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00063-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00063-6)
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2016): Wirtschaftsbereiche - Feldfrüchte und Grünland. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/FeldfruechteGruenland/Tabellen/FeldfruechteZeitreihe.html>, Zugriff am 22.05.2016
- Straeter, J. (2011): Cornrower System of stover harvest. ASABE Paper No. 1110596, <http://dx.doi.org/10.13031/2013.37239>
- Turner, S.; Scheiber, P.; Heizinger, V.; Hoffmann, D. (2015): Grasanwelkguternte: Ladewagen oder Häckselkette - Ein Verfahrensvergleich. In: Forum Pflanzenbau live, Agritechnica 2015, https://www.agritechnica.com/fileadmin/downloads/2015/Programm/Forum_1/F1-13-11-1300_Turner.pdf, Zugriff am 29.07.2016
- Vadas, P.; Digman, M. (2013): Production costs of potential corn stover harvest and storage systems. *Biomass and Bioenergy* 54, pp. 133–139, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.028>
- VDLUFA (1976): Band III Die chemische Untersuchung von Futtermitteln (Engl.: Chemical Analysis of Feedstuffs). Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- Womac, A.; Igathinathane, C.; Sokhansanj, S.; Pordesimo, L. (2005): Biomass moisture relations of an agricultural field residue: corn stover. *Transactions of the ASAE* 48(6), pp. 2073–2083, <http://dx.doi.org/10.13031/2013.20084>
- Zuo, Z.; Yang, X. (2011): Ethanol Production from Corn stover Using Soaking Pretreatment. *Advanced Materials Research* 171–172, pp. 261–265, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.171-172.261>

Autoren

M.Sc. Monika Fleschhut ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe „Pflanzenbausysteme und Züchtungsforschung bei Körner- und Silomais“ und **Dr. Joachim Eder** ist Arbeitsbereichsordinator „Futterpflanzen, Mais, Grünland“ am Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, **M.Sc. (TUM) Dipl. Ing. (FH) Stefan Thurner** ist Leiter der Arbeitsgruppe „Verfahrenstechnik Grünland und Futterkonservierung“ am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Vöttinger Str. 38, 85354 Freising, E-Mail: monika.fleschhut@LfL.bayern.de

Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen ist Leiter des Lehrstuhls für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme der Technischen Universität München, Liesel-Beckmann-tr. 2, 85354 Freising

Danksagung

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Förderung des Forschungsvorhabens.