



## **Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben**

Verwertung von Körnermaisstroh für die  
Biogasproduktion (N/14/07)

Monika Fleschhut

Stefan Thurner

Dr. Johannes Ostertag

Dr. Joachim Eder



**Projektbericht**

Projektförderung: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft  
und Forsten

Finanzierung: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft  
und Forsten

Förderkennzeichen: N/14/07

Geschäftszeichen: E6/b-7235.3-1/960 vom 24.04.2014

Projektlaufzeit: 01.05.2014 – 31.08.2017

Projektleiter: Dr. Joachim Eder

Projektbearbeiter: Monika Fleschhut (IPZ 4a), Stefan Thurner (ILT 1b), Dr.  
Johannes Ostertag (ehemals ITE 1b)

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>Glossar .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung und Problemstellung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Charakterisierung von Körnermaisstroh und Verwertungs-</b> <b>möglichkeiten.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Ertragsstruktur von Körnermais und Korn-Stroh-Verhältnis .....</b>	<b>6</b>
2.2.1 Ertrag und Zusammensetzung des potenziell erntbaren Maisstrohs .....	6
2.2.2 Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis.....	10
2.2.3 TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs.....	12
<b>2.3 Ernte von Körnermaisstroh.....</b>	<b>15</b>
2.3.1 Ernteverfahren zur Maisstrohbergung.....	15
2.3.2 Abgefahrener Strohertrag und Abfuhraten.....	16
<b>2.4 Qualitätsparameter des abgefahrenen Maisstrohs .....</b>	<b>21</b>
2.4.1 TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs .....	22
2.4.2 Rohaschegehalt des abgefahrenen Maisstrohs .....	23
2.4.3 Häcksellänge des abgefahrenen Maisstrohs .....	24
<b>2.5 Stoffliche Zusammensetzung von Körnermaisstroh .....</b>	<b>25</b>
<b>2.6 Methanausbeuten von Körnermaisstroh.....</b>	<b>29</b>
<b>3 Zielsetzung .....</b>	<b>34</b>
<b>4 Material und Methoden .....</b>	<b>35</b>
4.1 Versuchsübersicht.....	35
4.2 Standort und Vegetationsverlauf.....	37
4.3 Sorten- und Ernteterminversuch .....	41

4.3.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	41
4.3.2	Merkmalerfassung und Analysen .....	43
<b>4.4</b>	<b>Erntetechnikversuch.....</b>	<b>49</b>
4.4.1	Versuchsdurchführung.....	49
4.4.2	Versuchsvarianten.....	50
4.4.3	Versuchsaufbau und Versuchsdesign.....	59
4.4.4	Merkmalerfassung und Analysen .....	61
<b>4.5</b>	<b>Statistische Auswertung .....</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>69</b>
<b>5.1</b>	<b>Sorten- und Ernteterminversuche .....</b>	<b>70</b>
5.1.1	Ertrag und Qualität der Gesamtpflanze zur Siloreife (Silomais) .....	70
5.1.2	Ertragsparameter von Korn, Maisstroh und Gesamtpflanze zur Kornreife in Abhängigkeit von der Sorte und dem Erntetermin.....	73
5.1.3	Einfluss der Ertragsparameter auf das potenziell erntbare Maisstroh und das Korn-Stroh-Verhältnis .....	77
5.1.4	Stoffliche Zusammensetzung des potenziell erntbaren Maisstrohs in Abhängigkeit von der Sorte und dem Erntetermin.....	79
5.1.5	Methanausbeute und Methanhektarertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs in Abhängigkeit von der Sorte und dem Erntetermin.....	82
5.1.6	Einfluss der Inhaltsstoffe und Ertragsparameter auf die Methanausbeute und den Methanhektarertrag .....	85
<b>5.2</b>	<b>Erntetechnikversuche.....</b>	<b>86</b>
5.2.1	Ertragsparameter von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh.....	86
5.2.2	Auf Schwad gelegter und abgefahrener Maisstrohertrag in Abhängigkeit vom Ernteverfahren.....	89
5.2.3	Auf Schwad gelegter und abgefahrener Maisstrohertrag in Abhängigkeit von der Feldliegezeit und der angebauten Sorte .....	93
5.2.4	TM- und Rohaschegehalte des abgefahrenen Maisstrohs .....	96
5.2.5	oTM-Ertrag des abgefahrenen Maisstrohs.....	99
5.2.6	Maschinenspezifische Kennzahlen der Ernteverfahren.....	100

5.2.7	Maisstroh-Häcksellängen nach der Ernte .....	105
5.2.8	Ergebnisse des Direct Disc (nur 2016).....	107
<b>5.3</b>	<b>Vergleich der Erträge, Inhaltsstoffe und Methanausbeuten aus beiden Versuch.....</b>	<b>110</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>113</b>
<b>6.1</b>	<b>Sorten- und Ernteterminversuche .....</b>	<b>113</b>
6.1.1	Methodik und Datengrundlage.....	113
6.1.2	TM-Ertrag und TM-Gehalt von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh..	114
6.1.3	Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis.....	119
6.1.4	Stoffliche Zusammensetzung des potenziell erntbaren Maisstrohs .....	121
6.1.5	Methanausbeute und Methanhektarertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs und der Einfluss von Sorte, Erntetermin sowie ertrags- und qualitätsbestimmenden Parametern .....	124
<b>6.2</b>	<b>Erntetechnikversuche.....</b>	<b>129</b>
6.2.1	Methodik und Datengrundlage.....	129
6.2.2	Bilanz der Stroherträge und Ernteverluste bei der Strohernte .....	131
6.2.3	Einfluss der Ernteverfahren auf den Maisstrohertrag .....	135
6.2.4	Einfluss der Erntebedingungen auf den Maisstrohertrag.....	137
6.2.5	Einfluss der Ernteverfahren und Erntebedingungen auf die Qualität des abgefahrenen Maisstrohs .....	141
<b>6.3</b>	<b>Pflanzenbauliches und technologisches Potenzial von Körnermaisstroh.....</b>	<b>147</b>
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>149</b>
<b>8</b>	<b>Siliereignung von Maisstroh .....</b>	<b>153</b>
<b>9</b>	<b>Ökonomie der Maisstrohnutzung .....</b>	<b>153</b>
<b>10</b>	<b>Wissenstransfer .....</b>	<b>154</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>158</b>
<b>12</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>162</b>



---

## Glossar

Doppelnutzung von Körnermais	Anbau von Körnermais für die Ernte von Korn- und Maisstroh
Maisstroh/Körnermaisstroh	gesamte oberirdische Biomasse der Maispflanze ( <i>Zea mays</i> L.) abzüglich der Körner (Gesamtpflanze ohne Körner) ab dem Zeitpunkt der physiologischen Kornreife
potenziell erntbares Maisstroh (dt ha <sup>-1</sup> )	gesamtes Maisstroh, das zum Zeitpunkt des Dreschens potenziell für eine nachfolgende Strohbergung zur Verfügung steht (ermittelt im stehenden Bestand, Schnitthöhe ist die Bodenoberfläche, wenn nicht anders angegeben)
auf Schwad gelegtes Maisstroh (dt ha <sup>-1</sup> )	Maisstroh, das sich im gebildeten Schwad befindet (Schwadbreite ist dabei abhängig von der Schwadtechnik und der Genauigkeit der Anschlussfahrt)
abgefahrenes Maisstroh (dt ha <sup>-1</sup> )	tatsächlich geborgenes Maisstroh
oTM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	organischer TM-Ertrag nach Abzug des Rohascheanteils (= TM-Ertrag * (100 % – Rohaschegehalt))
Stoppeln (dt ha <sup>-1</sup> )	nicht abgetrennte Stoppeln, die nach der Bergung des Maisstrohs zurückbleiben (abhängig von der Arbeitshöhe des Mähdreschers oder der Schwadtechnik)
Abfuhrate (%)	Anteil des abgefahrenen Maisstrohs im Verhältnis zum potenziell erntbaren Maisstroh (= abgefahrener Maisstrohertrag / potenziell erntbarer Maisstrohertrag)

Bergungsverluste (dt ha <sup>-1</sup> )	Ernteverluste beim Verfahrensschritt Bergen (= auf Schwad gelegter Maisstrohertrag – abgefahrener Maisstrohertrag)
Ernteverluste (dt ha <sup>-1</sup> )	gesamte Ernteverluste bei der Strohernte (= potenziell erntbarer Maisstrohertrag – abgefahrener Maisstrohertrag)
Harvestindex	Verhältnis des Korn-TM-Ertrages zum oberirdischen TM-Ertrag der Gesamtpflanze
Korn-Stroh-Verhältnis (1:x)	Verhältnis des Korn-TM-Ertrages zum TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs (x = TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs/Korn-TM-Ertrag)
pflanzenbauliches Potenzial	Methanhektarertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs (vor der Strohernte)
technologisches Potenzial	Methanhektarertrag des abgefahrenen Maisstrohs (nach der Strohernte)
Ernteverfahren	Kombination aus einer Schwadtechnik und einer Bergungstechnik zur Ernte von Maisstroh
zweistufiges Ernteverfahren	für die Ernte von Korn und Maisstroh sind zwei separate Verfahrensschritte notwendig (1. Verfahrensschritt: Dreschen und Schwaden, 2. Verfahrensschritt: Bergen oder: 1. Verfahrensschritt: Dreschen, 2. Verfahrensschritt: Schwaden und Bergen)
dreistufiges Ernteverfahren	für die Ernte von Korn und Maisstroh sind drei separate Verfahrensschritte notwendig (1. Verfahrensschritt: Dreschen der Körner, 2. Verfahrensschritt: Schwaden des Maisstrohs, 3. Verfahrensschritte: Bergen des Maisstrohs)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fraktionen von Körnermais .....	4
Abbildung 2: Ausgelegte Kunstrasen-Matten für das Aufsammeln der auf Schwad gelegten Strohmenge .....	63
Abbildung 3: Abgemessene Maisstrohschwade für die Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. dem Kurzschnittladewagen .....	64
Abbildung 4: Einfluss des Korn-TM-Ertrages auf den TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs; Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine; n = 135 .....	78
Abbildung 5: Einfluss des Korn-TM-Ertrages auf das Korn-Stroh-Verhältnis (1:x); Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine; n = 135.....	79
Abbildung 6: Einfluss des TM-Ertrages des (potenziell erntbaren) Maisstrohs auf den Methanhektarertrag; Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine; n = 135 .....	85
Abbildung 7: Mengenanteile (%) des Maisstrohs an den sechs Größenfraktionen (mm) nach dem Verfahrensschritt Schwaden im Erntetechnikversuch.....	106
Abbildung 8: Mengenanteile (%) des Maisstrohs an den sechs Größenfraktionen (mm) nach dem Verfahrensschritt Bergen im Erntetechnikversuch.....	107
Abbildung 9: Mengenanteile (%) des Maisstrohs an den sechs Größenfraktionen (mm) nach dem Verfahrensschritt Bergen im Erntetechnikversuch.....	109
Abbildung 10: Versuchsdesign im Sorten- und Ernteterminversuch in 2014 .....	175
Abbildung 11: Versuchsdesign im Sorten- und Ernteterminversuch in 2015 .....	175
Abbildung 12: Versuchsdesign im Sorten- und Ernteterminersuch in 2016.....	176
Abbildung 13: Einsatz des BioChippers (Versuchsjahr 2015).....	177
Abbildung 14: Blick von unten in den BioChipper.....	177
Abbildung 15: Einsatz des Schwadhäckslers UP-6400 (Prototyp) (Versuchsjahr 2015).178	
Abbildung 16: Blick von unten in den Schwadhäcksler UP-6400.....	178
Abbildung 17: Einsatz des Merge Maxx 900 (Versuchsjahr 2014).....	179
Abbildung 18: Detailfoto vom Merge Maxx 900.....	179
Abbildung 19: Einsatz des Mais Star* Collect (Versuchsjahr 2015).....	180
Abbildung 20: Detailfoto vom Unterbau des Mais Star* Collect.....	180
Abbildung 21: Versuchsdesign im Erntetechnikversuch in 2014 .....	181
Abbildung 22: Versuchsdesign im Erntetechnikversuch in 2015 .....	182
Abbildung 23: Versuchsdesign im Erntetechnikversuch in 2016 .....	183
Abbildung 24: Trommelsiebmaschine mit 6 Größenklassen.....	184
Abbildung 25: Einfluss des Zuckergehaltes auf den Methanhektarertrag; Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine; n = 135.....	187

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Literaturübersicht zu den Ertragsparametern von Körnermais und dem Harvestindex bzw. dem Korn-Stroh-Verhältnis .....</i>	8
<i>Tabelle 2: Literaturübersicht zu den abgefahrenen Stroherträgen.....</i>	19
<i>Tabelle 3: Literaturübersicht über die stoffliche Zusammensetzung von Körnermaisstroh</i>	27
<i>Tabelle 4: Literaturübersicht über die Methanausbeuten von Körnermaisstroh .....</i>	31
<i>Tabelle 5: Übersicht der durchgeführten Versuche und untersuchten Parameter.....</i>	36
<i>Tabelle 6: Übersicht über die Versuchsstandorte.....</i>	37
<i>Tabelle 7: Monatliche Durchschnittstemperatur (°C) im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Pulling .....</i>	38
<i>Tabelle 8: Monatliche Niederschlagsmenge (mm) im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Pulling .....</i>	38
<i>Tabelle 9: Monatliche Durchschnittstemperatur (°C) im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Neufinsing .....</i>	39
<i>Tabelle 10: Monatliche Niederschlagsmenge (mm) im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Neufinsing .....</i>	40
<i>Tabelle 11: Sortenbeschreibung .....</i>	41
<i>Tabelle 12: Übersicht über die pflanzenbaulichen Maßnahmen in den Sorten- und Ernteterminversuchen .....</i>	42
<i>Tabelle 13: Übersicht über die Erntetermine in den einzelnen Versuchsjahren im Sorten- und Ernteterminversuch .....</i>	43
<i>Tabelle 14: Parameter und Methoden der nasschemischen Futtermittelanalysen.....</i>	47
<i>Tabelle 15: Übersicht über die pflanzenbaulichen Maßnahmen im Erntetechnikversuch ..</i>	49
<i>Tabelle 16: Übersicht über die Versuchsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren im Erntetechnikversuch.....</i>	51
<i>Tabelle 17: Übersicht und Charakterisierung der eingesetzten Schwadtechniken.....</i>	55
<i>Tabelle 18: Zeitlicher Überblick über die Verfahrensschritte Dreschen, Schwaden und Bergen des Maisstrohs in den Versuchsjahren 2014 (zwei Feldliegezeiten), 2015 (drei Sorten) und 2016; graue hinterlegte Markierung: Varianten, die über drei Jahre geprüft wurden. ....</i>	58
<i>Tabelle 19: Übersicht über die Abmessungen der Parzellen und Ernteflächen bei den einzelnen Schwadtechniken .....</i>	60

<i>Tabelle 20: Ertragsparameter und Methanausbeuten von Silomais (Gesamtpflanze zur Siloreife) in Abhängigkeit von der Sorte und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabelle 21: Inhaltsstoffe (NIRS-Analysen) von Silomais (Gesamtpflanze zur Siloreife) in Abhängigkeit von der Sorte und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabelle 22: Ertragsparameter von Korn, Maisstroh und Gesamtpflanze in Abhängigkeit von der Sorte, dem Erntetermin und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabelle 23: Länge und TM-Ertrag der Stoppeln im Versuchsjahr 2016 im Sorten- und Ernteterminversuch (Mittelwerte <math>\pm</math> Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Sorten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Ernteterminen; Student-Newman-Keuls-Test, <math>\alpha = 0,05</math>).....</i>	<i>76</i>
<i>Tabelle 24: Stoffliche Zusammensetzung des (potenziell erntbaren) Maisstrohs (Weender/Van Soest-Analysen) in Abhängigkeit von der Sorte, dem Erntetermin und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabelle 25: Methanausbeute und Methanhektarertrag des (potenziell erntbaren) Maisstrohs in Abhängigkeit von der Sorte, dem Erntetermin und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabelle 26: Ertragsparameter der Sorte LG 32.58 im stehenden Maisbestand im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabelle 27: Ertragsparameter der drei Sorten im stehenden Maisbestand im Versuchsjahr 2015 im Erntetechnikversuch .....</i>	<i>88</i>
<i>Tabelle 28: Stroherträge und Stoppelmenge in Abhängigkeit vom Ernteverfahren für die Varianten „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“ im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabelle 29: Stroherträge bei Variation der Feldliegezeit im Versuchsjahr 2014 im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabelle 30: Stroherträge in Abhängigkeit von drei Sorten im Versuchsjahr 2015 im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabelle 31: TM- und Rohaschegehalte des abgefahrenen Maisstrohs in Abhängigkeit vom Ernteverfahren für die Varianten „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“ im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabelle 32: Organischer Maisstrohertrag des abgefahrenen Maisstrohs in Abhängigkeit vom Ernteverfahren für die Varianten „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“ im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>99</i>

<i>Tabelle 33: Effektive Arbeitsbreite (m) nach dem Einsatz der Schwadtechniken im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabelle 34: Schwadbreite (m) nach dem Einsatz der Schwadtechniken im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabelle 35: Schwadhöhe (cm) nach dem Einsatz der Schwadtechniken im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabelle 36: Stoppellänge (cm) nach dem Einsatz der Schwadtechniken im Erntetechnikversuch.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabelle 37: Vergleich des Direct Disc mit den anderen Schwadtechniken im Versuchsjahr 2016 im Erntetechnikversuch (Mittelwerte <math>\pm</math> Standardabweichung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Spalte zwischen den Schwadtechniken; Student-Newman-Keuls-Test, <math>\alpha = 0,05</math>) .....</i>	<i>108</i>
<i>Tabelle 38: Vergleich der Erträge, Inhaltsstoffe und Methanausbeuten aus den beiden Versuchen (unter Berücksichtigung aller geprüften Varianten in den Einzeljahren) .</i>	<i>112</i>
<i>Tabelle 39: Vorträge im Rahmen des Projektes.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabelle 40: Zeitschriftenbeiträge, Filmbeiträge und sonstige Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes .....</i>	<i>156</i>
<i>Tabelle 41: Korrelationsmatrix der Ertragsparameter im Sorten- und Ernteterminversuch, Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (r), Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine; n = 135.....</i>	<i>185</i>
<i>Tabelle 42: Korrelationsmatrix der Inhaltsstoffe, der Ertragsparameter und der Methanausbeute im Sorten- und Ernteterminversuch, Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman (r); Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine; n = 135 .....</i>	<i>186</i>

---

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ADF</b>	Säure-Detergenzfaser
<b>ADL</b>	Lignin
<b>BioC</b>	BioChipper
<b>CEL</b>	Cellulose
<b>EEG</b>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<b>FL</b>	Feldliegezeit
<b>HCEL</b>	Hemicellulose
<b>k. A.</b>	Keine Angabe
<b>KLW</b>	Kurzschnittladewagen
<b>LfL</b>	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
<b>MergeM</b>	Merge Maxx 900/902
<b>MSCollect</b>	Mais Star* Collect
<b>Mt</b>	Megatonne
<b>n</b>	Anzahl an Beobachtungen
<b>n. b.</b>	nicht bestimmt
<b>NDF</b>	Neutral-Detergenzfaser
<b>NIRS</b>	Nahinfrarotspektroskopie
<b>NN</b>	Normalnull
<b>oTM</b>	Organische Trockenmasse
<b>SchwH</b>	Schwadhäcksler UP-6400
<b>SFH</b>	Selbstfahrender Feldhäcksler
<b>ST</b>	Stärke
<b>TM</b>	Trockenmasse
<b>TM-Gehalt</b>	Trockenmassegehalt
<b>VK</b>	Variationskoeffizient
<b>XA</b>	Rohasche
<b>XF</b>	Rohfaser
<b>XL</b>	Rohfett
<b>XP</b>	Rohprotein
<b>XZ</b>	Zucker (reduzierend)

## 1 Einleitung und Problemstellung

Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen und umweltschonenden Energiebereitstellung sollen die erneuerbaren Energien auch künftig stärker forciert werden (z. B. Directive 2009/28/EC, 2009; EEWärmeG, 2008; BioKraftQuG, 2006). In Deutschland spielt dabei die Biogastechnologie als witterungsunabhängiger und flexibler Energieträger mit einer Anlagenanzahl von 8.726 Biogasanlagen und einer installierten elektrischen Nennleistung von 3.905 Megawatt (Fachverband Biogas e.V., 2016) eine bedeutende Rolle in der Energieversorgung. Dabei liegt der Anteil an der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien bei insgesamt 16,8 % im Stromsektor, 10,6 % im Wärmesektor und bei 1,6 % im Verkehrssektor (BMWV, 2016). Zudem ist die Biogasproduktion für viele Landwirte zu einem wichtigen Standbein in der Einkommensstruktur geworden.

Als Substrate werden nach wie vor überwiegend nachwachsende Rohstoffe eingesetzt, die mittlerweile auf 13 % der landwirtschaftlichen Nutzflächen angebaut werden (BMEL, 2016). Dies führt vermehrt zu Akzeptanzproblemen in der Öffentlichkeit und wird vor dem Hintergrund der stetig sinkenden Vergütungssätze zunehmend unrentabler. Die bedeutendsten Substrate (energiebezogen) sind Silomais, Grassilage, Getreide-Ganzpflanzensilage und Getreidekörner (DBFZ, 2015). Der Einsatz von Silomais als Biogassubstrat liegt dabei aktuell in einer Größenordnung von 13 - 14 Mt TM, bei einer Anbaufläche von 900.000 ha (FNR, 2015) und einem Durchschnittsertrag von 154 dt ha<sup>-1</sup> (Destatis, 2016) in Deutschland). Durch das EEG (2017) muss jedoch der Einsatz von Mais (als Ganzpflanze, Maiskorn-Spindel-Gemisch, Körnermais und Lieschkolbenschrot) und Getreidekörnern künftig schrittweise auf bis zu 44 Masseprozent begrenzt werden (§ 39h). Demzufolge sind für den künftigen Anlagenbetrieb Biomassepotenziale notwendig, die kostengünstig sind, keinen zusätzlichen Flächenbedarf induzieren und nach Möglichkeit nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion stehen sowie keiner Reglementierung durch das EEG (2017) unterliegen.

Reststoffe aus der Landwirtschaft erfüllen diese Eigenschaften größtenteils. Die Studie der Leopoldina (2012), die sich in ihrer Stellungnahme „Bioenergy – Chances and Limits“ gegen einen weiteren Ausbau von Bioenergie in Deutschland ausspricht, sieht dabei ein signifikantes Bioenergiepotenzial in der Verwendung von Mist und Gülle aus der Tierhaltung wie auch dem Einsatz von Lebensmittelabfällen und pflanzlichen Reststoffen, sofern die Nutzung pflanzlicher Reststoffe so begrenzt wird, dass mit der zurückbleibenden Biomasse auf den Feldern die Bodenfunktionen gesichert sind (Leopoldina, 2012).

Mit einem weltweiten Mengenanfall von 204 Mt Trockenmasse (TM) ist Maisstroh, das als landwirtschaftliches Koppelprodukt bei der Ernte von Körnermais anfällt, nach Reis- und Weizenstroh der drittbedeutendste pflanzliche Reststoff bezüglich Quantität und Energiegehalt. Besonders viel Körnermaisstroh fällt in Nordamerika an, gefolgt von Asien und Europa (29 Mt TM) (KIM & DALE, 2004). Die Menge an nachhaltig verfügbarem Körnermaisstroh wird in der Europäischen Union (EU 27) auf 20,6 Mt TM beziffert (BAUER et al., 2015). Eine Potenzialabschätzung für die Nutzung von Körnermaisstroh als Energiesubstrat liegt auch bereits für einzelne Länder bzw. Regionen vor (z. B. PAVLISKA et al., 2012; JIANG et al., 2012; COSIC et al., 2011; SCARLAT et al., 2010; HADDAD & ANDERSON, 2008). Die Nutzungsmöglichkeiten für Maisstroh sind dabei vielfältig, wobei die energetische Verwertung zunehmend im Fokus steht (MENARDO et al., 2015a). Von besonderem Interesse ist dabei die Nutzung von Maisstroh für die Produktion von Ethanol, was in zahlreichen Untersuchungen bereits mehrfach Gegenstand der Forschung war (s. QIANG & THOMSEN, 2012; ZUO & YANG, 2011; SHEEHAN et al., 2003; SOKHANSANJ et al., 2002).

Auch in Deutschland kann bei einer aktuellen Anbaufläche von 455.000 ha (Bezugsjahr 2015; Destatis, 2016) ein relevantes Strohaufkommen von jährlich 3,8 Mt TM unterstellt werden, wenn ein mittlerer Kornertrag von 96,2 dt ha<sup>-1</sup> (Bezugsjahre: 2006 – 2015; 14 % Kornfeuchte; Destatis, 2016) und ein Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1 (DüV, 2006) angenommen werden. Bislang verbleibt das Maisstroh jedoch nach der Körnerernte zur Humusreproduktion und Nährstoffrückführung auf dem Feld und wird keiner nennenswerten Nutzung zugeführt.

Da also relevante, bislang nicht genutzte Mengen an Maisstroh vorhanden sind, die als Reststoff nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion stehen, grundsätzlich kostengünstig sind und zudem nicht unter den „Mais- und Getreidekorndeckel“ des EEG (2017) fallen, ist Maisstroh in Deutschland überaus interessant für den künftigen Einsatz in der Biogasproduktion. Diese Nutzungsrichtung ist aber bislang kaum untersucht. Deshalb ist die Prüfung der Substrateignung Voraussetzung für eine umfangreiche Nutzung von Maisstroh. Da auch grundlegende Fragestellungen zu Ertrag und Qualität dieses Substrates unter deutschen Standortbedingungen nicht geklärt bzw. vorhandene Erkenntnisse nicht zweifelsfrei auf die Standortbedingungen und Gegebenheiten in Deutschland übertragbar sind, müssen zunächst systematische Untersuchungen zu den Ertragsparametern von Körnermais durchgeführt und wesentliche Kennzahlen wie der Strohanfall und das Korn-Stroh-Verhältnis bzw. der Harvestindex geklärt werden.

Unklar ist ebenfalls, welche Erträge bei der Strohbergung mit den in Deutschland verfügbaren Ernteverfahren unter den vorherrschenden Erntebedingungen erzielt werden. Generelle Forschungslücken bestehen außerdem hinsichtlich der Maisstrohqualität, der Silierfähigkeit und der Eignung des Substrates für eine anaerobe Vergärung. Auch die Wirtschaftlichkeit des Substrates ist bislang nicht untersucht worden.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden in den Jahren 2014 - 2016 feldexperimentelle Analysen durchgeführt, die auf zwei eigenständigen Feldversuchen basierten:

Der Sorten- und Ernteterminversuch sollte Erkenntnisse zu den Ertragsparametern von Körnermais und den pflanzenbaulichen Effekten der Sorten- und Ernteterminwahl auf die Ertragsbildung von Korn und Maisstroh liefern. Mithilfe des Erntetechnikversuches sollten für verschiedene Ernteverfahren und Erntebedingungen die Abfuhrdaten und Ernteverluste bei der Strohbergung quantifiziert werden.

Zur Beschreibung der Substratqualität wurde die stoffliche Zusammensetzung und weitere Qualitätsparameter wie der Verschmutzungs- und Zerkleinerungsgrad des Maisstrohs bestimmt. Als Parameter für eine erste Abschätzung der Vergärbarkeit in der Biogasanlage wurde die Methanausbeute erfasst und die mögliche Bedeutung einzelner Inhaltsstoffe analysiert.

Die Erkenntnisse aus beiden Versuchen wurden anschließend in einer Gesamtbewertung zusammengeführt, um das pflanzenbaulich vorhandene und das technologisch realisierbare Potenzial von Körnermaisstroh für die Biogasproduktion zu quantifizieren.

Weiterhin wurde mithilfe von Silierversuchen die Siliereignung geprüft und eine erste Abschätzung zur Ökonomie der Maisstrohnutzung durchgeführt.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Charakterisierung von Körnermaisstroh und Verwertungsmöglichkeiten

Der Begriff Körnermaisstroh bzw. Maisstroh bezieht sich meist auf den Anteil der oberirdischen Biomasse der Maispflanze, der beim Körnerdrusch nicht geerntet wird. SHINNERS et al. (2012) und IGATHINATHANE et al. (2007) definieren Körnermaisstroh als den oberirdischen Teil der Maispflanze nach Abzug der Maiskörner. Bei ausschließlicher Ernte der Körner, besteht Körnermaisstroh demzufolge aus den fünf verschiedenen Fraktionen Halm, Blätter, Rispe, Spindel und den Lieschblättern (vgl. Abbildung 1). Werden jedoch zusätzlich zum Korn weitere Kolbenbestandteile geerntet (Corn-Cob-Mix und Lieschkolbenschrot), fehlen für die nachfolgende Ernte des Körnermaisstrohs die Spindeln und Lieschblätter ganz oder teilweise. Je nach Schnitthöhe beim Dreschen bzw. bei der Ernte von Körnermaisstroh sind auch variable Anteile der Stoppeln Bestandteil des Körnermaisstrohs.

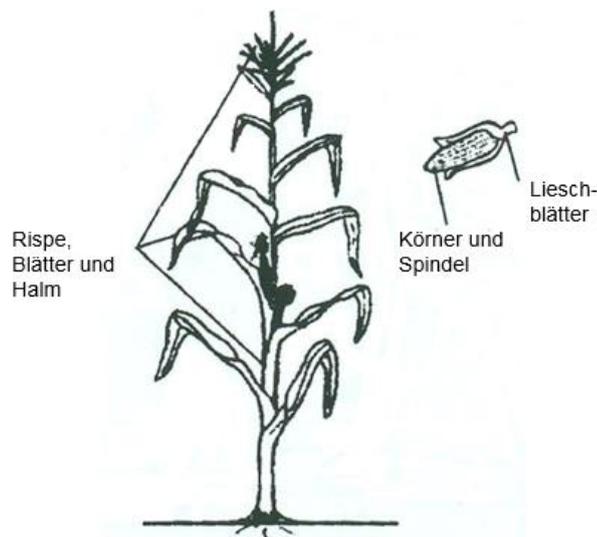


Abbildung 1: Fraktionen von Körnermais (verändert nach GOLUB et al., 2012)

Körnermaisstroh unterscheidet sich in zwei wesentlichen Merkmalen von Silomais (Ganzpflanzen-Silage zur Siloreife; TM-Gehalt von 30 – 35 % in der Gesamtpflanze). Da der Bestand erst zum Zeitpunkt der physiologischen Reife (BBCH-Stadium 87; Korn-TM-Gehalt von ca. 60 %) bzw. vorwiegend der Vollreife (BBCH-Stadium 89; Korn-TM-Gehalt von ca. 65 %) gedroschen wird (BSA, 2000), ist die Restpflanze bei Körnermais, bedingt durch den späteren Erntezeitpunkt, meist stärker abgereift und das Substrat enthält keine

Körner mehr. Dagegen sind das Anbauverfahren und häufig auch die angebauten Genotypen identisch mit der Produktionsrichtung Silomais. Da Silomais aufgrund des hohen Anbauumfanges in der Praxis oftmals über ein relativ breites Erntefenster hinweg geerntet wird, können die Übergänge zwischen Silomais und Körnermaisstroh in Bezug auf das Abreifeverhalten der Restpflanze auch fließend sein.

Die Verwertungsmöglichkeiten von Körnermaisstroh sind vielfältig. In einigen Ländern ist das Substrat bereits seit langer Zeit als Futtermittel oder als Einstreu in der Tierhaltung bekannt (SHINNERS et al., 2011; KADAM & MCDILLAN, 2003). Die Spindeln werden außerdem als Baustoff verwendet (PINTO et al., 2012). Auch für chemisch-industrielle Zwecke ist die Nutzung von Maisstroh beschrieben, z. B. für die Extraktion einzelner Inhaltsstoffe oder für die Gewinnung von Zellstoff in der Papierindustrie (BONINI et al., 2008; ZHU & LEE, 2011). GLASSNER et al. (1998) bezifferten den Nutzungsumfang von Maisstroh für die Tierhaltung (Futter und Einstreu) auf 5 %, den Anteil für industrielle Zwecke auf nur 1 %, und den auf dem Feld verbleibenden Anteil auf über 90 %. Auch KADAM & MCDILLAN (2003) kamen zu dem Ergebnis, dass unter 5 % des Maisstrohs in den USA geerntet und genutzt werden.

In den letzten Jahren ist das Interesse an der Maisstrohnutzung insbesondere für energetische Zwecke gestiegen. Der primäre Nutzungspfad ist dabei die thermochemische Konversion, wie z. B. die Vergasung oder Pyrolyse (IOANNIDOU et al., 2009; KUMAR et al., 2008), und insbesondere die Produktion von Ethanol (WANG et al., 2014; BONDESSON et al., 2013; ZUO & YANG, 2011; QIANG & THOMSEN, 2012; LAMSAL et al., 2011; CHERUBINI & ULGIATI, 2010; LORENZ et al., 2009; SHEEHAN et al., 2003). In jüngster Zeit besteht auch zunehmendes Interesse an der Nutzung von Maisstroh für die anaerobe Vergärung, insbesondere in Europa. Die grundsätzliche Verwertbarkeit als Biogassubstrat wurde bereits vereinzelt beschrieben (MENARDO & BALSARI, 2012; LI et al., 2011; YUAN, 2011; DINUCCIO et al., 2010). Allerdings erfolgt die Nutzung als Biogassubstrat noch nicht in größerem Umfang (MENARDO et al., 2015a) und systematische Untersuchungen fehlen bislang für diese Nutzungsrichtung.

Im Hinblick auf eine Verwertung von Körnermaisstroh in der Biogasproduktion spielt neben der Charakterisierung des Substrates auch die begriffliche Einordnung eine wesentliche Rolle. Im landwirtschaftlichen Kontext wird Körnermaisstroh zumeist als „Nebenernteprodukt“ deklariert, worunter die trockenen Halme, Stängel und Blätter der ausgedroschenen Getreidearten, Hülsenfrüchte, Öl- und Faserpflanzen verstanden werden (LEIBNITZ, 1974). Gemäß der Biokraft-NachV (2009) wird Stroh der Kategorie „Reststoff“ zugeordnet. Diese Eingruppierung findet sich auch in zahlreichen weiteren Literaturstellen (ZELLER et al., 2012; Leopoldina, 2012). Eine klare begriffliche

Abgrenzung zwischen Reststoffen und Neben(ernte)produkten erfolgt jedoch selten. Zumeist werden die Begriffe gleichbedeutend verwendet.

Im Sinne des EEG (2009) wird Stroh (Grüngut, Trockengut oder Silage) als nachwachsender Rohstoff gewertet und demzufolge mit dem Bonus für Strom aus nachwachsenden Rohstoffen vergütet, wobei eine klare Abgrenzung zu den „rein pflanzlichen Nebenprodukten“, wie z. B. Getreideausputz, besteht. Gemäß dem EEG (2012) werden die nachwachsenden Rohstoffe zusätzlich in zwei Einsatzstoffvergütungsklassen unterschieden, wobei das Substrat Stroh in die Einsatzstoffvergütungsklasse II mit einer höheren Vergütung fällt.

## 2.2 Ertragsstruktur von Körnermais und Korn-Stroh-Verhältnis

Grundlage für die künftige Nutzung von Körnermaisstroh ist die Kenntnis der beim Drusch anfallenden oberirdischen Biomasse an Körnermaisstroh, die potenziell für die Maisstrohbergung zur Verfügung steht. Dafür wird im Folgenden der Begriff *potenziell erntbares Maisstroh* verwendet (Definitionen s. Glossar).

### 2.2.1 Ertrag und Zusammensetzung des potenziell erntbaren Maisstrohs

Die Angaben zum potenziell erntbaren Maisstrohertrag – ermittelt im stehenden Bestand durch eine manuelle Ernte – differieren in der Literatur sehr stark und bewegen sich zwischen TM-Erträgen von durchschnittlich 72 dt ha<sup>-1</sup> (GOLUB et al., 2016) und 132 dt ha<sup>-1</sup> (HUANG et al., 2012a) (*Tabelle 1*). Bei der Mehrheit der Studien waren die Korn-TM-Erträge, die von 53 dt ha<sup>-1</sup> (GOLUB et al., 2016) bis 118 dt ha<sup>-1</sup> (PORDESIMO et al., 2004a) reichten, größer als das potenziell erntbare Maisstroh. WILHELM et al. (2011) konnten diesen Zusammenhang in einer einjährigen Untersuchung an sieben von acht untersuchten Versuchsstandorten in den USA – zum Zeitpunkt der Kornreife – bestätigen.

Für die Ertragshöhe beider Fraktionen spielt der Erntetermin eine wesentliche Rolle. So ermittelten PORDESIMO et al. (2004a) in einer umfangreichen Studie zur Entwicklung der Korn- und Stroherträge über eine Zeitspanne von knapp vier Monaten (beginnend Anfang August, kurz vor der physiologischen Reife) sehr variable TM-Erträge in Abhängigkeit vom Erntetermin. Dabei betragen die Korn-erträge im gesamten Betrachtungszeitraum zwischen 93 und 132 dt ha<sup>-1</sup>, während die potenziell erntbaren Maisstroherträge mit 86 - 156 dt ha<sup>-1</sup> noch stärker schwankten. Der Maximalertrag des potenziell erntbaren

Maisstrohs von  $156 \text{ dt ha}^{-1}$  wurde ebenso wie der maximale Kornertrag zum Zeitpunkt der physiologischen Kornreife (23. August, Korn-TM-Gehalt von knapp 70 %) gemessen. Durch die zahlreichen Erhebungen in einem Zeitabstand von nur wenigen Tagen konnten die Autoren zudem zeigen, dass vor der physiologischen Kornreife der TM-Ertrag der Körner geringer als das potenziell erntbare Maisstroh war, wohingegen nach Erreichen der physiologischen Kornreife der Kornertrag den stetig sinkenden Maisstrohertrag überstieg.

Vergleichbar zu den Ergebnissen von PORDESIMO et al. (2004a) bestätigten SHINNERS & BINVERSIE (2007) im Verlauf ihrer mehrjährigen Ernteterminstudie sinkende Stroh- und steigende Kornerträge. Bei Ertragserhebungen im Oktober, dem typischen Erntemonat für Körnermais in Wisconsin (USDA, 2010), waren die Korn-TM-Erträge mit  $110 \text{ dt ha}^{-1}$  fast doppelt so hoch wie zu Beginn der Ernteterminstudie (Ende August), der potenziell erntbare Strohertrag aber um durchschnittlich  $20 \text{ dt ha}^{-1}$  geringer. Ebenso waren dabei die Stroherträge anfangs größer als die Kornerträge, während es im späteren Verlauf umgekehrt war.

Auch WILHELM et al. (2011), welche die Erträge von Korn und Maisstroh zum Zeitpunkt der physiologischen Reife mit den Erträgen zur tatsächlichen Kornernte verglichen, konnten einen geringfügigen Anstieg der Kornerträge, aber einen Rückgang des potenziell erntbaren Maisstrohs feststellen, der an einzelnen Standorten bis zu 39 % betrug. Sinkende Maisstroherträge und steigende Kornerträge bei späteren Ernteterminen bestätigten auch LIZOTTE et al. (2015b). Der durchschnittliche Ertragsverlust an Maisstroh betrug in ihren Untersuchungen  $1,6 \text{ dt ha}^{-1}$  pro Woche. Vergleichbar zu den Ergebnissen von SHINNERS & BINVERSIE (2007) sanken auch bei HUANG et al. (2012a) die potenziell erntbaren Maisstroherträge um rund  $20 \text{ dt ha}^{-1}$  zwischen der physiologischen Kornreife und dem Versuchsende, wobei die Kornerträge in diesem Zeitraum konstant blieben.

Tabelle 1: Literaturübersicht zu den Ertragsparametern von Körnermais und dem Harvestindex bzw. dem Korn-Stroh-Verhältnis

Quelle	Land	Korn		Maisstroh		Harvest-index <sup>1)</sup>	Korn-Stroh-Verhältnis	Zeitraum der Beprobung	Schnitthöhe Maisstroh (cm)	Anmerkungen
		TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	TM-Gehalt (%)	TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	TM-Gehalt (%)					
GOLUB et al., 2016	Serbien (Vojvodina)	108/53 (2011/2012)	k. A.	104/72 (2011/2012)	k. A.	0,51/0,41 (2011/2012)	k. A. (1:0,96/1:1,36)	Mitte Sept. - Ende Nov.	Bodenoberfläche	manuelle Ernte von 1,4 m <sup>2</sup> 2 Jahre, 3 Orte, 8 Sorten
LIZOTTE et al., 2015b	Kanada (Quebec)	96	> 70	82	48	k. A. (0,54)	1:0,85	1. Okt. - 12. Nov.	10	manuelle Ernte von 5 Pflanzen, 3 Jahre, 3 Orte, 7 Sorten, wöchentliche Ernte
WILHELM et al., 2011	USA (8 Standorte)	92/96 (physiol. Kornreife/ Kornernte)	k. A.	86/73 (physiol. Kornreife/ Kornernte)	k. A.	0,50/0,57 (physiol. Kornreife/ Kornernte)	k. A. (1:0,93/1:0,76)	10. Sept. - 29. Okt.	Bodenoberfläche	manuelle Ernte von 1 m <sup>2</sup> , 1 Jahr, 8 Orte, 2 Erntetermine
HUANG et al., 2012a	USA (Illinois)	111/112 (physiol. Kornreife/ Versuchs-ende)	63/82 (physiol. Kornreife/ Versuchs-ende)	132/110 (physiol. Kornreife/ Versuchs-ende)	32/49 (physiol. Kornreife/ Versuchs-ende)	k. A. 0,46/0,50 (physiol. Kornreife/ Versuchs-ende)	k. A. (1:1,19/1:0,98)	19. Aug. - 23. Nov.	10	manuelle Ernte von 4 m <sup>2</sup> 2 Jahre, 1 Ort, 1- bzw. 2-wöchentliche Ernte
SHINNERS & BINVERSIE, 2007	USA (Wisconsin)	110	75	105	53	0,52	k. A. (1:0,95)	14. Okt. - 28. Okt.	1. Knoten oberhalb des Bodens	manuelle Ernte von 5 Pflanzen, 3 Jahre, 6 Sorten, Ernte alle 5 Tage
PORDESIMO et al., 2004a	USA (Tennessee)	118	82	110	k. A.	k. A. (0,52)	1:0,76 <sup>2)</sup> (1:0,93)	23. Aug. - 26. Nov.	15,2	manuelle Ernte von 2 Pflanzen 1 Jahr, 2 Sorten, 95 Tage Erntezeitraum
BARTEN, 2013	USA (6 Bundesstaaten)	113	75	87	k. A.	0,55	k. A. (1:0,77)	k. A.	Bodenoberfläche	manuelle Ernte von 10 Pflanzen, 2 Jahre, 6 Orte, 12 Sorten, 5 Bestandesdichten

<sup>1)</sup> bezogen auf TM-Erträge<sup>2)</sup> Ausnahme: Korn-FM-Ertrag; Stroh-TM-Ertrag eigene Berechnung, k. A.: keine Angabe

Die Zusammensetzung der einzelnen Fraktionen des Maisstrohs – zumeist wird dabei unterschieden in die Halme (einschließlich der Rispe), die Blätter, die Lieschblätter (einschließlich des Kolbenschafts) und die Spindeln – bezifferten LIZOTTE et al. (2015b) auf einen Anteil von 44 % für die Halme, 29 % für die Blätter, 9 % für die Lieschblätter und 18 % für die Spindeln. PORDESIMO et al. (2004a) ermittelten zum Zeitpunkt der physiologischen Kornreife für die Einzelfraktionen Halm, Blätter, Spindeln und Lieschblätter TM-Erträge von 79, 33, 24 und 20 dt ha<sup>-1</sup>, was einer prozentualen Verteilung von 51, 21, 15 und 13 % am Maisstroh entsprach. Durch die quantitative Ermittlung der Einzelfraktionen konnten sie die Ertragsreduktion des potenziell erntbaren Maisstrohs im Verlauf der Abreife im Wesentlichen auf die hohen Verluste der Blätter zurückführen, die bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes 74 % ihres maximalen TM-Ertrages verloren hatten. Geringer, aber immer noch beachtlich waren die Ertragsverluste der Halme und Lieschblätter mit 38 bzw. 54 %, wohingegen die Verluste bei den Spindeln mit 18 % am geringsten waren.

Auch WILHELM et al. (2011) konnten in ihren Untersuchungen den Rückgang des potenziell erntbaren Maisstrohertrages auf Blattverluste und weitere Verluste an der Rispe und dem Halm oberhalb des Kolbens zurückführen. Ursachen für die Biomasseverluste beim potenziell erntbaren Maisstroh können physikalische Bröckelverluste (WILHELM et al., 2011; SHINNERS & BINVERSIE, 2007; TOLERA & SUNDSTØL, 1999), aber auch die Translokation von Nährstoffen aus dem Halm und den Blättern in die Körner sein (CENTER et al., 1970). Der Rückgang der Spindelerträge wird im Wesentlichen auf Respirationsverluste und mikrobielle Aktivität zurückgeführt (SHINNERS & BINVERSIE, 2007; PORDESIMO et al., 2004a) oder auch die Schädigung durch Insekten (HUANG et al., 2012a).

WILHELM et al. (2011) ermittelten außerdem zum Zeitpunkt der Kornernte auch einen Rückgang der Pflanzenhöhe, aufgrund von geknickten und teils abgebrochenen Rispen. Die Menge an Stroh oberhalb des Kolbens (bei einer durchschnittlichen Kolbenhöhe von 93 cm), einschließlich der Spindel, bezifferten sie auf durchschnittlich 50 % des gesamten potenziell erntbaren Maisstrohs, was einem TM-Ertrag von 30 – 60 dt ha<sup>-1</sup> entsprach. Zudem untersuchten die Autoren auch die vertikale Verteilung der Biomasse beim Körnermais. Dabei konnten sie einen starken linearen Zusammenhang ( $R^2 = 0,93$ ) zwischen der relativen Schnitthöhe der Pflanzen und dem am Feld verbleibenden Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs feststellen. Deshalb ist anzunehmen, dass auch unterschiedliche Schnitthöhen, wie es in den genannten Studien (*Tabelle 1*) der Fall ist, einen Einfluss auf die ermittelten TM-Erträge des potenziell erntbaren Maisstrohs haben.

So ernteten PORDESIMO et al. (2004a) in ihren Versuchen das Maisstroh bei einer Schnitthöhe von 15,2 cm über der Bodenoberfläche, was sie als realistisch einstufen, um die Verschmutzung bei einer mechanischen Ernte zu minimieren. LIZOTTE et al. (2015b) und HUANG et al. (2012a) wählten als Schnitthöhe 10 cm über der Bodenoberfläche, während GOLUB et al. (2016), WILHELM et al. (2011) und BARTEN (2013) unmittelbar an der Bodenoberfläche ernteten. Dagegen definierten IGATHINATHANE et al. (2006) für ihre Untersuchungen zur Masse- und Feuchteentwicklung von Körnermaisstroh als Schnitthöhe den Ansatz der Kronenwurzeln und ließen zudem die Spindeln unberücksichtigt, weil sie diese aufgrund des geringen Masseanteils für die Bergung als irrelevant betrachteten. Ausgehend vom ermittelten potenziell erntbaren Maisstroh subtrahierten GOLUB et al. (2016) vom TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs gezielt den TM-Ertrag der Stoppeln (definiert als die unteren 20 cm des Halms), der sich auf durchschnittlich 10 dt ha<sup>-1</sup> belief, weil sie diesen als schwer erntbar und schlecht verwertbar bewerteten. Neben dem Erntetermin bzw. dem Reifestatus der Pflanze können also auch methodische Unterschiede zu einer zusätzlichen Variation beim TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs führen.

Darüber hinaus beeinflussen natürlich auch pflanzenbauliche Parameter die Höhe von Kornertrag und potenziell erntbarem Maisstroh. So zeigten die Untersuchungen von LIZOTTE et al. (2015b) sowohl für den Kornertrag als auch das Maisstroh signifikante Unterschiede in Abhängigkeit vom Versuchsort. Während für die Kornerträge zudem signifikante Jahreseffekte nachgewiesen wurden, war der potenziell erntbare Maisstrohertrag zwischen den drei Versuchsjahren gleich. SHINNERS & BINVERSIE (2007) und GOLUB et al. (2016) fanden hingegen deutliche Unterschiede zwischen den Versuchsjahren mit Ertragsdifferenzen von 16 bzw. 32 dt ha<sup>-1</sup>. Die hohe Ertragsreduktion beim potenziell erntbaren Maisstroh konnten GOLUB et al. (2016) auf die ungünstigen Witterungsbedingungen während der Wachstumsphase zurückführen, die durch ungewöhnlich hohe Temperaturen und geringe Niederschläge gekennzeichnet waren. Unterschiede waren außerdem durch die Sortenwahl gegeben (GOLUB et al., 2016; LIZOTTE et al., 2015b).

## 2.2.2 Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis

Eine Abschätzung des anfallenden und somit potenziell erntbaren Maisstrohs erlauben der Harvestindex bzw. das Korn-Stroh-Verhältnis (Korn:Stroh-Verhältnis). Der Harvestindex ist definiert als das Verhältnis der geernteten Kornmenge zur oberirdischen Gesamtpflanzen-TM (UNKOVICH et al., 2010; DONALD & HAMBLIN, 1976, zitiert nach HAY,

1995). Überwiegend wird für diese beiden Indizes der Körnerertrag als TM-Ertrag berücksichtigt (GOLUB et al., 2016; SOKHANSANJ et al., 2002; WILHELM et al., 2011; LINDEN et al., 2000), vereinzelt aber auch der Korn-FM-Ertrag (WOMAC et al., 2005; PORDESIMO et al., 2004a). Nach HAY (1995) bezieht sich der Harvestindex jedoch auf den Anteil des Korns an der Gesamtpflanze zum Zeitpunkt der physiologischen Reife und sollte durch eine manuelle Ernte der Pflanzen an der Bodenoberfläche und nach der Trocknung der Pflanzen ermittelt werden.

Für Körnermais wird sehr häufig ein Harvestindex von 0,50 bzw. ein Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1 unterstellt (GOLECHA & GAN, 2016; SHINNERS et al., 2012; KEENE et al., 2012; WOMAC et al., 2005; WILHELM et al., 2004; SOKHANSANJ et al., 2002; LEASK & DAYNARD, 1973), um den potenziell erntbaren Maisstrohertrag überschlägig anhand des einfacher zu erfassenden Körnerertrages abschätzen zu können. Auch für Deutschland sieht die Düngeverordnung (DüV, 2006) ein Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1 vor. Allerdings finden sich in der Literatur sehr variable Angaben zu diesen beiden Indizes, die z. T. deutlich von dieser vereinfachten Annahme abweichen. So ermittelten LINDEN et al. (2000) in Minnesota bei einer Langzeituntersuchung über einen Zeitraum von 13 Jahren Werte zwischen 0,35 und 0,75 für den Harvestindex, wobei der durchschnittliche Wert 0,56 betrug. Sehr ähnliche Ergebnisse fand auch BARTEN (2013), der in einer zweijährigen umfangreichen Untersuchung einen durchschnittlichen Harvestindex von 0,55 ermittelte. Auch bei WILHELM et al. (2011) und LIZOTTE et al. (2015b) war der Harvestindex zum Zeitpunkt der typischen Körnernte deutlich über 0,50, dagegen bei GOLUB et al. (2016) mit 0,41 in einem Versuchsjahr deutlich darunter (*Tabelle 1*).

Da im Zusammenhang mit der Nutzung von Körnermaisstroh der TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs zum Zeitpunkt des Drusches von Interesse ist, ist bei der Bestimmung des Harvestindex bzw. des Korn-Stroh-Verhältnisses die physiologische Reife meist schon überschritten. Durch die Änderung der Körnerträge und der potenziell erntbaren Maisstroherträge im Verlauf der Abreife (vgl. Kapitel 2.2.1), hat der Erntezeitpunkt jedoch einen großen Einfluss auf den Harvestindex bzw. das Korn-Stroh-Verhältnis. So konnten HUANG et al. (2012a) wie auch WILHELM et al. (2011) einen Anstieg des Harvestindex nach Erreichen der physiologischen Kornreife feststellen. SOKHANSANJ et al. (2002) ermittelten Werte von 0,45 - 0,55 in Abhängigkeit vom Erntetermin. Bei PORDESIMO et al. (2004a) stieg der Harvestindex sogar von 0,41 zu Versuchsbeginn im August (Korn-TM-Gehalt von 59 %) auf bis zu 0,57 bei Versuchsende im November (Korn-TM-Gehalt von 87 %) (eigene Berechnungen auf Basis des Korn-TM-Ertrages / Gesamt-TM-Ertrag), wobei der durchschnittliche Harvestindex über den gesamten Versuchszeitraum bei genau 0,50 lag. Die Autoren schlussfolgerten daraus,

dass bei einem für die Ernte typischen Korn-TM-Gehalt zwischen 69 und 82 % ein Korn-Stroh-Verhältnis von rund 1:0,8 (bezogen auf Korn-FM-Ertrag, umgerechnet auf den Korn-TM-Ertrag wären das 1:1,1) realistischer sei.

Wie auch bei den Erträgen von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh können Abweichungen im Harvestindex und dem Korn-Stroh-Verhältnis neben dem Erntetermin auch durch unterschiedliche Sorten, pflanzenbauliche Einflüsse (LINDEN et al., 2000; GRAHAM et al., 2007) oder das Ertragsniveau bedingt sein. Während SCARLAT et al. (2010) auf der Basis vorhandener Daten aus der Literatur nur einen sehr schwachen Zusammenhang zwischen dem Kornertrag und dem Korn-Stroh-Verhältnis nachweisen konnten ( $R^2 = 0,17$ ), ergaben sich bei LIZOTTE et al. (2015b) deutliche Effekte des Kornertrages auf das Korn-Stroh-Verhältnis, wobei die Autoren bei sehr geringen Kornerträgen ( $60 \text{ dt ha}^{-1}$ ) Korn-Stroh-Verhältnisse von 1:1,03 erzielten, bei sehr hohen Kornerträgen ( $120 \text{ dt ha}^{-1}$ ) jedoch nur von 1:0,8. Zwischen dem Korn-TM-Ertrag und dem TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs konnte dabei ein enger linearer Zusammenhang nachgewiesen werden ( $R^2 = 0,70$ ). Auch WILHELM et al. (2011) fanden einen ähnlichen linearen Zusammenhang zwischen dem Kornertrag und dem potenziell erntbaren Maisstroh. GOLUB et al. (2016) konnten zudem zeigen, dass auch die Witterungsbedingungen während der Vegetation den Harvestindex beeinflussen. Im Versuchsjahr mit Trockenstress war der Harvestindex mit 0,41 deutlich niedriger als in einem durchschnittlichen Versuchsjahr mit 0,51. Ähnliche Zusammenhänge ergaben sich auch bei BARTEN (2013), der signifikante Unterschiede im Harvestindex zwischen den Versuchsjahren ermittelte. Dabei wurden unter schlechten Witterungsbedingungen (Trockenstress) geringere (0,48) und auch deutlich variablere Harvestindizes erzielt als unter guten Ertragsbedingungen (Harvestindex von 0,55). Zugleich konnten signifikante Unterschiede im Harvestindex zwischen den Sorten und verschiedenen Bestandesdichten ermittelt werden.

### 2.2.3 TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs

Neben dem TM-Ertrag von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh ist der TM-Gehalt des Maisstrohs beim Drusch (also unabhängig von verfahrenstechnischen oder äußeren Einflüssen bei der Bergung) ein wesentlicher Ertragsparameter. Dieser wird oftmals durch eine manuelle Ernte aus dem stehenden Bestand ermittelt.

LIZOTTE et al. (2015b) ermittelten für manuell geerntetes Maisstroh zum Zeitpunkt der physiologischen Kornreife einen durchschnittlichen TM-Gehalt von 48 %, wobei die TM-Gehalte von 37 - 59 % reichten. In diesem Bereich lag auch der von SHINNERS &

BINVERSIE (2007) gemessene TM-Gehalt von 53 % (Tabelle 1). Auch HUANG et al. (2012a) erzielten für das potenziell erntbare Maisstroh am Versuchsende ihrer Ernteterminstudie TM-Gehalte von 49 %, wobei die TM-Gehalte zum Zeitpunkt der physiologischen Kornreife bei nur 32 % lagen, sodass sie einen deutlichen Anstieg im Verlauf der Abreife verzeichneten. Der TM-Gehalt nahm dabei um bis zu 0,6 %-Punkte pro Tag zu. Einen noch stärkeren Anstieg der TM-Gehalte beschrieben PORDESIMO et al. (2004a), von 30 % (110 Tage nach der Saat) auf mehr als 85 % (Versuchsende, 170 Tage nach der Saat). Als Faustregel wird oftmals angenommen, dass der Feuchtegehalt des Maisstrohs doppelt so hoch ist wie beim Korn. Dies bestätigten PORDESIMO et al. (2004b) und mit leichten Abweichungen (2,15:1) auch SHINNERS & BINVERSIE (2007), die jedoch auch Einflüsse der Niederschlagsmenge während der Vegetationsdauer auf das Verhältnis der Feuchtegehalte fanden. So ermittelten sie unter trockenen Jahresbedingungen ein Verhältnis von unter 2:1, dagegen unter niederschlagsreichen Jahresbedingungen ein Verhältnis von über 2,3:1

Die einzelnen Fraktionen des Maisstrohs haben meist verschiedene TM-Gehalte und trocknen unterschiedlich ab. Die geringsten TM-Gehalte mit Werten von 16 - 37 % ermittelten LIZOTTE et al. (2015b) für den unteren Halmabschnitt, wohingegen die Blätter am trockensten waren und die TM-Gehalte des oberen Halmabschnittes und der Spindeln dazwischen lagen. HUANG et al. (2012a) fanden im zweijährigen Mittel TM-Gehalte von 29 % für die Halme und Blätter und von 45 % für die Spindeln. In den Untersuchungen von SHINNERS & BINVERSIE (2007) überschritten die Halme – mit einer Ausnahme – einen TM-Gehalt von 30 % nicht, wohingegen die Spindeln TM-Gehalte von 60 % erreichten und die Blätter und Lieschblätter sogar 70 % überschritten. IGATHINATHANE et al. (2006) beobachteten zudem für den Halm einen starken Gradienten beim TM-Gehalt vom Boden bis zum oberen Ende des Halmes, wobei der Halmabschnitt oberhalb des Kolbens deutlich trockener war, als der Abschnitt unterhalb des Kolbens. Während die Blätter und Lieschblätter schneller abtrocknen – insbesondere wenn Nachtfröste auftreten – steigen die TM-Gehalte der Halme und Spindeln langsamer an (LIZOTTE et al., 2015b). Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Witterungsfaktoren während der Erntezeit (z. B. Niederschlag, Wind, Temperatur, relative Feuchte) auf den TM-Gehalt ergaben, dass die untersuchten Faktoren einen zu vernachlässigenden Effekt haben (IGATHINATHANE et al., 2006).

### **Bewertung und Fazit**

Kenntnisse über die Menge und den TM-Gehalt des beim Drusch vorhandenen und damit potenziell erntbaren Maisstrohs – unter mitteleuropäischen bzw. deutschen

Standortbedingungen – sowie die Entwicklung beider Parameter im Verlauf der Abreife bzw. in Abhängigkeit von pflanzenbaulichen Einflüssen (z. B. Genotyp, klimatische Bedingungen, Düngung, Bestandesdichte) sind grundlegende Informationen für die nachfolgende Bergung und Nutzung von Körnermaisstroh. Zudem sind sie Voraussetzung für die Ermittlung der Abfuhraten und Ernterückstände bei der Bergung von Körnermaisstroh und liefern gegebenenfalls Hinweise zur Terminierung der Ernte oder dem Konservierungserfolg nach der Ernte. Die zuverlässige Bestimmung des Korn-Stroh-Verhältnisses ermöglicht darüber hinaus die Abschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohertrages auf der Basis der wesentlich einfacher zu bestimmenden Kornerträge.

In der Literatur sind die Höhe und die Relation der Erträge von Korn und Maisstroh im Hinblick auf eine Doppelnutzung (Nutzung von Korn und Maisstroh) bereits vielfältig beschrieben und z. T. auch pflanzenbauliche Einflüsse (z. B. Einfluss von Erntezeitpunkt, Versuchsstandort, Bestandesdichte) untersucht (*Tabelle 1*). Allerdings wird der Begriff *potenziell erntbares Maisstroh* wie auch die abgeleiteten Indizes (Harvestindex, Korn-Stroh-Verhältnis) sehr unterschiedlich verstanden und gehandhabt, beispielsweise in Bezug auf die enthaltenen Fraktionen und Schnitthöhen, wodurch ein direkter Vergleich der Ergebnisse erschwert ist. Oftmals fehlen außerdem konkrete Angaben zum Reifestadium und dem Feuchtegehalt des Maisstrohs, sodass eine Einordnung der angegebenen Erntetermine nicht möglich ist. Die Studien stammen fast überwiegend aus den USA bzw. Nordamerika, wohingegen für mitteleuropäische bzw. deutsche Bedingungen kaum Untersuchungen vorliegen. Die Gültigkeit der beschriebenen Zusammenhänge in anderen Boden-Klima-Regionen ist jedoch zweifelhaft, weil sich neben den klimatischen Verhältnissen auch oftmals die pflanzenbaulichen Anbauverfahren und -bedingungen unterscheiden. Während Körnermais im Nordosten der USA traditionell nach Erreichen der physiologischen Kornreife bei einem Korn-TM-Gehalt von rund 75 – 82 % geerntet wird (HUANG et al., 2012a), wird in Deutschland für den Drusch von Körnermais ein Korn-TM-Gehalt von mindestens 65 % angestrebt (BSA, 2000), wobei TM-Gehalte über 70 % unter süddeutschen Bedingungen eher selten sind. Demzufolge unterscheiden sich möglicherweise auch die TM-Gehalte des potenziell erntbaren Maisstrohs. Darüber hinaus können sich Unterschiede aufgrund von abweichenden Bestandesdichten und anderen Sorten bzw. Reifegruppen ergeben. Der Einfluss des Genotyps wurde bislang nicht hinreichend untersucht und beschrieben. Ein Grund dafür könnte sein, dass bei der Mehrheit der Studien die Ergebnisse auf der Ernte von nur wenigen Einzelpflanzen basieren (*Tabelle 1*), wodurch eine möglicherweise vorhandene Sortendifferenzierung schwierig nachzuweisen ist.

## 2.3 Ernte von Körnermaisstroh

### 2.3.1 Ernteverfahren zur Maisstrohbergung

Während die Ernte von Getreidestroh weit verbreitet und technisch unproblematisch ist, stellt die Bergung von Körnermaisstroh eine größere Herausforderung dar. Grund dafür ist, dass beim Dreschen von Körnermais – anders als beim Getreide – nicht die gesamte Pflanze den Mähdrescher passiert und somit problemlos auf Schwad gelegt werden kann, sondern im Wesentlichen nur die vom Pflücker abgetrennten Kolben, während die Restpflanzen durch die Unterflurhäcksler am Pflückvorsatz zerkleinert und breitflächig verteilt werden. Deshalb sind für die Maisstrohbergung spezielle Ernteverfahren bzw. Erntetechniken erforderlich. Diese werden nach Anzahl und Kombination der Verfahrensschritte Dreschen, Schwaden und Bergen in ein-, zwei-, drei- und mehrstufige Verfahren unterteilt.

Bei den einstufigen Verfahren erfolgt die Ernte von Korn und Maisstroh simultan mit umgebauten Mähdreschern, bei denen Körner und Restpflanze den Mähdrescher in getrennten Stoffströmen passieren. Einstufige Verfahren werden in den USA bereits in geringem Umfang von einzelnen Herstellern angeboten, z. T. handelt es sich aber auch um sogenannte „Aftermarket-Lösungen“, die von den Herstellern nicht kommerziell vertrieben werden (HOSKINSON et al., 2007). Die Schnitthöhe dieser Verfahren liegt dabei meist unterhalb des Kolbens, sodass nur der obere Teil der Restpflanze als Maisstroh geerntet wird (WEBSTER, 2011). Dabei wird die Restpflanze in einer integrierten Häckseleinrichtung am Mähdrescher zerkleinert und anschließend in einem 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 zusätzlich den Vorteil, dass nur eine Überfahrt erforderlich ist. Maschinenbelastung und -verschleiß sind jedoch deutlich erhöht und die Schlagkraft beim Körnerdrusch reduziert (VADAS & DIGMAN, 2013). SHINNERS et al. (2012; 2007a) ermittelten eine um 39 % geringere Flächenleistung ( $\text{ha h}^{-1}$ ) im Vergleich zum Maisdrusch ohne Strohbergung. GOLUB et al. (2016) beziffern die Reduktion der Flächenleistung ( $\text{ha h}^{-1}$ ) auf bis zu 60 %.

Um die Flächenleistung beim Maisdrusch nicht übermäßig zu beeinträchtigen, basiert die Strohbergung bei der Mehrheit der Ernteverfahren auf einem zusätzlichen, vom Drusch absetzigen Verfahrensschritt.

Erfolgen dabei das Dreschen der Körner und das Schwaden des Maisstrohs in einem Arbeitsgang und lediglich die Strohbergung separat, handelt es sich um zweistufige

Ernteverfahren. Dabei kommen modifizierte Pflücker zum Einsatz (SHINNERS et al., 2012; STRAETER, 2011), die zusätzlich zur Pflückfunktion mit einer Schwadvorrichtung ausgestattet sind, die die Strohablage in einem Schwad mittig unterhalb des Pflückers ermöglicht. Lieschen und Spindeln fallen von den Schüttlern und Sieben ebenfalls auf den Schwad, wodurch von beträchtlich geringeren Verlusten dieser beiden Fraktionen auszugehen ist (GOLUB et al., 2016). Da mit Ausnahme der Kolben keine weiteren Anteile der Restpflanze den Mähdrescher passieren, verringert sich die Flächenleistung ( $\text{ha h}^{-1}$ ) nur geringfügig durch das zeitgleiche Schwaden des Maisstrohs. So ermittelten SHINNERS et al. (2012) in ihren Untersuchungen eine Reduktion der Flächenleistung von nur 9 %.

Bei den dreistufigen Verfahren ist auch der Verfahrensschritt Schwaden vom Körnerdrusch getrennt, sodass insgesamt drei Arbeitsgänge (Überfahrten) für die Ernte von Korn und Maisstroh notwendig sind. Für das Schwaden des Maisstrohs werden dabei entweder Kreiselschwader, Bandschwader oder spezielle (Schlegel-) Mulcher mit einer integrierten Schwadvorrichtung eingesetzt (DARR & WEBSTER, 2014; GOLUB et al., 2012; SHINNERS et al., 2012; SHINNERS et al., 2007b; SOKHANSANJ et al., 2002). Wird vor dem Schwaden gemulcht (SHINNERS et al., 2007b) oder mit einem Scheibenmäherwerk die Stoppeln abgeschnitten (LIZOTTE & SAVOIE, 2011), sind insgesamt vier Verfahrensschritte erforderlich.

Nach dem Schwaden erfolgt die Bergung des Maisstrohs in Abhängigkeit von der Verwertungsrichtung und den Lagermöglichkeiten mit einer Ballenpresse (SHINNERS et al., 2007b; DARR & WEBSTER, 2014) oder seltener mit dem Feldhäcksler oder Ladewagen (SHINNERS et al., 2012; GOLUB et al., 2012).

### 2.3.2 Abgefahrener Strohertrag und Abfuhraten

Während der Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs (vgl. Kapitel 2.2) den Strohanfall beim Drusch widerspiegelt (wofür sich in der Literatur auch oftmals der Begriff *theoretisches Potenzial* findet (ZELLER et al., 2012, PAVLISKA et al., 2012)), ist der entscheidende Ertragsparameter für die nachfolgende Nutzung von Maisstroh der bei der Bergung tatsächlich realisierte, also *abgefahrene Maisstrohertrag* (Definitionen s. Glossar). In Anlehnung an das *theoretische Potenzial* wird dafür auch der Begriff *technisches Potenzial* verwendet, womit der Teil des theoretischen Potenzials gemeint, der unter Berücksichtigung von technischen Restriktionen (bei der Bergung) einer nachfolgenden Nutzung zur Verfügung steht (PAVLISKA et al., 2012).

In der Literatur finden sich für den abgefahrenen Stroh-TM-Ertrag sehr unterschiedliche Angaben, die von 31 - 92 dt  $\text{ha}^{-1}$  reichen. Die Abfuhraten, also der Anteil des

abgefahrenen Strohertrages im Verhältnis zum potenziell erntbaren Maisstroh, reichen von 40 - 93 % (*Tabelle 2*).

Die Wahl des Ernteverfahrens hat einen wesentlichen Einfluss auf den abgefahrenen Strohertrag. In einer zweijährigen Untersuchung in Wisconsin zum Vergleich verschiedener Ernteverfahren ermittelten SHINNERS et al. (2012) für einstufige Verfahren die höchsten Abfuhraten in Höhe von 67 - 71 % des potenziell erntbaren Maisstrohs mit Stroh-TM-Erträgen von 61 - 65 dt ha<sup>-1</sup>. Unter gleichen Bedingungen wurden mit einem zweistufigen Verfahren (Schwadablage des Maisstrohs während des Körnerdrusches und nachfolgende Strohbergung mit einem Feldhäcksler) 48 dt ha<sup>-1</sup> (Abfuhraten von 48 bis 56 %) und mit einem vierstufigen Verfahren (Dreschen, Mulchen, Schwaden und Bergen mit einem Feldhäcksler) 38 - 46 dt ha<sup>-1</sup> (Abfuhraten von 40 bis 46 %) geerntet. Dabei wurde vereinfacht angenommen, dass der Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs jeweils den ermittelten Körnerträgen entsprach.

In weiteren zweijährigen Untersuchungen wurden von SHINNERS et al. (2007b) für drei- bzw. vierstufige Ernteverfahren (Mulcher mit integrierter Schwadfunktion bzw. Mulcher und Kreiselschwader in Kombination mit einem Feldhäcksler) wesentlich höhere abgefahrene Stroh-TM-Erträge von durchschnittlich 49 und 58 dt ha<sup>-1</sup> bei einem potenziell erntbaren Maisstrohertrag von 92 und 105 dt ha<sup>-1</sup> ermittelt. Die Abfuhraten lagen demzufolge zwischen 53 und 55 %. SOKHANSANJ et al. (2002) erfassten für ein dreistufiges Ernteverfahren ähnliche abgefahrene Stroh-TM-Erträge von 54 und 59 dt ha<sup>-1</sup> (bei einem potenziell erntbaren Maisstrohertrag von 78 und 119 dt ha<sup>-1</sup>) und damit eine Abfuhrate von 60 % im zweijährigen Durchschnitt.

Für ein einstufiges Verfahren, bei dem das Maisstroh mit dem Mähdrescher geerntet und direkt in einer nachgezogenen Ballenpresse weiterverarbeitet wurde, bezifferten KEENE et al. (2012) den abgefahrenen Stroh-TM-Ertrag auf 43 dt ha<sup>-1</sup>. HOSKINSON et al. (2007) ermittelten dagegen deutlich höhere Stroh-TM-Erträge von 67 dt ha<sup>-1</sup> für ein einstufiges Verfahren.

GOLUB et al. (2016) ermittelten in einer Fallstudie für die serbische Provinz Vojvodina den Strohertrag bei der Bergung von Körnermaisstroh mit einem zweistufigen Ernteverfahren (modifizierter Pflücker mit Schwadfunktion, beschrieben von SHINNERS et al. (2012) und STRAETER (2011)) und mit einem mehrstufigen Ernteverfahren (separates Schwaden nach dem Dreschen). Die nachfolgende Bergung erfolgte mit einer Ballenpresse. Dabei wurden die Ernteverluste der beiden Ernteverfahren auf der Grundlage von Literaturangaben und Praxiserfahrungen geschätzt. Für das zweistufige Verfahren wurden Verluste von 30 % für die Blätter und Halme sowie jeweils 10 % für die Spindeln und Lieschen angenommen.

Beim mehrstufigen Verfahren unterstellten sie ebenfalls Ernteverluste von 30 % bei den Blättern und Halmen, aber 60 % bei den Spindeln und Lieschen. Für die Verluste bei der nachfolgenden Strohbergung mit der Ballenpresse wurden in beiden Fällen 20 % angesetzt. Bei einem gemessenen potenziell erntbaren Maisstrohertrag von durchschnittlich 104 und 72 dt ha<sup>-1</sup> in zwei Versuchsjahren und den unterstellten Ernteverlusten, wurden demzufolge Stroh-TM-Erträge von 55 und 38 dt ha<sup>-1</sup> für das zweistufige Verfahren und von 45 und 31 dt ha<sup>-1</sup> für das mehrstufige Verfahren ermittelt.

MENARDO et al. (2015a) ernteten in Italien mit einem zweistufigen Ernteverfahren (modifizierter Pflücker mit Schwadablage, Bergung mit einem Feldhäcksler) einen Stroh-TM-Ertrag von 80 dt ha<sup>-1</sup>, wobei sie das potenziell vorhandene Maisstrohs auf einen TM-Ertrag von 99 dt ha<sup>-1</sup> bezifferten, sodass sehr hohe Abfuhraten von 81 % erreicht wurden. Noch höhere Erträge von 93 dt ha<sup>-1</sup> wurden unter gleichen Bedingungen mit einem einstufigen Verfahren abgefahren. Wie die Autoren auf Nachfrage mitteilten, handelte es sich bei beiden Maschinen um einen nicht ausgereiften Prototyp, dessen Einsatz als nicht praktikabel beurteilt wurde (AIROLDI, 2017).

Tabelle 2: Literaturübersicht zu den abgefahrenen Stroherträgen

Quelle	Land	TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs (dt ha <sup>-1</sup> )	abgefahrener Stroh-TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	Abfuhrtrate (%)	Ernteverfahren	TM-Gehalt des abgefahrenen Strohs (%)
GOLUB et al., 2016	Serbien (Vojvodina)	104/72 (2011/2012)	55/38 <sup>1)</sup> (2011/2012) 45/31 <sup>1)</sup> (2011/2012)	53/53 <sup>1)</sup> (2011/2012) 43/43 <sup>1)</sup> (2011/2012)	2-stufig 4-stufig	k. A. k. A.
MENARDO et al., 2015a	Italien (Piemont)	99	92 80	93 81	1-stufig 2-stufig	32 33
SHINNERS et al., 2012	USA (Wisconsin)	86/97 <sup>2)</sup> (2007/2008) 85/100 <sup>2)</sup> (2007/2008) 94/100 <sup>2)</sup> (2007/2008)	61/65 (2007/2008) 48/48 (2007/2008) 38/46 (2007/2008)	k. A. 71/67 (2007/2008) k. A. 56/48 (2007/2008) k. A. 40/46 (2007/2008)	1-stufig 2-stufig 4-stufig	59/56 (2007/2008) 78/51 (2007/2008) 83/52 (2007/2008)
KEENE et al., 2012	USA (Wisconsin)	80 <sup>2)</sup>	43	k. A. 54	1-stufig	k. A.
HOSKINSON et al., 2007	USA (Iowa)	k. A.	67	k. A.	1-stufig	66
SHINNERS et al., 2007b	USA (Wisconsin)	92/105 (2002/2003)	49/58 (2002/2003)	k. A. 53/55 (2002/2003)	3-/4-stufig	53/52 (2002/2003)
SOKHANSANJ et al., 2002	USA	78/119 (1979/1980)	54/59 (1979/1980)	k. A. 69/50 (1979/1980)	3-stufig	k. A.

<sup>1)</sup> es wurden geschätzte Ernteverluste unterstellt

<sup>2)</sup> der potenziell erntbare Maisstrohertrag wurde nicht ermittelt, sondern anhand des Korntrages geschätzt eigene Berechnung, k. A.: keine Angabe

Neben der Wahl des Ernteverfahrens kann auch der Erntezeitpunkt oder die Beschaffenheit des Maisstrohs die Abfuhrate beeinflussen. SHINNERS et al. (2007b) ermittelten in einer zweijährigen Studie für trockenes Stroh bei einer verzögerten Ernte Abfuhraten von nur 33 % (die Ernte war um sechs Wochen verzögert) bzw. 41 % (die Ernte war um eine Woche verzögert), während sie bei unmittelbarer Ernte für feuchteres Stroh mit den gleichen Ernteverfahren Abfuhraten von 57 und 50 % erreichten. Daraus schlussfolgerten sie, dass die Effizienz der Ernteverfahren sinkt, wenn der Zeitabstand zwischen der Ernte von Korn und Maisstroh zunimmt bzw. wenn der TM-Gehalt des Maisstrohs steigt. Als mögliche Gründe nannten sie die einfachere Aufnahme von feuchterem Maisstroh mit der Pick-up (der Ballenpresse) und zusätzliche Verluste von Maisstroh durch Witterungseinflüsse und einen biologischen Abbau bei einer verzögerten Ernte.

LIZOTTE & SAVOIE (2011) ermittelten für Maisstroh, bei dem die Stoppeln erst im Frühjahr (sechs Monate nach dem Körnerdrusch) mit einem Scheibenmäherwerk bei einer Höhe von 64 - 89 mm gemäht, anschließend das Maisstroh geschwadet und mit einer Ballenpresse geborgen wurde, einen abgefahrenen TM-Ertrag von nur 39 dt ha<sup>-1</sup> bei einem potenziell erntbaren Strohertrag von 82 dt ha<sup>-1</sup> zur Kornernte im Herbst, was einer Abfuhrate von 48 % entspricht. Dabei wurden die Verluste, die nicht unmittelbar den Ernteverfahren zuzurechnen sind, sondern durch die längere Verweildauer des Maisstrohs auf dem Feld entstehen, also z. B. Veratmungsverluste, Auswaschungsverluste oder Deposition von Maisstroh durch Wind, auf durchschnittlich 25 % des anfänglichen vorhandenen, potenziell erntbaren Maisstrohs beziffert.

### **Bewertung und Fazit**

Da die Ernte von Maisstroh in Deutschland bzw. auch größtenteils in Mitteleuropa kaum verbreitet ist und erst seit wenigen Jahren Interesse an dem Substrat Maisstroh besteht, gibt es bisher nur wenige technische Lösungen zur Strohbergung. In Deutschland und Österreich werden zumeist zwei- und insbesondere dreistufige Verfahren eingesetzt, wohingegen einstufige Verfahren nicht verbreitet sind. Bei den zweistufigen Verfahren handelt es sich um modifizierte Pflücker mit Schwadfunktion. Bei den dreistufigen Verfahren werden entweder Bandschwader oder Mulcher mit einer integrierten Schwadvorrichtung verwendet, während sich Kreiselschwader nicht durchgesetzt haben (s. *Tabelle 17*). Bei diesen Erntetechniken handelt es sich um vergleichsweise junge Entwicklungen, die bislang in der Literatur nicht beschrieben bzw. untersucht wurden. Die genannten Untersuchungen zur Bergung von Maisstroh stammen überwiegend aus

anderen Ländern, vorwiegend aus den USA (*Tabelle 2*). Dabei wurden neben der Untersuchung von Ertragsparametern auch bereits weiterführende Fragestellungen, wie z. B. die Effizienz und Ökonomie dieser Verfahren, bearbeitet (z. B. MENARDO et al., 2015a; THOMPSON & TYNER, 2014; SESMERO & GRAMIG, 2013; VADAS & DIGMAN, 2013; LIZOTTE & SAVOIE, 2011; SOKHANSANJ et al., 2010; PETROLIA, 2008; ATCHISON & HETTENHAUS, 2003; SOKHANSANJ & TURHOLLOW, 2002), behandelt. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Gegebenheiten in Deutschland ist jedoch schwierig, weil oftmals genaue Angaben zu den verwendeten Ernteverfahren bzw. den vorherrschenden Erntebedingungen fehlen. Zudem wurden in Deutschland eigene Ernteverfahren entwickelt und es ist aufgrund anderer klimatischer Verhältnisse von abweichenden Erntebedingungen und Strohqualitäten auszugehen.

Um die Abfuhraten und Ernteverluste bestimmen zu können, wurde außerdem bei der Mehrheit der genannten Studien entweder der potenziell erntbare Maisstrohertrag anhand der Kornerträge unter der Annahme eines Korn-Stroh-Verhältnisses von 1:1 geschätzt (z. B. SHINNERS et al., 2012; KEENE et al., 2012; MOREY et al., 2010) oder aber pauschale Ernteverluste unterstellt (z. B. GOLUB et al., 2016). Die Allgemeingültigkeit und Robustheit dieser vereinfachten Annahmen scheint jedoch fragwürdig (vgl. Kapitel 2.2), was möglicherweise zu einer ungenauen Quantifizierung der Stroherträge und der Abfuhraten führt. Eine zuverlässige Bestimmung der Abfuhraten und Ernteverluste ist nur möglich, wenn sowohl die potenziell erntbaren Maisstroherträge als auch die abgefahrenen Maisstroherträge systematisch unter einheitlichen Bedingungen ermittelt werden. Ebenso fehlt bislang für die mehrstufigen Ernteverfahren eine separate Erfassung der Ernteverluste für die beiden Verfahrensschritte Schwaden und Bergen, was die Grundlage für eine vollständige Bilanzierung der Stroherträge und Verluste über die gesamte Verfahrenskette der Maisstrohbergung bildet und möglicherweise Schwachstellen und Optimierungsmöglichkeiten zielgenau den einzelnen Verfahrensschritten zuordnen kann.

## **2.4 Qualitätsparameter des abgefahrenen Maisstrohs**

Zusätzlich zur Menge des abgefahrenen Strohertrages sind auch Qualitätseigenschaften des abgefahrenen Maisstrohs für die nachfolgende Nutzung von Bedeutung. Für die Konservierung des Substrates und auch die nachfolgende Verwertung in der Biogasanlage sind primär der TM-Gehalt, der Verschmutzungs- sowie der Zerkleinerungsgrad des abgefahrenen Maisstrohs wichtige Kenngrößen, die mit der Ernte des Substrates in Verbindung stehen.

### 2.4.1 TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs

Die TM-Gehalte des abgefahrenen Maisstrohs sind sehr variabel, wobei die Angaben in der Literatur von 33 bis 83 % reichen (*Tabelle 2*). Damit unterscheiden sie sich deutlich von den TM-Gehalten des potenziell erntbaren Maisstrohs, die mit 32 - 53 % lagen (vgl. Kapitel 2.2.3 bzw. *Tabelle 1*), sodass von einem Einfluss der Bergung auszugehen ist.

In Untersuchungen zur Entwicklung des Feuchtegehaltes von Körnermaisstroh ermittelten WOMAC et al. (2005) im Südosten der USA TM-Gehalte im abgefahrenen Maisstroh von 59 - 76 % bei früher Ernte (Korn-TM-Gehalt von ca. 75 %) und von 78 - 89 % bei später Ernte (Korn-TM-Gehalt von ca. 85 %). GOLUB et al. (2012) kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Bei einem Korn-TM-Gehalt von durchschnittlich 85 %, fanden sie für verschiedene Maisstroh-Fractionen TM-Gehalte von 72 - 88 %.

WOMAC et al. (2005) konnten zudem zeigen, dass neben dem Erntetermin auch die Witterungsbedingungen, das Ernteverfahren und die Tageszeit den TM-Gehalt von Maisstroh, das nach dem Drusch bis zur Bergung auf dem Feld verbleibt, beeinflussen. Dabei stellten sie fest, dass der Effekt eines Niederschlagsereignisses um einige Tage zeitversetzt auftritt und dass ein höherer Zerkleinerungsgrad des Maisstrohs zu stärkeren Trocknungs- und Wiederbefeuchtungseffekten führt. Einen signifikanten Unterschied im TM-Gehalt bewirkte auch die Tageszeit. So waren die TM-Gehalte bei einer Probenahme am Nachmittag um bis zu 7 %-Punkte geringer als bei einer Probenahme am Vormittag. Zudem konnten sie zeigen, dass Maisstroh, welches Kontakt mit der Bodenoberfläche hat, langsamer trocknet, als Maisstroh ohne Bodenkontakt.

Auch SHINNERS et al. (2007b) führten in einer zweijährigen Studie in Wisconsin umfangreiche Untersuchungen zur Entwicklung des TM-Gehaltes von Maisstroh in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen und dem Ernteverfahren durch. Dabei verglichen sie die Feuchtegehalte des nach dem Dreschen auf dem Feld verbliebenen Maisstrohs über einen Zeitraum von bis zu drei Wochen für verschiedene verfahrenstechnische Varianten (Maisstroh, das nach dem Dreschen nicht weiter bearbeitet wurde, im Vergleich zu zusätzlich zerkleinertem, breit verteiltem sowie zusätzlich zerkleinertem und schmal geschwadetem Maisstroh). Dabei konnten sie im Untersuchungszeitraum enorme Schwankungen im TM-Gehalt (TM-Gehalte von 32 – 81 %) und einen deutlichen Einfluss der Niederschläge auf die Trocknung des Maisstrohs zeigen. Ausgehend von einem TM-Gehalt von rund 53 - 55 % nach dem Körnerdrusch wurden am Ende des Untersuchungszeitraumes TM-Gehalte von 52 - 67 % gemessen. Während das Maisstroh zu Beginn trocknete, stiegen die Feuchtegehalte nach einem Niederschlagsereignis stark an. Varianten, bei denen das Maisstroh durch den Einsatz

eines Schlegelmulchers zusätzlich zerkleinert worden war, zeigten wesentlich stärker ausgeprägte Änderungen im TM-Gehalt.

Für Maisstroh, das unmittelbar nach dem Dreschen geschwadet und mit einer Ballenpresse innerhalb von wenigen Stunden geborgen wurde, konnten sie unter warmen und windigen Witterungsbedingungen einen sprunghaften Anstieg der TM-Gehalte von 37 % (nach dem Dreschen) auf 61 % (im Maisstrohballen) nachweisen. Im Folgejahr veränderten sich hingegen die TM-Gehalte nur geringfügig von anfänglich 49 auf 56 %. Bei einer sehr späten Bergung des Maisstrohs, sechs Wochen nach dem Dreschen, wurden TM-Gehalte von bis zu 84 % ermittelt.

Der TM-Gehalt eines Substrates nach der Ernte ist ein wesentliches Kriterium für die Konservierungsmöglichkeiten. Entsprechend den sehr variablen TM-Gehalten findet sich für Körnermaisstroh in der Literatur sowohl die Möglichkeit einer aeroben Lagerung als trockenes Erntegut (MENARDO et al., 2015b; SHINNERS et al., 2011; SHAH et al., 2011, SHINNERS et al., 2007b; SOKHANSANJ et al., 2002), als auch einer anaeroben Lagerung von feuchterem Maisstroh im Silo (ZHAO et al., 2016; MENARDO et al., 2015b; SHINNERS et al., 2011; SHINNERS et al., 2007b), wobei die Ernte als trockenes Erntegut für eine Vielzahl von Nutzungsrichtungen (z. B. Ethanolproduktion, Verbrennung, Einstreu) bevorzugt und durch Nachtrocknung auf dem Feld erreicht wird (MENARDO et al., 2015b; SHINNERS et al., 2007b). SHINNERS et al. (2007b) und SHAH et al. (2011) verstehen unter trockenem Maisstroh Stroh-TM-Gehalte von 75 – 80 % bzw. von 80 – 85 % und unter feuchtem Maisstroh Stroh-TM-Gehalte bis 55 % bzw. von 65 – 70 %.

#### **2.4.2 Rohaschegehalt des abgefahrenen Maisstrohs**

Ein weiterer wesentlicher Qualitätsparameter ist der Rohaschegehalt von Maisstroh. Dieser umfasst alle anorganischen Bestandteile im Erntegut und setzt sich zusammen aus dem physiologischen Rohaschegehalt der Pflanze und einem additiven Anteil, bedingt durch Erdanhang, Schmutz oder aufgenommene Steine. Der Rohaschegehalt sollte möglichst gering sein, weil Rohasche als inertes Material bei biochemischen Verwertungen nicht umsetzbar ist (LACEY et al., 2016) und eine höhere Belastung für die Ernte- und Verfahrenstechnik darstellt.

Hinsichtlich der Verschmutzung des geborgenen Maisstrohs ermittelten SHINNERS et al. (2012) die geringsten Rohaschegehalte in Höhe von 4,9 % der TM bei einem einstufigen Ernteverfahren, während bei einem zweistufigen Verfahren bereits signifikant höhere Gehalte von 6,0 % und beim mehrstufigen Verfahren nochmals signifikant höhere Gehalte von 9,8 % ermittelt wurden. Einen Zusammenhang zwischen dem Schmutzanteil und der

steigenden Zahl an Verfahrensschritten beschreiben auch VADAS & DIGMAN (2013). Ebenso bestätigten DARR & WEBSTER (2014) für die zweistufigen Ernteverfahren einen geringeren Rohaschegehalt als für die mehrstufigen Ernteverfahren. Unter den mehrstufigen Verfahren hatten dabei die Kreiselschwader höhere Aschegehalte als die Mulcher mit Schwadfunktion. Zudem konnten sie einen positiven Zusammenhang zwischen der Abfuhrate und dem Rohaschegehalt zeigen.

MENARDO et al. (2015b) ernteten in Italien mit einem vierstufigen Ernteverfahren (Mulcher, Krieselschwader, Ballenpresse) Maisstrohballen mit sehr hohen Rohaschegehalten von 16,8 – 28,5 %. Hohe Rohaschegehalte ermittelte auch WRIGHT (2005). Er fand Rohaschegehalte von bis zu 23,0 % in Maisstrohballen bei einem mehrstufigen Ernteverfahren. Nur etwa halb so hoch waren die Rohaschegehalte von Maisstrohballen (ebenfalls bei einem mehrstufigen Ernteverfahren) bei LACEY et al. (2016), die bei 12,7 % lagen. In beiden Untersuchungen sind jedoch die verwendeten Ernteverfahren nicht näher beschrieben.

Sehr geringe Rohaschegehalte von nur 3,6 % fanden LIZOTTE et al. (2015a) für Maisstrohballen, bei denen das Stroh über Winter auf dem Feld verblieb und erst im Frühjahr mit einem Schlegelmulcher mit integrierter Schwadvorrichtung geschwadet und geborgen worden war. Wurde ebenfalls im Frühjahr geerntet, aber ein Scheibenmähwerk und zusätzlich ein Schwader eingesetzt, lagen die Rohaschegehalte etwas höher bei 5,2 %, was die Autoren auf den zusätzlichen Arbeitsgang zurückführten. Signifikant höhere Rohaschegehalte von 7,0 % wurde für Maisstrohballen ermittelt, bei denen das Maisstroh bereits im Herbst geschwadet, aber erst im Frühjahr geborgen worden war. Da die Rohaschegehalte des geschwadeten Strohs zwischen 5,5 und 11,7 % lagen, gingen die Autoren davon aus, dass es während des Winters zu einer Reduktion des Rohaschegehaltes gekommen war.

### **2.4.3 Häcksellänge des abgefahrenen Maisstrohs**

Zusätzlich zum TM-Gehalt und Rohaschegehalt des geborgenen Strohs spielt auch der Zerkleinerungsgrad im Erntegut eine Rolle, z. B. für den Transport des Substrates und die Verdichtbarkeit im Silo, wobei meist ein höherer Zerkleinerungsgrad angestrebt wird. SHINNERS et al. (2007b) ermittelten mit einem Siebverfahren (Wisconsin Separator) für Maisstroh, das mit einem dreistufigen Verfahren (Schlegelmulcher mit integrierter Schwadvorrichtung und Feldhäcksler) geborgen worden war, Häcksellängen, die deutlich von den theoretischen Häcksellängen des Feldhäckslers abwichen. Während bei der Ernte von Mais-Gesamtpflanzen aus dem stehenden Bestand die theoretischen

Häcksellängen sehr gut mit den tatsächlich erfassten Längen übereinstimmten, war der Häckseffekt bei der Maisstrohbergung deutlich reduziert, weil das Maisstroh nach dem Schwaden bereits vorzerkleinert (17 – 29 mm) und die Anordnung im Schwad sehr unstrukturiert war. So lag beispielsweise bei einer theoretischen Häcksellänge von 12,7 mm, die tatsächliche Häcksellänge bei nur 25,4 mm. Mit derselben Methodik wurden für ein einstufiges Ernteverfahren mit einer theoretischen Häcksellänge von 16 mm mittlere Häcksellängen von 29 mm und für ein zweistufiges Verfahren, bei dem die Bergung mit einem Feldhäcksler bei einer theoretischen Häcksellänge von 5 mm erfolgte, mittlere Häcksellängen von 12 mm bestimmt, sodass sich auch bei diesen Ernteverfahren die tatsächlich erreichten Häcksellängen deutlich von den theoretischen Häcksellängen unterschieden (SHINNERS et al., 2012).

### **Bewertung und Fazit**

Da in Deutschland andere Erntetechniken eingesetzt und andere Erntebedingungen vorliegen (vgl. Kapitel 2.3), sind auch für die Qualitätsparameter des geernteten Maisstrohs (TM-Gehalt, Rohaschegehalt, Häcksellängen) unter deutschen Bedingungen andere Ergebnisse zu erwarten. Konträr zur Nutzung von Maisstroh in anderen Ländern wird in Deutschland außerdem die Silierung (anstelle der Trocknung) als gängiges Konservierungsverfahren von Biogassubstraten angestrebt, sodass auch unterschiedliche Zielsetzungen vorliegen. Offensichtlich unterscheidet sich die Qualität des Maisstrohs nach der Bergung grundlegend von den Eigenschaften des potenziell erntbaren Maisstrohs (also vor der Maisstrohernte im stehenden Bestand), sodass von verfahrenstechnischen und weiteren äußeren Einflüssen während der Bergung auszugehen ist, die aber bislang in der Literatur nicht nachvollziehbar beschrieben sind.

## **2.5 Stoffliche Zusammensetzung von Körnermaisstroh**

Neben dem Ertrag ist die stoffliche Zusammensetzung eines Substrates ein maßgeblicher Faktor, der die Eignung für die nachfolgende Verwertung beeinflusst. Für die Einschätzung eines Biogassubstrates wird meist auf die gängige Futtermittelanalytik zurückgegriffen.

Silomais (Ganzpflanze zur Siloreife), als wichtiges Futtermittel und bedeutendstes Biogassubstrat (DBFZ, 2015), ist hinsichtlich seiner stofflichen Zusammensetzung bereits umfassend untersucht (ZSCHEISCHLER, 1990). Sowohl aus Sicht der Tierernährung wie

auch im Hinblick auf eine optimierte Nutzung von Silomais für die anaerobe Vergärung wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zum Effekt der Sorte, des Erntetermins oder weiteren pflanzenbaulichen und produktionstechnischen Einflussfaktoren, wie z. B. dem Effekt der Bestandesdichte oder Düngung, durchgeführt (z. B. EDER, 2010; SCHITTENHELM, 2008; MINIHUBER, 2007; DARBY & LAUER, 2002).

Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf Körnermaisstroh ist jedoch schwierig, weil sich Körnermaisstroh durch den späteren Erntezeitpunkt und die fehlenden Körner (vgl. Kapitel 2.1) wesentlich von Silomais unterscheidet.

So ändern sich in der Gesamtpflanze mit zunehmendem Reifestadium die Gehalte der einzelnen Inhaltsstoffe. Während die Rohproteingehalte sinken und der Anteil des Rohfetts nahezu konstant bleibt, unterliegt die Kohlenhydratfraktion der stärksten Veränderung (ZSCHEISCHLER, 1990). Dies konnte auch von EDER (2010) bestätigt werden, die bei späteren Ernteterminen von Silomais sinkende Gehalte an wasserlöslichen Kohlenhydraten in der Gesamt- und Restpflanze und auch sinkende NDF- und ADF-Gehalte für die Gesamtpflanze ermittelte. Die Körner unterscheiden sich in der stofflichen Zusammensetzung außerdem grundlegend von den anderen Fraktionen. So sind die Protein-, Fett- und Kohlenhydratbestandteile wesentlich höher als in den anderen Fraktionen (Stängel, Blätter, Lieschen und Spindeln), wohingegen der Anteil an Rohfaser und Rohasche verschwindend gering ist (MENARDO et al., 2015a; MINIHUBER, 2007). MENARDO et al. (2015a) beziffern den Anteil an Stärke, löslichen Zuckern, Protein und Fett auf insgesamt über 80 % der TM.

Ein Großteil der Studien, die sich explizit auf die stoffliche Zusammensetzung von Maisstroh beziehen, zielt auf die Nutzung von Maisstroh für die Ethanolproduktion ab, weshalb der Gehalt und die Zusammensetzung an Monosacchariden im Vordergrund stehen (MOURTZINIS et al., 2016; ATHMANATHAN et al., 2015; WANG et al., 2014, BONDESSON et al., 2013; ZUO & YANG, 2011; TEMPLETON et al., 2009; LORENZ et al., 2009; HOSKINSON et al., 2007; PORDESIMO et al., 2005). Eine besondere Bedeutung haben dabei die Inhaltsstoffe Glucose und Xylose, weil sie die Abschätzung der Ethanolproduktion anhand einer Schätzformel erlauben (TUMBALAM et al., 2016). Auch der Lignin-Gehalt, als unerwünschter Inhaltsstoff im Konversionsprozess (TUMBALAM et al., 2016), spielt eine große Rolle.

Angaben zur stofflichen Zusammensetzung von Körnermaisstroh entsprechend den Inhaltsstoffen der gängigen Futtermittelanalytik (Weeder, Van Soest) sind hingegen in der Literatur selten und inkonsistent (*Tabelle 3*). So sind z. B. die Angaben zum Ligningehalt mit 4,6 – 10,3 % oder auch die Cellulosegehalte mit 29,3 – 44,0 % sehr variabel (*Tabelle 3*).

Tabelle 3: Literaturübersicht über die stoffliche Zusammensetzung von Körnermaisstroh

Quelle	Land	Bezeichnung	TM-Gehalt (% FM)	XA (% TM)	XP (% TM)	XL (% TM)	CEL (% TM)	HCEL (% TM)	ADL (% TM)	Anmerkungen
MENARDO et al., 2015b	Italien	corn stalk	33/35	8,9/7,7	3,8/5,4	-	36,8/34,1	27,0/25,0	9,2/10,0	Ernte mit einem Orbis-Maisgebiss/Direct Disc1 nach dem Dreschen
Li et al., 2014	China	corn stover	93	4,8	4,1	-	35,1	30,6	6,3	Spindeln sind nicht enthalten, manuelle Ernte
Li et al., 2013a	China	corn stover	85	8,4	5,0	-	42,3	29,8	10,3	keine näheren Angaben zum Maisstroh und der Erntemethode
MENARDO & BALSARI, 2012	Italien	maize stalk	88	11,0	7,2	1,1	44,0	26,7	5,6	vorwiegend die Halme und Blätter, keine Angaben zur Erntemethode
HUANG et al., 2012b	USA	corn stover	-	-	-	-	42,4	25,5	5,3	Spindeln sind nicht enthalten, 7 Erntetermine, manuelle Ernte
YUAN, 2011	China	corn stalk	95	4,9	-	-	33,4	28,7	7,7	keine näheren Angaben zum Maisstroh und der Erntemethode
ZHONG et al., 2011	China	corn straw	94	12,6	-	-	41,1	28,1	8,7	keine näheren Angaben zum Maisstroh, manuelle Ernte
WRIGHT et al., 2005	USA	corn stover	-	4,3	-	-	33,3	17,5	-	keine näheren Angaben zum Maisstroh, manuelle Ernte
TOLERA et al., 1998	Äthiopien	maize stover	83	8,8	4,3	-	29,3	38,8	4,6	Spindeln sind nicht enthalten; 3 Erntetermine, manuelle Ernte

XA: Rohasche; XP: Rohprotein; XL: Rohfett; CEL: Cellulose; HCEL: Hemicellulose, ADL: Lignin

Ein Grund für die Variabilität der Inhaltsstoffe von Maisstroh sind verschiedene Standort- und Umweltbedingungen und pflanzenbauliche Unterschiede beim Anbauverfahren. So konnten TEMPLETON et al. (2009) in umfangreichen dreijährigen Untersuchungen zur chemischen Zusammensetzung von Maisstroh an 47 Standorten in den USA (Corn Belt) den größten Anteil an der Heterogenität der stofflichen Zusammensetzung dem Versuchsjahr zuordnen, einen geringeren Anteil dem Standort und den geringsten Anteil der Sorte. TUMBALAM et al. (2016) dagegen fanden keinen signifikanten Effekt des Versuchsjahres, aber signifikante Effekte der Sorte und des Versuchsstandortes in Bezug auf die stoffliche Variation. BARTEN (2013) ermittelten zudem signifikante Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung aufgrund der Bestandesdichte, des Versuchsjahres und der Sorte. Der Anteil einzelner Inhaltsstoffe kann auch vom Erntezeitpunkt abhängig sein. So fanden TOLERA et al. (1998) einen geringeren Futterwert für Maisstroh mit zunehmendem Reifestadium, wobei die Gehalte an Rohprotein sanken und die Konzentration der Fasergehalte stieg.

Eine weitere Ursache für die Variabilität der Maisstrohqualität liegt in der unterschiedlichen Zusammensetzung der Einzelfractionen (Halm, Blätter, Spindel, Lieschblätter). So heben sich beispielsweise die Inhaltsstoffe der Spindel grundlegend von den Blättern und Halmen ab (MENARDO et al., 2015a; HUANG et al., 2012b; SHINNERS et al., 2007a; PORDESIMO et al., 2005). SHINNERS et al. (2007a) ermittelten für die Spindeln signifikant höhere Ligningehalte als für die Blätter und Lieschblätter. Zu einem gegenteiligen Ergebnis kamen HUANG et al. (2012b), die für die Spindeln wesentlich geringere Ligningehalte als für die Blätter und Halme erfassten. MENARDO et al. (2015a) gaben für die Spindeln die geringsten Protein- und Fettgehalte, aber die höchsten Gehalte an Hemicellulose – verglichen mit dem Halm, den Blättern und den Lieschblättern – an. Wird also die Spindelfraktion nicht dem Maisstroh zugeordnet, wie es bei einer Vielzahl an Untersuchungen erfolgte (*Tabelle 3*), ist von einer veränderten stofflichen Zusammensetzung des Maisstrohs auszugehen. TOLERA & SUNDSTØL (1999) fanden zudem signifikante Unterschiede zwischen den Blättern, Halmen und Lieschblättern (z. B. beim Ligningehalt oder den Gehalten an Cellulose und Hemicellulose). Auch GARLOCK et al. (2009) ermittelten signifikante Unterschiede im Ligningehalt zwischen den Einzelfractionen. TOLERA & SUNDSTØL (1999) schlussfolgerten, dass auch morphologische Unterschiede im Anteil der einzelnen botanischen Fraktionen (z. B. ein verändertes Blatt-Halm-Verhältnis) zu einer Variation der Inhaltsstoffe führen. BARTEN (2013) konnten außerdem Unterschiede zwischen der oberen und unteren Hälfte der Maispflanze nachweisen. Auch HOSKINSON et al. (2007) ermittelten einen Einfluss der Schnitthöhe. Demzufolge kann auch die Erntemethodik, die in den vorliegenden Untersuchungen

vorwiegend auf einer manuellen Ernte des Maisstrohs aus dem stehenden Bestand basiert bzw. nicht klar beschrieben ist (*Tabelle 3*), eine weitere Variation in der stofflichen Zusammensetzung verursachen.

Neben der variablen Zusammensetzung von Maisstroh aus den verschiedenen Einzelfractionen, ist auch oftmals die Zusammensetzung der Einzelfraktion nicht konstant. So wurden mehrfach Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung der Einzelfractionen im Zeitverlauf bestätigt (HUANG et al., 2012b; PORDESIMO et al., 2005; TOLERA & SUNDSTØL, 1999). PORDESIMO et al. (2005) konnten dabei eine Veränderung in der stofflichen Zusammensetzung im Verlauf der Abreife primär bei den Blättern beobachten, wohingegen die Zusammensetzung von Halm und Lieschblättern relativ konstant war.

### **Fazit und Bewertung**

Die Angaben zur stofflichen Zusammensetzung von Maisstroh gemäß den gängigen Parametern der Futtermittelanalytik sind bislang sehr inkonsistent und es fehlen wiederum systematische Untersuchungen unter deutschen Bedingungen, die auf eine Einordnung der stofflichen Qualität im Hinblick auf die Methanertragsfähigkeit abzielen. Weitere Unzulänglichkeiten ergeben sich aus dem unterschiedlichen Verständnis der zum Maisstroh zugehörigen Einzelfractionen (z. B. die Spindeln oder Stoppeln) und den oftmals fehlenden Angaben zum genauen Erntetermin bzw. dem physiologischen Reifezustand. Bislang fehlen außerdem Untersuchungen, ob bzw. inwiefern sich die stoffliche Zusammensetzung des potenziell erntbaren Maisstrohs (ermittelt im stehenden Bestand unabhängig von verfahrenstechnischen Einflüssen) von der Zusammensetzung des Maisstrohs nach der Strohbergung unterscheidet, zumal sich die Erträge und die TM-Gehalte von Maisstroh vor und nach der Bergung (s. Kapitel 2.2, 2.3 und 2.4) ebenfalls deutlich unterscheiden.

## **2.6 Methanausbeuten von Körnermaisstroh**

Für die sinnvolle Verwertung von Körnermaisstroh in Biogasanlagen ist die Methanausbeute ein wesentliches Kriterium, das in Kombination mit dem Ertrag die Eignung als Biogassubstrat maßgeblich beeinflusst. Da die Nutzung von Körnermaisstroh

im internationalen Kontext aber nur selten auf die Biogasproduktion abzielt und meist andere Nutzungspfade im Vordergrund stehen (vgl. Kapitel 2.1), ist die Methanertragsfähigkeit von Maisstroh bislang nicht hinreichend bekannt. Im Zusammenhang mit der Diskussion um den idealen Silomais-Sortentyp wurde die Methanausbeute der Restpflanze bereits mehrfach untersucht. So ermittelte MINIHUBER (2007) für die Restpflanze (bei einem späten Erntetermin Mitte Oktober und einem Korn-TM-Gehalt von 65 %) eine Methanausbeute von  $300 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$ , was nur  $34 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$  unter der Methanausbeute der Gesamtpflanze lag. Auch EDER et al. (2009) bestätigten eine hohe Methanausbeute der kolbenlosen Restpflanze, die  $320 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$  betrug (Erntetermin: Mitte Oktober). Dagegen bezifferten NEGRI et al. (2014) die Methanausbeute der kolbenlose Restpflanze auf nur  $202 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$ , was deutlich von der Methanausbeute der Gesamtpflanze von  $352 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$  abwich. Da sich die Restpflanze jedoch meist in Bezug auf den Erntetermin (Siloreife) wie auch die enthaltenen Fraktionen (meist ist die kolbenlose Restpflanzen gemeint, sodass die Spindeln nicht enthalten sind) von dem Substrat Maisstroh unterscheidet, sind die Ergebnisse nicht auf Maisstroh übertragbar. Zwar wurde auch für Maisstroh die grundsätzliche Verwertbarkeit bei der anaeroben Vergärung bereits von einigen Autoren anhand von Batchversuchen bestätigt (Tabelle 4), allerdings sind die Angaben zur Methanausbeute sehr widersprüchlich. So ermittelten LIEW et al. (2012) bei einer Trockenvergärung von Maisstroh nur sehr geringe Methanausbeuten in Höhe von  $81 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$ . Dagegen bezifferten LI et al. (2016) die Methanausbeuten (von grünem Maisstroh) auf bis zu  $320 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$ . Auch DINUCCIO et al. (2010) bestätigen für Maisstroh in Italien ähnliche Methanausbeuten in Höhe von  $317 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$ . Die Angaben zur Methanausbeute von Maisstroh basieren in den genannten Studien meist auf Einzeluntersuchungen bzw. Voruntersuchungen, wobei sehr häufig verschiedene (chemische, biologische oder physikalische) Aufbereitungsmöglichkeiten oder die Co-Vergärung mit unterschiedlichen Mischungspartnern zur Verbesserung der Methanausbeute im Vordergrund stehen (MENARDO et al., 2015b; MENARDO et al., 2012; ZHONG et al., 2012; XU & LI, 2012; LI et al., 2013b; ZHOU et al., 2012; ZHONG et al., 2011; YUAN, 2011; ZHENG et al., 2009).

Tabelle 4: Literaturübersicht über die Methanausbeuten von Körnermaisstroh

Quelle	Land	Bezeichnung	oTM-Gehalt (% TM)	Biogasausbeute (l(kg oTM) <sup>-1</sup> )	Methanausbeute (l(kg oTM) <sup>-1</sup> )	Methangehalt (%)	Anmerkungen zur Methodik
ZHAO et al., 2016	China	corn stalk	k. A.	k. A.	228 <sup>1)</sup>	k. A.	Zerkleinerung: 1 – 2 cm, 1l, 37°C, 20 Tage
LI et al., 2016	China	corn stover	88,6/92,1	k. A.	320/235	k. A.	VDI 4630, Zerkleinerung: 5 mm, 0,25l, 35°C, 20 Tage (grünes/getrocknetes Maisstroh)
MENARDO et al., 2015b	Italien	corn stalk	91,1/92,3	447/517	229/246	51,3/47,5	VDI 4630, 2 l, 40°C, 42Tage, 2 Ernteverfahren
DJATKOV et al., 2015	Serbien	corn stover	94,9 – 96,7	390 - 549	209 - 301	47,4 - 54,9	VDI 4630, 2 l, 37°C, 30 Tage, 5 Sorten
LI et al., 2013b	China	corn stover	90,6	417	214	k. A.	Zerkleinerung: 0,4 mm, 1 l, 37°C
LI et al., 2013a	China	corn stover	90,6	k. A.	241	k. A.	Zerkleinerung: 1 mm; 1 l, 37°C
LIEW et al., 2012	USA	corn stover	92,6	k. A.	81	k. A.	Zerkleinerung: 9 mm; 1 l, 37°C, 30 Tage
MENARDO et al., 2012	Italien	maize stalk	98,0	k. A.	246	k. A.	VDI 4630, 2 l, 40°C, 60 Tage
LI et al., 2011	USA	corn stover	92,9	321	k. A.	k. A.	2 l, 37°C, 40 Tage
ZHOU & PILARSKI, 2011	Polen	maize straw	k. A.	358 <sup>1)</sup>	200 <sup>1)</sup>	56,0	2 l, 38°C,
DINUCCIO et al., 2010	Italien	maize drying up residues	97,5	641	317	k. A.	VDI 4630, 2 l, 40°C, 40 Tage
CHANDRA et al., 2012	Indien	maize crop waste	k. A.	k. A.	338	k. A.	abgeleitet anhand mehrerer Literaturstellen
CHEN et al., 2010	China	corn stalk	89,1	336	218	64,9	Zerkleinerung: 1 – 2 cm , 1 l, 35°C,

<sup>1)</sup> bezogen auf l(kg TM)<sup>-1</sup>

Der direkte Vergleich der in der Literatur genannten Werte (*Tabelle 4*) ist zudem erschwert, weil zum Teil unterschiedliche Methoden verwendet wurden, die sich beispielsweise in der Verweildauer, der Temperatur oder dem Zerkleinerungsgrad des Substrates unterscheiden. Eine standardisierte Untersuchungsmethode, wie sie gemäß der Richtlinie VDI 4630 (2006) in Deutschland und auch teilweise in Mitteleuropa eingesetzt wird, wurde nur bei wenigen Untersuchungen angewandt. Die unterschiedlichen Bezeichnungen für *Maisstroh* lassen zudem darauf schließen, dass sich das untersuchte Substrat möglicherweise im Abreifegrad bzw. dem Erntetermin, den enthaltenen Fraktionen oder auch der Erntemethode (manuelle Ernte des Maisstrohs aus dem stehenden Bestand, manuelles Aufsammeln des Maisstrohs nach dem Dreschen oder maschinelle Bergung des Maisstrohs) unterscheidet. Für die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sind diese Angaben jedoch zwingend notwendig. Auch fehlen weitere pflanzenbauliche Spezifikationen wie z. B. die Sortenwahl oder die Standort- und Witterungsbedingungen, welche die Höhe der Methanausbeute ebenfalls beeinflussen können. So ermittelten LI et al. (2016) für früh geerntetes, grünes Maisstroh wesentlich höhere Methanausbeuten als für getrocknetes Maisstroh (*Tabelle 4*). DJATKOV et al. (2015) fanden in einer einjährigen Untersuchung zudem signifikante Sortenunterschiede zwischen fünf Genotypen aus unterschiedlichen Reifebereichen (FAO Zahl von 490 - 700), wobei die erzielten Methanausbeuten zwischen 209 und 301 l (kg oTM)<sup>-1</sup> lagen. Auch die Art und Dauer der Lagerung können einen Effekt auf die Methanausbeute von Maisstroh haben. In den Untersuchungen von MENARDO et al. (2015b) erreichte frisches Maisstroh und siliertes Maisstroh Werte zwischen 205 und 263 l (kg oTM)<sup>-1</sup>, wohingegen Maisstrohballen nach einer Lagerdauer von 141 Tagen lediglich Werte zwischen 153 und 180 l (kg oTM)<sup>-1</sup> erzielten.

Da sich die Einzelfraktionen des Maisstrohs in ihrer stofflichen Zusammensetzung (vgl. Kapitel 2.5) und auch den physikalischen Eigenschaften (ZHANG et al., 2012) wesentlich unterscheiden, wurde mehrfach der Beitrag der einzelnen Fraktionen für die jeweilige Verwertungsrichtung von Maisstroh untersucht. MOURTZINIS et al. (2016) fanden signifikante Unterschiede in der Zusammensetzung der Kohlenhydrate zwischen den einzelnen Maisstroh-Fraktionen, was sich jedoch nur geringfügig auf den theoretischen Ethanolertrag (ermittelt anhand einer Schätzformel) der einzelnen Fraktionen auswirkte. Im Gegensatz dazu ermittelten SHINNERS et al. (2007a) signifikante Unterschiede im geschätzten Ethanolertrag zwischen den Fraktionen Halm, Blätter und Spindel. PORDESIMO et al. (2005) hingegen fanden trotz deutlicher Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung zwischen den einzelnen Maisstroh-Fraktionen und der Variation der Inhaltsstoffe innerhalb einer Fraktion im Verlauf der Abreife keine merklichen

Unterschiede im Energiegehalt der einzelnen Fraktionen, weshalb sie für die Verbrennung von Maisstroh eine gleichbleibende Qualität schlussfolgerten. Auch für die Nutzung von Maisstroh in der Biogasproduktion wurden vereinzelt Untersuchungen zur Methanertragsfähigkeit der Maisstroh-Einzelfraktionen durchgeführt. MENARDO et al. (2015a) ermittelten die höchsten Methanausbeuten für die Lieschblätter ( $307 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$ ), signifikant geringere Methanausbeuten für die Halme und Blätter ( $234\text{-}245 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$ ) und die geringsten Methanausbeuten für die Spindeln ( $207 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$ ). Die höchsten Methanausbeuten erzielten jedoch die Körner, die grundsätzlich nicht Bestandteil des Maisstrohs sind. Mit  $393 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$  hoben sie sich signifikant von den Lieschblättern ab. Geringere Methanausbeuten für die Spindeln wurden auch in Voruntersuchungen von EZE & OJIKE (2012) bestätigt.

### **Fazit und Bewertung**

Auch wenn in der Literatur vereinzelte Ergebnisse zur Vergärbarkeit von Maisstroh unter anaeroben Bedingungen vorliegen, ist die Methanausbeute bislang nur unzureichend untersucht und für deutsche bzw. mitteleuropäische Bedingungen gänzlich unbekannt. Für die flächenbezogene Bewertung der Methanertragsfähigkeit wird in der Regel der Methanhektarertrag verwendet, der neben der Methanausbeute auch den organischen TM-Ertrag (oTM-Ertrag, s. Glossar) eines Substrates berücksichtigt. Eine konsequente und systematische Ermittlung der Erträge, Methanausbeuten und Rohaschegehalte unter gleichen Standort- und Umweltbedingungen liegt bisher für Maisstroh nicht vor. Wissenslücken bestehen auch in Bezug auf die Variabilität der Methanausbeute durch pflanzenbauliche Maßnahmen wie der Sortenwahl oder des Erntetermins sowie eines möglichen Zusammenhanges mit der stofflichen Zusammensetzung von Maisstroh.

### 3 Zielsetzung

Da unter deutschen bzw. mitteleuropäischen Bedingungen der Ertrag und die Qualität des anfallenden Maisstrohs wie auch die technischen Möglichkeiten zur Ernte von Maisstroh bislang nicht hinreichend bekannt sind und zudem generelle Wissenslücken in Bezug auf die Methanausbeute von Maisstroh bestehen, war es das Ziel der vorliegenden Arbeit, folgende Fragestellungen mithilfe von Feldversuchen zu klären:

- Welche TM-Erträge fallen beim Anbau von Körnermais als potenziell erntbares Maisstroh (Definitionen s. Glossar) zusätzlich zum Kornertrag an und welche TM-Gehalte weist das Maisstroh auf? Eignen sich der Kornertrag oder der Gesamtpflanzenenertrag bzw. die Parameter Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis für die Abschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohs?
- Welche Erträge können mit den vorhandenen Ernteverfahren (Schwadetechniken und Bergungstechniken) bei unterschiedlichen Erntebedingungen abgefahren werden und wie hoch sind die Abfuhraten bzw. Ernteverluste? Welche Erträge und Verluste entstehen in den einzelnen Verfahrensschritten (Schwaden und Bergen) der Strohernte? Welche TM-Gehalte und welchen Verschmutzungs- und Zerkleinerungsgrad hat das abgefahrenere Maisstroh nach der Strohbergung?
- Wie ist die stoffliche Zusammensetzung von Maisstroh anhand der gängigen Futtermittelanalytik zu beschreiben und welche Methanausbeuten werden damit erzielt? Gibt es einen kausalen Zusammenhang zwischen der stofflichen Zusammensetzung von Maisstroh und der erzielten Methanausbeute?
- Führen der Anbau verschiedener Sorten und unterschiedliche Erntezeitpunkte zu einer Differenzierung des potenziell erntbaren Maisstrohs in Bezug auf die Parameter TM-Ertrag, TM-Gehalt, stofflicher Zusammensetzung, Methanausbeute und Methanhektarertrag? Erzielen dabei Sorten mit einem verzögerten Abreifeverhalten (stay-green Charakter) höhere Methanausbeuten als die Vergleichssorten?

Die getrennte Erfassung von ertrags- und qualitätsbestimmenden Merkmalen für das potenziell erntbare Maisstroh einerseits und das abgefahrenere Maisstroh andererseits, sollte eine Quantifizierung des grundsätzlich vorhandenen **pflanzenbaulichen Potenzials** als auch des realisierbaren **technologischen Potenzials** ermöglichen

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Versuchsübersicht

Die vorliegende Arbeit basiert auf mehrjährigen Feldversuchen, die in den Jahren 2014 bis 2016 durchgeführt wurden. Die Untersuchungen umfassen zwei eigenständige Versuche:

- **Versuch 1: „Sorten- und Ernteterminversuche“**

Zur Ermittlung von Ertrag, Qualität und der Methanausbeute des potenziell erntbaren Maisstrohs (Gesamtpflanze ohne Körner, Definitionen s. Glossar), wurden Feldversuche mit fünf verschiedenen Sorten durchgeführt. Neben Erhebungen zur Siloreife wurden für die angebauten Sorten zu drei zeitlich gestaffelten Ernteterminen ab der Kornreife die Erträge der drei Biomassefraktionen Korn, potenziell erntbares Maisstroh und Gesamtpflanze erhoben und die Kennzahlen Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis abgeleitet. Zudem wurden die stoffliche Zusammensetzung und die Methanausbeute des Maisstrohs untersucht, um auf Basis des Methanhektarertrages das pflanzenbaulich vorhandene Potenzial (im stehenden Bestand) zu bestimmen. Diese Versuche werden im Folgenden als „Sorten- und Ernteterminversuche“ bezeichnet.

- **Versuch 2: „Erntetechnikversuche“**

Im gleichen Versuchszeitraum wurden in separaten Feldversuchen im Großmaßstab unter praxisnahen Bedingungen für verschiedene Schwadtechniken, Bergeverfahren und Erntebedingungen die Stroherträge in den einzelnen Verfahrensschritten der Strohbergung untersucht und für das abgefahrene Maisstroh qualitätsbestimmende Parameter und Methanausbeuten ermittelt, um auf Basis der Methanhektarerträge das technologische Potenzial zu bestimmen, das sich aufgrund von verfahrenstechnischen Einflüssen bei der Strohbergung ergibt. Diese Versuche werden im Folgenden als „Erntetechnikversuche“ bezeichnet.

*Tabelle 5* gibt einen Überblick über die beiden Versuche, die jeweils geprüften Varianten und die wichtigsten Untersuchungsparameter. Mit Ausnahme der Sortenausweitung ab 2015 (Hinzunahme einer zusätzlichen Sorte) wurden in den Sorten- und Ernteterminversuchen über drei Jahre hinweg die gleichen Versuchsvarianten geprüft. In den Erntetechnikversuchen hingegen wurden die Versuchsvarianten zwischen den Jahren

teilweise verändert. Gründe dafür waren die Verfügbarkeit der Erntetechniken, das Aufkommen neuer Ernteverfahren und das Ziel, verschiedene Erntebedingungen bei begrenzter Versuchskapazität zu untersuchen.

Tabelle 5: Übersicht der durchgeführten Versuche und untersuchten Parameter

	Sorten- und Ernteterminversuche	Erntetechnikversuche
<b>Standort</b>	Pulling	Neufinsing
<b>Jahr und Varianten</b>	2014: 4 Sorten ✕ 3 Erntetermine	2014: 4 Schwadtechniken ✕ 2 Bergungstechniken ✕ 2 Feldliegezeiten
	2015: 5 Sorten ✕ 3 Erntetermine	2015: 4 Schwadtechniken ✕ 1 bzw. 2 Bergungstechniken ✕ 3 Sorten
	2016: 5 Sorten ✕ 3 Erntetermine	2016: 3 Schwadtechniken ✕ 2 Bergungstechniken
<b>Versuchsdesign</b>	zweifaktorielle Blockanlage, 3 Wiederholungen	zwei-/dreifaktorielle Spaltanlage, 4 Wiederholungen
<b>wesentliche Parameter</b>	Ertragsparameter von Körnermais (im stehenden Bestand)	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>TM-Ertrag und TM-Gehalt der Gesamtpflanze zur Siloreife (Silomais) <sup>1)</sup></li> <li>TM-Ertrag und TM-Gehalt von Korn, potenziell erntbarem Maisstroh und Gesamtpflanze zur Kornreife;</li> <li>Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TM-Ertrag und TM-Gehalt von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh <sup>1)</sup></li> </ul>
	Erträge und Kennzahlen bei der Strohbergung	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>auf Schwad gelegter Strohertrag</li> <li>abgefahrener Strohertrag</li> <li>Ertrag der Stoppeln</li> <li>Maschinenspezifische Kennzahlen (Arbeitsbreite, Schwadbreite, Schwadhöhe, Stoppellänge)</li> </ul>
Maisstrohqualität		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Inhaltsstoffe des potenziell erntbaren Maisstrohs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inhaltsstoffe des abgefahrenen Maisstrohs <sup>1)</sup></li> <li>TM-Gehalt, Rohaschegehalt und Häcksellängen des abgefahrenen Maisstrohs</li> </ul>	
Methanertragsfähigkeit von Maisstroh		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Methanausbeute des potenziell erntbaren Maisstrohs</li> <li>Methanhektarertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Methanausbeute des abgefahrenen Maisstrohs <sup>1)</sup></li> <li>Methanhektarertrag des abgefahrenen Maisstrohs <sup>1)</sup></li> </ul>	

<sup>1)</sup> Erhebungen und Untersuchungen in reduziertem Umfang

## 4.2 Standort und Vegetationsverlauf

Die Versuchsflächen der Sorten- und Ernteterminversuche lagen in Pulling (Landkreis Freising, Südbayern, 48°21'54.8"N 11°42'11.9"E), die der Erntetechnikversuche in Neufinsing (Landkreis Erding, Südbayern, 48°13'57.0"N 11°45'33.8"E). Beide Versuchsstandorte gehören zum Bayerischen Tertiär-Hügelland. Die einzelnen Versuchsflächen am Standort Pulling sind durch die Bodenart schluffiger Lehm und eine mittlere Bodenzahl von 48 bis 62 gekennzeichnet (*Tabelle 6*). Am Standort Neufinsing wurden die Versuche 2014 und 2016 jeweils auf demselben Schlag durchgeführt. 2015 wurde der Nachbarschlag gewählt, der die gleiche Bodenart (Lösslehm) und einen ähnlichen Nährstoffgehalt aufwies. Somit kann in Pulling von vergleichbaren, in Neufinsing sogar von nahezu identischen Standorteigenschaften der Versuchsflächen in den Untersuchungsjahren ausgegangen werden.

*Tabelle 6: Übersicht über die Versuchsstandorte*

Ort	Jahr	Versuchsfläche	Bodenart	Boden- zahl	pH- Wert	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> in mg/100 g Boden	K <sub>2</sub> O	Mg
Pulling	2014	Schlüter 20	Humoser Boden, schluffiger Lehm	62	7,4 <sup>1)</sup>	8 <sup>1)</sup>	8 <sup>1)</sup>	14 <sup>1)</sup>
Pulling	2015	Schlüter 10	Mineralboden, schluffiger Lehm	52	7,6 <sup>2)</sup>	27 <sup>2)</sup>	20 <sup>2)</sup>	12
Pulling	2016	Pulling 2	Humoser Boden, schluffiger Lehm	48	7,7 <sup>2)</sup>	10 <sup>2)</sup>	11 <sup>2)</sup>	20 <sup>2)</sup>
Neufinsing	2014/ 2016	Moos/rechts	Anmooriger Boden, Lösslehm	47	7,3 <sup>1)</sup>	34 <sup>1)</sup>	10 <sup>1)</sup>	-
Neufinsing	2015	Moos/links/A	Anmooriger Boden, Lösslehm	46	7,3 <sup>1)</sup>	33 <sup>1)</sup>	18 <sup>1)</sup>	-

<sup>1)</sup>Werte gemäß Bodenuntersuchung 2012

<sup>2)</sup>Werte gemäß Bodenuntersuchung 2015

Die Versuchsstandorte Neufinsing und Pulling gehören zur feucht-gemäßigten Klimazone. Die Versuchsfläche in Pulling liegt ca. 455 m über NN. Die jährliche Niederschlagsmenge betrug im Mittel der letzten zehn Jahre (2006 - 2015) 844 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur 8,9°C (2006 - 2015). Am Versuchsstandort Neufinsing, der sich auf 494 m über NN befindet, ist die mittlere Niederschlagsmenge etwas höher und

lag bei 864 mm (2006 - 2015), die Jahresdurchschnittstemperatur bei 9,0°C (2006 - 2015).

Die Vegetationsperiode am Standort Pulling war in allen Versuchsjahren durch überdurchschnittliche Lufttemperaturen im Vergleich zum langjährigen Mittel gekennzeichnet (*Tabelle 7*). Besonders markant war das Versuchsjahr 2015. Hier lagen die Durchschnittstemperaturen – mit Ausnahme des Monats September – in allen Monaten deutlich und in der Hauptwachstumsphase von Mitte Juni bis August sogar durchgängig 4°C über dem langjährigen Mittel. In Kombination mit den äußerst geringen Niederschlagsmengen in diesem Zeitraum war das Versuchsjahr 2015 durch starken Trockenstress gezeichnet (*Tabelle 8*). Besonders gering waren dabei die Niederschläge zur Blüte im Juli (25 mm). Dagegen haben die hohen Niederschläge im Vegetationsjahr 2014, insbesondere in den Monaten Mai, Juli und Oktober die Ernte verzögert und zu überdurchschnittlichen Ertragsergebnissen geführt. Im Versuchsjahr 2016 waren die Niederschlagsmengen vergleichbar zum langjährigen Mittel mit Ausnahme der zu geringen Niederschläge im August, sodass je nach standorttypischer Wasserverfügbarkeit kleinräumig sehr unterschiedliche Erträge, von mäßig bis sehr gut, erzielt wurden.

*Tabelle 7: Monatliche Durchschnittstemperatur (°C) im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Pulling (Datengrundlage: LfL, 2017a)*

	Versuchsjahr			Langjähriges Mittel (1961-1990)
	2014	2015	2016	
April	10,0	8,5	8,3	7,3
Mai	12,1	13,1	12,8	11,9
Juni	16,7	16,8	16,5	15
Juli	18,1	20,7	18,7	16,7
August	15,9	20,0	17,7	16,1
September	13,9	12,9	15,6	12,9
Oktober	10,8	8,0	7,8	7,9
November	5,5	6,7	3,4	2,8
$\bar{x}$	12,9	13,3	12,6	11,3

*Tabelle 8: Monatliche Niederschlagsmenge (mm) im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Pulling (Datengrundlage: LfL, 2017a)*

	2014	Versuchsjahr 2015	2016	Langjähriges Mittel (1961-1990)
April	30	60	49	56
Mai	167	134	98	90
Juni	40	102	104	104
Juli	154	25	93	98
August	98	53	61	97
September	67	44	59	64
Oktober	118	61	45	51
November	41	67	70	54
$\Sigma$	714	546	580	613

Ähnliche klimatische Bedingungen wie in Pulling waren auch für den Versuchsstandort Neufinsing gegeben. Alle Versuchsjahre (2014 - 2016) waren ungewöhnlich warm und die Lufttemperaturen lagen im Monatsmittel zum Teil deutlich über dem langjährigen Mittel (Tabelle 9).

*Tabelle 9: Monatliche Durchschnittstemperatur (°C) im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Neufinsing (Datengrundlage: LfL, 2017a LfL, 2017a; Wetterstation Eichenried)*

	2014	Versuchsjahr 2015	2016	Langjähriges Mittel (1961-1990)
April	10,0	8,7	8,4	7,6
Mai	12,2	13,1	12,9	12,2
Juni	16,7	16,9	16,8	15,4
Juli	18,2	21,1	19,0	17,3
August	16,1	20,5	17,4	16,6
September	14,0	13,5	15,3	13,4
Oktober	11,0	8,3	8,0	8,2
November	5,4	7,0	3,6	2,8
$\bar{x}$	13,0	13,6	12,7	11,7

Auch in Neufinsing waren die Gesamtniederschläge im Jahr 2014 überdurchschnittlich hoch und in 2015 extrem gering (*Tabelle 10*). Durch den Grundwasseranschluss an diesem Standort, kam es jedoch nur stellenweise zu Trockenschäden und es wurden sogar überdurchschnittliche Erträge erzielt. Das Versuchsjahr 2016 war aufgrund der ausreichenden Niederschläge, die in etwa der langjährigen Niederschlagsverteilung glichen, durch ein sehr hohes Ertragsniveau gekennzeichnet.

*Tabelle 10: Monatliche Niederschlagsmenge (mm) im Vegetationsverlauf in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Neufinsing (Datengrundlage: LfL, 2017a; Wetterstation Eichenried)*

	Versuchsjahr			Langjähriges Mittel (1961-1990)
	2014	2015	2016	
April	38	55	50	55
Mai	94	154	90	88
Juni	43	92	103	109
Juli	154	36	103	100
August	136	41	81	98
September	67	48	73	68
Oktober	102	64	50	49
November	43	61	62	55
$\Sigma$	677	551	611	620

Durch ein Sturmereignis in der Nacht vom 21.10.2014 kam es kurz vor der Ernte teilweise zu Lager. Davon war sowohl die Versuchsfläche in Neufinsing, als auch die in Pulling betroffen.

## 4.3 Sorten- und Ernteterminversuch

### 4.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Maissaat erfolgte je nach Witterungsverhältnissen im Zeitraum Mitte bis Ende April (vgl. *Tabelle 12*). Gesät wurde mit einer 4-reihigen Parzellensämaschine (Hege 95B; ab 2016: Monosem NG Plus 4) und einem Reihenabstand von 0,75 m. Dazu wurde ein automatisches Lenksystem verwendet (Trimble Autopilot, geo-konzept GmbH, Deutschland). Die Parzellengröße betrug 18 m<sup>2</sup>, wobei entgegen der vierreihigen Standardanlage bei Maisversuchen eine achtreihige Parzelle mit halber Parzellenlänge (3 m) gewählt wurde, um sechs Kernreihen (statt wie üblich zwei Kernreihen) beproben zu können. Um für die Ertragserfassung eine einheitliche Pflanzenzahl je Parzelle zu erhalten, wurde mit einer Saatstärke von 120 % ausgesät und die Pflanzen nach dem Aufgang auf eine Bestandesdichte von 9,3 Pflanzen pro m<sup>2</sup> (21 Pflanzen bei 3 m Parzellenlänge) vereinzelt.

Für die Untersuchung von Sortenunterschieden wurden vier bzw. ab 2015 fünf verschiedene Körnermais-Genotypen aus dem mittelfrühen Reifebereich mit teils unterschiedlichen Reifezahlen (K 230 bis K 250) und einer möglichst breiten Spreizung im Abreifeverhalten angebaut (*Tabelle 11*).

*Tabelle 11: Sortenbeschreibung*

Sorte	Züchter	Reifezahl Silomais	Reifezahl Körnermais	Abreifeverhalten der Restpflanze
Grosso	KWS	S 250	K 250	normal
SY Kardona	Syngenta	S 250	K 240	normal - langsam
SY Talisman	Syngenta	S 220	K 230	schnell
Danubio	DSV	S 270	K 240	langsam
SM E0115 <sup>1)</sup> (ab 2015)	Farmsaat	~ S 250 <sup>2)</sup>	~ K 240 <sup>2)</sup>	langsam

<sup>1)</sup> Genotyp, noch keine zugelassene Sorte

<sup>2)</sup> Angaben gemäß Züchtereinschätzung

Als Standard- und Vergleichssorte wurde die Sorte Grosso gewählt. Sie ist eine ertragsstarke Sorte aus dem mittelfrühen Reifebereich, die sowohl für die Silomais- als auch Körnernutzung geeignet ist und aufgrund identischer Silomais- und Körnermais-Reifezahlen eine gleichmäßige Abreife aufweist. Die Sorte SY Talisman ist im Vergleich

zu Grosso durch eine schnellere Abreife der Restpflanze (Silomais-Reifezahl < Körnermais-Reifezahl) gekennzeichnet. Als Sorten mit deutlich verzögerter Abreife wurden Danubio sowie die Testhybride SM E0115 (noch keine zugelassene Sorte, ab 2015 im Versuch getestet) gewählt, die einen ausgeprägten Stay-green Charakter (Silomais-Reifezahl > Körnermais-Reifezahl) haben. Die Sorte SY Kardona kann hinsichtlich des Abreifeverhaltens der Restpflanze als Zwischentyp (normales bis langsames Abreifeverhalten der Restpflanze) beschrieben werden.

Die pflanzenbaulichen Maßnahmen wie Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz erfolgten ortsüblich (*Tabelle 12*). Während der Vegetation wurde mit Bonituren der Entwicklungsverlauf in Anlehnung an die Richtlinien des BSA (2000) dokumentiert. Dabei wurden neben dem Feldaufgang und dem Blühzeitpunkt (Datum weibliche Blüte) die Anzahl der Pflanzen in den Kernreihen und die Pflanzenlänge nach der Blüte erfasst. Vor der Ernte wurde zudem der Anteil an lagernden Pflanzen, der Befall mit Zünsler (*Ostrinia nubilalis*) und Beulenbrand (*Ustilago maydis*) (Anzahl befallender Pflanzen) sowie das Auftreten von Blattkrankheiten (Helminthosporium, Kabatiella) ermittelt. Um den Abreifegrad der Restpflanze zum jeweiligen Erntetermin beurteilen zu können, wurde außerdem eine Bonitur des Blattapparats (Note 1 = vollständig grün, Note 5 = je zur Hälfte grün und braun, Note 9 = vollständig abgereift) sowie eine SPAD Messung (SPAD-502Plus, Konica Minolta, Japan) an den Kolbenblättern durchgeführt. Dafür wurde an insgesamt 10 Pflanzen je Parzelle (an zwei verschiedenen Stellen pro Parzelle je fünf Pflanzen in einer Reihe nacheinander) das Kolbenblatt etwa 1/3 der Kolbenblattlänge von der Blattscheide entfernt, gemessen. Der SPAD-Wert ist dimensionslos und korreliert mit dem Chlorophyllgehalt der Blätter, wodurch er für die Beurteilung des Abreifegrades der Pflanzen verwendet werden kann.

*Tabelle 12: Übersicht über die pflanzenbaulichen Maßnahmen in den Sorten- und Ernteterminversuchen*

Versuchsfeld	Saattermin	Pflanzenschutz			Nährstoffversorgung		
		Datum	Mittel	Aufwand (l ha <sup>-1</sup> )	Datum	Art	Aufwand (kg N ha <sup>-1</sup> )
Schlüter 20 (2014)	24.04.	22.05.	Calaris	1,5	28.02.	N <sub>min</sub> -Vorrat	87
		22.05.	Dual Gold	1,25	10.04.	NPK 15/15/15	120
					24.04.	NP 20/20	30
					26.06.	KAS 27	40
Schlüter 10 (2015)	22.04.	29.05.	Calaris	1,5	06.03.	N <sub>min</sub> -Vorrat	56
		29.05.	Dual Gold	1,25	14.04.	NPK 15/15/15	105
					22.04.	NP 20/20	30
					18.06.	NPK 15/15/15	50
Pulling 2 (2016)	29.04.	06.06.	Calaris	1,5	24.03.	N <sub>min</sub> -Vorrat	71
		06.06.	Dual Gold	1,25	20.04.	NPK 19/8/19	150

Durch die zeitliche Staffelung der Erntetermine wurde zusätzlich zum Faktor Sorte der Einfluss des Erntetermins bzw. des Abreifegrades der Restpflanze ermittelt. Anhaltspunkt für die Terminierung des Erntezeitpunktes waren die Kornfeuchte und ein an die Praxis angelehnter Zeitrahmen. Da die Druschfähigkeit Voraussetzung für die Ernte von Körnermais ist, wurde der erste Erntetermin so gewählt, dass die Kornreife bei der Mehrheit der Sorten knapp erreicht war (Kornfeuchtegehalt von ca. 37 - 35 %). Die beiden folgenden Erntetermine wurden je nach Witterung und verfügbarer Versuchstechnik im Abstand von 8 - 18 Tagen durchgeführt, sodass ein Erntefenster von drei bis vier Wochen abgedeckt werden konnte (*Tabelle 13*). Im Versuchsjahr 2014 konnte aufgrund der kühlen und regnerischen Herbstwitterung die Zielvorgabe von 37 % Kornfeuchte beim 1. Erntetermin nicht erreicht werden, während sie 2015 und 2016 überschritten werden musste, um in einem praxisüblichen Zeitfenster zu bleiben.

*Tabelle 13: Übersicht über die Erntetermine in den einzelnen Versuchsjahren im Sorten- und Ernteterminversuch*

Jahr	1. Erntetermin			2. Erntetermin			3. Erntetermin	
	Datum	Kornfeuchte (%)		Datum	Kornfeuchte (%)		Datum	Kornfeuchte (%)
<b>2014</b>	13.10.	38	+ 14 Tage➤	27.10.	36	+ 8 Tage➤	04.11.	35
<b>2015</b>	18.09.	32	+ 18 Tage➤	6.10.	26	+ 8 Tage➤	14.10.	26
<b>2016</b>	30.09.	32	+ 14 Tage➤	14.10.	31	+ 13 Tage➤	27.10.	28

Als Versuchsdesign wurde in allen Versuchsjahren eine zweifaktorielle Blockanlage mit randomisierten vollständigen Blöcken in dreifacher Wiederholung angelegt. Die Anzahl der Prüfglieder lag 2014 bei zwölf, ab 2015 bei 15. Das detaillierte Versuchsdesign der Einzeljahre ist dem Anhang zu entnehmen (*Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12*).

#### 4.3.2 Merkmalerfassung und Analysen

##### Erträge und TM-Gehalte von Korn, potenziell erntbarem Maisstroh und Gesamtpflanze

Da je Parzelle acht Maisreihen zur Verfügung standen, waren zwei Kernreihen (4,5 m<sup>2</sup>) für die Ermittlung der TM-Erträge von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh (Gesamtpflanze ohne Körner), zwei Kernreihen für die Erträge der Gesamtpflanze und

zwei Reihen für zusätzliche Erhebungen wie die Bestimmung des Silomaisertrages (Gesamtpflanze zur Siloreife) vorgesehen.

Um den Ertrag und die Qualität des potenziell erntbaren Maisstrohs mit dem Ertrag und der Qualität von Silomais vergleichen zu können, wurden zur Siloreife (Ende Teigreife; 26.09.2014, 27./28.08.2015 bzw. 09./12.09.2016) je Sorte zehn Gesamtpflanzen von Hand mit der Sichel bei einer Schnitthöhe von 20 - 25 cm über der Bodenoberfläche geerntet. Anschließend wurde das Erntegut mit einem Gartenhäcksler (Viking GE 355, ANDREAS STIHL AG & Co. KG, Deutschland) zerkleinert, gewogen und eine Probe zur Ermittlung des TM-Gehaltes sowie eine Probe zur Bestimmung der Inhaltsstoffe abgenommen.

Bei Erreichen der Kornreife wurden zum jeweiligen Erntetermin (*Tabelle 13*) an den beiden „Maisstroh-Reihen“ alle Kolben von Hand gepflückt, wobei die Lieschblätter an der Pflanze belassen wurden. Die Kolben wurden anschließend gezählt und gewogen. Mit einem Stationärdrescher (LD 350, Wintersteiger AG, Österreich) wurden Körner und Spindeln getrennt und das Frischmassegewicht beider Fraktionen separat ermittelt, wobei die „Überkehr“ aus der Dreschtrommel verworfen wurde. Aus der Kornmenge wurde eine Probe zur Bestimmung der Korn-TM-Gehalte gezogen. Die Spindeln wurden über Nacht mit einer Folie abgedeckt und im Kühlraum bei 8 °C gelagert, um den Feuchtigkeitsverlust zu minimieren. Am nächsten Morgen wurden die Spindeln mit einem Gartenhäcksler (Viking GE 355, ANDREAS STIHL AG & Co. KG, Deutschland) zerkleinert. Am selben Tag erfolgte die Ernte der kolbenlosen Restpflanzen (zwei Kernreihen) sowie separat dazu die Ernte von zwei weiteren Kernreihen (Gesamtpflanzen) mit einem zweireihigen selbstfahrenden Maisparzellenhäcksler (Haldrup M-65, Haldrup GmbH, Dänemark). Die Schnitthöhe lag dabei zwischen 20 und 25 cm, sodass die Stoppeln nicht erfasst werden konnten und ihr Ertrag nicht Teil des (potenziell erntbaren) Maisstrohs ist. Bei der Ernte der Gesamtpflanzen konnte das Frischgewicht der Parzelle mithilfe der integrierten Wiegeeinrichtung erfasst und über den Bordcomputer dokumentiert werden. Durch das maschinelle Probeentnahmesystem erfolgte eine kontinuierliche Probeentnahme (ca. 0,5 bis 1 kg Frischmasse) aus dem Häckselstrom für die Ermittlung der TM-Gehalte sowie eine spätere Qualitätsuntersuchung (Futtermittelanalyse gemäß Nahinfrarot-Reflexions-Spektroskopie (NIRS)). Das Frischgewicht der TM-Probe wurde durch eine Waage in der Führerkabine des Häckslers unmittelbar nach der Probenahme erfasst.

Ebenso wurden die Frischgewichte der kolbenlosen Restpflanzen während der Ernte mit der integrierten Wiegeeinrichtung ermittelt und die gesamte Restpflanzenmenge (es

erfolgte keine Probennahme aus dem Häckselstrom) möglichst verlustfrei in eine Radladerschaufel bzw. einen Silierwagen abgeladen. Anschließend wurden die zerkleinerten Spindeln der jeweiligen Parzelle sorgfältig unter die gehäckselte Restpflanzenmenge gemischt (kolbenlose Restpflanze + Spindel = Maisstroh) und von Hand fünf repräsentative Maisstroh-Proben von ca. 0,5 bis 1 kg Frischmasse gezogen. Die Einzelproben wurden für die Bestimmung des TM-Gehaltes, der Inhaltsstoffe (nasschemische Futtermittelanalyse nach Weender/Van Soest und NIRS-Analyse), sowie für die Ermittlung der Methanausbeute (Batchversuche) verwendet. Bei der zusätzlichen Probe handelte es sich um eine Rückstellprobe.

Alle Proben wurden in Crispac-Beuteln mit Super-Micro-Lochung gelagert und unmittelbar nach der Probenahme auf der Flachsatztrocknung bei maximal 60°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Proben, die ausschließlich für eine TM-Gehalts-Bestimmung vorgesehen waren (Silomais, Körner, Maisstroh) wurden nach dem Vortrocknen auf der Flachsatztrocknung im Umlufttrockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und aus der Ein- und Auswaage der TM-Gehalt (in %) berechnet (vgl. auch *Tabelle 14*). Bei Proben, die für die Bestimmung des TM-Gehaltes und zugleich für eine Qualitätsuntersuchung verwendet wurden (Gesamtpflanzen), erfolgte die TM-Gehalts-Bestimmung durch die Auswaage nach der Trocknung bei 60°C unter Berücksichtigung der Restfeuchte (ermittelt mithilfe von Referenzproben, bei denen die Restfeuchte durch die Gewichtserfassung nach der Trocknung bei 60°C und bei 105°C ermittelt wird).

Jegliche Frischmasseerträge wurden über die Parzellengröße und die jeweiligen TM-Gehalte in dt TM ha<sup>-1</sup> umgerechnet. Für die Ermittlung des potenziell erntbaren Maisstrohertrages wurden die Erträge der kolbenlosen Restpflanzen und die Spindelerträge addiert.

Für die beiden Kennzahlen Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis wurden die TM-Erträge des Kornes und des potenziell erntbaren Maisstrohs zugrunde gelegt und nachstehende Formeln verwendet. Es wurden nicht die TM-Erträge der Gesamtpflanze verwendet, weil diese an separaten Kernreihen ermittelt worden waren

Harvestindex

= Korn-TM-Ertrag / (Korn-TM-Ertrag + TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs)

Korn-Stroh-Verhältnis

= 1:x, wobei x = TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs / Korn-TM-Ertrag

### **Analyse der Inhaltsstoffe (NIRS-Analyse und nasschemische Futtermittelanalyse nach Weender/Van Soest)**

Für die Bestimmung der Inhaltsstoffe von Silomais (Gesamtpflanze zur Siloreife) und der Gesamtpflanze zu den drei Ernteterminen der Kornreife wurde das Probenmaterial auf 1 mm vermahlen und die Nah-Infrarot-Reflexions-Spektren mit einem FOSS NIR-System (NIRSystems 5000-C, Silver Spring, USA) im Labor der Syngenta Zuchtstation in Wadersloh in zwei unabhängigen Messwiederholungen aufgenommen. Für die Auswertung der Spektren wurde das Statistikprogramm ISIScan 4.6.11 (Infrasoft International, USA) verwendet und die Kalibration des Silomais-Netzwerkes für Silomais-Ganzpflanzen (VDLUFA, 2010), die bundesweit standardmäßig für die Qualitätsbewertung der Silomaisprüfungen angewendet wird, genutzt.

Auch die Maisstroh-Proben, die zur Bestimmung der Inhaltsstoffe vorgesehen waren, wurden in gleicher Weise aufbereitet und mittels NIRS analysiert. Da es für Maisstroh aktuell keine geeigneten Kalibrationen gibt, wurde eine Restpflanzen-Kalibration aus Belgien (Labor P.Dardenne, B-6800 Libramont, Belgien) verwendet. Da diese für Restpflanzen ohne Spindeln und zudem vorzugsweise für Restpflanzen zum Zeitpunkt der Siloreife vorgesehen ist, war unklar, ob bzw. inwiefern eine zuverlässige Bestimmung der Inhaltsstoffe bei den Maisstrohproben möglich war.

Aus diesem Grund wurde für alle Prüfglieder aus dem Sorten- und Ernteterminversuch (alle Sorten, Erntetermine, Versuchsjahre und Wiederholungen) anhand einer separaten Maisstroh-Probe zusätzlich auch eine nasschemische Futtermittelanalyse nach Weender- und van Soest gemäß VDLUFA (2012) in der Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) durchgeführt. Alle Analysen wurden in doppelter Ausführung untersucht. Dabei wurden die in *Tabelle 14* beschriebenen Parameter ermittelt.

Tabelle 14: Parameter und Methoden der nasschemischen Futtermittelanalyse

	Parameter	Bezeichnung	Einheit	Methode	Quelle
gemessen	Trockenmasse	TM	g	Probengewicht nach der Trocknung bei 105°C (bis zur Gewichtskonstanz)	VDLUFA MB III, 3.1, 1976
	Rohasche	XA	% TM	Glührückstand nach Veraschung bei 550 °C	VDLUFA MB III, 8.1, 1976
	Rohprotein	XP	% TM	Dumas Verbrennungsmethode	VDLUFA MB III, 4.1.2, 2004
	Rohfett	XL	% TM	Soxhlet Extraktion	VDLUFA MB III, 5.1.1
	Rohfaser	XF	% TM	Weender-Methode	VDLUFA MB III, 6.1.1
	Stärke	ST	% TM	Polarimetrische Methode	VDLUFA MB III, 7.2.1
	Zucker (reduzierend)	XZ	% TM	Titrimetrisch	VDLUFA MB III, 7.1.1
	Neutral- Detergenzfaser	NDF	% TM	Van Soest – Methode (gravimetrisch)	VDLUFA MB III, 6.5.1 2012
	Säure- Detergenzfaser	ADF	% TM	Van Soest – Methode (gravimetrisch)	VDLUFA MB III, 6.5.2 2012
	Lignin	ADL	% TM	Van Soest – Methode (gravimetrisch)	VDLUFA MB III, 6.5.3 2012
berechnet	Trockenmasse- gehalt	TM-Gehalt	%	$TM = TM/FM * 100$	VDLUFA MB III, 3.1, 1976
	Organische Trockenmasse	oTM	g	$oTM = (100 \% - XA) * TM$	VDLUFA MB II, 4.2 2012
	Hemicellulose	HCEL	% TM	$HCEL = NDF - ADF$	VDLUFA MB III, 6.5.1 2012
	Cellulose	CEL	% TM	$CEL = ADF - ADL$	VDLUFA MB III, 6.2.1 2012

### Spezifische Methanausbeute und Methanhektarertrag

Für sämtliche Maisstroh-Proben aus dem Sorten- und Ernteterminversuch (alle Sorten, Erntetermine, Versuchsjahre und Wiederholungen) wurden neben den Inhaltsstoffen auch die spezifischen Methanausbeuten bestimmt. Dazu wurden Batchversuche gemäß der Richtlinie VDI 4630 (2006) am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der LfL durchgeführt. Die getrockneten Proben wurden in einer Schneidmühle (Retsch, Haan, Deutschland) mit einem 10 mm Sieb vermahlen, homogenisiert und jede Einzelprobe in jeweils drei parallelen Ansätzen (technische Wiederholungen) in 2 l Gefäßen im Verhältnis von  $0,5 \pm 0,1$  (bezogen auf organische Trockenmasse (oTM)) mit einem Inokulum

versetzt. Die Batchversuche wurden bei einer Temperatur von  $39 \pm 0,5^\circ\text{C}$  durchgeführt. Das produzierte Gas wurde über Gaszähler (Ritter Apparatebau GmbH, Bochum, Deutschland) mit einer Genauigkeit von  $\pm 3 \%$  erfasst und anschließend das Gas aller drei Ansatzwiederholungen gemeinsam in einem gasdichten Sack gesammelt. Ab einer Gasbildung von 1,5 l wurde automatisch eine Gasanalyse durchgeführt, wobei mithilfe eines Infrarot-Sensors der Methan- und Kohlendioxidgehalt und mittels eines elektrochemischen Sensors der Sauerstoffgehalt gemessen wurden. Die Messung der Gasbildung erfolgte für mindestens 30 Tage und wurde so lange fortgesetzt, bis die Gasbildungsrate unter 0,5 % des Gesamtvolumens des bereits gebildeten Gasertrages je Tag sank. Als Referenzsubstrate dienten mikrokristalline Zellulose (in sechsfacher technischer Wiederholung) und eine definierte Probe von getrocknetem Ganzpflanzenmais (zur Siloreife geerntet) sowie das Inokulum separat als Blindwert. Durch die Bestimmung des Methangehalts konnte aus der gemessenen Gasausbeute die spezifische Methanausbeute berechnet werden, die als Liter (genormt auf 273,15 K und 1013,25 mbar) je kg organischer Trockenmasse ( $\text{l (kg oTM)}^{-1}$ ) angegeben wird. Die Ergebnisse der Biogas- und Methanausbeute der drei Ansätze (technischen Wiederholungen) wurden jeweils zu einem Durchschnittswert verrechnet. Dabei sollte der Variationskoeffizient der drei technischen Wiederholungen unter 10 % liegen (HEUWINKEL et al., 2009). Wurde dieser Variationskoeffizient überschritten, wurde von den drei technischen Wiederholungen die am wenigsten plausible Wiederholung für die Berechnung des Durchschnittswertes ausgeklammert. Durch die Multiplikation der spezifischen Methanausbeute mit der oTM je ha wurde der Methanhektarertrag ( $\text{m}^3 \text{CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ) gemäß nachstehender Formel errechnet. Für die Berechnung der oTM wurde der Aschegehalt verwendet (*Tabelle 14*).

Auf Basis des Methanhektarertrages konnte das pflanzenbauliche Potenzial beziffert werden.

Methanhektarertrag ( $\text{m}^3 \text{CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ )

= Spezifische Methanausbeute ( $\text{l (kg oTM)}^{-1}$ ) \* oTM-Ertrag ( $\text{dt ha}^{-1}$ ) \* 100/1000

= Spezifische Methanausbeute ( $\text{l (kg oTM)}^{-1}$ ) \* potenziell erntbares Maisstroh ( $\text{dt ha}^{-1}$ ) \* (100 % - XA) 100/1000

## 4.4 Erntetechnikversuch

### 4.4.1 Versuchsdurchführung

Für den Erntetechnikversuch wurde Körnermais auf Großparzellen ausgesät. Die Aussaat erfolgte in allen Versuchsjahren Ende April (*Tabelle 15*). Als Vorfrucht stand auf den Schlägen 2014 und 2015 jeweils Winterweizen, auf dem Schlag 2016 Sommergerste. Die Bodenbearbeitungsmaßnahmen vor der Saat beschränkten sich auf tiefes Grubbern und die Saatbettbereitung. Für die Aussaat wurde eine sechsreihige Sämaschine (Maxima 2 GT, Kuhn S.A., Frankreich) verwendet und mit einem Reihenabstand von 0,75 m gesät. Zur Einpassung der Versuche ins Feld wurde ein Lenksystem (Star Fire 3000 mit SF 2 Signal, John Deere, USA) verwendet. Die Parzellenlängen variierten in den Einzeljahren und betragen 140 m (2014), 105 m (2015) bzw. 108 m (2016), was jedoch für die späteren Ertragserfassungen unerheblich war, da in jeder Parzelle nur ein mittig positionierter Teilbereich für den Vergleich der Erträge berücksichtigt wurde. Die Parzellenbreite und die genaue Anordnung der Parzellen innerhalb der angelegten Versuchsblöcke (die einzelnen Wiederholungen wurden als Blöcke bereits bei der Aussaat angelegt, s. Anhang *Abbildung 21, Abbildung 22, Abbildung 23*) wurden durch Abzählen der Maisreihen erst vor der Ernte festgelegt (s. Kapitel 4.4.3). Nach der Saat wurden die Schläge gewalzt. Es wurde eine Bestandesdichte von 9 Pflanzen je m<sup>2</sup> angestrebt und die tatsächliche Bestandesdichte unmittelbar vor der Ernte erfasst. Düngungs- und Pflanzenschutzmaßnahmen wurden ortsüblich durchgeführt (vgl. *Tabelle 15*)

*Tabelle 15: Übersicht über die pflanzenbaulichen Maßnahmen im Erntetechnikversuch*

Versuchsfeld	Saat	Pflanzenschutz			Düngung			Ernte
		Datum	Mittel	Aufwand (l/g ha <sup>-1</sup> )	Datum	Dünger	Aufwand (kg N ha <sup>-1</sup> )	
Moos/rechts (2014)	24.04.	31.05.	Gardo Gold	2,5 l	03.04.	Rindergülle	39	27.10. – 31.10.
		31.05.	TASK	306 g	24.04.	Harnstoff 46	23	
		16.06.	Callisto	0,75 l	04.06.	ASS	91	
Moos/links/A (2015)	23.04.	28.05.	Gardo Gold	2,5 l	10.04.	Rindergülle	42	29.09. – 02.10.
		28.05.	TASK	300 g	23.04.	Harnstoff 46	23	
		11.06.	Callisto	0,75 l	11.06.	ASS	101	
Moos/rechts (2016)	29.04.	28.05.	Spectrum	1,0 l	05.04.	Biogasgärrest	35	17.10. – 18.10.
		28.05.	Stomp Aqua	2,0 l	29.04.	Alzon 47	25	
		28.05.	TASK	300 g	08.06.	ASS	104	
		10.06.	Callisto	0,75 l				

ASS: Ammonsulfatsalpeter

Nach Erreichen der Druschreife, bei einem Korn-Feuchtegehalt von maximal 35 %, wurden die Parzellen mit einem 8-reihigen Mähdrescher (Lexion 670, Claas KGaA mbH, Deutschland) geerntet. Dafür wurde auf allen Parzellen (mit Ausnahme der Parzellen, die für die Ernte mit dem modifizierten Pflücker Mais Star\* Collect vorgesehen waren) der Maispflücker Quasar (Capello Srl, Italien) (2014, 2015) bzw. der SLT 968 (Dominoni s.n.c., Italien) (2016) eingesetzt. Da sich die Verfahrensschritte Dreschen, Schwaden und Bergen des Maisstrohs über mehrere Tage erstreckten, war die Witterung ein weiteres Kriterium für die Wahl des Erntezeitpunktes. Im Versuchsjahr 2014 war der Versuchsschlag aufgrund von starken Niederschlägen Mitte Oktober (*Tabelle 10*) für längere Zeit nicht befahrbar, weshalb erst Ende Oktober geerntet werden konnte. Bedingt durch die warme und sehr trockene Vegetationsperiode wurde 2015 ungewöhnlich früh geerntet, während die Ernte im Versuchsjahr 2016 in ein für Körnermais gängiges Erntefenster fiel. Für jede Parzelle wurden während des Dreschens die Uhrzeit, gegebenenfalls Störungen, vereinzelt die Fahrgeschwindigkeit sowie größere Lager- (2014) oder Trockenschäden (2015) dokumentiert.

#### 4.4.2 Versuchsvarianten

Für die Analyse verschiedener Ernteverfahren zur Maisstrohbergung wurden die vier Schwadtechniken BioChipper, Schwadhäcksler UP-6400, Merge Maxx 900/902 und der Mais Star\* Collect in Kombination mit den zwei Bergungsarten selbstfahrender Feldhäcksler und Kurzschnittladewagen verglichen. Alle Schwadtechniken wurden bereits 2013 für die Ernte von Maisstroh in Deutschland bzw. Österreich in der Praxis eingesetzt und waren mit Ausnahme des Schwadhäckslers UP-6400, bei dem es sich bislang um einen Prototyp handelt, kommerziell verfügbar. Es handelte sich jeweils um mehrstufige (zwei- und dreistufige) Ernteverfahren, einstufige Ernteverfahren waren nicht verfügbar. Die einzelnen Techniken sind im folgenden Absatz näher beschrieben und in *Tabelle 17* vergleichend dargestellt.

Im Versuchsjahr 2016 wurde als zusätzliches Ernteverfahren das Direct Disc 500 (als Erntevorsatz an den selbstfahrenden Feldhäcksler) in den Versuch aufgenommen, wohingegen 2016 der Schwadhäcksler UP-6400 nicht zur Verfügung stand.

Als weitere Versuchsvarianten wurden 2014 für alle Ernteverfahren zwei verschiedene Stroh-Feldliegezeiten und im Versuchsjahr 2015 drei verschiedene Sorten geprüft. Eine Übersicht über alle Faktorstufen und die wesentlichen Informationen zum Versuchsdesign gibt *Tabelle 16*.

Tabelle 16: Übersicht über die Versuchsvarianten in den einzelnen Versuchsjahren im Erntetechnikversuch

	2014	2015		2016
<b>Faktoren</b>				
<b>Schwad- technik</b>	<b>4 Schwadtechniken</b> BioChipper, Schwadhäcksler UP-6400, Merge Maxx 900, Mais Star* Collect	<b>4 Schwadtechniken</b> BioChipper, Schwadhäcksler UP-6400, Merge Maxx 902, Mais Star* Collect		<b>3 Schwadtechniken</b> BioChipper, - Merge Maxx 902, Mais Star* Collect
<b>Feldliege- zeit bzw.</b>	<b>2 Feldliegezeiten</b> kurze Feldliegezeit, lange Feldliegezeit	(kurze Feldliegezeit)		(kurze Feldliegezeit)
<b>Sorte</b>	(LG 32.58)	<b>1 Sorte</b> LG 32.58	<b>2 Sorten</b> SY Talisman, KWS 9361	(LG 32.58)
<b>Bergungs- art</b>	<b>2 Bergungsarten</b> selbstfahrender Feldhäcksler,  Kurzschnittladewagen	<b>2 Bergungsarten</b> selbstfahrender Feldhäcksler,  Kurzschnitt- ladewagen	<b>1 Bergungsart</b>  Kurzschnitt- ladewagen	<b>2 Bergungsarten</b> selbstfahrender Feldhäcksler,  Kurzschnittladewagen zusätzlich: Direct Disc 500 am selbstfahrenden Feldhäcksler
<b>Anzahl Prüfglieder</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>7</b>
		<b>12</b> (wenn 3 Sorten und nur die Kurzschnittladewagen-Varianten verglichen werden)		
<b>Wieder- holungen</b>	4	4	4	4
<b>Versuchs- design</b>	dreifaktorielle dreistufige Spaltanlage	zweifaktorielle Spaltanlage  zweifaktorielle Spaltanlage (3 Sorten, nur Kurzschnittladewagen)	zweifaktorielle Spaltanlage	zweifaktorielle Spaltanlage

**BioChipper („BioC“)**

Der BioChipper (BioG GmbH, Österreich) wurde eigens für die Bergung von Maisstroh bzw. auch anderen Reststoffen wie z. B. Rapsstroh entwickelt (s. Anhang *Abbildung 13*). Dabei handelt es sich um einen modifizierten Mulcher, der mit einer zusätzlichen Schwadfunktion ausgestattet wurde. Mithilfe einer rotierenden Welle mit Hammerschlegeln werden je nach eingestellter Arbeitstiefe zusätzliche Anteile der

Maisstoppeln über dem Boden abgeschlagen, das Erntegut mit Hilfe einer Gegenschlagleiste zerkleinert, gleichzeitig durch den Sog der Schlegelwelle loses Maisstroh ohne Bodenkontakt aufgenommen und auf ein Querförderband hinter der Schlegelwelle geworfen (s. Anhang *Abbildung 14*). Anschließend wird das Substrat seitlich im Schwad abgelegt. Unterseitig angebrachte Führungswalzen verhindern den Bodenkontakt der Schlegel, um den Verschmutzungsgrad des Ernteguts zu minimieren. Der BioChipper ist in Arbeitsbreiten von 3,0 m bis 6,0 m erhältlich, wobei die Maschine ab 4,0 m Arbeitsbreite hydraulisch geklappt wird, um den Straßentransport zu ermöglichen. Im Versuch wurde der BioChipper 600 mit einer Arbeitsbreite von 6,0 m eingesetzt. Somit konnte durch Vor- und Rückfahrt das Maisstroh von einer Fläche von 12 m Breite auf einen Doppelschwad gelegt werden. Der eingesetzte BioChipper 600 hat nach Herstellerangaben ein Gewicht von 4 000 kg und erfordert eine Leistung von 162 KW am Zugfahrzeug. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt je nach Erntebedingungen ca. 5 - 10 km h<sup>-1</sup>, sodass eine Flächenleistung von 2,5 – 4 ha h<sup>-1</sup> erreicht wird (Herstellerangaben). Im Versuch wurde eine Fahrgeschwindigkeit von durchschnittlich 5 - 6 km h<sup>-1</sup> erreicht. Zwischen den Versuchsjahren sind vom Hersteller technische Veränderungen am BioChipper vorgenommen worden. So war für das Versuchsjahr 2015 die Auswurfhöhe des Schlegelmulchers auf das Querförderband erhöht worden, um den Materialfluss zu verbessern. Für das Versuchsjahr 2016 war die Auswurfhöhe nochmals erhöht und gleichzeitig die Bandübergabe vom rechten auf das linke Band verengt worden, um die Ernteverluste durch eine optimierte Querförderung zu vermindern. Weil eine verbesserte Funktionsweise des BioChippers bei höheren Stoppeln vermutet wurde, sind 2016 die für den BioChipper vorgesehenen Parzellen geringfügig höher gedroschen worden.

#### **Schwadhäcksler UP-6400 („SchwH“)**

Ähnlich wie der BioChipper ist auch der Schwadhäcksler UP-6400 (Uidl Biogas GmbH/Agrinz Technologies GmbH, Österreich) ein modifizierter Mulcher mit Schwadvorrichtung (s. Anhang *Abbildung 15*). Die Funktionsweise ist dabei dem BioChipper sehr ähnlich, allerdings sind beim Schwadhäcksler UP-6400 (anstelle von Hammerschlegeln) Messer verbaut, wodurch eine intensivere Zerkleinerung des aufgenommenen Maisstrohs möglich ist (s. Anhang *Abbildung 16*). Die Querförderung des Ernteguts erfolgt durch eine Querförderschnecke. Die einfache Arbeitsbreite beträgt 6,4 m, sodass ein Doppelschwad von 12,8 m Arbeitsbreite erzeugt wird. Die Maschine wird gezogen und verfügt über ein Fahrwerk mit 4 Reifen. In Kombination mit der Heckhydraulik wird die Tiefenführung gesteuert. Im Straßenbetrieb wird die Maschine längs auf zwei Rädern gezogen. Die Umrüstung zum Feldbetrieb erfolgt mithilfe eines

Schnellkupplungssystems. Das Eigengewicht der Maschine liegt laut Herstellerangaben bei 5 500 kg, die optimale Fahrgeschwindigkeit zwischen 5 - 7 km h<sup>-1</sup> und der Leistungsbedarf bei 184 KW - 221 KW. Unter Versuchsbedingungen wurde eine Fahrgeschwindigkeit von durchschnittlich 5 – 6 km h<sup>-1</sup> erreicht. Der Schwadhäcksler UP-6400 stand 2016 nicht zur Verfügung, weshalb für diese Erntetechnik nur zweijährige Ergebnisse vorliegen.

#### **Merge Maxx 900/902 („MergeM“)**

Beim Merge Maxx 900 (2014 im Einsatz) bzw. 902 (2015 und 2016 im Einsatz) (Kuhn S.A., Frankreich) handelt es sich um einen Bandschwader, der das Maisstroh ohne weitere Zerkleinerung über Pick-ups aufnimmt und mithilfe von Leitblechen (bei der im Versuch gewählten Variante) auf die beiden Förderbänder transportiert (s. Anhang *Abbildung 17* und *Abbildung 18*). Die Ablage des Schwades kann seitlich oder mittig erfolgen, weil die gesamte Pick-up aus 3 einzelnen Pick-up Einheiten besteht, deren Förderrichtung jeweils beliebig gesteuert werden kann. Bei mittiger Schwadablage wird die mittlere Pick-up Einheit hochgeklappt und die äußeren Förderbänder drehen sich zur Mitte hin. Jede Pick-up Einheit besitzt zwei Gleitkufen, um den Auflagedruck zu vermindern und eine optimale Boden Anpassung zu erreichen. Bei einer Arbeitsbreite von 9,1 m wurde die mittige Ablage gewählt. Laut Herstellerangaben beträgt das Gewicht des Merge Maxx 7058 kg und die Maschine erfordert eine minimale Traktorleistung von 103 KW. Die Arbeitsgeschwindigkeit des Merge Maxx lag in den Versuchen bei etwa 7 km h<sup>-1</sup>. Laut Herstellerangaben unterscheidet sich das Nachfolgemodell Merge Maxx 902 vom Merge Maxx 900 hauptsächlich durch eine verbesserte Boden Anpassung aufgrund einer veränderten Aufhängung der Pick-ups. Weil eine verbesserte Funktionsweise des Merge Maxx 902 bei kleinen Stoppeln vermutet wurde, sind 2016 die für den Merge Maxx 902 vorgesehenen Parzellen möglichst tief gedroschen worden. Außerdem wurde 2016 gezielt gemäß der Arbeitsrichtung des Mähdreschers (entspricht der Knickrichtung der Stoppeln) geschwadet.

#### **Mais Star\* Collect („MSCollect“)**

Der Mais Star\* Collect (Carl Geringhoff Vertriebsgesellschaft mbH & Co.KG, Deutschland) ist ein modifizierter Pflückvorsatz, mit welchem die Arbeitsschritte Dreschen und Schwaden nicht absetzig sondern in einem Arbeitsgang erfolgen (s. Anhang *Abbildung 19*). Dazu besitzt der Pflücker gekröpfte Häckselmesser, wodurch die Restpflanze stärker zerkleinert und ohne Bodenkontakt in eine unterhalb des Pflückers verbaute

Auffangwanne geworfen wird (s. Anhang *Abbildung 20*). Anschließend wird das Substrat über eine integrierte Förderschnecke in einem Schwad mittig unter dem Pflücker abgelegt, auf welchen auch die Spindeln und Lieschen, die den Mähdrescher passieren, fallen. Der Mais Star\* Collect ist mit gängigen Mähdreschertypen kompatibel und als 8- bzw. 12-reihiger Pflücker, also in Arbeitsbreiten von 6 m und 9 m, erhältlich. Im Versuch wurde ein 8-reihiger Mais Star\* Collect eingesetzt und mit einer Geschwindigkeit von ca. 4,3 - 4,5 km h<sup>-1</sup> gedroschen, die auch bei der Körnermaisernte mit gängigen Pflückern erreicht wird.

Bei den Parzellen, die für die Schwadtechnik Mais Star\* Collect vorgesehenen waren, wurde der Capello/Dominoni-Pflückvorsatz gegen den modifizierten Pflücker von Geringhoff ausgetauscht und der Radialverteiler so reguliert, dass die Breitverteilung der abgeschiedenen Spindel und Lieschen möglichst gering war und diese auf dem Schwad abgelegt wurden. Für eine möglichst schmale Ablage der Spindeln und Lieschen auf dem Schwad, wäre ein vollständiges Abschalten des Radialverteilers notwendig gewesen. Dies konnte aus technischen Gründen nur im Versuchsjahr 2016, nicht aber 2014 und 2015 realisiert werden. Demnach waren die Schwadbreiten 2016 deutlich geringer als 2014 und 2015. Durch die erhöhten Windgeschwindigkeiten während der Ernte 2015 war die Schwadablage unnatürlich breit. Da der Pflückvorsatz Mais Star\* Collect im Gegensatz zum Capello Pflücker nicht mit Lagermaisschnecken ausgestattet war, war die Ernte 2014 durch z. T. lagernde Pflanzen aufgrund von Sturmschäden (vgl. 4.2) erschwert. 2016 war bewusst auf eine möglichst tiefe Arbeitshöhe des Mais Star\* Collect geachtet worden, um die Stoppelmenge möglichst gering zu halten. Die Einstellungen für die Dreschtrummeldrehzahl und Dreschspaltenweite waren beim Mais Star\* Collect jeweils identisch zum Capello/Dominoni Pflückvorsatz.

Tabelle 17: Übersicht und Charakterisierung der eingesetzten Schwadtechniken

Technik	BioChipper	Schwad- häcksler UP-6400	Merge Maxx 900/902	Mais Star* Collect	Direct Disc 500 (nur 2016 geprüft)
Abkürzung	„BioC“	„SchwH“	„MergeM“	„MSCollect“	„DirectD“
Anzahl der Verfahrens- schritte	3-stufig	3-stufig	3-stufig	2-stufig	2-stufig
Kombination der Verfahrens- schritte	1. Dreschen 2. Schwaden 3. Bergen	1. Dreschen 2. Schwaden 3. Bergen	1. Dreschen 2. Schwaden 3. Bergen	1. Dreschen + Schwaden 2. Bergen	1. Dreschen (auf Kolbenhöhe) 2. Ernte aus dem stehenden Bestand
Funktions- weise	Schlegel- mulcher mit Schwad- funktion; Aufnahme über Sogwirkung	Schlegel- mulcher mit Schwad- funktion; Aufnahme über Sogwirkung	Band-schwader; Aufnahme über Pick-ups	modifizierter Pflücker mit Auffangwanne und Querförder- schnecke unter der Pflückerinheit	Direktschneidwerk als Erntevorsatz am selbstfahrenden Feldhäcksler
Arbeitsbreite <sup>1)</sup> (m)	6,0 (12,0 durch Doppel- schwad)	6,4 (12,8 durch Doppel- schwad)	9,1	6,0	5,0
Schwad- ablage	seitlich (Querförder- band)	seitlich (Querförder- schnecke)	mittig (Querförder- band)	mittig unter dem Drescher (Querförder- schnecke)	-
Schwadbreite <sup>1)</sup> (m)	k. A.	k. A.	1,4 – 1,8	k. A.	-
Zerkleinerung des Maisstrohs	ja  (durch Hammer- schlegel der rotierenden Schlegel- welle und Gegenschlag leiste)	ja  (durch Schlegel- messer der rotierenden Schlegel- welle und Gegenschla gleiste)	nein	ja  durch gekröpfte Häcksel- messer (an der Pflückerinheit)	nein  (erst bei der Passage des selbstfahrenden Feldhäckslers)
Einfluss auf die Stoppellänge	ja  (beeinfluss- bar durch die Arbeitshöhe der Schlegelwell e)	ja  (beeinfluss- bar durch die Arbeitshöhe der Schlegelwell e)	nein  (festgelegt durch die Arbeitshöhe des Pflückers beim Dreschen)	ja  (beeinflussbar durch die Arbeitshöhe des Mais Star* Collect beim Dreschen)	ja  (beeinflussbar durch die Arbeitshöhe des Mähwerks)

<sup>1)</sup> gemäß Herstellerangaben; k. A.: Keine Angabe

### **Selbstfahrender Feldhäcksler („SFH“) und Kurzschnittladewagen („KLW“)**

In der Praxis wird Maisstroh, das mit den Schwadtechniken BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400 geschwadet wird, in der Regel mit einem Kurzschnittladewagen geborgen. Die Schwadtechniken Mais Star\* Collect und der Bandschwader Merge Maxx 900/902, bei denen das Maisstroh beim Schwaden nur wenig bzw. gar nicht zerkleinert wird, werden hingegen zumeist mit einem selbstfahrenden Feldhäcksler mit Pick-up-Erntevorsatz aufgenommen. Um die Vorzüglichkeit jedes Ernteverfahrens im Hinblick auf Ernteleistung und -qualität beurteilen zu können, wurde das geschwadete Maisstroh jeder Schwadtechnik sowohl mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler als auch dem Kurzschnittladewagen geborgen und vergleichend bewertet. Als selbstfahrender Feldhäcksler kam in allen Versuchsjahren der Jaguar 960 (Claas KGaA mbH, Deutschland) mit einem Pick-up Erntevorsatz von 3 m Breite zum Einsatz. Die Messertrommel war 2014 und 2016 mit 18 Messern (theoretische Häcksellänge von 8 mm), 2015 mit 36 Messern (theoretische Häcksellänge von 16 mm) ausgestattet. Als Kurzschnittladewagen wurden 2014 zwei baugleiche ZX 400 GL (Maschinenfabrik Bernard KRONE GmbH & Co. KG, Deutschland) eingesetzt. Diese besaßen eine Pick-up Aufnahmebreite von 2,1 m und wurden mit dem vollen Messersatz von 46 Messern (theoretische Häcksellänge von 37 mm) eingesetzt. Im Versuchsjahr 2015 wurde wiederum mit dem Krone ZX 400 GL aus dem Vorjahr und zusätzlich mit einem Cargos 8400 (Claas KGaA mbH, Deutschland) geborgen. Der Claas Cargos 8400 hat eine Pick-up Aufnahmebreite von 2,0 m und es wurde mit dem vollen Messersatz von 40 Messern (theoretische Häcksellänge von 38 mm) gearbeitet. Um im Versuchsjahr 2015 mögliche Unterschiede in der Bergungsleistung der beiden Kurzschnittladewagen-Modelle auszugleichen, wurden beide Kurzschnittladewagen gleichmäßig auf die vier Wiederholungen verteilt. Im Versuchsjahr 2016 wurden für die Bergung ein Claas Cargos 8400 und ein Rapide 6600 (Schuitemaker Machines B.V., Niederlande) verwendet. Letzterer wurde jedoch nur für die „Häckslervarianten“ als Häckseltransportwagen eingesetzt, eine Bergung mit der Pick-up dieses Kurzschnittladewagens erfolgte nicht.

### **Direct Disc 500 („DirectD“) (nur im Versuchsjahr 2016)**

Im Versuchsjahr 2016 wurde als weiteres zweistufiges Ernteverfahren das Direct Disc 500 im Versuch geprüft, nachdem ein Erfahrungsbericht aus der Praxis vorgelegen hatte. Hierbei werden beim Dreschen die Unterflurhäcksler des Pflückers abgeschaltet und die Kolben auf Kolbenhöhe gepflückt. Der verbleibende, teils geknickte und auch überfahrene Bestand, wird anschließend mit einem Direktschneidwerk, das als Erntevorsatz an den

selbstfahrenden Feldhäcksler (Claas Jaguar 960, 18 Messer) montiert ist, aus dem Stand geerntet. Die Arbeitsbreite des Direct Disc 500 beträgt 5,0 m. Der Verfahrensschritt Schwaden entfällt in diesem Fall, sodass keine Bergung mit dem Kurzschnittladewagen erfolgen konnte.

### **Feldliegezeit („FeldL“)**

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 verschiedener Feldliegezeiten, also unterschiedlicher Verweildauern des Maisstrohs nach dem Dreschen auf dem Feld, untersucht. Für die kurze Feldliegezeit erfolgte die Ernte des Maisstrohs innerhalb von 15 - 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 selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. Kurzschnittladewagen vergingen (*Tabelle 18*). Da beim Mais Star\* Collect die Arbeitsschritte Dreschen und Schwaden zeitgleich erfolgen, muss in diesem Fall berücksichtigt werden, dass sich die längere Feldliegezeit nicht auf die Schwadleistung sondern lediglich auf die Bergungsleistung bei der Aufnahme mit selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. dem Kurzschnittladewagen auswirken kann.

In den Versuchsjahren 2015 und 2016 wurde (bei den Parzellen mit der Sorte LG 32.58) konform zur kurzen Feldliegezeit in 2014 ebenfalls eine Strohbergung innerhalb von 15 - 30 h nach dem Maisdrusch angestrebt, sodass die Varianten als „kurze Feldliegezeit“ gewertet werden können (vgl. grau hinterlegte Varianten in *Tabelle 18*).

Tabelle 18: Zeitlicher Überblick über die Verfahrensschritte Dreschen, Schwaden und Bergen des Maisstrohs in den Versuchsjahren 2014 (zwei Feldliegezeiten), 2015 (drei Sorten) und 2016; graue hinterlegte Markierung: Varianten, die über drei Jahre geprüft wurden.

	Tag 1	Tag 2	Tag 3	Tag 4	Tag 5
2014	27.10. Dreschen <b>lange Feldliegezeit</b> (Sorte LG 32.58) <sup>1)</sup>	28.10.	29.10.  Schwaden aller Parzellen <sup>2)</sup>  Dreschen <b>kurze Feldliegezeit</b> (Sorte LG 32.58) <sup>1)</sup>	30.10.  Bergen <b>kurze Feldliegezeit</b> mit SFH/KLW	31.10.  Bergen <b>lange Feldliegezeit</b> mit SFH/KLW
		29.09. Dreschen Sorte <b>SY Talisman/KWS 9361</b> <sup>1)</sup>	30.09.  Schwaden aller Parzellen <sup>2)</sup>  Dreschen Sorte <b>LG 32.58</b> (kurze Feldliegezeit) <sup>1)</sup>	01.10.  Bergen Sorte <b>LG 32.58</b> mit SFH/KLW	02.10.  Bergen Sorte <b>SY Talisman/KWS 9361</b> mit KLW
2016			17.10 Dreschen (Sorte LG 32.58)	Niederschlag <sup>5)</sup> 18.10 Bergen <sup>4)</sup> mit SFH/KLW	

<sup>1)</sup> Einsatz der Schwadtechnik Mais Star\* Collect.

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

<sup>3)</sup> Einsatz der Schwadtechniken BioChipper, Merge Maxx 902 und Direct disc.

<sup>4)</sup> verzögerter Einsatz der Schwadtechnik Mais Star\* Collect aufgrund einer notwendigen Reparatur.

<sup>5)</sup> Niederschlag in der Nacht vom 17. auf den 18.10.2016 sowie am Tag des 18.10.2016

SFH: Selbstfahrender Feldhäcksler; KLW: Kurzschnitlagewagen

## Sortenwahl

Als Standard-Maissorte wurde in allen Jahren die mittelfrühe Sorte LG 32.58 (S 250/K 250) angebaut. Im Versuchsjahr 2015 wurde das Sortenspektrum erweitert und auf der Hälfte der Parzellen – anstelle der längeren Feldliegezeit – die mittelfrühe Sorte SY Talisman (S 220/K 230) mit geringerer Reifezahl und schneller Restpflanzenabreife sowie die mittelspäte Sorte KWS 9361 (S 290/K 280) mit höherer Reifezahl und gleichzeitig einer verzögerten Abreife geprüft. Ziel war es, durch die gezielte Sortenwahl eine Variationsbreite an unterschiedlichen Strohfeuchten und gegebenenfalls auch Strohmenge zu generieren. Mit der Sorte SY Talisman, die auch im Sorten- und Ernteterminversuch geprüft wurde, sollte im Vergleich zur Sorte LG 32.58 ein möglichst trockenes Maisstroh erzielt werden. Der Genotyp KWS 9361 sollte dagegen möglichst

feuchtes Stroh mit hoher Restpflanzenbiomasse liefern. Für alle Parzellen der beiden Sorten SY Talisman und KWS 9361 wurde aus Kapazitätsgründen auf eine Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler verzichtet und die Ernteleistung und -qualität lediglich für die Bergung mit dem Kurzschnittladewagen ermittelt. Aus Zeitgründen konnte die Ernte der beiden zusätzlichen Sorten nicht unter den Bedingungen der „kurzen Feldliegezeit“ erfolgen, weshalb drei Tage zwischen dem Drusch der Parzellen und der Strohbergung lagen (*Tabelle 18*).

Die Varianten „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“ wurden gleichbleibend in allen drei Versuchsjahren geprüft (vgl. grau hinterlegte Varianten in *Tabelle 18*) und konnten für den dreijährigen Vergleich der verschiedenen Ernteverfahren herangezogen werden.

Bis auf einen kurzweiligen Nieselregen am Vormittag des 30. Oktober 2014 (~ 0,7 mm; LfL, 2017a), herrschten in den Versuchsjahren 2014 und 2015 niederschlagsfreie Witterungsverhältnisse während der Dauer der Ernte. Im Versuchsjahr 2016 konnte das Schwaden mit den Schwadtechniken BioChipper und Merge Maxx 902 ebenfalls niederschlagsfrei erfolgen, am 18.10.2016 fielen dann jedoch vor und während der Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler und dem Kurzschnittladewagen ca. 16,8 mm (LfL, 2017a) Niederschlag. Davon war auch der Einsatz des Mais Star\* Collect betroffen, der aufgrund einer notwendigen Reparatur nicht wie geplant am 17.10.2016, sondern erst am 18.10.2016 eingesetzt werden konnte.

#### **4.4.3 Versuchsaufbau und Versuchsdesign**

Während die Parzellenlänge und die Position der Blöcke (Wiederholungen) bereits bei der Aussaat berücksichtigt worden waren, wurden die Anordnung und die Breite der einzelnen Parzellen erst vor dem Drusch auf der Grundlage der Anzahl an Maisreihen festgelegt. Die Parzellenbreite wurde dabei gezielt so gewählt, dass sie möglichst einem Vielfachen der Mährescherbreite (8-reihiger Mährescher, 6 m Druschbreite) als auch zugleich einem Vielfachen der Arbeitsbreite der jeweiligen Schwadtechnik entsprach (*Tabelle 19*). Grund dafür ist, dass der Mährescher beim Körnerdrusch das Maisstroh oftmals ungleichmäßig über die Arbeitsbreite des Mähreschers verteilt (Spindeln und Lieschen fallen hinten aus dem Mährescher und werden deshalb vorzugsweise im Mittelbereich des Mähreschers abgelegt). Zugleich sollte ein praxisnaher Einsatz der Schwadtechniken möglichst in der vorgesehenen Arbeitsbreite der jeweiligen Technik erfolgen. Für die Schwadtechniken BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400 wurden dazu 12 m breite Parzellen gewählt. Beim Mais Star\* Collect betrug die Parzellenbreite 6 m und beim Merge Maxx 900/902 9 m. Für das Direct Disc 500 wurden ebenfalls 12 m

breite Parzellen angelegt, gemäß der technischen Arbeitsbreite des Direct Disc 500 wurde aber nur eine Breite von 5 m geerntet. Für die Ertragserfassung wurde jedoch in jeder Parzelle nur eine Teilfläche von einheitlich 360 m<sup>2</sup> berücksichtigt, sodass abhängig von der Breite der jeweiligen Technik Längen von 30 – 72 m geerntet wurden (*Tabelle 19*).

*Tabelle 19: Übersicht über die Abmessungen der Parzellen und Ernteflächen bei den einzelnen Schwadtechniken*

Technik	Arbeitsbreite der Technik (m)	gewählte Parzellenbreite		Parzellen-Teilfläche für die Ertragserfassung		
		Anzahl Maisreihen	Breite (m)	Breite (m)	Länge (m)	Fläche (m <sup>2</sup> )
BioChipper	12,0 <sup>1)</sup>	16	12	12	30	360
Schwadhäcksler UP-6400	12,8 <sup>1)</sup>	16 (+ 1 <sup>2)</sup> )	12 (+ 0,75 <sup>2)</sup> )	12	30	360
Mais Star* Collect	6,0	8	6	6	60	360
Merge Maxx 900/902	9,1	12	9	9	40	360
Direct Disc 500	5,0	16	12	5	72	360

<sup>1)</sup> Arbeitsbreite bei Doppelschwad

<sup>2)</sup> zusätzliche Begrenzungsreihe (= 0,75 m) innerhalb der Doppelparzelle, um der Arbeitsbreite von 12,8 m beim Schwadhäcksler UP-6400 möglichst gerecht zu werden

Für den Vergleich von selbstfahrendem Feldhäcksler und Kurzschnittladewagen wurden durch Verdoppeln der jeweiligen Parzellenbreite Doppelparzellen je Schwadtechnik angelegt. Alle Doppelparzellen wie auch die Einfachparzellen (= Parzellen der Sorte SY Talisman und KWS 9361 im Versuchsjahr 2015, für die auf eine Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler verzichtet wurde) waren mit einer Zwischenreihe Mais zueinander abgegrenzt (*Abbildung 3*). Diese Begrenzungsreihe verhinderte beim Einsatz der Schwadtechniken das Ausscheren der Maschinen in die Nachbarparzelle und erleichterte eine geradlinige Befahrung der Parzelle. Durch die zusätzliche Begrenzungsreihe war außerdem jede Einfachparzelle um 0,75 m und jede Doppelparzelle um 0,375 m breiter, wodurch minimal abweichenden Arbeitsbreiten (wie beispielsweise beim Merge Maxx 900/902 mit 9,1 m Arbeitsbreite) ausgeglichen werden konnten. Um der Arbeitsbreite von 6,4 m beim Schwadhäcksler UP-6400 möglichst gerecht werden zu können, war bei dieser Schwadtechnik eine zusätzliche Begrenzungsreihe zwischen den Doppelparzellen vorgesehen, wodurch auch die Einfachparzelle um 0,75 m breiter wurde (Parzellenbreite lag somit bei 12,75 m) und ein

unnötiges Überlappen der Schwadtechnik beim Gegenfahren weitestgehend vermieden werden konnte.

Alle Prüfglieder wurden in vierfacher Wiederholung in einer Spaltanlage mit vollständiger Bockbildung geprüft. Die Faktoren Feldliegezeit (2014) bzw. Sorte (2015) wurden als Großteilstücke angelegt und die vier Schwadtechniken zufällig innerhalb der Großteilstücke verteilt. Sofern als dritter Faktor die Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler und dem Kurzschnittladewagen unterschieden wurde, waren Doppelparzellen je Schwadtechnik vorhanden. Das detaillierte Versuchsdesign ist den Tabellen im Anhang zu entnehmen (*Abbildung 21; Abbildung 22 und Abbildung 23*).

#### **4.4.4 Merkmalerfassung und Analysen**

Für die in Kapitel 4.4.2 beschriebenen Varianten wurden nachfolgende Ertrags- und Qualitätsparameter ermittelt. Die Definition der einzelnen Ertragsparameter ist dem Glossar zu entnehmen.

##### **Kornertrag und potenziell erntbarer Maisstrohertrag**

Um den Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs, verlustfrei bestimmen zu können, wurden vor dem Dreschen aus den Doppelparzellen in jeder Wiederholung des Versuches (gemäß der Faktorkombination Schwadtechnik × Feldliegezeit (2014) bzw. Schwadtechnik × Sorte (2015) bzw. Schwadtechnik (2016)) an zwei zufällig ausgewählten Teilstücken der Doppelparzelle je 10 Pflanzen (= 2,3 m<sup>2</sup> je Doppelparzelle) von Hand mit einer Sichel direkt über der Bodenoberfläche geerntet. Mit den geernteten Gesamtpflanzen wurde anschließend wie folgt verfahren: Die Pflanzen wurden in Kolben und Restpflanze getrennt und die Kolben in einem zweiten Schritt mithilfe des Stationärdreschers (LD 350, Wintersteiger AG, Österreich) in Körner und Spindeln separiert. Die Fraktionen Spindeln und Restpflanzen wurden nachfolgend gehäckselt und gemischt, um das potenziell erntbare Maisstroh zu erhalten (potenziell erntbares Maisstroh = Spindel + Restpflanze bzw. Gesamtpflanze - Körner). Durch Wiegen der Massenanteile konnten somit die Parameter Kornertrag und potenziell erntbarer Maisstrohertrag weitestgehend verlustfrei bestimmt werden. Da vor dem Einsatz des Mähdreschers die Bestandesdichten in den Doppelparzellen durch Auszählen der Pflanzenzahl für eine Länge von 6 m ermittelt worden waren, konnte mit Hilfe der TM-

Gehalte (vgl. 4.3.2) anschließend der TM-Ertrag der Körner bzw. des potenziell erntbaren Maisstrohs je ha berechnet werden.

### **Auf Schwad gelegter Maisstrohertrag und Stoppelertrag**

Um die Ernteverluste entlang der gesamten Erntekette beurteilen zu können, wurde nach dem Einsatz der Schwadtechniken in einem ersten Schritt der „auf Schwad gelegte Maisstrohertrag“ der vier Schwadtechniken quantifiziert. Dafür wurde aus jeder Doppelparzelle (2014) bzw. Einfachparzelle (ab 2015) die Strohmenge von einer zufällig gewählten Teilfläche des Schwades (Abmessung der Teilfläche: Schwadbreite  $\times$  1 m; die Teilfläche lag außerhalb der für die Strohbergung vorgesehenen Fläche) von Hand aufgesammelt und verwogen.

Um das ungewollte Aufsammeln von Fremd- und Schmutzanteilen zu vermeiden und somit die Ertragserfassung zu verbessern, wurden ab 2015 vor der Überfahrt mit dem Mährescher in jeder Parzelle drei Kunstrasen-Matten (je 0,72 m  $\times$  1 m) nebeneinander zwischen den Maisreihen ausgelegt, sodass der Boden zwischen den Maisreihen über eine Breite von 2,25 m vollständig – mit Ausnahme der Lücken zwischen den Maispflanzen innerhalb der Maisreihen – bedeckt war. Die Matten wurden dabei in ca. 10 - 15 m Entfernung vom Parzellenrand an der Stelle, an der später von der jeweiligen Technik der Schwad gebildet werden sollte, nebeneinander zwischen 4 Maisreihen positioniert und mit Nägeln im Boden fixiert (vgl. *Abbildung 2*). In gleicher Weise wie bei der Beprobung der Schwadmenge ohne Matten, wurde nach der Überfahrt mit den Schwadtechniken das lose Stroh aufgesammelt und verwogen.

Ab 2015 wurden außerdem von derselben Fläche, auf der die Schwadmenge aufgesammelt worden war, auch die Stoppeln geerntet, indem sie unmittelbar an der Bodenoberfläche abgeschnitten wurden.

Nach dem Verwiegen der Schwadmenge wurde eine Probe für die Häcksellängenbestimmung und nach der Zerkleinerung und Homogenisierung mit einem Gartenhäcksler (Viking GE 355, ANDREAS STIHL AG & Co. KG, Deutschland) eine bzw. ab 2015 zwei Proben für die Ermittlung der TM-Gehalte (vgl. 4.3.2) gezogen. Ebenso wurden die Stoppeln verwogen, gehäckselt und eine Probe zur Bestimmung des TM-Gehaltes abgenommen.

Auf der Grundlage der FM-Gewichte in Kombination mit den ermittelten TM-Gehalten und der Arbeitsbreite der jeweiligen Schwadtechniken konnte der auf Schwad gelegte Stroh-TM-Ertrag und der Stoppelertrag in  $\text{dt ha}^{-1}$  berechnet werden.



Abbildung 2: Ausgelegte Kunstrasen-Matten für das Aufsammeln der auf Schwad gelegten Strohmenge

### Abgefahrener Maisstrohertrag

Zielgröße der Ertragserhebungen war der abgefahrene Maisstrohertrag, also die mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. dem Kurzschnittladewagen tatsächlich geborgenen Erntemengen. Dazu wurde in jeder Parzelle das geschwadete Stroh von einer einheitlichen (mittig positionierten) Teilfläche in der Größe von  $360 \text{ m}^2$  geborgen (*Tabelle 19*). Beginn und Ende der Schwadlänge wurden durch den Abtrag des Schwades (ca. 1 - 2 m Schwad) mit einer Heugabel optisch kenntlich gemacht (vgl. *Abbildung 3*). An diesen Stellen konnte die Pick-up des selbstfahrenden Feldhäckslers bzw. des Kurzschnittladewagens zu Beginn und Ende der Strohbergung zielgenau gesenkt und ausgehoben werden. Die Fahrtrichtung beim Einsatz des selbstfahrenden Feldhäckslers und des Kurzschnittladewagens war dabei vorgegeben, um nach Möglichkeit die Knickrichtung der Stoppeln zu berücksichtigen (nach Möglichkeit Aufnahme in Knickrichtung, um die Belastung für die Pick-up zu minimieren). Anschließend wurde das geborgene Maisstroh der jeweiligen Parzelle aus dem Kurzschnittladewagen (auch für den selbstfahrenden Feldhäcksler wurde der Kurzschnittladewagen als Abfuhrgespann eingesetzt) in vier Behälter ( $1,4 \text{ m}^3$  je Behälter) abgeladen. Diese standen auf einer Silofolie, um mögliche Verluste beim Abladen nachfolgend aufsammeln und somit erfassen zu können. Während des Abladens wurden 20 - 30 Stichproben entnommen und zu einer Mischprobe vereint. Mithilfe einer Bodenwaage (Bodenwaage ELC3, Dini Argeo s.r.l., Italien, Messunsicherheit von maximal 0,008 %), konnte das FM-Gewicht des abgefahrenen Strohertrages mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Die Mischprobe wurde dann in Einzelproben/Stichproben aufgeteilt, wobei drei Einzelproben für die

Bestimmung der TM-/Rohaschegehalte und eine Einzelprobe für die Ermittlung der Häcksellängen bestimmt war. Bei einzelnen Versuchsvarianten wurden weitere zwei Einzelproben für die Analyse der Inhaltsstoffe und der Methanausbeute abgenommen.



*Abbildung 3: Abgemessene Maisstrohschwade für die Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. dem Kurzschnittladewagen (Foto: Josef Schuhbauer)*

### **Abfuhrate, Ernteverluste und Bergungsverluste**

Aus den ermittelten Erträgen konnten anschließend weitere Kennzahlen berechnet werden. So wurde aus dem Verhältnis des abgefahrenen Strohertrages zum potenziell erntbaren Maisstrohertrag Abfuhrate in Prozent berechnet. Die Ernteverluste ergaben sich aus der Differenz des potenziell erntbaren Maisstrohertrags und des abgefahrenen Strohertrags, die Bergungsverluste aus der Differenz des auf Schwad gelegten Strohertrages und des abgefahrenen Strohertrages (s. Glossar).

### **Maschinenspezifische Kennzahlen**

Um die eingesetzten Schwadtechniken anhand der wichtigsten technischen Kennzahlen zu charakterisieren und gegebenenfalls Hintergrundinformationen für die ermittelten Stroherträge (geschwadet und abgefahren) zu erhalten, wurden nach dem Einsatz der Schwadtechniken die tatsächlich erreichten Arbeitsbreiten (effektive Arbeitsbreite), die Breite und Höhe der gebildeten Schwade und die Länge der nach dem Schwaden verbleibenden Stoppeln erfasst. Dazu wurden an fünf zufällig gewählten Positionen der Doppelparzellen die Schwadbreite und -höhe sowie der Abstand zweier Schwade gemessen. Für die Erhebung der Stoppellängen wurde an drei zufällig gewählten Stellen, bei fünf Stoppeln in Folge, die Länge gemessen.

### **TM-Gehalt und Rohaschegehalt des abgefahrenen Maisstrohs**

Für alle Prüfglieder des Erntetechnikversuches wurden die TM-Gehalte und Rohaschegehalte des abgefahrenen Maisstrohs anhand von drei Stichproben bei gleicher Vorgehensweise wie beim Sorten- und Ernteterminversuch (vgl. Kapitel 4.3.2 bzw. *Tabelle 14*) untersucht. Da jede Stichprobe jeweils für die Ermittlung der TM-Gehalte und zugleich für die Untersuchung des Rohaschegehaltes (vgl. *Tabelle 14*) genutzt wurde, wurden als Probengefäße Aluschalen verwendet, um mögliche Bröckelverlusten beim Trocknen und damit eine fehlerhafte Bestimmung des Rohaschegehaltes zu verhindern. Für jede Stichprobe erfolgte eine Doppelbestimmung des Rohaschegehaltes im Labor. Die drei Stichproben wurden gemittelt, wobei extreme Ausreißer (bei einem Variationskoeffizienten über 15%) ausgeklammert wurden.

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

### **Häcksellängenbestimmung beim Maisstroh**

Als Kenngröße für die Strohzerkleinerung in Abhängigkeit des Ernteverfahrens wurden Siebanalysen mithilfe einer Trommelsiebmaschine (Eigenbau des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung in Freising in Zusammenarbeit mit dem Technologie- und Förderzentrum für Nachwachsende Rohstoffe in Straubing, vgl. Anhang *Abbildung 24*) durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen Rotationsklassifizierer, der mit fünf aufeinanderfolgenden zylindrischen Rundloch-Siebringen von jeweils 40 cm Länge und einem Durchmesser von 50 cm, ausgestattet ist. Die Maschine erlaubt eine Klassifizierung in folgende sechs Größenfraktionen:

- $x < 3,15 \text{ mm}$
- $3,15 \text{ mm} < x < 8 \text{ mm}$
- $8 \text{ mm} < x < 16 \text{ mm}$
- $16 \text{ mm} < x < 45 \text{ mm}$
- $45 \text{ mm} < x < 63 \text{ mm}$
- $63 \text{ mm} < x$

Dabei handelt es sich um eine anerkannte Methode für die Bestimmung der Größenverteilung von Holzhackschnitzeln (BÖHM & HARTMANN, 2002). In Vorab-Untersuchungen mit zahlreichen Mehrfachbestimmungen einzelner Proben war die Methodik aufgrund von geringen Variationskoeffizienten (< 5 % bei den Größenfraktionen bis 45 mm) als zuverlässig und wiederholbar eingestuft worden. Bei den Größenfraktionen über 45 mm haben sich jedoch zumeist aufgrund der sehr geringen Gewichtsanteile z. T. sehr hohe Variationskoeffizienten ergeben.

Die Bestimmung der Häcksellängenfraktionen wurde für alle acht Ernteverfahren (Faktorkombinationen „Schwadtechnik x Bergungsart“), jedoch nur für die Varianten „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“ (vgl. grau hinterlegte Varianten in *Tabelle 18*) durchgeführt. Das Probenmaterial wurde vor der Siebung getrocknet, die Menge je Probenvariante lag bei rund 600 g TM. Nach der Siebung erfolgte eine Bestimmung der Massenanteile für die einzelnen Fraktionen.

### **Inhaltsstoffe, Methanausbeute und Methanhektarertrag des abgefahrenen Maisstrohs**

Vergleichbar zu den Sorten- und Ernteterminversuchen wurden auch für das abgefahrene Maisstroh in den Erntetechnikversuchen die stoffliche Zusammensetzung und die Methanausbeuten ermittelt, um den Methanhektarertrag unter praxisnahen Bedingungen zu erfassen. Allerdings wurden nicht alle Prüfglieder untersucht, sondern lediglich ein reduzierter Probenumfang.

So wurden in jedem Versuchsjahr für jeweils zwei Feldwiederholungen des abgefahrenen Maisstrohs von jeder Schwadtechnik-Variante repräsentative Proben gezogen und je eine Probe für die für die nasschemische Analyse der Inhaltsstoffe (nach Weender/Van Soest) und für die Ermittlung der Methanausbeute im Batchversuch verwendet, wobei die Vorgehensweise der Probenaufbereitung und Analyse identisch zum Sorten- und Ernteterminversuch war (Kapitel 4.3.2).

Für die Berechnung des Methanhektarertrages, wurde entgegen der Vorgehensweise im Sorten- und Ernteterminversuch (Kapitel 4.3.2) nicht der potenziell erntbare Maisstrohertrag, sondern der abgefahrene Maisstrohertrag zugrunde gelegt, um das technologische Potenzial nach der Strohbergung beziffern zu können.

Methanhektarertrag ( $\text{m}^3 \text{CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ )

= Spezifische Methanausbeute ( $\text{l (kg oTM)}^{-1}$ ) \* oTM-Ertrag des abgefahrenen Maisstrohs ( $\text{dt ha}^{-1}$ ) \* 100/1000

= Spezifische Methanausbeute ( $\text{l (kg oTM)}^{-1}$ ) \* abgefahrener Maisstrohertrag ( $\text{dt ha}^{-1}$ ) \* (100 %- XA) 100/1000

## 4.5 Statistische Auswertung

Der Sorten- und Ernteterminversuch war als zweifaktorielle vollständige Blockanlage angelegt. Die Faktoren Sorte und Erntetermin als auch die Interaktion beider Faktoren wurden mithilfe einer Varianzanalyse auf Signifikanz getestet. Der Faktor Jahr wurde als fixer Effekt im Modell berücksichtigt.

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen den Ertragsparametern bzw. einzelnen Inhaltsstoffen und der Methanausbeute oder dem Methanhektarertrag zu prüfen, wurde für alle Parameter anhand einer Korrelationsanalyse die Rangkorrelation nach Spearman berechnet und bei Vorliegen eines engen linearen Zusammenhangs eine Regressionsanalyse durchgeführt, um den Zusammenhang mithilfe einer Schätzfunktion darzustellen.

Der Erntetechnikversuch war über drei Versuchsjahre als zweifaktorielle Spaltanlage angelegt. Für die dreijährige Auswertung wurden lediglich jene Varianten berücksichtigt, die über drei Jahre durchgängig und gleichbleibend geprüft worden waren (BioC/MergeM/MSCollect  $\times$  SFH/KLW unter den Bedingungen „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“, vgl. *Tabelle 18*). Der Faktor Schwadtechnik war dabei als Großteilstück angeordnet und der Faktor Bergungsart zufällig innerhalb des Großteilstückes verteilt. Die im Versuchsjahr 2014 und 2015 zusätzlich geprüften Faktoren Feldliegezeit und Sorte waren ebenfalls als Großteilstücke angeordnet, sodass für die einjährigen Auswertungen eine dreifaktorielle dreistufige Spaltanlage verwendet wurde (vgl. *Tabelle 16*; *Abbildung 21*, *Abbildung 22* und *Abbildung 23*). Alle Faktoren wurden mit einer zwei- bzw. dreifaktoriellen Varianzanalyse geprüft und die Haupteffekte als auch die Interaktionen auf signifikante Unterschiede getestet. Der Faktor Jahr wurde im dreijährigen Modell als fixer Effekt berücksichtigt.

Beim Vergleich der Faktorstufen wurde in beiden Versuchen der Student-Newman-Keuls-Test (SNK) als multipler Mittelwertvergleich auf einem Signifikanzniveau von 95 % durchgeführt. Für fehlende Werte (z. B. für den Genotyp SM E0115 im Versuchsjahr 2014 im Sorten- und Ernteterminversuch) wurden jeweils durch Adjustierung Schätzwerte auf der Grundlage eines statistischen Modells ermittelt. Anhand von Residuenplots bzw. dem Shapiro-Wilk-Test wurde die Normalverteilung und Varianzhomogenität der Residuen überprüft. Die Daten wurden mit dem Statistikprogramm SAS 9.3 und der SAS Prozedur MIXED (SAS Institute Inc., USA) analysiert.

## 5 Ergebnisse

Um die Höhe und Qualität des potenziell erntbaren Maisstrohs (Gesamtpflanze ohne Körner, Definitionen s. Glossar) bestimmen und pflanzenbauliche Einflüsse des Erntetermins und der Sorte ermitteln zu können, wurden in den Jahren 2014 bis 2016 Feldversuche mit fünf Sorten und drei zeitlich gestaffelten Ernteterminen in etwa ein- bis zweiwöchigen Abständen durchgeführt („Sorten- und Ernteterminversuche“). Für alle Versuchsvarianten wurden die Ertragsparameter von Korn, (potenziell erntbarem) Maisstroh und der Gesamtpflanze erhoben und die Kennzahlen Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis abgeleitet. Zudem wurden für das (potenziell erntbare) Maisstroh die stoffliche Zusammensetzung, die Methanausbeuten und Methanhektarerträge (im stehenden Bestand) ermittelt und mögliche Zusammenhänge zwischen Ertrags- bzw. Qualitätsparametern und dem Methanhektarertrag geprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im ersten Teil des folgenden Abschnittes (Kapitel 5.1) dargestellt. Vorangestellt sind die Erträge und Qualitäten der angebauten Sorten, geerntet als Gesamtpflanze zum Zeitpunkt der Siloreife (Silomais), um einen grundsätzlichen Vergleich von Silomais und Maisstroh ziehen zu können.

Welche Stroherträge auf Schwad gelegt und abgefahren werden können, wurde parallel zu den Sorten- und Ernteterminversuchen in den Jahren 2014 bis 2016 in separaten Feldversuchen im Praxismaßstab untersucht, um ausgehend vom pflanzenbaulich vorhandenen Potenzial das technologische Potenzial von Maisstroh, das sich aufgrund von verfahrenstechnischen Einflüssen bei der Ernte von Maisstroh unter Praxisbedingungen ergibt, quantifizieren zu können. Dabei wurden verschiedene Schwadtechniken, Bergungsarten und unterschiedliche Erntebedingungen geprüft. Neben dem Strohertrag wurden als weitere Zielgrößen auch der TM-Gehalt, der Rohaschegehalt sowie der Zerkleinerungsgrad des geernteten Maisstrohs als Qualitätsparameter nach der Bergung ermittelt. Die Ergebnisse dieser „Erntetechnikversuche“ sind im zweiten Teil (Kapitel 5.2) des folgenden Abschnittes beschrieben.

Im dritten Teil dieses Abschnittes (Kapitel 5.3) sind die Erträge, Inhaltsstoffe und Methanausbeuten von Maisstroh aus den beiden Versuchen (Sorten- und Ernteterminversuche, Erntetechnikversuche) gegenübergestellt, um für die untersuchten Ertrags- und Qualitätsparameter das (im stehenden Bestand) pflanzenbaulich vorhandene und das bei der Ernte unter praxisnahen Bedingungen technologisch realisierbare Potenzial vergleichen zu können.

Bei allen dargestellten Erträgen handelt es sich um TM-Erträge. Der Begriff Maisstroh umfasst im Folgenden die gesamte oberirdische Biomasse der Maispflanze abzüglich der

Körner (Gesamtpflanze ohne Körner) zum Zeitpunkt der Kornreife (Definitionen s. Glossar). Sind die Stoppeln aufgrund der methodischen Vorgehensweise nicht im potenziell erntbaren Maisstrohertrag enthalten, ist dies an den betreffenden Stellen durch eine Fußnote kenntlich gemacht.

## 5.1 Sorten- und Ernteterminversuche

### 5.1.1 Ertrag und Qualität der Gesamtpflanze zur Siloreife (Silomais)

Im Versuchsmittel betrug der TM-Ertrag der Gesamtpflanze zur Siloreife 202,1 dt ha<sup>-1</sup>, wobei die Sorten Grosso, SY Kardona, SY Talisman und Danubio auf einem vergleichbaren Niveau lagen, während der Ertrag des Genotyps SM E0115 signifikant geringer war (*Tabelle 20*). Wesentlich größer als die Sortenunterschiede waren die Jahreseffekte in Bezug auf die erzielten Erträge, die sich jeweils signifikant voneinander abhoben. Im Trockenjahr 2015 wurden die geringsten Silomaiserträge von nur 156,2 dt ha<sup>-1</sup> erreicht, während 2016 die Erträge im Mittel um rund 80 dt ha<sup>-1</sup> größer waren. Auch hinsichtlich der TM-Gehalte unterschieden sich die untersuchten Sorten und Jahre z.T. signifikant. Dabei war die Sorte Grosso durch signifikant geringere TM-Gehalte im Vergleich zu allen anderen Sorten, mit Ausnahme der Sorte Danubio, gekennzeichnet.

Die in Batchversuchen erzielten Methanausbeuten der Silomais-Proben betrugen 2014 für die angebauten Sorten (Einzelproben ohne Wiederholungen) und den Referenz-Silomais, der standardmäßig bei allen Batch-Ansätzen mituntersucht wird, im Mittel 358 l CH<sub>4</sub> (kg oTM)<sup>-1</sup>. Im Jahr 2015 wurden mit dem Referenzsubstrat ebenfalls 358 l CH<sub>4</sub> (kg oTM)<sup>-1</sup> erzielt, 2016 fast 30 l mehr, wobei für beide Jahre nur wenige Einzelproben vorlagen und es sich nicht um Proben aus dem Sorten- und Ernteterminversuch handelte, was beim Vergleich der Methanertragsfähigkeit von Silomais und Maisstroh entsprechend zu berücksichtigen ist. Gemittelt über alle Batchansätze, die in den Jahren 2014 - 2016 im Labor der LfL durchgeführt worden sind, erreichte der Referenz-Silomais eine durchschnittliche Methanausbeute von 361 l CH<sub>4</sub> (kg oTM)<sup>-1</sup> (± 12 l (kg oTM)<sup>-1</sup>)

*Tabelle 20: Ertragsparameter und Methanausbeuten von Silomais (Gesamtpflanze zur Siloreife) in Abhängigkeit von der Sorte und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Spalte zwischen den Sorten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )*

	<b>TM-Ertrag<sup>1)</sup></b> (dt ha <sup>-1</sup> )	<b>TM-Gehalt</b> (%)	<b>Methanausbeute</b> (l CH <sub>4</sub> (kg oTM) <sup>-1</sup> )
<b>Sorte:</b>	n = 9	n = 9	
Grosso	211,7 $\pm$ 27,5 a	32,0 $\pm$ 1,4 b	--
SY Kardona	204,0 $\pm$ 46,3 a	35,1 $\pm$ 3,8 a	--
SY Talisman	202,8 $\pm$ 34,5 a	35,4 $\pm$ 4,6 a	--
Danubio	211,9 $\pm$ 39,8 a	33,3 $\pm$ 4,7 ab	--
SM E0115	180,3 $\pm$ 40,3 b	35,0 $\pm$ 3,1 a	--
p-Wert (Sorte)	0,0002	0,0114	
<b>Jahr:</b>	n = 15	n = 15	
2014	213,9 $\pm$ 16,9 B	30,1 $\pm$ 1,5 B	358 <sup>2)</sup> $\pm$ 15 (n = 5)
2015	156,2 $\pm$ 20,0 C	36,6 $\pm$ 2,9 A	358 <sup>3)</sup> $\pm$ 3 (n = 3)
2016	236,3 $\pm$ 15,5 A	35,8 $\pm$ 2,6 A	387 <sup>3)</sup> $\pm$ 26 (n = 2)
p-Wert (Jahr)	< 0,0001	< 0,0001	
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>202,1 <math>\pm</math> 38,2</b>	<b>34,2 <math>\pm</math> 3,8</b>	<b>364 <math>\pm</math> 18</b>

n = Anzahl an Beobachtungen

<sup>1)</sup> Schnitthöhe: 20-25 cm über der Bodenoberfläche

<sup>2)</sup> Einzelproben ohne Feldwiederholungen der Silomais-Referenz und der Sorten Grosso, SY Kardona, SY Talisman und Danubio als Silomais zur Siloreife

<sup>3)</sup> Einzelproben der Silomais-Referenz

Qualitätsunterschiede zur Siloreife, gemessen an den gängigen Parametern der Futtermittelanalytik (*Tabelle 21*), wurden durch die angebauten Sorten nur bedingt erreicht. Signifikante Unterschiede ergaben sich nur für die Inhaltsstoffe Rohprotein, Rohfett, Zucker und Hemicellulose und führten mehrheitlich lediglich zu einer Differenzierung zwischen dem Genotyp SM E0115 und den anderen vier Sorten, beispielsweise durch die höchsten Rohprotein- und Rohfett-Gehalte beim Genotyp SM E0115, aber einen signifikant geringeren Gehalt an Hemicellulose.

Für die Mehrzahl der Inhaltsstoffe waren die Unterschiede durch die Jahres- und Standortbedingungen größer als die Sortenunterschiede und es wurden für alle Parameter hochsignifikante Jahreseffekte ( $p < 0,001$ ) ermittelt.

Tabelle 21: Inhaltsstoffe (NIRS-Analysen) von Silomais (Gesamtpflanze zur Siloreife) in Abhängigkeit von der Sorte und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Spalte zwischen den Sorten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	XP (% TM)	XL (% TM)	XF (% TM)	ST (% TM)	XZ (% TM)	HCEL (% TM)	CEL (% TM)	ADL (% TM)
<b>Sorte:</b>	n = 9	n = 9	n = 9	n = 9	n = 9	n = 9	n = 9	n = 9
Grosso	6,5 $\pm$ 0,5 ab	2,4 $\pm$ 0,3 b	17,7 $\pm$ 3,5 a	34,4 $\pm$ 6,2 a	5,9 $\pm$ 1,7 b	18,6 $\pm$ 2,4 a	21,1 $\pm$ 4,0 a	1,8 $\pm$ 0,4 a
SY Kardona	6,2 $\pm$ 0,4 b	2,3 $\pm$ 0,3 b	17,7 $\pm$ 2,5 a	35,0 $\pm$ 3,7 a	6,2 $\pm$ 2,1 b	18,9 $\pm$ 1,8 a	20,9 $\pm$ 2,7 a	1,7 $\pm$ 0,3 a
SY Talisman	6,5 $\pm$ 0,6 ab	2,4 $\pm$ 0,3 b	17,2 $\pm$ 2,1 a	36,4 $\pm$ 3,3 a	5,3 $\pm$ 1,6 b	18,8 $\pm$ 1,4 a	20,2 $\pm$ 2,2 a	1,6 $\pm$ 0,2 a
Danubio	6,4 $\pm$ 0,7 ab	2,3 $\pm$ 0,1 b	17,7 $\pm$ 1,7 a	33,2 $\pm$ 4,8 a	8,1 $\pm$ 1,6 a	18,8 $\pm$ 1,1 a	20,7 $\pm$ 1,9 a	1,7 $\pm$ 0,3 a
SME0115	6,7 $\pm$ 0,6 a	2,8 $\pm$ 0,3 a	16,6 $\pm$ 2,1 a	34,5 $\pm$ 3,7 a	6,9 $\pm$ 1,2 ab	17,4 $\pm$ 1,3 b	20,4 $\pm$ 2,7 a	1,6 $\pm$ 0,2 a
p-Wert (Sorte)	0,0229	< 0,0001	> 0,1	> 0,1	0,0009	0,0006	> 0,1	> 0,1
<b>Jahr:</b>	n = 15	n = 15	n = 15	n = 15	n = 15	n = 15	n = 15	n = 15
2014	7,1 $\pm$ 0,3 A	2,5 $\pm$ 0,3 A	16,5 $\pm$ 1,6 B	35,4 $\pm$ 3,2 B	6,1 $\pm$ 0,7 B	17,9 $\pm$ 0,9 B	19,2 $\pm$ 1,5 B	1,7 $\pm$ 0,2 B
2015	6,0 $\pm$ 0,1 C	2,3 $\pm$ 0,2 B	20,0 $\pm$ 1,6 A	30,3 $\pm$ 3,6 C	5,4 $\pm$ 2,4 B	20,4 $\pm$ 1,1 A	23,8 $\pm$ 1,7 A	1,9 $\pm$ 0,3 A
2016	6,3 $\pm$ 0,4 B	2,6 $\pm$ 0,4 A	15,6 $\pm$ 0,9 B	38,4 $\pm$ 1,3 A	7,9 $\pm$ 0,8 A	17,2 $\pm$ 0,8 C	19,0 $\pm$ 0,9 B	1,4 $\pm$ 0,2 C
p-Wert (Jahr)	< 0,0001	0,0005	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>6,5 <math>\pm</math> 0,6</b>	<b>2,4 <math>\pm</math> 0,3</b>	<b>17,4 <math>\pm</math> 2,4</b>	<b>34,7 <math>\pm</math> 4,4</b>	<b>6,5 <math>\pm</math> 1,9</b>	<b>18,5 <math>\pm</math> 1,7</b>	<b>20,7 <math>\pm</math> 2,7</b>	<b>1,7 <math>\pm</math> 0,3</b>

n = Anzahl an Beobachtungen; XP: Rohprotein; XL: Rohfett; XF: Rohfaser; ST: Stärke; XZ: Stärke; HCEL: Hemicellulose; CEL: Cellulose; ADL: Lignin

### 5.1.2 Ertragsparameter von Korn, Maisstroh und Gesamtpflanze zur Kornreife in Abhängigkeit von der Sorte und dem Erntetermin

Während beim Anbau von Körnermais lediglich der Kornertrag und der TM-Gehalt der Körner beim Dreschen relevant sind, spielen bei einer Doppelnutzung von Körnermais auch die Ertragsparameter des Maisstrohs eine entscheidende Rolle. Die Biomasse des potenziell erntbaren Maisstrohs sollte dabei möglichst hoch sein. Diese war unter den vorliegenden Versuchsbedingungen im Versuchsmittel mit einem TM-Ertrag von  $113,0 \text{ dt ha}^{-1}$  um rund  $10 \text{ dt ha}^{-1}$  geringer als der mittlere Kornertrag mit  $123,5 \text{ dt ha}^{-1}$  (*Tabelle 22*). Die Beobachtung, dass der TM-Ertrag des (potenziell erntbaren) Maisstrohs dem Kornertrag unterlegen ist, galt ausnahmslos für alle untersuchten Sorten und Erntetermine, allerdings nicht für das Versuchsjahr 2015, das aufgrund von Trockenstress durch sehr geringe Erträge gekennzeichnet war.

Das Verhältnis von Kornertrag und potenziell erntbarem Maisstrohertrag spiegelt sich im Harvestindex und dem Korn-Stroh-Verhältnis wider, die im Mittel bei 0,52 bzw. 1:0,93 lagen.

Der Anbau der fünf verschiedenen Sorten (*Tabelle 11*) wie auch die Ernte zu drei zeitlich versetzten Ernteterminen (*Tabelle 13*) führte zu einer signifikanten Differenzierung dieser Indizes. Beim späten Erntetermin war das Korn-Stroh-Verhältnis signifikant geringer als bei den ersten beiden Ernteterminen, was auf einen signifikanten Ertragsrückgang des potenziell erntbaren Maisstrohs zurückzuführen ist. Hinsichtlich der Sorten wurde das geringste Korn-Strohverhältnis bzw. der höchste Harvestindex von der Sorte SY Talisman mit 1:0,85 bzw. 0,54 erreicht. Signifikant höher war das Korn-Stroh-Verhältnis des Genotyps SM E0115, das wiederum von signifikant höheren Korn-Stroh-Verhältnissen der übrigen drei Sorten übertroffen wurde. Die Variation der beiden Indizes in Abhängigkeit von der Sortenwahl wurde dabei primär durch die Differenzierung des potenziell erntbaren Maisstrohs verursacht, die mit Ertragsunterschieden von bis zu  $16 \text{ dt ha}^{-1}$  größer war als beim Kornertrag (maximale Unterschiede von  $10 \text{ dt ha}^{-1}$ ). Eine signifikante Wechselwirkung zwischen der Sorte und dem Erntetermin ( $p = 0,0467$ ) wurde nur für den Kornertrag ermittelt.

Im Vergleich zu den Effekten der Sortenwahl und der Wahl des Erntetermins auf die Erträge von Korn und Maisstroh war jedoch die Variation durch das Versuchsjahr weitaus größer und es wurden in allen drei Versuchsjahren signifikant unterschiedliche Erträge (sowohl beim Kornertrag als auch beim potenziell erntbaren Maisstroh) ermittelt, wobei die jahresbedingten Unterschiede bei den Kornerträgen mit mehr als  $55 \text{ dt ha}^{-1}$  größer waren als beim potenziell erntbaren Maisstroh mit maximal  $35 \text{ dt ha}^{-1}$ . Trotz signifikanter Unterschiede im Kornertrag und dem potenziell erntbaren Maisstroh in den

Versuchsjahren 2014 und 2016, waren der Harvestindex und das Korn-Stroh-Verhältnis in beiden Versuchsjahren vergleichbar. Im Versuchsjahr 2015 hingegen wurde unter dem Einfluss von Trockenstress ein signifikant geringerer Harvestindex ( $< 0,50$ ) bzw. ein signifikant höheres Korn-Stroh-Verhältnis ( $>1$ ) als 2014 und 2016 ermittelt.

Der TM-Ertrag der Gesamtpflanze zur Kornreife betrug im Mittel  $230,4 \text{ dt ha}^{-1}$  und war somit um fast  $30 \text{ dt ha}^{-1}$  größer als der Ertrag der Gesamtpflanze zur Siloreife (Silomais) (Tabelle 20), sodass vom Zeitpunkt der Siloreife zur Kornreife ein Biomassezuwachs stattgefunden hat. Im Verlauf der drei Erntetermine kam es jedoch zu einem tendenziellen bzw. vom mittleren zum späten Erntetermin sogar zu einem signifikanten Ertragsrückgang, in gleicher Höhe (rund  $12 \text{ dt ha}^{-1}$ ), wie er auch beim potenziell erntbaren Maisstroh beobachtet wurde. Die Erträge der Gesamtpflanze wurden an separaten Versuchsreihen ermittelt und stimmen deshalb aufgrund der Variation innerhalb des Versuchsfeldes nicht mit der rechnerischen Summe von Kornertrag und potenziell erntbarem Maisstroh überein. Die Sortendifferenzierung der TM-Erträge der Gesamtpflanze zur Kornreife war deckungsgleich mit der Sortendifferenzierung zur Siloreife, sodass sich lediglich der Genotyp SM E0115 durch signifikant geringere Gesamtpflanzenerträge von den anderen Sorten, die auf einem ähnlichen Ertragsniveau lagen, unterschied.

Tabelle 22: Ertragsparameter von Korn, Maisstroh und Gesamtpflanze in Abhängigkeit von der Sorte, dem Erntetermin und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Sorten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Ernteterminen; unterschiedliche griechische Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Korn		(potenziell erntbares) Maisstroh <sup>1)</sup>		Gesamtpflanze <sup>2)</sup>		Harvestindex <sup>3)</sup>		Korn-Stroh-Verhältnis <sup>4)</sup>	
	TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	TM-Gehalt (%)	TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	TM-Gehalt (%)	TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	TM-Gehalt (%)	TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	TM-Gehalt (%)		
<b>Sorte:</b>	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27	1:x	n = 27
Grosso	125,9 $\pm$ 23,6	a 67,3 $\pm$ 4,1	b 116,7 $\pm$ 17,2	a 32,6 $\pm$ 3,6	c 235,5 $\pm$ 42,5	a 43,5 $\pm$ 3,7	b 0,52 $\pm$ 0,04	c 0,95 $\pm$ 0,15	a	
SY Kardona	123,3 $\pm$ 27,2	ab 68,3 $\pm$ 4,1	b 118,2 $\pm$ 18,1	a 35,3 $\pm$ 5,7	b 235,8 $\pm$ 45,0	a 45,5 $\pm$ 5,0	b 0,51 $\pm$ 0,03	c 0,98 $\pm$ 0,15	a	
SY Talisman	128,0 $\pm$ 28,5	a 70,6 $\pm$ 6,2	a 108,1 $\pm$ 23,2	b 39,1 $\pm$ 9,8	a 228,5 $\pm$ 49,9	a 50,3 $\pm$ 9,2	a 0,54 $\pm$ 0,03	a 0,85 $\pm$ 0,09	c	
Danubio	122,3 $\pm$ 22,0	ab 68,4 $\pm$ 4,1	b 119,0 $\pm$ 19,0	a 33,7 $\pm$ 4,8	bc 236,5 $\pm$ 38,7	a 44,0 $\pm$ 4,5	b 0,51 $\pm$ 0,03	c 0,98 $\pm$ 0,10	a	
SM E0115	118,3 $\pm$ 27,1	b 67,3 $\pm$ 4,4	b 103,1 $\pm$ 15,6	b 31,6 $\pm$ 4,6	c 215,5 $\pm$ 47,9	b 42,9 $\pm$ 4,6	b 0,53 $\pm$ 0,03	b 0,90 $\pm$ 0,12	b	
p-Wert (Sorte)	0,0117	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0004	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	
<b>Erntetermin:</b>	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	
früh	123,1 $\pm$ 25,1	A 65,7 $\pm$ 3,2	c 118,3 $\pm$ 17,6	A 30,9 $\pm$ 5,1	B 237,9 $\pm$ 46,5	A 42,3 $\pm$ 5,6	B 0,51 $\pm$ 0,03	B 0,98 $\pm$ 0,13	A	
mittel	124,5 $\pm$ 25,7	A 69,0 $\pm$ 4,7	b 116,3 $\pm$ 18,4	A 35,6 $\pm$ 7,9	A 232,8 $\pm$ 41,6	A 46,0 $\pm$ 7,0	A 0,51 $\pm$ 0,03	B 0,95 $\pm$ 0,13	A	
spät	123,0 $\pm$ 26,6	A 70,4 $\pm$ 4,9	a 104,5 $\pm$ 20,2	B 36,5 $\pm$ 4,7	A 220,4 $\pm$ 46,0	B 47,5 $\pm$ 4,9	A 0,54 $\pm$ 0,03	A 0,86 $\pm$ 0,11	B	
p-Wert (Erntetermin)	> 0,1	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	
p-Wert (Sorte x Erntetermin)	0,0467	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	
<b>Jahr:</b>	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	
2014	130,9 $\pm$ 9,2	$\beta$ 63,2 $\pm$ 1,5	$\gamma$ 112,1 $\pm$ 10,7	$\beta$ 29,5 $\pm$ 4,3	$\gamma$ 227,9 $\pm$ 21,9	$\beta$ 39,9 $\pm$ 3,4	$\gamma$ 0,54 $\pm$ 0,02	$\alpha$ 0,86 $\pm$ 0,08	$\beta$	
2015	92,3 $\pm$ 15,2	$\gamma$ 72,2 $\pm$ 4,0	$\alpha$ 96,2 $\pm$ 17,1	$\gamma$ 39,8 $\pm$ 7,1	$\alpha$ 183,8 $\pm$ 27,5	$\gamma$ 48,9 $\pm$ 7,1	$\alpha$ 0,49 $\pm$ 0,03	$\beta$ 1,05 $\pm$ 0,14	$\alpha$	
2016	147,4 $\pm$ 6,8	$\alpha$ 69,8 $\pm$ 2,4	$\beta$ 130,8 $\pm$ 12,3	$\alpha$ 34,1 $\pm$ 2,8	$\beta$ 279,4 $\pm$ 15,6	$\alpha$ 47,0 $\pm$ 3,5	$\beta$ 0,53 $\pm$ 0,02	$\alpha$ 0,89 $\pm$ 0,08	$\beta$	
p-Wert (Jahr)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>123,5 <math>\pm</math> 25,6</b>	<b>68,4 <math>\pm</math> 4,7</b>	<b>113,0 <math>\pm</math> 19,6</b>	<b>34,5 <math>\pm</math> 6,6</b>	<b>230,4 <math>\pm</math> 45,0</b>	<b>45,3 <math>\pm</math> 6,3</b>	<b>0,52 <math>\pm</math> 0,03</b>	<b>0,93 <math>\pm</math> 0,13</b>		

n = Anzahl an Beobachtungen; <sup>1)</sup> Stoppeln sind nicht enthalten (Schnitthöhe: 20-25 cm über der Bodenoberfläche); <sup>2)</sup> Erhebung an separaten Pflanzenreihen, Stoppeln sind nicht enthalten (Schnitthöhe: 20-25 cm über der Bodenoberfläche); <sup>3)</sup> Korntrag/(Korntrag + potenziell erntbarer Maisstrohtrag); <sup>4)</sup> 1:x: x = potenziell erntbarer Maisstrohtrag/(Korntrag)

Bei den TM-Erträgen des potenziell erntbaren Maisstrohs (und auch der Gesamtpflanze) ist zu berücksichtigen, dass die Biomasse der Stoppeln nicht enthalten ist, weil mit dem Parzellenhäcksler eine Mindestschnitthöhe über dem Boden aus technischen Gründen nicht unterschritten werden konnte. Durch die zusätzliche Erhebung des TM-Ertrages der Stoppeln im Versuchsjahr 2016 konnte die nicht geerntete Biomasse bei einer mittleren Schnitthöhe/StopPELLänge von 22 cm auf 12,3 dt ha<sup>-1</sup> beziffert werden (Tabelle 23).

Tabelle 23: Länge und TM-Ertrag der Stoppeln im Versuchsjahr 2016 im Sorten- und Ernteterminversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Sorten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Ernteterminen; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	Stoppellänge (cm)			TM-Ertrag der Stoppeln (dt ha <sup>-1</sup> )		
<b>Sorte:</b>	n = 9			n = 9		
Grosso	21	$\pm 3$	a	10,8	$\pm 1,5$	d
SY Kardona	22	$\pm 2$	a	14,2	$\pm 2,2$	a
SY Talisman	22	$\pm 2$	a	12,9	$\pm 1,3$	b
Danubio	22	$\pm 2$	a	12,2	$\pm 0,9$	bc
SM E0115	21	$\pm 2$	a	11,1	$\pm 1,2$	cd
p-Wert (Sorte)				< 0,0001		
<b>Erntetermin:</b>	n = 15			n = 15		
früh	23	$\pm 2$	A	13,2	$\pm 2,1$	A
mittel	20	$\pm 1$	B	11,5	$\pm 1,7$	B
spät	21	$\pm 2$	AB	12,1	$\pm 1,7$	B
p-Wert (Erntetermin)				0,0051		
<b><math>\bar{x}</math></b>	n = 45			n = 45		
	<b>22</b>	<b><math>\pm 2</math></b>		<b>12,3</b>	<b><math>\pm 1,9</math></b>	

Demzufolge müsste das potenziell erntbare Maisstroh um diesen Ertrag erhöht werden, wobei jedoch in Abhängigkeit von der Sorte signifikant unterschiedliche TM-Erträge für die Stoppeln ermittelt wurden, die aber mit Unterschieden von maximal 3,5 dt ha<sup>-1</sup> wenig ertragsrelevant sind und bei vergleichbaren Schnitthöhen/StopPELLängen vermutlich auf eine unterschiedliche Halmdicke zurückzuführen sind. Signifikante Unterschiede im Stoppelertrag zwischen dem frühen Erntetermin und dem mittleren bzw. späten Erntetermin sind auf signifikant unterschiedliche StopPELLängen zurückzuführen, die möglicherweise durch die Beschaffenheit des Bodens und die Fahrweise bei der Ernte zustande kommen. Wird das potenziell erntbare Maisstroh um durchschnittlich 12,3 dt ha<sup>-1</sup>

nach oben korrigiert, ergibt sich ein mittlerer Harvestindex von 0,49 und ein mittleres Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1,04

Der TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs, der insbesondere für die Konservierung des Maisstrohs von Bedeutung ist und nicht zu hoch sein sollte, betrug im Mittel nur 34,5 %, also rund die Hälfte des Korn-TM-Gehaltes, und lag damit in einem Bereich, wie er auch für Silomais gängig ist.

Die ermittelten Unterschiede im TM-Gehalt der Körner stimmten dabei weitgehend mit der Eingruppierung der Reifezahl für Körnermais überein, sodass die Sorte SY Talisman mit der geringsten Reifezahl (K 230, vgl. *Tabelle 11*) signifikant höhere Korn-TM-Gehalte erreichte. Für die TM-Gehalte des potenziell erntbaren Maisstrohs wurde eine wesentlich größere Differenzierung erreicht, wobei ebenfalls die Sorte SY Talisman mit 39,1 % die höchsten TM-Gehalte erzielte und sich signifikant von allen anderen Sorten unterschied. Gemäß dem Stay-green-Charakter des Genotyps SM E0115 waren die TM-Gehalte des Maisstrohs mit 31,6 % bei dieser Sorte am geringsten, bei der Sorte Danubio mit dem stärksten Stay-green Charakter (Reifezahl Silomais  $\gg$  Reifezahl Körnermais) aber tendenziell höher, sodass sich im TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs die Silomais-Reifezahl nicht zuverlässig widerspiegelte. Neben einem eindeutigen Jahreseffekt beim TM-Gehalt der Körner und des Maisstrohs hatte auch der Erntetermin einen Einfluss auf die TM-Gehalte beider Fraktionen. Während beim Korn-TM-Gehalt signifikante Zunahmen für jeden Erntetermin ermittelt wurden, stieg der TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs lediglich vom frühen zum mittleren Erntetermin signifikant an und nahm beim späten Erntetermin nur noch unwesentlich zu, was sich auch für die TM-Gehalte der Gesamtpflanze bestätigte.

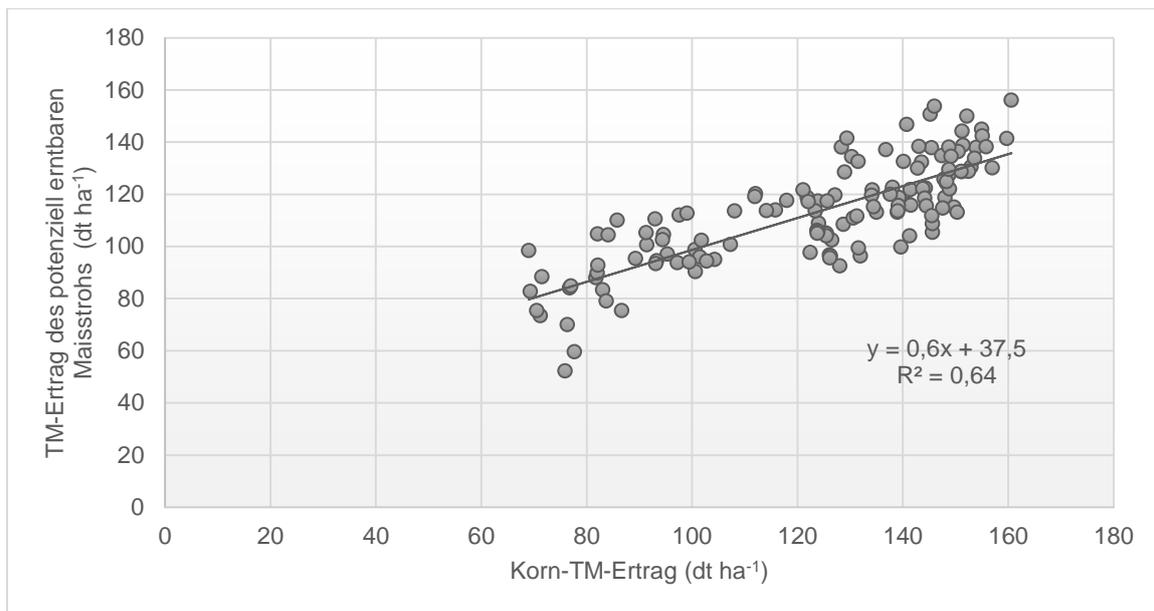
### **5.1.3 Einfluss der Ertragsparameter auf das potenziell erntbare Maisstroh und das Korn-Stroh-Verhältnis**

Während die Ermittlung des potenziell erntbaren Maisstrohs sehr aufwändig ist, kann der Kornertrag oder der Gesamtpflanzenenertrag wesentlich einfacher bestimmt werden, weshalb eine Abschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohs anhand dieser Ertragsparameter erstrebenswert ist. Auf der Grundlage des Korrelationskoeffizienten nach Spearman konnte ein signifikanter und stark positiver Zusammenhang zwischen dem potenziell erntbaren Maisstroh und dem Kornertrag ( $r = 0,80$ ) und ebenso zwischen dem potenziell erntbaren Maisstroh und dem Gesamtpflanzenenertrag ( $r = 0,87$ ) ermittelt werden (s. Anhang *Tabelle 41*), sodass sich durch eine einfache monokausale

Regression der TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs anhand des einfacher zu ermittelnden Kornertrages über folgenden Zusammenhang beschreiben lässt:

TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs = Korn-TM-Ertrag \* 0,6 + 37,5.

Mit diesem Modell konnte ein mäßiger Anteil der Variation ( $R^2 = 0,64$ ; *Abbildung 4*) des potenziell erntbaren Maisstrohs erklärt werden. Bei der Schätzung des potenziell erntbaren Maisstrohs auf der Grundlage des Gesamtpflanzen-TM-Ertrages wurde ein höheres Bestimmtheitsmaß von 0,75 erreicht.



*Abbildung 4: Einfluss des Korn-TM-Ertrages auf den TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs; Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine; n = 135*

Für das Korn-Stroh-Verhältnis bzw. den Harvestindex wurde ein mäßiger ( $r = 0,54$ , bzw.  $r = 0,53$ ), aber signifikanter Zusammenhang mit dem Korn-TM-Ertrag ermittelt, wobei ein höherer Kornertrag zu sinkenden Korn-Stroh-Verhältnissen führte. Durch den Parameter Korn-TM-Ertrag konnte letztlich aber nur ein ungenügender Anteil von 37 % der Variation des Korn-Stroh-Verhältnisses erklärt werden (*Abbildung 5*).

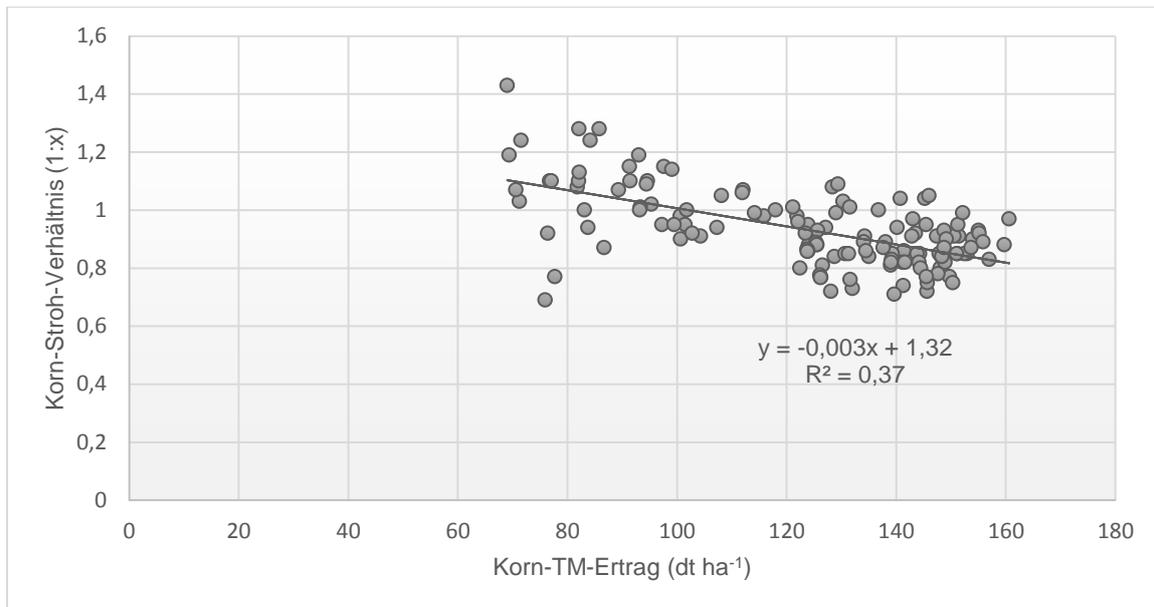


Abbildung 5: Einfluss des Korn-TM-Ertrages auf das Korn-Stroh-Verhältnis (1:x); Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine;  $n = 135$

#### 5.1.4 Stoffliche Zusammensetzung des potenziell erntbaren Maisstrohs in Abhängigkeit von der Sorte und dem Erntetermin

Um die Qualität von Maisstroh in Abhängigkeit von der Sortenwahl oder dem Erntetermin beschreiben zu können, wurden für sämtliche Maisstroh-Proben die gängigen Parameter der Futtermittelanalytik nasschemisch bestimmt (*Tabelle 24*). Die Ermittlung der Inhaltsstoffe mithilfe von NIRS-Analysen hatte sich als wenig zuverlässig erwiesen. Die Übereinstimmung mit den chemisch ermittelten Gehalten war nur gering.

Ein Großteil der untersuchten Inhaltsstoffe, wie z. B. die Faserbestandteile XF bzw. Hemicellulose und Cellulose, zeigte dabei eine nur geringe Variation mit Variationskoeffizienten unter 10 % (*Tabelle 38*). Eine wesentlich stärkere Differenzierung wurde für die Rohprotein- und Ligningehalte mit Variationskoeffizienten von über 15 % erreicht. Mit Werten zwischen 4,0 und 19,6 % deckten die Zuckergehalte ein weites Spektrum ab, was sich in einem sehr hohen Variationskoeffizienten von über 25 % widerspiegelte. Da Maisstroh grundsätzlich keine oder einen nur sehr geringen Anteil an Körnern enthält (beispielsweise bei einem zweiten Kolbenansatz mit nur wenigen, oftmals nicht vollständig ausgebildeten Kornreihen), waren die Stärkegehalte minimal und teilweise unter der Nachweisgrenze. Da die Stärkegehalte außerdem nicht normalverteilt waren und der Erklärungsgehalt dieses Parameters bei einem mittleren Stärkegehalt von 0,3 % als irrelevant betrachtet werden kann, wurde die Stärke aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Für die Faserbestandteile wurde auf die berechneten Merkmale Hemicellulose und Cellulose zurückgegriffen, weil die Schwankungsbreite

geringfügig größer war als bei den NDF- und ADF-Gehalten, bei denen es sich zudem um aggregierte Parameter (NDF beinhaltet ADF) handelt.

Der Rohfett- und Hemicellulosegehalt war unbeeinflusst von der Sortenwahl und veränderte sich im Verlauf des Erntezeitraums nicht. Auch die Rohasche- und Rohproteingehalte wurden nicht vom Erntetermin beeinflusst, waren aber sehr sortenspezifisch. Für den unverdaulichen Inhaltsstoff Lignin war eine Sortendifferenzierung ebenfalls erkennbar, wobei der Genotyp SM E0115 mit 3,7 % signifikant weniger Lignin aufwies als die Sorten Grosso und SY Kardona. Für die Parameter Rohfaser bzw. Cellulose beschränkte sich die Sortendifferenzierung auf einen signifikanten Unterschied zwischen dem Genotyp SM E0115 und den anderen vier Sorten. Insgesamt hob sich der Genotyp SM E0115 von den anderen vier Sorten durch die signifikant geringeren Gehalte an Rohfaser bzw. Cellulose und umgekehrt die höchsten Gehalte an Rohprotein und Zucker ab. Für die Faserfraktionen Lignin, Cellulose und Rohfaser wurde außerdem ein Einfluss des Erntetermins ermittelt, wobei die Gehalte beim letzten Erntetermin jeweils signifikant erhöht waren im Vergleich zu den beiden ersten Ernteterminen. Dagegen war der Zuckergehalt beim letzten Erntetermin signifikant vermindert. Es gab keine signifikanten Wechselwirkungen zwischen der Sorte und dem Erntetermin.

Die jahresspezifischen Standort- und Umweltbedingungen hatten jedoch z. T. sehr großen Einfluss auf die stoffliche Zusammensetzung des Maisstrohs, sodass sich mit Ausnahme des Rohfasergehaltes für alle dargestellten Inhaltsstoffe signifikante Jahresunterschiede ergaben.

*Tabelle 24: Stoffliche Zusammensetzung des (potenziell erntbaren) Maisstrohs (Weender/Van Soest-Analysen) in Abhängigkeit von der Sorte, dem Erntetermin und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Sorten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Ernteterminen; unterschiedliche griechische Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )*

	XA (% TM)	XP (% TM)	XL (% TM)	XF (% TM)	XZ (% TM)	HCEL (% TM)	CEL (% TM)	ADL (% TM)
Sorte:	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27
Grosso	4,4 $\pm$ 0,4 ab	4,3 $\pm$ 0,6 bc	0,7 $\pm$ 0,1 a	30,0 $\pm$ 1,7 a	10,8 $\pm$ 3,2 ab	30,8 $\pm$ 2,1 a	34,9 $\pm$ 2,4 a	4,4 $\pm$ 0,7 a
SY Kardona	4,2 $\pm$ 0,5 b	4,0 $\pm$ 0,5 cd	0,7 $\pm$ 0,1 a	30,7 $\pm$ 1,5 a	11,1 $\pm$ 2,0 ab	30,6 $\pm$ 1,5 a	35,5 $\pm$ 1,8 a	4,2 $\pm$ 0,8 ab
SY Talisman	4,3 $\pm$ 0,3 ab	4,1 $\pm$ 0,7 d	0,7 $\pm$ 0,1 a	31,0 $\pm$ 2,3 a	10,1 $\pm$ 3,4 b	30,7 $\pm$ 2,6 a	36,1 $\pm$ 3,3 a	4,0 $\pm$ 0,7 bc
Danubio	4,0 $\pm$ 0,5 c	4,5 $\pm$ 0,8 b	0,7 $\pm$ 0,1 a	31,1 $\pm$ 1,7 a	11,4 $\pm$ 2,3 ab	29,7 $\pm$ 2,1 a	35,9 $\pm$ 2,1 a	4,0 $\pm$ 0,8 bc
SM E0115	4,5 $\pm$ 0,3 a	4,8 $\pm$ 0,7 a	0,8 $\pm$ 0,1 a	28,1 $\pm$ 1,9 b	12,2 $\pm$ 2,6 a	29,8 $\pm$ 2,0 a	33,4 $\pm$ 2,1 b	3,7 $\pm$ 0,5 c
p-Wert (Sorte)	< 0,0001	< 0,0001	> 0,1	< 0,0001	0,0093	0,0582	< 0,0001	0,0001
Erntetermin:	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45
früh	4,3 $\pm$ 0,4 A	4,3 $\pm$ 0,8 A	0,7 $\pm$ 0,1 A	29,8 $\pm$ 1,9 B	12,1 $\pm$ 2,1 A	29,8 $\pm$ 1,9 A	34,3 $\pm$ 2,0 B	3,9 $\pm$ 0,7 B
mittel	4,3 $\pm$ 0,4 A	4,3 $\pm$ 0,7 A	0,7 $\pm$ 0,1 A	29,8 $\pm$ 2,1 B	11,8 $\pm$ 2,8 A	30,5 $\pm$ 2,2 A	34,8 $\pm$ 2,4 B	3,9 $\pm$ 0,7 B
spät	4,3 $\pm$ 0,5 A	4,4 $\pm$ 0,7 A	0,7 $\pm$ 0,1 A	31,0 $\pm$ 2,2 A	9,6 $\pm$ 2,7 B	30,6 $\pm$ 2,1 A	36,4 $\pm$ 2,8 A	4,4 $\pm$ 0,8 A
p-Wert (Erntetermin)	> 0,1	> 0,1	> 0,1	0,0011	< 0,0001	0,0871	< 0,0001	< 0,0001
p-Wert (Sorte $\times$ Erntetermin)	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1
Jahr:	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45
2014	4,3 $\pm$ 0,3 $\beta$	4,8 $\pm$ 0,6 $\alpha$	0,8 $\pm$ 0,1 $\alpha$	30,6 $\pm$ 1,9 $\alpha$	10,2 $\pm$ 2,5 $\beta$	29,5 $\pm$ 2,1 $\beta$	35,9 $\pm$ 2,2 $\alpha$	3,9 $\pm$ 0,5 $\beta$
2015	4,6 $\pm$ 0,4 $\alpha$	3,9 $\pm$ 0,5 $\gamma$	0,7 $\pm$ 0,1 $\beta$	30,3 $\pm$ 1,9 $\alpha$	10,4 $\pm$ 2,8 $\beta$	31,8 $\pm$ 1,5 $\alpha$	36,1 $\pm$ 2,4 $\alpha$	3,7 $\pm$ 0,5 $\beta$
2016	4,0 $\pm$ 0,4 $\gamma$	4,4 $\pm$ 0,8 $\beta$	0,8 $\pm$ 0,1 $\alpha$	29,7 $\pm$ 2,5 $\alpha$	12,8 $\pm$ 2,3 $\alpha$	29,6 $\pm$ 1,7 $\beta$	33,5 $\pm$ 2,2 $\beta$	4,6 $\pm$ 0,9 $\alpha$
p-Wert (Jahr)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0047	< 0,0605	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
$\bar{x}$	<b>4,3 <math>\pm</math> 0,4</b>	<b>4,4 <math>\pm</math> 0,7</b>	<b>0,7 <math>\pm</math> 0,1</b>	<b>30,2 <math>\pm</math> 2,1</b>	<b>11,1 <math>\pm</math> 2,8</b>	<b>30,3 <math>\pm</math> 2,1</b>	<b>35,2 <math>\pm</math> 2,6</b>	<b>4,1 <math>\pm</math> 0,7</b>

n = Anzahl an Beobachtungen; XA: Rohasche; XP: Rohprotein; XL: Rohfett; XF: Rohfaser; XZ: Zucker (reduzierend); HCEL: Hemicellulose; CEL: Cellulose; ADL: Lignin

### 5.1.5 Methanausbeute und Methanhektarertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs in Abhängigkeit von der Sorte und dem Erntetermin

Um die grundsätzliche Vergärbarkeit von Maisstroh bewerten und pflanzenbauliche Einflüsse beschreiben zu können, wurden zusätzlich zur stofflichen Zusammensetzung für alle fünf Sorten und die drei zeitlich gestaffelten Erntetermine die Biogas- und Methanausbeuten anhand von Batchversuchen ermittelt (*Tabelle 25*). Im Versuchsmittel erreichte das potenziell erntbare Maisstroh eine hohe Methanausbeute von  $324 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$ , die aber mit einem Unterschied von rund  $40 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  deutlich unter den Methanausbeuten zur Siloreife (*Tabelle 20*) lag. Die Methanausbeuten lagen zwischen 254 und  $379 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$ , wobei bei einem Variationskoeffizienten von nur 6,8 % (*Tabelle 38*) die Schwankungsbreite insgesamt gering war. Da im Methangehalt nur geringfügige und für die Berechnung der Methanausbeute kaum relevante Unterschiede zwischen den verschiedenen Faktorstufen ermittelt wurden, waren die Ergebnisse der Methan- und Biogasausbeuten deckungsgleich. Die Variation des Erntetermins beeinflusste die Methanausbeute stärker als die Sortenwahl und das Versuchsjahr. Je später das Maisstroh geerntet wurde, desto signifikant geringer waren die erzielten Methanausbeuten, die um jeweils  $14 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  sanken. Die höchsten jahresspezifischen Methanausbeuten wurden im Versuchsjahr 2015 erreicht, als der erste Erntetermin, bedingt durch die warme und trockene Vegetationsperiode, ungewöhnlich früh (Mitte September) erfolgte (*Tabelle 13*). Trotz der z.T. deutlichen Sortendifferenzierung bei einigen Inhaltsstoffen (*Tabelle 24*), unterschieden sich die angebauten Sorten nur begrenzt in der Methan- bzw. Biogasausbeute, wobei lediglich die Sorte Danubio durch signifikant höhere Methanausbeuten von den Sorten Grosso und SM E0115 zu unterscheiden war.

Der Methanhektarertrag betrug im Mittel über alle geprüften Varianten  $3\,509 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ , wobei der TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs einen überproportionalen Einfluss bei der Berechnung des Methanhektarertrages hatte (Formel siehe Kapitel 4.3.2), weil es den Betrag der Methanausbeute um den Faktor 35 überstieg. Deshalb waren die Sorteneffekte beim Methanhektarertrag im Wesentlichen vom potenziell erntbaren Maisstrohertrag (*Tabelle 22*) geprägt, sodass die Sorten SY Talisman und SM E0115 aufgrund ihres signifikant geringeren Maisstrohertrages auch signifikant geringere Methanhektarerträge im Vergleich zu den Sorten SY Kardona und Danubio erzielten. Die geringsten Methanhektarerträge wurden vom Genotyp SM E0115 erzielt, aufgrund des geringsten potenziell erntbaren Maisstrohertrages in Kombination mit der geringsten Methanausbeute. Der Einfluss von Erntetermin und Versuchsjahr war jeweils hochsignifikant und führte zu einer deutlichen Abstufung der Methanhektarerträge. Mit

---

einem Unterschied von fast  $1\,000\text{ m}^3\text{ CH}_4\text{ ha}^{-1}$  zwischen den Versuchsjahren 2015 und 2016 waren die Jahreseffekte gewichtiger als die Sorten- und Erntetermineinflüsse. Bei einem Variationskoeffizienten von fast 20 % (*Tabelle 38*) war die Schwankungsbreite des Zielmerkmals insgesamt sehr hoch.

Tabelle 25: Methanausbeute und Methanhektarertrag des (potenziell erntbaren) Maisstrohs in Abhängigkeit von der Sorte, dem Erntetermin und dem Versuchsjahr im Sorten- und Ernteterminversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Spalte zwischen den Sorten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Ernteterminen; unterschiedliche griechische Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

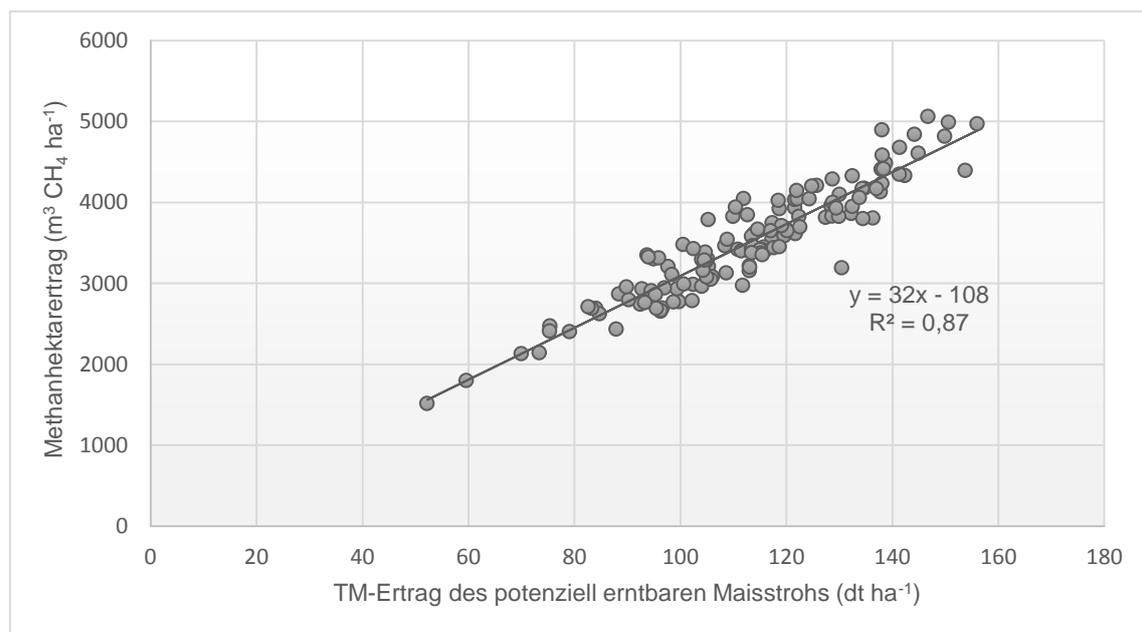
	Biogausausbeute (l (kg oTM) <sup>-1</sup> )	Methanausbeute (l CH <sub>4</sub> (kg oTM) <sup>-1</sup> )	Methangehalt (%a)	Methanhektarertrag (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> )
<b>Sorte:</b>	n = 27	n = 27	n = 27	n = 27
Grosso	606 $\pm$ 37 b	319 $\pm$ 18 b	0,527 $\pm$ 0,01 a	3563 $\pm$ 603 ab
SY Kardona	625 $\pm$ 49 ab	326 $\pm$ 25 ab	0,521 $\pm$ 0,01 b	3695 $\pm$ 682 a
SY Talisman	622 $\pm$ 43 ab	326 $\pm$ 21 ab	0,523 $\pm$ 0,01 ab	3381 $\pm$ 772 b
Danubio	634 $\pm$ 48 a	332 $\pm$ 25 a	0,523 $\pm$ 0,01 ab	3781 $\pm$ 583 a
SM E0115	608 $\pm$ 37 b	319 $\pm$ 19 b	0,522 $\pm$ 0,01 ab	3127 $\pm$ 524 c
p-Wert (Sorte)	0,0019	0,0051	0,0406	< 0,0001
<b>Erntetermin:</b>	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45
früh	648 $\pm$ 39 A	338 $\pm$ 19 A	0,522 $\pm$ 0,01 B	3832 $\pm$ 589 A
mittel	619 $\pm$ 33 B	324 $\pm$ 18 B	0,523 $\pm$ 0,01 AB	3603 $\pm$ 597 B
spät	590 $\pm$ 39 C	310 $\pm$ 20 C	0,526 $\pm$ 0,01 A	3093 $\pm$ 614 C
p-Wert (Erntetermin)	< 0,0001	< 0,0001	0,0307	< 0,0001
p-Wert (Sorte $\times$ Erntetermin)	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1
<b>Jahr:</b>	n = 45	n = 45	n = 45	n = 45
2014	603 $\pm$ 28 $\beta$	317 $\pm$ 14 $\beta$	0,525 $\pm$ 0,01 $\alpha$	3400 $\pm$ 409 $\beta$
2015	642 $\pm$ 47 $\alpha$	334 $\pm$ 25 $\alpha$	0,521 $\pm$ 0,01 $\beta$	3081 $\pm$ 648 $\gamma$
2016	613 $\pm$ 45 $\beta$	322 $\pm$ 23 $\beta$	0,524 $\pm$ 0,01 $\alpha$	4047 $\pm$ 539 $\alpha$
p-Wert (Jahr)	< 0,0001	< 0,0001	0,0105	< 0,0001
$\bar{x}$	<b>619 <math>\pm</math> 44</b>	<b>324 <math>\pm</math> 22</b>	<b>0,523 <math>\pm</math> 0,01</b>	<b>3509 <math>\pm</math> 671</b>

n = Anzahl an Beobachtungen

### 5.1.6 Einfluss der Inhaltsstoffe und Ertragsparameter auf die Methanausbeute und den Methanhektarertrag

Obwohl signifikante Unterschiede zwischen den Sorten und den Ernteterminen für einzelne Inhaltsstoffe und die Methan- bzw. Biogasausbeuten vorlagen, lag kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Inhaltsstoffen und den Methan- bzw. Biogasausbeuten vor. Die Korrelationskoeffizienten lagen nur zwischen  $|0,00|$  und  $|0,31|$  (s. Anhang *Tabelle 42*), sodass die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe keinen Einfluss auf die Höhe der Methanausbeute hatte.

Für die Zielgröße Methanhektarertrag wurde ein enger ( $r = 0,92$ ; s. Anhang *Tabelle 42*) und hochsignifikanter linearer Zusammenhang mit dem TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs ermittelt, sodass auf der Grundlage einer einfachen Regression der TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs einen hohen Anteil von 87 % (*Abbildung 6*) der Variation des Methanhektarertrages erklären konnte.



*Abbildung 6: Einfluss des TM-Ertrages des (potenziell erntbaren) Maisstrohs auf den Methanhektarertrag; Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine; n = 135*

Die Inhaltsstoffe zeigten kaum eine relevante Beziehung zum Methanhektarertrag. Der höchste Korrelationskoeffizient wurde für den Zuckergehalt ermittelt, der jedoch mit 0,51 ebenfalls nur mäßig war und zu einem unzureichenden Bestimmtheitsmaß von nur 0,30 führte (s. Anhang *Abbildung 25*).

## 5.2 Erntetechnikversuche

### 5.2.1 Ertragsparameter von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh

Ausgangspunkt für die Ermittlung der Abfuhrraten bei der Bergung von Körnermaisstroh ist der Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs. Im Versuchsmittel betrug dieser  $107,1 \text{ dt ha}^{-1}$  und war damit niedriger als der Kornertrag mit  $121,1 \text{ dt ha}^{-1}$ , woraus sich ein mittleres Korn-Stroh-Verhältnis von 1:0,88 für die in allen drei Versuchsjahren verwendete Sorte LG 32.58 ergab.

Um möglichst einheitliche Ausgangsbedingungen für den Vergleich der verschiedenen Ernteverfahren zu schaffen, wurden die Versuche in den drei Versuchsjahren unter gleichen Standortbedingungen (identischer Schlag in 2014 und 2016, benachbarter Schlag in 2015) durchgeführt, die gleiche Maissorte (LG 32.58) gewählt und ein möglichst gleicher Zeitraum für die Bergung des Maisstrohs angestrebt (*Tabelle 18*). Ziel war es, die Ernteverfahren auf der Grundlage eines homogenen Maisbestandes zu vergleichen, was anhand der Kennzahlen Bestandesdichte, Kornertrag, potenziell erntbarer Maisstrohertrag und TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs überprüft wurde. Dabei wurden zwischen den Parzellen der vier Schwadtechniken keine signifikanten Unterschiede für die genannten Parameter ermittelt, weshalb homogene Ausgangsbedingungen für den Vergleich der Ernteverfahren angenommen wurden (*Tabelle 26*).

Bedingt durch den Witterungseinfluss der einzelnen Versuchsjahre wurden jedoch signifikante Jahresunterschiede für die wesentlichen Ertragsparameter des Maisbestandes ermittelt. So war die Bestandesdichte 2014, trotz gleicher Sätechnik und Saateinstellungen, mit 8,2 Pflanzen je  $\text{m}^2$  signifikant geringer als 2015 und 2016 mit 9,1 und 9,4 Pflanzen je  $\text{m}^2$ . Im Trockenjahr 2015 wurde im Vergleich zu 2014 der gleiche mittlere Kornertrag und sogar ein signifikant höherer Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs erzielt. Sehr gute Wachstumsbedingungen lagen 2016 vor, sodass die höchste Gesamtpflanzenbiomasse mit insgesamt  $247,7 \text{ dt ha}^{-1}$  erreicht wurde, wobei sowohl der mittlere Kornertrag als auch der potenziell erntbare Maisstrohertrag signifikant größer waren als 2014 und 2015. Demzufolge wurden in den Einzeljahren Korn-Stroh-Verhältnisse von 1:0,85 bis 1:0,94 ermittelt.

Obwohl die Pflanzen zum jeweiligen Erntezeitpunkt in den Einzeljahren bereits stark verbräunt und abgereift waren (insbesondere beim späten Erntezeitpunkt 2014), wurden für das potenziell erntbare Maisstroh nur TM-Gehalte von 32,2 – 36,9 % ermittelt, wobei signifikante Jahresunterschiede festgestellt wurden.

*Tabelle 26: Ertragsparameter der Sorte LG 32.58 im stehenden Maisbestand im Erntetechnikversuch (Mittelwerte über die drei Versuchsjahre bzw. die Parzellen der vier Schwadtechniken  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Parzellen der Schwadtechniken, unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )*

	<b>Bestandesdichte</b> (Pflanzen m <sup>-2</sup> )	<b>TM-Ertrag Korn</b> (dt ha <sup>-1</sup> )	<b>TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs</b> (dt ha <sup>-1</sup> )	<b>TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs</b> (%)
	n = 12	n = 12	n = 12	n = 12
BioC	8,8 $\pm$ 0,6 a	120,7 $\pm$ 9,0 a	108,2 $\pm$ 9,5 a	33,9 $\pm$ 2,9 a
SchwH	9,1 $\pm$ 0,5 a	120,9 $\pm$ 13,0 a	106,6 $\pm$ 10,7 a	34,1 $\pm$ 2,3 a
MSCollect	8,9 $\pm$ 0,8 a	121,9 $\pm$ 11,0 a	107,2 $\pm$ 8,6 a	35,2 $\pm$ 4,1 a
MergeM	8,9 $\pm$ 0,9 a	121,0 $\pm$ 10,7 a	106,2 $\pm$ 9,0 a	34,5 $\pm$ 2,5 a
p-Werte (Schwadtechnik)	0,6009	0,9835	0,8533	0,4428
	n = 16	n = 16	n = 16	n = 16
2014	8,2 $\pm$ 0,5 B	115,4 $\pm$ 4,1 B	97,6 $\pm$ 4,9 C	36,9 $\pm$ 1,1 A
2015	9,1 $\pm$ 0,3 A	115,7 $\pm$ 10,6 B	108,4 $\pm$ 7,1 B	34,2 $\pm$ 3,4 B
2016	9,4 $\pm$ 0,6 A	132,1 $\pm$ 5,4 A	115,6 $\pm$ 5,0 A	32,2 $\pm$ 1,6 C
p-Werte (Jahr)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
	n = 48	n = 48	n = 48	n = 48
$\bar{x}$	8,9 $\pm$ 0,7	121,1 $\pm$ 10,5	107,1 $\pm$ 9,4	34,4 $\pm$ 3,0

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902

Durch die Ausweitung des Sortenspektrums um die beiden Sorten SY Talisman und KWS 9361 im Versuchsjahr 2015 wurde eine Differenzierung im Ausgangsbestand erreicht (Tabelle 27). Signifikante Unterschiede ergaben sich für die Bestandesdichten, wobei mit den beiden zusätzlichen Sorten signifikant höhere Bestandesdichten im Vergleich zur Sorte LG 32.58 erzielt wurden, obwohl die Einstellungen bei der Aussaat unverändert waren. Die Unterschiede sind also vermutlich auf den Feldaufgang bzw. unterschiedliche Wachstumsbedingungen in der Jugendphase der Maisentwicklung zurückzuführen.

Tabelle 27: Ertragsparameter der drei Sorten im stehenden Maisbestand im Versuchsjahr 2015 im Erntetechnikversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Sorten; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

Sorte	Bestandesdichte			TM-Ertrag Korn			TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs			TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs		
	(Pflanzen m <sup>-2</sup> )			(dt ha <sup>-1</sup> )			(dt ha <sup>-1</sup> )			(% )		
	n = 8			n = 8			n = 8			n = 8		
<b>LG 32.58</b>	9,1	$\pm 0,3$	b	115,7	$\pm 9,4$	a	108,4	$\pm 5,4$	a	34,2	$\pm 2,8$	a
<b>SY Talisman</b>	10,1	$\pm 0,6$	a	127,1	$\pm 14,7$	a	114,8	$\pm 13,0$	a	34,5	$\pm 3,8$	a
<b>KWS 9361</b>	9,8	$\pm 0,5$	a	123,7	$\pm 12,6$	a	124,3	$\pm 16,0$	a	30,6	$\pm 1,9$	b
p-Werte	0,0172			0,2387			0,0728			0,0394		

n = Anzahl an Beobachtungen

Auch für den TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs wurden signifikante Unterschiede ermittelt. Dabei erreichte die Sorte KWS 9361 aufgrund der höheren Reifezahl geringere TM-Gehalte als die Sorten LG 32.58 und SY Talisman. Bei den Korn-TM-Erträgen und insbesondere den TM-Erträgen des potenziell erntbaren Maisstrohs wurden zwar Unterschiede ermittelt, die im Fall des potenziell erntbaren Maisstrohs trotz einer Ertragsdifferenz von fast 16 dt ha<sup>-1</sup> zwischen der Sorte LG 32.58 und der spätreiferen Sorte KWS 9361 aber nur zu tendenziellen Unterschieden ( $p = 0,0728$ ) führten, weil die Variabilität der Erträge im Versuchsjahr 2015 aufgrund von Trockenstress auf einzelnen Teilflächen wesentlich höher als 2014 und 2016 war. Die berechneten Korn-Stroh-Verhältnisse lagen je nach Sorte zwischen 1:0,90 und 1:1,00. Insgesamt war die Sortendifferenzierung im Ausgangsbestand hinsichtlich der beschriebenen Parameter eher mäßig und somit das eigentliche Ziel der Sortenwahl, nämlich unterschiedliche Mengen und TM-Gehalte des potenziell erntbaren Maisstrohs zu generieren, nur bedingt erreicht.

### 5.2.2 Auf Schwad gelegter und abgefahrener Maisstrohertrag in Abhängigkeit vom Ernteverfahren

Bei einem mittleren TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs von  $107,1 \text{ dt ha}^{-1}$  (Sorte LG 32.58; *Tabelle 26*), wurden von den drei Schwadtechniken BioChipper, Mais Star\* Collect und Merge Maxx 900/902 über die drei Versuchsjahre (unter den Bedingungen „kurze Feldliegezeit“ und „Sorte LG 32.58“) im Mittel lediglich  $61,3 \text{ dt ha}^{-1}$  des Maisstrohs auf Schwad gelegt und nur  $52,9 \text{ dt ha}^{-1}$  bei der nachfolgenden Bergung abgefahren (*Tabelle 28*). Demzufolge betrug die Abfuhrate nur durchschnittlich 49 % und die Ernteverluste in Höhe von  $54,2 \text{ dt ha}^{-1}$  überstiegen den abgefahrenen Strohertrag. Die größten Verluste von im Mittel  $45,8 \text{ dt ha}^{-1}$  (43 % des potenziell erntbaren Maisstrohs) entstanden beim Verfahrensschritt Schwaden, wohingegen die Bergungsverluste bei der Aufnahme mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. dem Kurzschnittladewagen mit  $8,4 \text{ dt ha}^{-1}$  bzw. 14 % des auf Schwad gelegten Strohertrages (8 % des potenziell erntbaren Strohertrages) eher gering waren.

Im Mittel der drei Versuchsjahre gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Schwadtechniken BioChipper, Mais Star\* Collect und Merge Maxx 900/902 (*Tabelle 28*) in den auf Schwad gelegten wie auch abgefahrenen Stroherträgen. Dabei waren die absoluten Unterschiede zwischen den drei Techniken mit maximal  $6,2 \text{ dt ha}^{-1}$  bei den auf Schwad gelegten Stroherträgen bzw. mit  $2,4 \text{ dt ha}^{-1}$  bei den abgefahrenen Stroherträgen ebenfalls sehr gering. Mit dem zweistufigen Ernteverfahren Mais Star\* Collect sind also im Mittel die gleichen Ernteverluste wie bei den dreistufigen Verfahren aufgetreten und der Großteil der Verluste ist dabei ebenfalls beim Verfahrensschritt Schwaden entstanden, obwohl das Maisstroh bei dieser Technik ohne Bodenkontakt geschwadet wird. Ein großer Teil der Restpflanze wurde demnach nicht in die Unterfangwanne geworfen oder ging bei der Zusammenführung durch die Querförderschnecke verloren.

Auch der selbstfahrende Feldhäcksler und der Kurzschnittladewagen unterschieden sich im abgefahrenen Strohertrag nicht, sodass die Wahl der Bergungstechnik unerheblich war.

Während es keine signifikanten Effekte der Schwadtechnik und der Bergungsart gab, hatten die Einzeljahre z. T. einen signifikanten Einfluss auf den geschwadeten und abgefahrenen Strohertrag.

Obwohl der potenziell erntbare Strohertrag der Sorte LG 32.58 im Versuchsjahr 2015 um rund  $10 \text{ dt ha}^{-1}$  größer war als 2014 (*Tabelle 26*), wurden im Mittel über alle Schwadtechniken in den beiden Versuchsjahren nahezu gleiche Stroherträge geschwadet und auch abgefahren. Somit wurde 2015 eine geringere Abfuhrate (44 %) als 2014

(50 %) erzielt. 2016 war der TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs rund  $18 \text{ dt ha}^{-1}$  größer als 2014. Allerdings wurden im Vergleich zu 2014 und 2015 auch signifikant höhere Stroherträge geschwadet und abgefahren, sodass 2016 mit 54 % die höchsten Abfuhraten erzielt wurden. Trotz der teils unterschiedlichen Stroherträge (geschwadete und abgefahrene) in den einzelnen Versuchsjahren, waren die Bergungsverluste mit  $7,5 - 9,3 \text{ dt ha}^{-1}$  bzw. 13 – 15 % des auf Schwad gelegten Strohertrages in den drei Versuchsjahren vergleichbar.

In den Einzeljahren erzielten die Schwadtechniken z. T. sehr unterschiedliche Ergebnisse, sodass signifikante Wechselwirkungen zwischen der Schwadtechnik und dem Versuchsjahr für den auf Schwad gelegten und abgefahrenen Ertrag festgestellt wurden, die eine Einzeljahresbetrachtung erforderlich machen.

Während mit dem Mais Star\* Collect 2014 und 2015 im Vergleich zu den anderen Schwadtechniken (tendenziell bzw. signifikant) höhere Erträge geschwadet wurden, waren es 2016 die geringsten Erträge, wobei es 2016 beim Einsatz des Mais Star\* Collect auch geregnet hatte (die beiden anderen Techniken aber unter trockenen Bedingungen eingesetzt werden konnten; s. *Tabelle 18*). Noch extremer waren die Unterschiede zwischen den Versuchsjahren beim Merge Maxx 900/902 mit rund  $24 \text{ dt ha}^{-1}$  bzw. beim BioChipper mit rund  $29 \text{ dt ha}^{-1}$ . Somit waren die Ertragsunterschiede innerhalb einer Schwadtechnik zwischen den Versuchsjahren größer als zwischen den Schwadtechniken innerhalb eines Versuchsjahres. Signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken konnten nur im Versuchsjahr 2015 ( $p = 0,0232$ ) ermittelt werden. Da der auf Schwad gelegte Strohertrag nur für eine kleine Fläche pro Parzelle ermittelt worden war, waren die Standardabweichungen versuchsbedingt sehr hoch.

Auch beim Zielmerkmal abgefahrener Strohertrag wurden z. T. enorme Unterschiede für dieselbe Schwadtechnik zwischen den Versuchsjahren ermittelt. Die größten Unterschiede zwischen den drei Versuchsjahren ergaben sich wiederum für den BioChipper und den Merge Maxx 900/902. So wurden beim BioChipper 2016 rund  $19 \text{ dt ha}^{-1}$  mehr an Maisstroh geborgen als 2014, beim Merge Maxx 900/902 waren es 2016 rund  $17 \text{ dt ha}^{-1}$  mehr als 2015. Die großflächigere Erhebung ( $360 \text{ m}^2$  je Parzelle) führte zu deutlich geringeren Schwankungsbreiten als bei den geschwadeten Stroherträgen und es konnten in zwei von drei Versuchsjahren (2014 und 2015) signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken gezeigt werden. So wurden 2014 beim Einsatz von Mais Star\* Collect und Merge Maxx 900 im Vergleich zum Schwadhäcksler UP-6400 signifikant höhere Stroherträge abgefahren, während der Mais Star\* Collect 2015 sowohl im Vergleich zum Schwadhäcksler UP-6400 als auch dem Merge Maxx 900 höhere Erträge erzielte. Der BioChipper war in beiden Jahren nicht von

den anderen Schwadtechniken zu unterscheiden, erreichte jedoch 2016 die höchsten absoluten Erträge, wobei eine optimierte Maschine eingesetzt worden war (4.4.2).

Ab dem Versuchsjahr 2015 ist zusätzlich der TM-Ertrag der Stoppeln ermittelt worden, der sich im Versuchsmittel auf  $6,7 \text{ dt ha}^{-1}$  belief, wobei in den beiden Versuchsjahren signifikante Unterschiede von fast  $3 \text{ dt ha}^{-1}$  auftraten. Zwischen den Schwadtechniken ergaben sich 2016 keine Unterschiede beim Stoppelertrag, wohingegen 2015 beachtliche Unterschiede bestanden. Bei den beiden Techniken BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400, die als modifizierter Mulcher arbeiten und in Abhängigkeit von der Arbeitshöhe zusätzliche Anteile der vom Mähdrescher hinterlassenen Stoppeln schlegeln und schwaden, war die Menge, die nach dem Schwaden auf die stehengebliebenen Stoppeln entfiel, mit maximal  $4,2 \text{ dt ha}^{-1}$  sehr gering, dagegen beim Mais Star\* Collect und dem Merge Maxx 900/902 mit bis zu  $11,6 \text{ dt ha}^{-1}$  um ein Vielfaches höher.

Werden für die Betrachtung der Bergungsverluste die abgefahrenen Stroherträge mit den auf Schwad gelegten Stroherträgen in Beziehung gesetzt, ergeben sich geringfügige, aber nicht signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken. So wurden mit dem Schwadhäcksler UP-6400 und dem BioChipper jeweils vergleichbare Stroherträge auf Schwad gelegt, die abgefahrenen Stroherträge waren jedoch beim Schwadhäcksler UP-6400 tendenziell geringer. Auf Basis der zweijährigen Ergebnisse wurden dabei beim Schwadhäcksler vergleichsweise hohe Bergungsverluste in Höhe von 21 % (des auf Schwad gelegten Strohertrages) berechnet. Die geringsten Bergungsverluste traten beim Merge Maxx 900/902 mit 11 % auf, wohingegen sie beim Mais Star\* Collect im Mittel mit 16 % am höchsten waren.

Tabelle 28: Stroherträge und Stoppelmenge in Abhängigkeit vom Ernteverfahren für die Varianten „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“ im Erntetechnikversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Spalte zwischen den Schwadtechniken; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bergungsarten; unterschiedliche griechische Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	auf Schwad gelegter Stroh-TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )				abgefahrener Stroh-TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )				TM-Ertrag der Stoppeln (dt ha <sup>-1</sup> )		
	2014 n = 4	2015 n = 4	2016 n = 4	2014-2016 n = 12	2014 n = 8	2015 n = 8	2016 n = 8	2014-2016 n = 24	2015 n = 8	2016 n = 8	2015-2016 n = 16
BioC	55,1 $\pm$ 13,7 a	49,2 $\pm$ 6,5 b	78,3 $\pm$ 11,8 a	<b>60,8 <math>\pm</math> 16,2 a</b>	46,0 $\pm$ 5,9 ab	46,7 $\pm$ 4,3 ab	64,7 $\pm$ 7,2 a	<b>52,5 <math>\pm</math> 10,5 a</b>	2,5 $\pm$ 0,9 b	4,2 $\pm$ 1,9 b	<b>3,3 <math>\pm</math> 1,7 b</b>
SchwH	54,1 $\pm$ 10,7 a	53,6 $\pm$ 11,0 b			43,6 $\pm$ 4,8 b	41,8 $\pm$ 4,6 b			2,4 $\pm$ 0,4 b		
MSCollect	58,1 $\pm$ 11,8 a	71,4 $\pm$ 15,2 a	64,6 $\pm$ 7,3 a	<b>64,7 <math>\pm</math> 10,5 a</b>	49,1 $\pm$ 4,3 a	52,4 $\pm$ 9,2 a	61,5 $\pm$ 4,4 a	<b>54,3 <math>\pm</math> 8,1 a</b>	11,6 $\pm$ 2,2 a	5,7 $\pm$ 0,7 b	<b>8,6 <math>\pm</math> 3,4 a</b>
MergeM	55,3 $\pm$ 8,5 a	48,0 $\pm$ 13,2 b	72,2 $\pm$ 12,6 a	<b>58,5 <math>\pm</math> 13,4 a</b>	51,0 $\pm$ 9,5 a	43,7 $\pm$ 5,8 b	61,1 $\pm$ 6,3 a	<b>51,9 <math>\pm</math> 10,1 a</b>	10,2 $\pm$ 2,8 a	6,3 $\pm$ 1,5 b	<b>8,2 <math>\pm</math> 3,0 a</b>
p-Wert (Schwadtechnik)	> 0,1	0,0232	> 0,1	> 0,1	0,012	0,0349	> 0,1	> 0,1	< 0,0001	0,0717	< 0,0001
SFH					n = 16	n = 16	n = 12	n = 36	n = 16	n = 12	n = 24
KLW					46,2 $\pm$ 5,0 A	46,0 $\pm$ 8,4 A	63,1 $\pm$ 6,2 A	<b>52,7 <math>\pm</math> 9,9 A</b>	6,2 $\pm$ 4,4 A	5,2 $\pm$ 2,0 A	<b>6,3 <math>\pm</math> 3,5 A</b>
p-Wert (Bergungsart)					48,6 $\pm$ 8,2 A	46,3 $\pm$ 6,1 A	61,6 $\pm$ 6,0 A	<b>53,1 <math>\pm</math> 9,3 A</b>	7,1 $\pm$ 5,0 A	5,5 $\pm$ 1,4 A	<b>7,1 <math>\pm</math> 3,9 A</b>
					> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1	> 0,1
<b><math>\bar{x}</math> (ohne SchwH)</b>	n = 12	n = 12	n = 12	n = 36	n = 24	n = 24	n = 24	n = 72	n = 24	n = 24	n = 48
	<b>56,2 <math>\pm</math> 10,5 <math>\beta</math></b>	<b>56,2 <math>\pm</math> 14,0 <math>\beta</math></b>	<b>71,7 <math>\pm</math> 9,6 <math>\alpha</math></b>	<b>61,3 <math>\pm</math> 13,4</b>	<b>48,7 <math>\pm</math> 6,9 <math>\beta</math></b>	<b>47,6 <math>\pm</math> 7,4 <math>\beta</math></b>	<b>62,4 <math>\pm</math> 6,0 <math>\alpha</math></b>	<b>52,9 <math>\pm</math> 9,6</b>	<b>8,1 <math>\pm</math> 4,6 <math>\alpha</math></b>	<b>5,4 <math>\pm</math> 1,7 <math>\beta</math></b>	<b>6,7 <math>\pm</math> 3,7</b>
p-Werte (Jahr)				<b>0,0018</b>				< 0,0001			< 0,0001
p-Werte (Schwadtechnik x Bergungsart)				-				> 0,1			> 0,1
p-Werte (Jahr x Schwadtechnik)				<b>0,0225</b>				<b>0,0190</b>			< 0,0001
p-Werte (Jahr x Bergungsart )				-				> 0,1			> 0,1

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902; SFH: selbstfahrender Feldhäcksler; KLW: Kurzschnittladewagen

### 5.2.3 Auf Schwad gelegter und abgefahrener Maisstrohertrag in Abhängigkeit von der Feldliegezeit und der angebauten Sorte

Unterschiede in den Stroherträgen sind nicht nur durch die Schwadtechniken bedingt, sondern auch auf Einflüsse durch verschiedene Erntebedingungen zurückzuführen. Unter den Bedingungen der kurzen Feldliegezeit (gesamte Ernte innerhalb von zwei Tagen) wurden im Mittel über alle Schwadtechniken 47,4 dt ha<sup>-1</sup> geborgen (Tabelle 29). Bei einer um drei Tage längeren Feldliegezeit des Maisstrohs (gesamte Ernte innerhalb von fünf Tagen; s. Tabelle 18) war der abgefahrene Strohertrag im Mittel über alle Schwadtechniken signifikant ( $p = 0,0499$ ) geringer und betrug 43,9 dt ha<sup>-1</sup>. Ähnlich verhielt es sich mit den auf Schwad gelegten Stroherträgen, die bei der langen Feldliegezeit um 5 dt ha<sup>-1</sup> niedriger waren, was jedoch aufgrund der hohen Standardabweichungen statistisch nicht abgesichert werden konnte.

Tabelle 29: Stroherträge bei Variation der Feldliegezeit im Versuchsjahr 2014 im Erntetechnikversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Faktorkombinationen Schwadtechnik  $\times$  Feldliegezeit innerhalb einer Spalte; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

Variante		auf Schwad gelegter Stroh-TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )			abgefahrener Stroh-TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )		
		n = 4			n = 8		
Lange Feldliegezeit <sup>1)</sup>	BioC	42,8	$\pm 7,3$	a	35,0	$\pm 2,6$	d
	SchwH	43,6	$\pm 8,2$	a	38,9	$\pm 8,8$	cd
	MSCollect	58,4	$\pm 5,5$	a	46,0	$\pm 4,6$	bc
	MergeM	57,5	$\pm 6,2$	a	55,6	$\pm 12,7$	a
	$\bar{x}$	50,6	$\pm 9,8$		43,9	$\pm 11,1$	
Kurze Feldliegezeit <sup>2)</sup>	BioC	55,1	$\pm 13,7$	a	46,0	$\pm 5,9$	bc
	SchwH	54,1	$\pm 10,7$	a	43,6	$\pm 4,8$	bc
	MSCollect	58,1	$\pm 11,8$	a	49,1	$\pm 4,3$	ab
	MergeM	55,3	$\pm 8,5$	a	51,0	$\pm 9,5$	ab
	$\bar{x}$	55,6	$\pm 10,3$		47,4	$\pm 6,8$	
p-Werte:							
Schwadtechnik		> 0,1			< 0,0001		
Feldliegezeit		> 0,1			0,0499		
Schwadtechnik $\times$ Feldliegezeit		> 0,1			0,0088		

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902

<sup>1)</sup> 1. Tag: Dreschen; 3. Tag: Schwaden; 5. Tag: Bergen; Ausnahme Mais Star\* Collect: 1. Tag: Dreschen + Schwaden; 5. Tag: Bergen

<sup>2)</sup> 1. Tag: Dreschen + Schwaden; 2. Tag: Bergen

Unter den Bedingungen der langen Feldliegezeit erzielten die Schwadtechniken signifikante Ertragsunterschiede von bis zu  $20,6 \text{ dt ha}^{-1}$ , wohingegen sich bei der kurzen Feldliegezeit die Unterschiede nivellierten und bei einer Differenz von maximal  $7,4 \text{ dt ha}^{-1}$  keine Technikunterschiede mehr vorlagen.

Der Effekt einer verzögerten Ernte wirkte sich jedoch nicht bei allen Schwadtechniken im gleichen Maße und gleich gerichtet aus, was die signifikanten Interaktionen zwischen den Faktoren Schwadtechnik und Feldliegezeit verdeutlichen ( $p = 0,0088$ ). Deshalb sind in *Tabelle 29* auch die Faktorkombinationen Feldliegezeit  $\times$  Schwadtechnik dargestellt.

Bei den beiden vergleichbaren Schwadtechniken BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400, die das Maisstroh im Wesentlichen über eine Sogwirkung aufnehmen (*Tabelle 17*), verursachte die längere Feldliegezeit eine erschwerte Aufnahme des Maisstrohs vom Feld, wodurch die abgefahrenen Stroherträge bei beiden Techniken unter den Bedingungen der langen Feldliegezeit signifikant (beim BioChipper) bzw. tendenziell (beim Schwadhäcksler UP-6400) geringer waren als bei einer kurzen Feldliegezeit. Auch die auf Schwad gelegten Stroherträge deuten auf dieses Ergebnis hin, wobei aufgrund der hohen Standardabweichungen für diesen Ertragsparameter keine Unterschiede ermittelt werden konnten.

Da beim Mais Star\* Collect die Verfahrensschritte Dreschen und Schwaden in einem Arbeitsgang erfolgen (naturgemäß kann also keine Zeitverzögerung beim Schwaden realisiert werden), gab es keine Unterschiede zwischen den beiden Feldliegezeiten bei dem auf Schwad gelegten Strohertrag. Allerdings wurden bei einer verzögerten Bergung des geschwadeten Maisstrohs (Bergung am fünften Tag nach dem Dreschen/Schwaden) tendenziell geringere Stroherträge abgefahren.

Beim Merge Maxx 900/902, der das Maisstroh über Pick-ups aufnimmt, hatte die lange Feldliegezeit des Maisstrohs im Vergleich zu den anderen drei Schwadtechniken einen gegenteiligen Effekt. So wurde unter den Bedingungen der längeren Feldliegezeit geringfügig mehr Stroh geschwadet und auch abgefahren, wobei eine statistische Absicherung nicht möglich war.

Neben der Witterung während der Ernte oder unterschiedlich langen Feldliegezeiten können sich veränderte Erntebedingungen auch aufgrund von pflanzenbaulichen Aspekten wie dem TM-Gehalt des Maisstrohs oder der vorhandenen Menge an Maisstroh ergeben. Diese Parameter werden unter anderem von der Sorte beeinflusst. Demzufolge wurde versucht, durch den Anbau von drei unterschiedlichen Sorten eine Variation im Ausgangsbestand zu erzeugen. Unmittelbar vor dem Drusch unterschieden sich die drei Sorten jedoch nur in der Bestandesdichte und dem TM-Gehalt (Kapitel. 5.2.1 bzw. *Tabelle*

27), wohingegen für den TM-Ertrag und den TM-Gehalt des den potenziell erntbaren Strohertrag und den TM-Gehalt des Maisstrohs, nur tendenzielle Unterschiede vorlagen. Gemittelt über alle Schwadtechniken gab es keinen signifikanten Sorteneffekt auf den Strohertrag (auf Schwad gelegter und abgefahrener Strohertrag) (Tabelle 30). Allerdings waren die auf Schwad gelegten wie auch abgefahrenen Stroherträge der beiden Sorten SY Talisman und KWS 9361 geringfügig höher, obwohl sich die Ernte bei diesen Sorten im Vergleich zur Ernte bei der Sorte LG 32.58 aus Zeitgründen über zwei zusätzliche Tage erstreckte, sodass möglicherweise von erschwerten Erntebedingungen auszugehen ist. Insgesamt war die sortenbedingte Variation geringer als die technikbedingte Variation. Die Hinzunahme der beiden zusätzlichen Sorten SY Talisman und KWS 9361 bestätigte dieselbe (signifikante) Differenzierung zwischen den Schwadtechniken, wie sie auch für die Sorte LG 32.58 im Jahr 2015 (Tabelle 28) vorlag.

*Tabelle 30: Stroherträge in Abhängigkeit von drei Sorten im Versuchsjahr 2015 im Erntetechnikversuch (Mittelwerte über die vier Schwadtechniken bzw. die drei Sorten  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Sorten; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )*

Variante	auf Schwad gelegter Stroh-TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )			abgefahrener Stroh-TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )		
	n = 16			n = 16		
<b>LG 32.58</b>	55,5	$\pm 13,0$	a	46,1	$\pm 6,8$	a
<b>SY Talisman</b>	58,1	$\pm 13,4$	a	50,9	$\pm 7,4$	a
<b>KWS 9361</b>	57,8	$\pm 12,7$	a	51,6	$\pm 8,5$	a
<b>p-Werte (Sorte)</b>	> 0,1			> 0,1		
	n = 12			n = 12		
<b>BioC</b>	53,8	$\pm 8,2$	B	51,0	$\pm 6,4$	AB
<b>SchwH</b>	52,1	$\pm 13,7$	B	47,1	$\pm 8,2$	B
<b>MSCollect</b>	69,7	$\pm 8,1$	A	54,1	$\pm 6,9$	A
<b>MergeM</b>	53,1	$\pm 12,3$	B	45,9	$\pm 7,8$	B
<b>p-Werte (Schwadtechnik)</b>	0,0020			0,0049		
<b>p-Werte (Schwadtechnik x Sorte)</b>	> 0,1			> 0,1		

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902

#### 5.2.4 TM- und Rohaschegehalte des abgefahrenen Maisstrohs

Als Qualitätsparameter wurden für alle Ernteverfahren die TM- und Rohaschegehalte im abgefahrenen Maisstroh ermittelt, weil sie für die Silierung wie auch den späteren Biogasprozess eine Rolle spielen.

Die TM-Gehalte im abgefahrenen Maisstroh (*Tabelle 31*) unterschieden sich grundlegend von den TM-Gehalten des potenziell erntbaren Maisstrohs, die unmittelbar vor dem Drusch im stehenden Bestand durch Handernte ermittelt worden waren und im Mittel bei 34,4 % lagen (*Tabelle 26*). Dabei wurden deutliche Jahreseffekte ermittelt, die nicht mit den jahresbedingten Unterschieden in den TM-Gehalten des potenziell erntbaren Maisstrohs (*Tabelle 26*) erklärbar waren. Durch die sehr frühe Ernte im Versuchsjahr 2015 und die warme Witterung während der Strohernte, waren die TM-Gehalte 2015 sehr hoch und lagen im Mittel bei 59,1 %. Umgekehrt waren die TM-Gehalte 2016 durch die Niederschläge während der Bergung sehr gering und lagen im Mittel mit 26,8 % sogar unter den TM-Gehalten des potenziell erntbaren Maisstrohs (*Tabelle 26*). Signifikante Unterschiede im TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs ergaben sich auch für die Schwadtechniken. So wurden mit dem zweistufigen Ernteverfahren Mais Star\* Collect geringere TM-Gehalte erzielt als mit den dreistufigen Verfahren. Die TM-Gehalte beim Einsatz des Mais Star\* Collect waren dabei 2014 signifikant geringer, 2015 aufgrund der höheren Standardabweichungen nur zahlenmäßig geringer. 2016 ergaben sich andere Zusammenhänge, wobei die TM-Gehalte hier vorwiegend durch die Niederschlagsmenge beeinflusst waren.

Signifikante, aber mit einem absoluten Unterschied von 1,1 % für die spätere Verwertung des Maisstrohs eher zu vernachlässigende, Unterschiede beim TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs konnten auch für die Bergungsart ermittelt werden. Wurde das Maisstroh mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler geborgen, konnten signifikant geringere TM-Gehalte im Vergleich zu einer Bergung mit dem Kurzschnittladewagen festgestellt werden – unabhängig von der eingesetzten Schwadtechnik ( $p\text{-Wert Schwadtechnik} \times \text{Bergungsart} > 0,1$ ).

Der im Versuchsjahr 2014 zusätzlich untersuchte Faktor Feldliegezeit hatte keinen Einfluss auf den TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs. So ergaben sich auch bei der langen Feldliegezeit trotz der verzögerten Ernte im Mittel mit 41,9 % nahezu gleiche TM-Gehalte wie bei der kurzen Feldliegezeit mit 41,4 % (Daten nicht gezeigt). Der zusätzliche Anbau der beiden Sorten SY Talisman und KWS 9361 im Versuchsjahr 2015 hatte jedoch, trotz der starken Nachrocknung des Maisstrohs während der Erntekette, einen tendenziellen ( $p = 0,0764$ ) Effekt auf den TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs. Konform zu den TM-Gehalten des potenziell erntbaren Maisstrohs vor dem Dreschen

(Tabelle 27) wurden für die Sorte SY Talisman etwas höhere TM-Gehalte (65,4 %) und für die Sorte KWS 9361 etwas geringere TM-Gehalte (53,6 %) als bei der Sorte LG 32.58 (59,5 %) ermittelt (Daten nicht gezeigt).

Der Rohaschegehalt des abgefahrenen Maisstrohs, der als Maß für die Verschmutzung bzw. den Erdanhang am Erntegut verwendet wird und möglichst gering sein sollte, lag im Versuchsmittel bei 7,6 % in der TM. Signifikante Unterschiede waren im Wesentlichen auf die Erntebedingungen im jeweiligen Versuchsjahr zurückzuführen. Unter den sehr trockenen Verhältnissen im Versuchsjahr 2015 waren dabei die Rohaschegehalte mit 6,0 % am geringsten, unter dem Einfluss der Niederschläge während der Bergung und der insgesamt sehr hohen abgefahrenen Stroherträge im Versuchsjahr 2016 (Tabelle 28) mit 9,2 % am höchsten. Signifikante Effekte der Schwadtechniken, die sich z. T. in der Funktionsweise der Strohaufnahme beim Verfahrensschritt Schwaden unterscheiden (Tabelle 17), wurden nur 2015 ermittelt. Dabei erzielte das zweistufige Verfahren Mais Star\* Collect signifikant geringere Rohaschegehalte. Auch in den Versuchsjahren 2014 und 2016 erreichte der Mais Star\* Collect mit der unmittelbaren Schwadablage die geringsten Rohaschegehalte. Die beiden modifizierten Schlegelmulcher, der BioChipper und der Schwadhäcksler UP-6400, wie auch der Bandschwader Merge Maxx 900/902 lagen trotz unterschiedlicher Aufnahmeprinzipien auf einem vergleichbaren Niveau.

Die nachfolgende Bergung der Strohschwaden mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. dem Kurzschnittdewagen führte zu keiner Differenzierung im Rohaschegehalt des geborgenen Maisstrohs. Ein Einfluss der Feldliegezeit (2014) bzw. der Sorte (2015) (Daten nicht gezeigt) lag ebenfalls nicht vor.

Tabelle 31: TM- und Rohaschegehalte des abgefahrenen Maisstrohs in Abhängigkeit vom Ernteverfahren für die Varianten „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“ im Erntetechnikversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bergungsarten; unterschiedliche griechische Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

	TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs (%)				Rohaschegehalt des abgefahrenen Maisstrohs (% der TM)			
	2014 n = 8	2015 n = 8	2016 n = 8	2014-2016 n = 24	2014 n = 8	2015 n = 8	2016 n = 8	2014-2016 n = 24
BioC	43,7 $\pm$ 1,4 a	61,3 $\pm$ 5,7 a	25,2 $\pm$ 1,0 b	<b>43,4 <math>\pm</math> 15,4 a</b>	8,1 $\pm$ 2,9 a	6,7 $\pm$ 1,1 a	9,3 $\pm$ 1,3 a	<b>8,0 <math>\pm</math> 2,2 a</b>
SchwH	42,8 $\pm$ 2,1 a	60,4 $\pm$ 10,2 a			8,4 $\pm$ 1,8 a	6,8 $\pm$ 1,0 a		
MSCollect	37,0 $\pm$ 1,3 b	56,1 $\pm$ 6,9 a	30,0 $\pm$ 1,2 a	<b>41,0 <math>\pm</math> 11,9 b</b>	6,3 $\pm$ 1,1 a	5,1 $\pm$ 0,6 b	8,6 $\pm$ 2,6 a	<b>6,7 <math>\pm</math> 2,2 a</b>
MergeM	42,0 $\pm$ 1,5 a	60,1 $\pm$ 4,3 a	25,2 $\pm$ 1,1 b	<b>42,4 <math>\pm</math> 14,8 ab</b>	8,1 $\pm$ 2,6 a	6,1 $\pm$ 0,6 a	9,5 $\pm$ 4,2 a	<b>7,9 <math>\pm</math> 3,1 a</b>
p-Wert (Schwadtechnik)	< 0,0001	> 0,1	0,0001	<b>0,0187</b>	> 0,1	0,0078	> 0,1	<b>&gt; 0,1</b>
SFH	n = 16 40,9 $\pm$ 2,9 A	n = 16 58,0 $\pm$ 7,3 B	n = 12 27,2 $\pm$ 2,5 A	n = 36 <b>41,7 <math>\pm</math> 13,2 B</b>	n = 16 7,9 $\pm$ 2,2 A	n = 16 6,1 $\pm$ 0,8 A	n = 12 9,3 $\pm$ 3,4 A	n = 36 <b>7,6 <math>\pm</math> 2,7 A</b>
KLW	41,9 $\pm$ 3,2 A	60,9 $\pm$ 6,7 A	26,4 $\pm$ 2,6 A	<b>42,8 <math>\pm</math> 14,8 A</b>	7,6 $\pm$ 2,4 A	6,2 $\pm$ 1,3 A	9,1 $\pm$ 2,2 A	<b>7,5 <math>\pm</math> 2,4 A</b>
p-Wert (Bergungsart)	0,0520	0,0244	0,0549	<b>0,0446</b>	> 0,1	> 0,1	> 0,1	<b>&gt; 0,1</b>
<b><math>\bar{x}</math> (ohne SchwH)</b>	n = 24 <b>40,9 <math>\pm</math> 3,2 <math>\beta</math></b>	n = 24 <b>59,1 <math>\pm</math> 5,9 <math>\alpha</math></b>	n = 24 <b>26,8 <math>\pm</math> 2,5 <math>\gamma</math></b>	n = 72 <b>42,3 <math>\pm</math> 13,9</b>	n = 24 <b>7,5 <math>\pm</math> 2,4 <math>\beta</math></b>	n = 24 <b>6,0 <math>\pm</math> 1,0 <math>\gamma</math></b>	n = 24 <b>9,2 <math>\pm</math> 2,8 <math>\alpha</math></b>	n = 72 <b>7,6 <math>\pm</math> 2,5</b>
p-Wert (Jahr)				<b>&lt; 0,0001</b>				<b>0,0039</b>
p-Werte (Schwadtechnik X Bergungsart)				<b>&gt; 0,1</b>				<b>0,0627</b>
p-Werte (Jahr X Schwadtechnik)				<b>&lt; 0,0001</b>				<b>&gt; 0,1</b>
p-Werte (Jahr X Bergungsart)				<b>0,0142</b>				<b>&gt; 0,1</b>

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902; SFH: selbstfahrender Feldhäcksler; KLW: Kurzschnittladewagen

### 5.2.5 oTM-Ertrag des abgefahrenen Maisstrohs

Bei einem mittleren Rohaschegehalt von 7,6 % (Tabelle 31) und einem im Mittel abgefahrenen Strohertrag von 52,9 dt ha<sup>-1</sup> (Tabelle 28) ergibt sich rechnerisch ein organischer TM-Ertrag von 48,8 dt ha<sup>-1</sup> für das abgefahrene Maisstroh, der bei einer Nutzung in der Biogasanlage für die Methanbildung zur Verfügung steht (Tabelle 32).

Da für die Berechnung des organischen Maisstrohertrages in erster Linie der abgefahrene Strohertrag von Bedeutung ist, decken sich die Ergebnisse mit denen des abgefahrenen Strohertrages (Tabelle 28). Die Reihung der Erträge in Abhängigkeit von den Schwadtechniken als auch in Abhängigkeit von den Versuchsjahren ist dabei identisch zu den abgefahrenen Stroherträgen.

*Tabelle 32: Organischer Maisstrohertrag des abgefahrenen Maisstrohs in Abhängigkeit vom Ernteverfahren für die Varianten „kurze Feldliegezeit und Sorte LG 32.58“ im Erntetechnikversuch (Mittelwerte ± Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bergungsarten; unterschiedliche griechische Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )*

<b>oTM-Ertrag des abgefahrenen Maisstrohs</b> (dt ha <sup>-1</sup> )				
	2014 n = 8	2015 n = 8	2016 n = 8	2014-2016 n = 24
BioC	42,2 ± 5,0 b	43,6 ± 4,0 ab	58,6 ± 6,5 a	<b>48,1 ± 9,1 a</b>
SchwH	39,9 ± 4,2 b	38,9 ± 4,6 b		
MSCollect	46,0 ± 4,1 a	49,7 ± 8,6 a	56,1 ± 3,1 a	<b>50,6 ± 7,0 a</b>
MergeM	46,9 ± 9,0 a	41,0 ± 5,4 b	55,2 ± 5,1 a	<b>47,7 ± 8,7 a</b>
p-Wert (Schwadtechnik)	0,0064	0,0224	> 0,1	<b>0,0990</b>
	n = 16	n = 16	n = 12	n = 36
SFH	42,5 ± 4,3 A	43,2 ± 8,1 A	57,2 ± 5,0 A	<b>48,6 ± 8,5 A</b>
KLW	44,9 ± 7,8 A	43,4 ± 5,9 A	56,1 ± 5,3 A	<b>49,0 ± 8,2 A</b>
p-Wert (Bergungsart)	> 0,1	> 0,1	> 0,1	<b>&gt; 0,1</b>
	n = 24	n = 24	n = 24	n = 72
$\bar{x}$ (ohne SchwH)	<b>45,0 ± 6,5 <math>\beta</math></b>	<b>44,8 ± 7,1 <math>\beta</math></b>	<b>56,6 ± 5,1 <math>\alpha</math></b>	<b>48,8 ± 8,3</b>
p-Wert (Jahr)				<b>&lt; 0,0001</b>
p-Werte (Schwadtechnik × Bergungsart)				<b>&gt; 0,1</b>
p-Werte (Jahr × Schwadtechnik)				<b>0,0115</b>
p-Werte (Jahr × Bergungsart)				<b>&gt; 0,1</b>

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902; SFH: selbstfahrender Feldhäcksler; KLW: Kurzschnittdewagen

### 5.2.6 Maschinenspezifische Kennzahlen der Ernteverfahren

Um die Fahr- und Arbeitsweise der Schwadtechniken in den einzelnen Versuchsjahren zu erfassen und zugleich Informationen und Erklärungsansätze für die ermittelten Maisstroherträge zu erhalten, wurden als maschinenspezifische Kennzahlen die effektive Arbeitsbreite, die Schwadbreite und -höhe und die Stoppellängen gemessen. Diese sind im Folgenden für die Faktorkombinationen Jahr x Schwadtechnik dargestellt (der Schwadhäcksler ist in der Statistik nicht enthalten, da keine Ergebnisse für 2016 vorliegen).

Ist die effektive Arbeitsbreite (tatsächlich realisierte Arbeitsbreite) geringer als die technische Arbeitsbreite (*Tabelle 17*), können unter Versuchsbedingungen die auf Schwad gelegten Stroherträge beeinflusst sein, weil dann möglicherweise die festgesetzte Parzellenbreite nicht ausgeschöpft wurde. Bei den Techniken BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400, die einen Doppelschwad durch Gegenfahrt erzeugen, wurde eine gute Übereinstimmung der effektiven Arbeitsbreiten mit den technischen Arbeitsbreiten erreicht, sodass von genauen Anschlussfahrten in den Parzellen auszugehen ist (*Tabelle 33*). Bei den Schwadtechniken Mais Star\* Collect und dem Merge Maxx 900/902 (jeweils mittige Schwadablage) wurden in Einzeljahren um bis zu 0,5 m bzw. 0,8 m abweichende Arbeitsbreiten ermittelt. Beim Merge Maxx 900/902 wurde 2016 sogar eine signifikant höhere Arbeitsbreite als beim Einsatz in 2014 und 2015 erreicht. Mögliche Gründe sind ungenaue Anschlussfahrten beim Säen oder beim Einsatz der Schwadtechniken oder auch eine nicht genau mittige Ablage des Schwades. Da der Mais Star\* Collect als modifizierter Pflücker an die Verteilung der Maisreihen gebunden ist, ist jedoch sichergestellt, dass die ermittelten Arbeitsbreiten keinen Effekt auf den geschwadeten Ertrag haben.

*Tabelle 33: Effektive Arbeitsbreite (m) nach dem Einsatz der Schwadtechniken im Erntetechnikversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Faktorkombinationen Jahr  $\times$  Schwadtechnik; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )*

effektive Arbeitsbreite												
(m)												
	2014			2015 n = 4			2016			2014-2016 n = 12		
BioC	12,0	$\pm 0,2$	a	12,2	$\pm 0,2$	a	12,2	$\pm 0,2$	a	<b>12,1</b>	<b><math>\pm 0,2</math></b>	<b>A</b>
SchwH	12,8	$\pm 0,2$		12,9	$\pm 0,1$							
MSCollect	6,1	$\pm 0,1$	d	6,5	$\pm 0,2$	d	6,1	$\pm 0,1$	d	<b>6,2</b>	<b><math>\pm 0,2</math></b>	<b>C</b>
MergeM	8,5	$\pm 0,3$	c	8,3	$\pm 0,0$	c	8,9	$\pm 0,1$	b	<b>8,6</b>	<b><math>\pm 0,3</math></b>	<b>B</b>
p-Wert (Schwadtechnik)										< 0,0001		
p-Wert (Jahr)										0,0215		
p-Werte (Jahr $\times$ Schwadtechnik)										0,0003		

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902

In welcher Schwadbreite das Maisstroh beim Schwaden abgelegt wird, war für die meisten Schwadtechniken zu Versuchsbeginn nicht bekannt (*Tabelle 17*), hat jedoch gegebenenfalls Einfluss auf die nachfolgende Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. dem Kurzschnittladewagen. Beim BioChipper und dem Schwadhäcksler UP-6400 wird die Schwadbreite aufgrund der seitlichen Schwadablage vor allem durch die Position der Anschlussfahrt bestimmt. Die größere Schwadbreite beim BioChipper im Versuchsjahr 2016 konnte allerdings nicht auf eine größere Arbeitsbreite (also einen Versatz bei der Anschlussfahrt) (*Tabelle 33*) zurückgeführt werden. Die größten Schwadbreiten wurden beim Einsatz des Mais Star\* Collect ermittelt, die 2014 und 2015 sogar über 2 m lagen, was jedoch hauptsächlich durch die breitere Ablage der Spindeln und Lieschen vom Radialverteiler des Mähdreschers verursacht wurde. Durch die höheren Windgeschwindigkeiten während der Ernte im Versuchsjahr 2015, war die Ablage mit 2,3 m, vermutlich aufgrund von Verwehungen, noch breiter, sodass die maximale Aufnahmebreite der Pick-up der beiden Kurzschnittladewagen (2,0 bzw. 2,1 m) geringfügig überschritten wurde und die Bergung beeinträchtigt war. Im Versuchsjahr 2016 hingegen, konnte durch den Einsatz eines anderen Mähdreschers der Radialverteiler komplett abgebaut werden, weshalb die Schwadbreiten mit 1,4 m

signifikant geringer als in den beiden Vorjahren waren. Auch beim Merge Maxx 902 wurde 2015 bei höheren Windeinflüssen eine größere Schwadbreite ermittelt.

*Tabelle 34: Schwadbreite (m) nach dem Einsatz der Schwadtechniken im Erntetechnikversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Faktorkombinationen Jahr  $\times$  Schwadtechnik; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )*

<b>Schwadbreite</b>												
(m)												
	2014			2015			2016			2014-2016		
				n = 4						n = 12		
BioC	1,5	$\pm 0,1$	de	1,5	$\pm 0,1$	de	1,8	$\pm 0,0$	bcd	<b>1,6</b>	<b><math>\pm 0,2</math></b>	<b>C</b>
SchwH	1,8	$\pm 0,2$		1,9	$\pm 0,1$							
MSCollect	2,1	$\pm 0,1$	ab	2,3	$\pm 0,2$	a	1,4	$\pm 0,1$	e	<b>1,9</b>	<b><math>\pm 0,4</math></b>	<b>A</b>
MergeM	1,7	$\pm 0,2$	cde	1,9	$\pm 0,1$	bc	1,6	$\pm 0,1$	cde	<b>1,7</b>	<b><math>\pm 0,2</math></b>	<b>B</b>
p-Wert (Schwadtechnik)										< 0,0001		
p-Wert (Jahr)										< 0,0001		
p-Werte (Jahr $\times$ Schwadtechnik)										< 0,0001		

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902

Neben der Schwadbreite kann auch die Schwadhöhe einen Einfluss auf die Bergung des Maisstrohs haben und sie erlaubt gegebenenfalls in Kombination mit der Schwadbreite Rückschlüsse auf die Menge des auf Schwad gelegten Maisstrohs.

Bei den beiden Schwadtechniken BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400 waren die Schwadhöhen zwischen den Versuchsjahren 2014 und 2015 jeweils vergleichbar (*Tabelle 35*). Beim BioChipper wurden jedoch 2016 signifikant größere Schwadhöhen als 2014 und 2015 erreicht, obwohl das Maisstroh 2016 zu einem breiteren Schwad abgelegt worden war (*Tabelle 34*). Die größeren Schwadabmessungen 2016 decken sich dabei mit den größeren auf Schwad gelegten Stroherträgen beim BioChipper (*Tabelle 28*). Ähnliches gilt für den Merge Maxx 900/902, der 2016 konform zu den höchsten auf Schwad gelegten Stroherträgen auch die größten Schwadhöhen erreichte, und umgekehrt 2015 bei den geringsten auf Schwad gelegten Stroherträgen auch die kleinsten Schwadhöhen (*Tabelle 28*). Auch die im Mittel des jeweiligen Versuchsjahres (über alle Schwadtechniken) erreichten Schwadhöhen von 32 cm (2014 und 2015) und 40 cm sind konform zu den auf Schwad gelegten Stroherträgen in den Einzeljahren (*Tabelle 28*).

*Tabelle 35: Schwadhöhe (cm) nach dem Einsatz der Schwadtechniken im Erntetechnikversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Faktorkombinationen Jahr  $\times$  Schwadtechnik; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )*

		Schwadhöhe (cm)											
		2014			2015 n = 4			2016			2014-2016 n = 12		
BioC		35	$\pm 3$	b	36	$\pm 3$	b	45	$\pm 3$	a	<b>38</b>	$\pm 5$	<b>A</b>
SchwH		29	$\pm 2$		33	$\pm 2$							
MSCollect		23	$\pm 2$	d	27	$\pm 3$	cd	28	$\pm 4$	c	<b>26</b>	$\pm 4$	<b>B</b>
MergeM		37	$\pm 1$	b	34	$\pm 2$	b	46	$\pm 4$	a	<b>39</b>	$\pm 6$	<b>A</b>
p-Wert (Schwadtechnik)											< 0,0001		
p-Wert (Jahr)											< 0,0001		
p-Werte (Jahr $\times$ Schwadtechnik)											0,0005		

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902

Die Länge der Stoppeln nach dem Einsatz der Schwadtechniken gibt Auskunft über die Arbeitshöhe der einzelnen Techniken beim Schwaden und kann einen Einfluss auf den Strohertrag haben. So verringert sich bei höheren Stoppellängen der Anteil des potenziell erntbaren Maisstrohs, der auf Schwad gelegt werden kann (nicht abgetrennte Stoppeln können nicht geschwadet und damit auch nicht geborgen werden). Je nach Funktionsweise der Schwadtechnik wird darüber hinaus auch der Verfahrensschritt Schwaden bzw. die nachfolgende Aufnahme der Strohschwade mit der Pick-up beeinflusst. Eine Besonderheit stellt in diesem Fall der Merge Maxx 900/902 dar, weil die Stoppellängen hier nicht von der Schwadtechnik beeinflusst werden, sondern bereits beim Dreschen durch die Arbeitshöhe des Mähdreschers festgelegt sind (*Tabelle 17*). Die Ergebnisse verdeutlichen, dass 2015 die Arbeitshöhe des Mähdreschers signifikant höher war und mit 29 cm Stoppellänge fast doppelt so hoch wie in den anderen beiden Versuchsjahren, in denen bewusst tief gedroschen worden war (2014 aufgrund des z. T. lagernden Maisbestandes; 2016 um den Einsatz des Merge Maxx 902 zu optimieren) (*Tabelle 36*). Im Versuchsjahr 2015 erzielte der Merge Maxx 902 auch zugleich die geringsten auf Schwad gelegten Stroherträge (*Tabelle 28*). Die bewusst tief gehaltene Arbeitshöhe im Versuchsjahr 2016 führte auch beim Mais Star\* Collect zu signifikant geringeren Stoppellängen. Beim BioChipper (und auch beim Schwadhäcksler UP-6400)

wurden die Stoppellängen beim Schwaden verringert und waren folglich mit einer mittleren Länge von 10 cm signifikant niedriger als bei den anderen Techniken.

Naheliegender ist ein positiver Zusammenhang zwischen der Stoppellänge und dem ermittelten Stoppelertrag, der ab 2015 erhoben wurde (*Tabelle 28*). Vergleichbar zu den Stoppellängen konnten dabei 2015 deutliche Unterschiede zwischen dem BioChipper einerseits und dem Mais Star\* Collect bzw. dem Merge Maxx 900/902 andererseits gezeigt werden. Und ebenso waren im Versuchsjahr 2016 konform zu den nur geringfügig (tendenziell) unterschiedlichen Stoppellängen auch keine signifikanten Unterschiede im Stoppelertrag festgestellt worden. Mit dem Direct Disc 500 wurde in allen Maisreihen, die nicht vom Mähdrescher (beim Dreschen auf Kolbenhöhe) überfahren worden waren, eine mittlere Stoppellänge von 21 cm erreicht.

*Tabelle 36: Stoppellänge (cm) nach dem Einsatz der Schwadtechniken im Erntetechnikversuch (Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Faktorkombinationen Jahr  $\times$  Schwadtechnik; unterschiedliche Großbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken; unterschiedliche griechische Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsjahren; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )*

	Stoppellänge (cm)											
	2014			2015 n = 4			2016			2014-2016 n = 12		
BioC	8	$\pm 1$	e	10	$\pm 5$	e	12	$\pm 2$	cde	<b>10</b>	$\pm 3$	<b>C</b>
SchwH	10	$\pm 1$		12	$\pm 1$							
MSCollect	25	$\pm 2$	a	27	$\pm 2$	a	19	$\pm 1$	b	<b>23</b>	$\pm 4$	<b>A</b>
MergeM	16	$\pm 2$	bc	29	$\pm 2$	a	14	$\pm 2$	bcd	<b>19</b>	$\pm 7$	<b>B</b>
DirectD							21	$\pm 0$				
p-Wert (Schwadtechnik)										< 0,0001		
p-Wert (Jahr)										< 0,0001		
p-Werte (Jahr $\times$ Schwadtechnik)										< 0,0001		

n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; SchwH: Schwadhäcksler UP-6400; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902; DirectD: Direct Disc

### 5.2.7 Maisstroh-Häcksellängen nach der Ernte

Um den Zerkleinerungsgrad des Maisstrohs bewerten zu können, wurden die Häcksellängen mit einer Trommelsiebmaschine ermittelt, indem die Massenanteile an sechs verschiedenen Größenfraktionen bestimmt wurden. Da eine Zerkleinerung des Maisstrohs sowohl beim Schwaden durch die Schwadtechnik (mit Ausnahme des Merge Maxx 900/902) als auch bei der Bergung durch die Aufnahme mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. dem Kurzschnittladewagen erfolgen kann, wurden die Häcksellängen des geschwadeten Maisstrohs als auch des abgefahrenen Maisstrohs erfasst. Da die Schwadtechnik Merge Maxx 900/902 das Maisstroh beim Schwaden nicht aktiv zerkleinert, spiegelt die Häcksellänge des auf Schwad gelegten Maisstrohs bei dieser Technik im Wesentlichen den nach dem Drusch vorliegenden Zerkleinerungsgrad wider.

Bei dem auf Schwad gelegten Maisstroh wurden im dreijährigen Mittel für alle sechs Größenfraktionen hochsignifikante Effekte des Faktors Schwadtechnik (p-Werte für die Schwadtechnik jeweils  $< 0,0001$ ) ermittelt, sodass sich für die Schwadtechniken eine klare Differenzierung hinsichtlich der Häcksellängen ergab (*Abbildung 7*). Ein sehr deutlicher Unterschied bestand zwischen dem Merge Maxx 900/902 und den anderen drei Schwadtechniken, die das Maisstroh beim Schwaden aktiv zerkleinern. Insbesondere die Anteile der großen Größenfraktionen (über 45 mm) waren mit insgesamt 42 % signifikant höher als bei den drei anderen Schwadtechniken mit 16 - 28 %. Der modifizierte Pflücker Mais Star\* Collect erreichte also eine stärkere Zerkleinerung als die gängigen Maispflücker (s. Kapitel 4.4.1) (gleichzusetzen mit den Ergebnissen des Merge Maxx 900/902).

Auch zwischen den drei Schwadtechniken BioChipper, Schwadhäcksler UP-6400 und dem Mais Star\* Collect konnten in den vier Größenfraktionen bis 45 mm jeweils signifikant unterschiedliche Mengenanteile bestätigt werden. Die stärkste Zerkleinerung erzielte der Schwadhäcksler UP-6400.

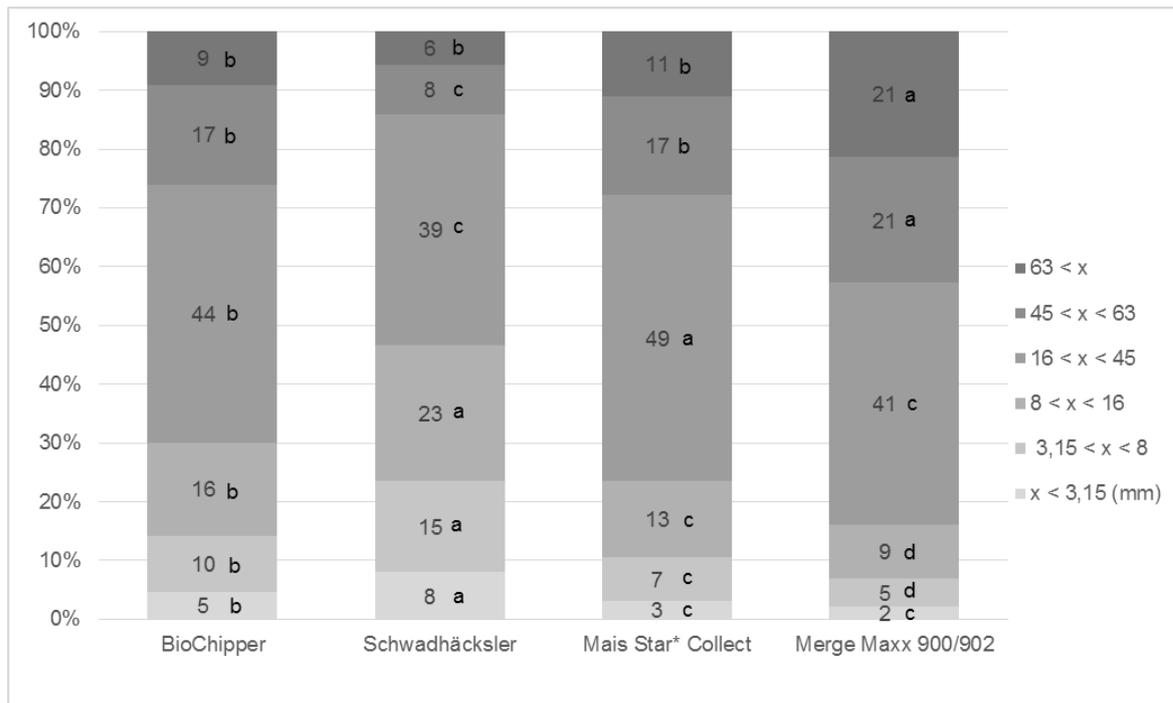


Abbildung 7: Mengenanteile (%) des Maisstrohs an den sechs Größenfraktionen (mm) nach dem Verfahrensschritt Schwaden im Erntetechnikversuch (Mittelwerte über die Jahre 2014 - 2016;  $n = 12$ ; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Größenfraktion zwischen den Schwadtechniken; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

Unabhängig von der nachfolgenden Bergung des Maisstrohs mit einem selbstfahrenden Feldhäcksler oder einem Kurzschnittladewagen, wurde bei allen Schwadtechniken durch den Verfahrensschritt Bergen eine zusätzliche Zerkleinerung des Maisstrohs erreicht, sodass der Anteil der Größenfraktionen über 45 mm bei maximal 15 % lag (Abbildung 8). Bei allen Schwadtechniken führte die Bergung des Maisstrohs mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler zu signifikant anderen Mengenanteilen als eine Bergung mit dem Kurzschnittladewagen. Häcksellängen über 63 mm waren beim Einsatz des selbstfahrenden Feldhäckslers nicht mehr vorhanden und die Größenfraktion über 45 mm hatte einen maximalen Anteil von 1 %.

Die zusätzliche Zerkleinerung durch den Kurzschnittladewagen veränderte jedoch die großteils signifikante Differenzierung zwischen den Schwadtechniken nicht und es ergab sich im Wesentlichen das gleiche Bild wie bei der Zerkleinerung nach dem Verfahrensschritt Schwaden (Abbildung 7). Wurde hingegen der selbstfahrende Feldhäcksler für die Bergung des Maisstrohs eingesetzt, waren die Unterschiede zwischen den Schwadtechniken nahezu ausgeglichen bzw. unbedeutend. Lediglich beim Schwadhäcksler UP-6400 zeichnete sich auch nach dem Einsatz des selbstfahrenden Feldhäckslers noch eine signifikant stärkere Zerkleinerung im Vergleich zu den anderen drei Schwadtechniken ab.

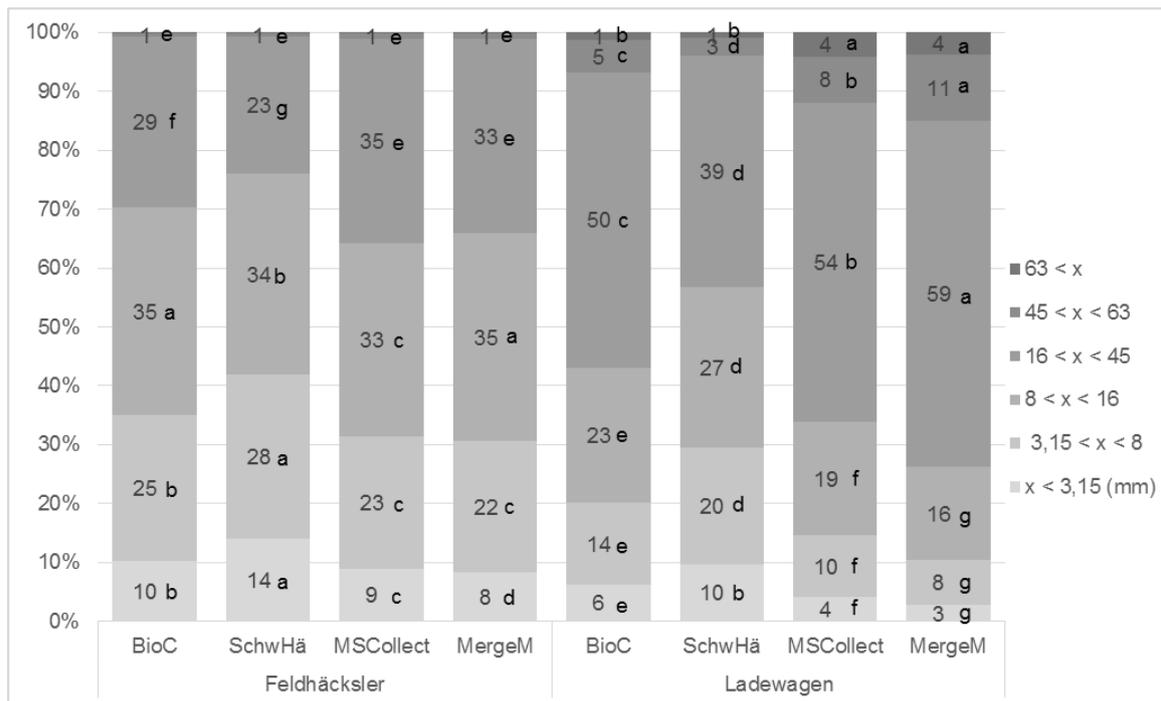


Abbildung 8: Mengenanteile (%) des Maisstrohs an den sechs Größenfraktionen (mm) nach dem Verfahrensschritt Bergen im Erntetechnikversuch (Mittelwerte über die Jahre 2014 - 2016;  $n = 12$ ; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Größenfraktion zwischen den Faktorkombinationen Schwadtechnik  $\times$  Bergungsart; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

Eine längere Feldliegezeit des Maisstrohs bewirkte keinen signifikanten Unterschied in der Zerkleinerung des Maisstrohs, weder bei dem auf Schwad gelegten Maisstroh noch bei dem abgefahrenen Maisstroh. Das galt ausnahmslos für alle Größenfraktionen (Daten nicht gezeigt). Da ebenso kein Effekt der Sorte auf die Zerkleinerung des Maisstrohs erwartet wurde, wurde im Versuchsjahr 2015 auf die Analyse der Häcksellängen für die Proben der Sorten SY Talisman und KWS 9361 verzichtet.

### 5.2.8 Ergebnisse des Direct Disc (nur 2016)

Bei dem im Versuchsjahr 2016 einmalig getesteten Ernteverfahren Direct Disc (als Erntevorsatz am selbstfahrenden Feldhäcksler) wird das Maisstroh (die kolbenlosen Restpflanzen) direkt aus dem stehenden Bestand geerntet, sodass der Verfahrensschritt Schwaden entfällt und der auf Schwad gelegte Strohertrag nicht ermittelt werden kann. Mit dem Direct Disc wurde ein Maisstrohertrag von  $42,0 \text{ dt ha}^{-1}$  abgefahren, der im Vergleich zu den anderen Schwadtechniken signifikant geringer war und nur knapp 2/3 der Stroherträge erreichte (Tabelle 37). Signifikant höher war beim Direct Disc jedoch die

Stoppelmenge, die mit 22,5 dt ha<sup>-1</sup> ein Vielfaches im Vergleich zu den Stoppelmengen der anderen drei Schwadtechniken betrug. Grund dafür war jedoch nicht die Arbeitshöhe des Direct Disc 500, die mit 21 cm (*oppellänge von 21 cm erreicht*).

*Tabelle 36)* vergleichbar zur Arbeitshöhe des Mais Star\* Collect war, sondern die vom Mährescher beim Dreschen (auf Kolbenhöhe) überfahrenen zwei Maisreihen, die vom Direct Disc 500 nicht mehr geerntet werden konnten. Mit nur 5,5 % Rohaschegehalt war die Verschmutzung des abefahrenen Maisstrohs beim Direct Disc wesentlich geringer als bei den anderen drei Schwadtechniken, was jedoch aufgrund der hohen Standardabweichungen statistisch nicht abgesichert werden konnte.

*Tabelle 37: Vergleich des Direct Disc mit den anderen Schwadtechniken im Versuchsjahr 2016 im Erntetechnikversuch (Mittelwerte ± Standardabweichung; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Spalte zwischen den Schwadtechniken; Student-Newman-Keuls-Test, α = 0,05)*

	abgefahrener Stroh-TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )			TM-Ertrag der Stoppeln (dt ha <sup>-1</sup> )			Rohaschegehalt im abefahrenen Maisstroh (% der TM)		
	n = 8 <sup>1)</sup>			n = 8 <sup>1)</sup>			n = 8 <sup>1)</sup>		
BioC	64,7	± 7,2	a	4,2	± 1,9	b	9,3	± 1,3	a
MSCollect	61,5	± 4,4	a	5,7	± 0,7	b	8,6	± 2,6	a
MergeM	61,1	± 6,3	a	6,3	± 1,5	b	9,5	± 4,2	a
DirectD	42,0	± 7,0	b	22,5	± 4,6	a	5,5	± 0,6	a
p-Wert (Schwadtechnik)	p < 0,0001			p < 0,0001			> 0,1		
	n = 28			n = 28			n = 28		
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>59,5</b>	<b>± 9,4</b>		<b>7,8</b>	<b>± 6,5</b>		<b>8,6</b>	<b>± 2,9</b>	

<sup>1)</sup> Ausnahme beim Direct Disc: n = 4 (keine Kurzschnittladewagen-Varianten); n = Anzahl an Beobachtungen; BioC: BioChipper; MSCollect: Mais Star\* Collect; MergeM: Merge Maxx 900/902; DirectD: Direct Disc 500

In Bezug auf den Zerkleinerungsgrad des geborgenen Maisstrohs unterschied sich das Direct Disc 500 lediglich bei den beiden kleinsten Größenfraktionen (< 3,15 mm und zwischen 3,15 und 8 mm) signifikant von den Mengenanteilen, die mit dem BioChipper in Kombination mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler erreicht wurden, wohingegen die Mengenanteile der Größenfraktionen über 8 mm gleich waren (*Abbildung 9*). Verglichen mit dem Mais Star\* Collect und dem Merge Maxx wurden aber für die drei mengenmäßig größten Fraktionen (3,15 – 16 mm) signifikante Unterschiede zum Direct Disc 500 festgestellt.

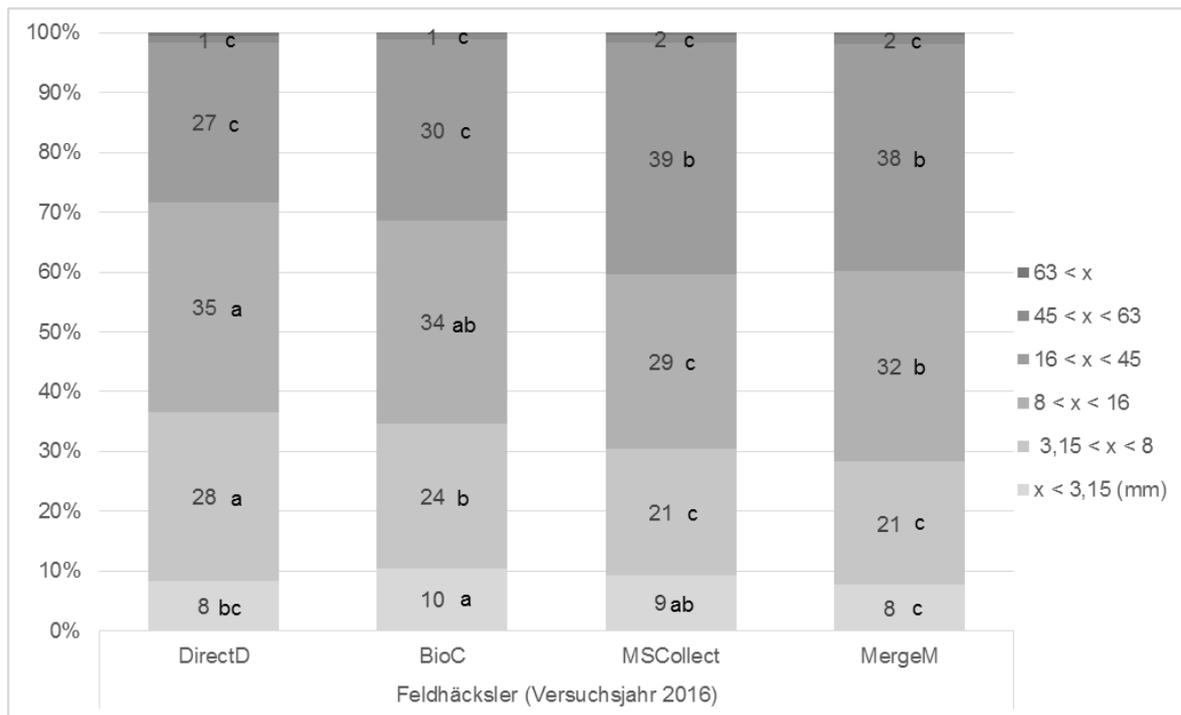


Abbildung 9: Mengenanteile (%) des Maisstrohs an den sechs Größenfraktionen (mm) nach dem Verfahrensschritt Bergen im Erntetechnikversuch (Mittelwerte des Versuchsjahres 2016;  $n = 4$ ; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Größenfraktion zwischen den Schwadtechniken; Student-Newman-Keuls-Test,  $\alpha = 0,05$ )

### 5.3 Vergleich der Erträge, Inhaltsstoffe und Methanausbeuten aus beiden Versuch

Zur Ermittlung des pflanzenbaulichen und technologischen Potenzials wurden ertrags- und qualitätsbestimmende Parameter in zwei eigenständigen Versuche erhoben. Dabei wurden die Parameter in den standardisierten Sorten- und Ernteterminversuchen am potenziell erntbaren Maisstroh erhoben, unter den praxisnahen Bedingungen der Erntetechnikversuche jedoch am abgefahrenen Maisstroh. *Tabelle 38* stellt die Ergebnisse der wesentlichen Untersuchungsparameter beider Versuche gegenüber.

Beim Anbau von Körnermais unter den praxisnahen Bedingungen des Erntetechnikversuches, wurde in Bezug auf den Kornertrag ein vergleichbares Ertragsniveau wie beim Sorten- und Ernteterminversuch erreicht. Der TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs war jedoch beim Erntetechnikversuch um rund 6 dt ha<sup>-1</sup>, geringer, obwohl beim Sorten- und Ernteterminversuch die Stoppeln (12,3 dt ha<sup>-1</sup>; *Tabelle 23*) aus methodischen Gründen nicht berücksichtigt waren. Die TM-Gehalte von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh waren jeweils vergleichbar. Durch die Variation der Sorten und Erntetermine war die Schwankungsbreite der Ertragsparameter von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh im Sorten- und Ernteterminversuch, gemessen am Variationskoeffizienten der einzelnen Ertragsparameter, wesentlich größer als beim Erntetechnikversuch.

Unter Berücksichtigung aller geprüften Ernteverfahren wurden in den Jahren 2014- 2016 im Erntetechnikversuch vom potenziell erntbaren Maisstrohertrag in Höhe von 107,3 dt ha<sup>-1</sup> lediglich 57,6 dt ha<sup>-1</sup> auf Schwad gelegt und davon 49,6 dt ha<sup>-1</sup> abgefahren. Die Ernteverluste in den beiden Verfahrensschritten Schwaden und Bergen waren also höher als der abgefahrene Strohertrag und die Abfuhrate lag folglich unter 50 %.

Die TM-Gehalte des abgefahrenen Maisstrohs lagen im Mittel bei 46,8 % und unterschieden sich deutlich von den TM-Gehalten des potenziell erntbaren Maisstrohs. Auch die Inhaltsstoffe, die beim Sorten- und Ernteterminversuch für das potenziell erntbare Maisstroh, beim Erntetechnikversuch jedoch nach der Strohbergung im abgefahrenen Maisstroh (für einen geringeren Probenumfang) ermittelt wurden, unterschieden sich z.T. sehr stark. So waren die Zuckergehalte nach der Bergung um fast 65 % geringer als beim potenziell erntbaren Maisstroh. Umgekehrt waren die Stärkegehalte, die Fasergehalte bzw. Cellulosegehalte und die Rohaschegehalte beim abgefahrenen Maisstroh höher.

Auch die Methanausbeuten des abgefahrenen Maisstrohs waren im Mittel mit 314 l CH<sub>4</sub> (kg oTM)<sup>-1</sup> um 10 l als beim potenziell erntbaren Maisstroh im Sorten- und

---

Ernteterminversuch. Auf der Grundlage des potenziell erntbaren Maisstrohertrages wurde ein mittlerer Methanhektarertrag von  $3509 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  als pflanzenbauliches Potenzial erzielt. Dagegen wurde nach der Strohbergung ein technologisches Potenzial von nur  $1510 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  erreicht.

Tabelle 38: Vergleich der Erträge, Inhaltsstoffe und Methanausbeuten aus den beiden Versuchen (unter Berücksichtigung aller geprüften Varianten in den Einzeljahren)

		Sorten- und Ernteterminversuche				Erntetechnikversuche			
		n	$\bar{x}$	Stab.	VK (%)	n	$\bar{x}$	Stab.	VK (%)
<b>potenziell erntbares Maisstroh</b>									
TM-Ertrag	(dt ha <sup>-1</sup> )	135	<b>113,0<sup>1)</sup></b>	19,6	17,3	76	<b>107,3<sup>2)</sup></b>	12,3	11,5
TM-Gehalt	(%)	135	<b>34,5</b>	6,6	19,1	76	<b>33,7</b>	3,0	8,9
<b>Korn</b>									
TM-Ertrag	(dt ha <sup>-1</sup> )	135	<b>123,5</b>	25,6	20,7	76	<b>120,4</b>	10,7	8,9
TM-Gehalt	(%)	135	<b>68,4</b>	4,7	6,9	76	<b>67,1</b>	1,7	2,5
<b>Maisstroh</b>									
auf Schwad gelegter TM-Ertrag	(dt ha <sup>-1</sup> )	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	92	<b>57,6</b>	12,8	22,3
abgefahrener TM-Ertrag	(dt ha <sup>-1</sup> )	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	152	<b>49,6</b>	10,0	20,3
TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs	(%)	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	152	<b>46,8</b>	13,2	28,1
<b>Inhaltsstoffe</b>		(des potenziell erntbaren Maisstrohs)				(des abgefahrenen Maisstrohs)			
XA	% TM	135	<b>4,3</b>	0,4	10,1	22	<b>5,6</b>	1,5	27,5
XP	% TM	135	<b>4,4</b>	0,7	16,8	22	<b>3,9</b>	0,5	12,5
XL	% TM	135	<b>0,7</b>	0,1	12,8	22	<b>0,7</b>	0,1	17,2
XF	% TM	135	<b>30,2</b>	2,1	7,0	22	<b>34,9</b>	2,2	6,2
ST	% TM	135	<b>0,3</b>	0,5	162,0	22	<b>1,7</b>	2,2	128,6
XZ	% TM	135	<b>11,1</b>	2,8	25,1	22	<b>3,9</b>	1,4	37,0
HCEL	% TM	135	<b>30,3</b>	2,1	6,9	22	<b>31,2</b>	1,7	5,5
CEL	% TM	135	<b>35,2</b>	2,6	7,3	22	<b>41,2</b>	1,8	4,5
ADL	% TM	135	<b>4,1</b>	0,7	18,1	22	<b>4,6</b>	0,5	10,1
<b>Methan-</b>		(des potenziell erntbaren Maisstrohs)				(des abgefahrenen Maisstrohs)			
Ausbeute	l CH <sub>4</sub> (kg oTM) <sup>-1</sup>	135	<b>324</b>	22	6,8	22	<b>314</b>	14	4,3
Hektarertrag	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup>	135	<b>3509<sup>3)</sup></b>	671	19,1	22	<b>1510<sup>4)</sup></b>	228	15,1

n = Anzahl an Beobachtungen; Stab.: Standardabweichung; VK: Variationskoeffizient; n. b.: Nicht bestimmt; XA: Rohasche; XP: Rohprotein; XL: Rohfett; XF: Rohfaser; ST: Stärke; XZ: Zucker (reduzierend); HCEL: Hemicellulose; CEL: Cellulose; ADL: Lignin

<sup>1)</sup> Stoppeln sind nicht enthalten (Schnitthöhe: 20-25 cm über der Bodenoberfläche)

<sup>2)</sup> Stoppeln sind enthalten (Schnitthöhe direkt über der Bodenoberfläche)

<sup>3)</sup> berechnet auf der Grundlage des TM-Ertrages des potenziell erntbaren Maisstrohs

<sup>4)</sup> berechnet auf der Grundlage des abgefahrenen Maisstroh-TM-Ertrages

## 6 Diskussion

### 6.1 Sorten- und Ernteterminversuche

Das Ziel der Sorten- und Ernteterminversuche war es, das beim Körnermaisbau anfallende, also potenziell erntbare, Maisstroh (Definitionen s. Glossar) anhand der Menge, Qualität und Methanabgabe zu charakterisieren. Zudem sollte der Einfluss von Sorte und Erntetermin auf die genannten Parameter geklärt und anhand der Methanhektarerträge das pflanzenbauliche Potenzial von Maisstroh für die Biogasproduktion unter süddeutschen Standortbedingungen quantifiziert werden.

#### 6.1.1 Methodik und Datengrundlage

Um zusätzlich zum Korntrag den Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs zu bestimmen, wurde in der Literatur meist eine manuelle Ernte von Korn und Maisstroh durchgeführt (*Tabelle 1*), wobei viele Untersuchungen auf der Ernte von nur wenigen Einzelpflanzen basieren (LIZOTTE et al., 2015b; SHINNERS & BINVERSIE, 2007; PORDESIMO et al., 2004a; BARTEN, 2013). Dagegen wurde im vorliegenden Versuch durch die Kombination aus manueller Ernte der Kolben und maschineller Ernte der Restpflanze mit dem Parzellenhäcksler eine weitaus größere Versuchsfläche von 4,5 m<sup>2</sup> für die Erhebung der ertrags- und qualitätsbestimmenden Merkmale geerntet, was dennoch nur der Hälfte der für Silomais gängigen Erntefläche in den Landessortenversuchen (BSA, 2000) entspricht.

Da die Ertragserhebung der kolbenlosen Restpflanze unmittelbar durch eine Wiegeeinrichtung am Parzellenhäcksler erfolgte, ist von einer weitgehend verlustfreien Ertragserhebung des potenziell erntbaren Maisstrohs auszugehen. Methodische Unzulänglichkeiten ergaben sich durch die Stoppeln, die vom Parzellenhäcksler nicht geerntet werden konnten, jedoch grundsätzlich dem potenziell erntbaren Maisstroh zuzuordnen sind und damit auch für die Berechnung von Korn-Stroh-Verhältnis und Harvestindex eine Rolle spielen. Da der Ertrag der Stoppeln nur im Versuchsjahr 2016 erfasst wurde, war eine sichere Korrektur der Erträge und der beiden abgeleiteten Indizes nicht möglich. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse entsprechend zu berücksichtigen.

Während die Ertragserfassung weitgehend verlustfrei erfolgte, entstanden beim Abladen der gehäckselten Restpflanze in die Radladerschaufel bzw. den Silierwagen (vgl. Kapitel

4.3.2) Verluste durch Verwehungen in Abhängigkeit von der Windstärke und dem Abreifegrad bzw. Trocknungsgrad der Restpflanze. Dies könnte möglicherweise einen Einfluss auf die quantitative und damit gegebenenfalls auch qualitative Zusammensetzung des Maisstrohs bei den nachfolgenden Untersuchungen (Inhaltsstoffe und Methanausbeute) gehabt haben, weil primär leichte Fraktionen (Blätter, Lieschblätter) verloren gehen, wohingegen die Spindeln durch die manuelle Ernte nach wie vor verlustfrei geerntet werden konnten.

Durch den gleichbleibenden Versuchsaufbau, die Wahl einer Blockanlage anstelle einer Spaltanlage (die häufig bei Ernteterminstudien verwendet wird) und die konsequente Erfassung der Ertragsparameter, der Inhaltsstoffe und der Methanausbeuten für alle Prüfglieder, Feldwiederholungen und Versuchsjahre konnte eine systematische und standardisierte Studie mit einem Probenumfang von je 135 Untersuchungen durchgeführt werden. Da es aktuell keine zuverlässigen NIRS-Kalibrationen für Maisstroh gibt, wurden nasschemische Methoden für die zuverlässige Bestimmung der Inhaltsstoffe gewählt. Verglichen mit anderen umfangreichen Studien zur Methanausbeute von Silomais, bei denen jedoch der Zusammenhang zwischen Inhaltsstoffen und der Methanausbeute im Vordergrund stand (RATH et al., 2013: Probenumfang von 429; EDER, 2010: Probenumfang von ca. 226), ist die Probenzahl im vorliegenden Versuch, insbesondere für das primäre Untersuchungsziel - die Höhe der Methanausbeute von Maisstroh zu bestimmen - als umfangreich zu bewerten. Dagegen war die Anzahl an geprüften Sorten (5 Sorten) und Ernteterminen (3 Erntetermine) sehr begrenzt, weshalb die Differenzierung der untersuchten Parameter nur mäßig war. Da die Terminierung des Erntetermins sowohl von der Witterung als auch der Verfügbarkeit der Versuchstechnik abhängig war, konnte außerdem ein gleichbleibender Zeitabstand zwischen den Ernteterminen nicht realisiert werden, sodass sich die Zeitabstände zwischen den Ernteterminen mit 8 -18 Tagen z. T. deutlich unterschieden. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Versuche an nur einem Standort durchgeführt wurden, weshalb die Übertragbarkeit der Ergebnisse begrenzt ist.

### 6.1.2 TM-Ertrag und TM-Gehalt von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh

In den bayerischen Landessortenversuchen (Reifegruppe mittelfrüh), betragen die **TM-Erträge von Silomais** im Mittel über alle Versuchsorte 214,1 dt ha<sup>-1</sup> (2014), 172,7 dt ha<sup>-1</sup> (2015) und 223,0 dt ha<sup>-1</sup> (2016) (LfL, 2017d). Die im vorliegenden Versuch erzielten TM-Erträge der Gesamtpflanze zur Siloreife (Silomais) von 213,9 dt ha<sup>-1</sup> (2014), 156,2 dt ha<sup>-1</sup> (2015) und 236,3 dt ha<sup>-1</sup> (2016) (*Tabelle 20*) lagen auf einem sehr ähnlichen Niveau,

lediglich im Trockenjahr 2015 waren die Erträge, bedingt durch den vorherrschenden Trockenstress, geringer als in den Landessortenversuchen.

Auch bei den **Korn-TM-Erträgen** wurden im vorliegenden Versuch mit 130,9 dt ha<sup>-1</sup> (2014), 92,3 dt ha<sup>-1</sup> (2015) und 147,4 dt ha<sup>-1</sup> (2016) (*Tabelle 22*) ähnliche Erträge wie bei den Landessortenversuchen in Bayern (Reifegruppe mittelfrüh) erzielt, die in den Jahren 2014 - 2016 122,9, 92,7 und 122,6 dt ha<sup>-1</sup> erreichten (LfL, 2017c) (alle Kornerträge sind mit 100 % TM-Gehalt ausgewiesen). Der geringe Kornertrag im Versuchsjahr 2015 ist auch hierbei auf die sehr warmen und niederschlagsarmen Vegetationsbedingungen während der Hauptwachstumsphase der Maispflanzen zurückzuführen (*Tabelle 7*; *Tabelle 8*). Vergleichbar zu den Silomaiserträgen waren auch die Kornerträge im Versuchsjahr 2016 gemessen an den Landessortenversuchen überdurchschnittlich hoch.

Im Vergleich zu den bayerischen Durchschnittserträgen in der Praxis, die für Körnermais bei 93,7 dt ha<sup>-1</sup> (2014) und 70,9 (2015) (TM-Ertrag bei 100 % TM-Gehalt; Wert für 2016 liegt noch nicht vor) lagen (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2016), wurden jedoch in den drei Versuchsjahren weit überdurchschnittliche Erträge erzielt. Insgesamt wurde also ein hohes, für Parzellenversuche aber übliches, Ertragsniveau erreicht.

Die ermittelten **TM-Erträge des potenziell erntbaren Maisstrohs** reichten in den Einzeljahren (bei einer Schnitthöhe von 20 - 25 cm über der Bodenoberfläche) von 96,2 - 130,8 dt ha<sup>-1</sup> (*Tabelle 22*) und lagen damit im Bereich der in der Literatur genannten Werte von 72 dt ha<sup>-1</sup> (GOLUB et al., 2016) bis 132 dt ha<sup>-1</sup> (HUANG et al., 2012a), die z. T. bei unterschiedlichen Schnitthöhen ermittelt wurden (vgl. *Tabelle 1*). PFALSDORF (2017) ermittelte für Deutschland jedoch weitaus geringere TM-Erträge für das potenziell erntbare Maisstroh von nur ca. 35 – 105 dt ha<sup>-1</sup>. Die mehrheitlich beschriebene Beobachtung, dass die Kornerträge die Erträge des potenziell erntbaren Maisstrohs übersteigen (LIZOTTE et al., 2015b; BARTEN, 2013; WILHELM et al., 2011; SHINNERS & BINVERSIE, 2007; PORDESIMO et al., 2004a), konnte grundsätzlich bestätigt werden, mit Ausnahme des Versuchsjahres 2015, in welchem der Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs den Kornertrag übertraf. Möglicherweise verursachte der Trockenstress im Versuchsjahr 2015 eine Ertragsdepression, die sich stärker auf die generativen Organe der Pflanze als auf die vegetativen Fraktionen auswirkte. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch GOLUB et al. (2016), die in einer zweijährigen Untersuchung in Serbien ebenfalls unter Trockenstressbedingungen wesentlich höhere Erträge für das potenziell erntbare Maisstroh (72 dt ha<sup>-1</sup>) im Vergleich zum Kornertrag (53 dt ha<sup>-1</sup>) ermittelten.

Da im vorliegenden Versuch der Ertrag der Stoppeln aus methodischen Gründen nicht dem potenziell erntbaren Maisstroh zugeordnet werden konnte, ist zu berücksichtigen, dass alle Erträge des potenziell erntbaren Maisstrohs um den Ertrag der Stoppeln

korrigiert werden müssten, weil die Stoppeln einen grundsätzlich (in der Praxis dennoch eher schwer) erntbaren, Bestandteil des Maisstrohs darstellen. Der TM-Ertrag der Stoppeln, der nur einjährig untersucht wurde, betrug im vorliegenden Versuch bei einer mittleren Stoppellänge von 22 cm im Mittel  $12,3 \text{ dt ha}^{-1}$  (Tabelle 23) und war damit nahezu identisch zu den von GOLUB et al. (2016) bezifferten Stoppelerträgen von  $12 \text{ dt ha}^{-1}$  bei 20 cm Stoppellänge unter durchschnittlichen Witterungsbedingungen. Die Autoren ermittelten jedoch unter Trockenstressbedingungen geringere Stoppelerträge von nur  $8 \text{ dt ha}^{-1}$ , sodass ähnlich wie bei den Erträgen von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh ebenfalls ein Einfluss der Witterungsbedingungen bzw. des Ertragsniveaus zu erwarten ist. Allerdings kann die Ertragsvariation dieser Biomassefraktion aufgrund des nur geringen Beitrages zum potenziell erntbaren Maisstroh als unbedeutend bewertet werden. Demzufolge erscheint eine pauschale Korrektur des potenziell erntbaren Maisstroh-TM-Ertrages um  $12 \text{ dt ha}^{-1}$  als akzeptabel. Unter dieser Annahme lägen die TM-Erträge des potenziell erntbaren Maisstrohs im Mittel bei  $125 \text{ dt ha}^{-1}$  und würden in den Einzeljahren von  $108,2 - 142,8 \text{ dt ha}^{-1}$  reichen.

Einen Einfluss auf den TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs hatten neben den jahresspezifischen Witterungsbedingungen auch der Genotyp und der Erntetermin.

Die Gesamtpflanzenenerträge zu den drei Ernteterminen ab der Kornreife waren jeweils größer als die Erträge der Gesamtpflanze zur Siloreife (Silomais), sodass ein Ertragszuwachs vom Zeitpunkt der Siloreife bis zum Zeitpunkt der Kornreife stattgefunden hat. Da zur Siloreife jedoch keine getrennte Ertragserhebung von Korn und Restpflanze erfolgte, ist unklar, in welchem Umfang der Ertragszuwachs den beiden Fraktionen zuzuordnen ist.

Nach Erreichen der Kornreife wurden bei gleichbleibenden Kornerträgen jedoch sinkende Erträge des potenziell erntbaren Maisstrohs ermittelt, wobei bei den ersten beiden Ernteterminen eine nur unwesentliche, beim dritten Erntetermin (also bei starker Abreife) jedoch eine signifikante Ertragsreduktion von rund 12 % bzw.  $14 \text{ dt ha}^{-1}$  des anfänglichen Ertrages zu verzeichnen war. Sinkende Erträge des potenziell erntbaren Maisstrohs im Verlauf der Abreife bestätigen auch LIZOTTE et al. (2015b), HUANG et al. (2012a); WILHELM et al. (2011), SHINNERS & BINVERSIE (2007) und PORDESIMO et al. (2004a). Allerdings war die Ertragsreduktionen beispielsweise bei HUANG et al. (2012a) und SHINNERS & BINVERSIE (2007) mit  $20 \text{ dt ha}^{-1}$  bzw. bei WILHELM et al. (2011) mit bis zu 39 % wesentlich größer als im vorliegenden Versuch. Dagegen überstiegen die Ertragsreduktionen im vorliegenden Versuch den von LIZOTTE et al. (2015b) bezifferten Ertragsverlust in Höhe von nur  $1,6 \text{ dt ha}^{-1}$  pro Woche. Bei einer Vielzahl der genannten Studien wurde jedoch eine

wesentlich größere Zeitspanne für die Ertragserhebungen im Zeitverlauf gewählt als im vorliegenden Versuch (< 1 Monat). Zudem begannen die Studien z. T. vor Erreichen der physiologischen Reife begann. Aus diesem Grund ermittelten einige Autoren auch steigende Kornerträge (z. B. LIZOTTE et al., 2015b; SHINNERS & BINVERSIE, 2007; PORDESIMO et al., 2004a). Da mit Ausbildung der schwarzen Trennschicht („black layer“) zwischen Spindel und Korn am Ende der Teigreife die Assimilateinlagerung abgeschlossen ist (ZSCHEISCHLER, 1990), ist in der Regel auch der Ertragszuwachs beim Korn beendet. Untersuchungen, bei denen sich die Ertragserfassung von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh explizit auf den Zeitraum nach Erreichen der physiologischen Reife bezog, konnten deshalb, wie im vorliegenden Versuch, keinen oder nur einen sehr geringen Anstieg des Kornertrages im Verlauf der Abreife feststellen (HUANG et al., 2012a; WILHELM et al., 2011).

Um den Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs zu maximieren, muss also ein möglichst früher Erntetermin angestrebt werden, weil mit zunehmender Abreife Biomasseverluste an der Restpflanze auftreten. Da bei einer Doppelnutzung neben dem Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs primär der Kornertrag und bei einer Trockenlagerung des Kornes auch der TM-Gehalt des Kornes entscheidend sind, ist unter vergleichbaren Bedingungen der mittlere Erntetermin empfehlenswert (Mitte/Ende Oktober), bei dem der TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs noch nicht signifikant abgesunken, der TM-Gehalt der Körner aber bereits signifikant höher als beim frühen Erntetermin war.

Zu einer ähnlichen Variation im TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs führte neben der Wahl des Erntetermins auch die Sortenwahl, wobei die Sortendifferenzierung mit signifikanten Ertragsunterschieden von bis zu 16 dt ha<sup>-1</sup> wesentlich geringer war als bei GOLUB et al. (2016), die in einjährigen Untersuchungen Sortenunterschiede von bis zu 51 dt ha<sup>-1</sup> erhoben haben. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass durch eine züchterische Bearbeitung bzw. Selektion von geeigneten Genotypen die Erträge des potenziell erntbaren Maisstrohs gesteigert werden können. Da auch bei der Doppelnutzung die Kornnutzung und damit der Kornertrag im Vordergrund stehen und die Nutzung des Maisstrohs nur zweitrangig ist, müssen entsprechende Doppelnutzungssorten einen hohen Kornertrag in Kombination mit einem möglichst hohen Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs vorweisen. PFALSDORF (2017) konnte dabei in aktuellen Untersuchungen (in Deutschland) zeigen, dass die TM-Erträge von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh zwar negativ korreliert sind, jedoch nur zu einem geringen, nicht signifikanten Grad. Daraus schlussfolgerte die Autorin, dass die Züchtung von Doppelnutzungssorten, die eine Maximierung beider Erträge zum Ziel hat, möglich ist.

Neben dem Ertrag hat auch der **TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs** eine essentielle Bedeutung, weil er Ausgangspunkt für die Entwicklung der TM-Gehalte während der Strohernte ist und damit vermutlich auch den TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs beeinflusst, der wiederum einen Effekt auf das Lagerungsverhalten (SHINNERS et al., 2007b) oder auch die prozesstechnischen Eigenschaften in der Biogasanlage (EDER, 2012) haben kann. PFALSDORF (2017) postuliert aus diesem Grund einen hohen Feuchtegehalt des Maisstrohs als wichtiges Selektionskriterium von Doppelnutzungssorten.

Die TM-Gehalte des potenziell erntbaren Maisstrohs lagen (bei einer Ernte aus dem stehenden Bestand) trotz der stark abgereiften und verbräunten Restpflanzen im Versuchsmittel bei 34,5 %, also noch im Bereich der für Silomais angestrebten TM-Gehalte, der nach SPIEKERS (2017) von 28 - 35 % reicht. Durch die Ernte aus dem stehenden Bestand konnte eine zusätzliche Abtrocknung verhindert werden. Auch PFALSDORF (2017) bestätigt in ihren umfangreichen Untersuchungen zur Selektion von Doppelnutzungssorten unter deutschen Standortbedingungen TM-Gehalte im Bereich von 28 - 35 %. Da die Körner, also die Biomasse-Fraktion mit den höchsten TM-Gehalten, beim Maisstroh nicht enthalten sind, wird der TM-Gehalt der stärker abgereiften Restpflanzen weitestgehend kompensiert.

Dagegen ermittelten LIZOTTE et al. (2015b) zur physiologischen Kornreife höhere TM-Gehalte von durchschnittlich 48 % (in Kanada), HUANG et al. (2012a) bezifferten die TM-Gehalte ebenfalls auf 49 % (in den USA) und auch die von SHINNERS & BINVERSIE (2007) erhobenen TM-Gehalte von 53 % (in den USA) sind in einem ähnlichen Bereich (vgl. *Tabelle 1*), obwohl in den genannten Untersuchungen eine manuelle Ernte durchgeführt wurde und somit Einflüsse auf den TM-Gehalt bei der Ernte ebenfalls vernachlässigt werden können. Folglich ist anzunehmen, dass die TM-Gehalte des potenziell erntbaren Maisstrohs in Ländern wie den USA oder Kanada tatsächlich höher sind. Gleichzeitig sind in den genannten Untersuchungen jedoch auch die TM-Gehalte der Körner mit über 70 % und bis zu 85 % wesentlich höher als im vorliegenden Versuch mit im Mittel 68 %. Während also unter süddeutschen Bedingungen der angestrebte TM-Gehalt der Körner von 65 % (BSA, 2000) unter typischen Herbstwitterungsbedingungen nur geringfügig überschritten wurde, kann die physiologische Kornreife unter anderen klimatischen Bedingungen deutlich überschritten werden, was offensichtlich auch Konsequenzen für den TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs hat. Die in der Literatur mehrfach bestätigte Faustregel, dass der Feuchtegehalt des Maisstrohs doppelt so hoch wie der Feuchtegehalt des Kornes ist (SHINNERS & BINVERSIE, 2007 ;PORDESIMO et al., 2004b), war auch im vorliegenden Versuch trotz des abweichenden Niveaus der TM-Gehalte zutreffend. Im Mittel betrug der Feuchtegehalt des Maisstrohs 65 % (TM-Gehalt von

34,5 %) und war somit fast genau doppelt so hoch wie der Feuchtegehalt des Korns von 32 % (TM-Gehalt von 68,4 %).

Vergleichbar mit den TM-Erträgen des potenziell erntbaren Maisstrohs variierten auch die TM-Gehalte am stärksten durch den Einfluss der Jahre, geringer, aber dennoch signifikant auch durch die Sortenwahl und den Erntetermin. Dabei ist die starke Abtrocknung der Restpflanze im Versuchsjahr 2015 (trotz der sehr frühen Ernte) durch die Trockenschäden zu erklären, wohingegen die geringen TM-Gehalt im Versuchsjahr 2014 vermutlich durch eine verminderte Abtrocknung aufgrund der nasskalten Herbstwitterung verursacht wurden. Hinsichtlich der Sorteneigenschaften ergab sich erwartungsgemäß eine klare Differenzierung zwischen der Sorte SY Talisman mit einem schnellen Abreifeverhalten der Restpflanze und den beiden stay-green Sorten Danubio und SM E0115, mit verzögertem Abreifeverhalten, die deutlich geringere TM-Gehalte erzielten. Der Zusammenhang zwischen zunehmender Abreife und steigendem TM-Gehalt konnte auch für die Erntetermine bestätigt werden. Dabei war die Abtrocknung des Maisstrohs anfangs sehr ausgeprägt, im späteren Verlauf aber nur noch marginal. Möglicherweise kam es hier jedoch zu Kompensationseffekten aufgrund der zunehmenden Biomasseverluste im Verlauf der Abreife. Da für die Verluste an Biomasse oftmals Blattverluste verantwortlich sind (WILHELM et al., 2011; PORDESIMO et al., 2004a), die mitunter den geringsten TM-Gehalt aufweisen (LIZOTTE et al., 2015b), können die Blattverluste eine Absenkung des TM-Gehaltes verursacht und der zunehmenden Abtrocknung des potenziell erntbaren Maisstrohs entgegen gewirkt haben. Da die TM-Erträge und TM-Gehalte nicht für die einzelnen Biomassefraktionen erhoben wurden, konnte diese Vermutung jedoch nicht überprüft werden.

### 6.1.3 Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis

Für die Abschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohs in der Praxis ist eine zeitaufwändige Ertragserfassung des potenziell erntbaren Maisstrohs nicht praktikabel und daher sind zuverlässige Parameter für eine indirekte Ermittlung notwendig. Mögliche Parameter sind der Kornertrag, der Gesamtpflanzenenertrag und Indizes wie der Harvestindex bzw. das Korn-Stroh-Verhältnis, die sich aus diesen Parametern berechnen. Im Mittel über alle geprüften Varianten im Versuch (Sorten, Erntetermine und Jahre) konnte dabei ein stark positiver, linearer Zusammenhang zwischen dem potenziell erntbaren Maisstrohertrag und dem Kornertrag ( $r = 0,80$ ;  $R^2 = 0,64$ ) bzw. dem Gesamtpflanzenenertrag ( $r = 0,87$ ;  $R^2 = 0,75$ ) nachgewiesen werden. Ein pflanzenbaulich hohes Ertragsniveau ging also zugleich mit einem hohen Ertrag des potenziell erntbaren

Maisstrohs einher. Einen vergleichbaren Zusammenhang zwischen dem Kornertrag und dem potenziell erntbaren Maisstrohertrag bestätigten auch LIZOTTE et al. (2015b) ( $R^2 = 0,70$ ), WILHELM et al. (2011) ( $R^2 = 0,73$ ) und PREWITT et al. (2007) ( $R^2 = 0,78/0,92$  in zwei Versuchsjahren). Dagegen ermittelte PFALSDORF (2017) für eine Vielzahl von Sorten eine negative Korrelation zwischen den TM-Erträgen von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh, sodass die Schätzung des potenziell erntbaren Maisstrohs anhand des Kornertrages zwar für pflanzenbauliche Zusammenhänge nutzbar scheint, für züchterische Zwecke jedoch ungeeignet ist.

Für die Abschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohs eignete sich im vorliegenden Versuch der Gesamtpflanzenenertrag besser ( $r = 0,87$ ;  $R^2 = 0,75$ ) als der Kornertrag ( $r = 0,80$ ;  $R^2 = 0,64$ ). Die gleichen Zusammenhänge bestehen deshalb auch für die beiden berechneten Indizes, dem Harvestindex ( $r = 0,87$ ;  $R^2 = 0,75$ ) und dem Korn-Stroh-Verhältnis ( $r = 0,80$ ;  $R^2 = 0,64$ ), sodass der Harvestindex dem Korn-Stroh-Verhältnis geringfügig überlegen ist. Der Vorteil des Korn-Stroh-Verhältnisses liegt jedoch darin, dass der Kornertrag im Vergleich zum Gesamtpflanzenenertrag ein Standardparameter bei Körnermais ist und unter Praxisbedingungen meist nur der Kornertrag bekannt ist.

Der mittlere Harvestindex betrug im vorliegenden Versuch 0,52, das Korn-Stroh-Verhältnis 1:0,93. Wird der im Versuchsjahr 2016 ermittelte Stoppelertrag von durchschnittlich  $12,3 \text{ dt ha}^{-1}$  angenommen, um den potenziell erntbaren Maisstrohertrag um den Ertrag der nicht erfassten Stoppeln zu korrigieren, ergibt sich ein mittlerer Harvestindex von 0,49 bzw. ein Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1,04, was mit dem sehr häufig zitierten und unterstellten Verhältnis von 0,50 bzw. 1:1 (GOLECHA & GAN, 2016; KEENE et al., 2012; WILHELM et al., 2004; PORDESIMO et al., 2004a; SOKHANSANJ et al., 2002) gut übereinstimmt. Allerdings variierten die beiden Indizes in Abhängigkeit von der Sorte, dem Erntetermin und insbesondere den jahresspezifischen Standort- und Umweltbedingungen, wobei unter guten bzw. durchschnittlichen Witterungsbedingungen ein höherer Harvestindex über 0,50 bzw. ein Korn-Stroh-Verhältnis unter 1:0,90 erreicht wurde, unter den schlechten Wachstumsbedingungen 2015 dagegen Werte unter 0,50 bzw. über 1:1. Dieser Zusammenhang ergab sich auch in den Untersuchungen von BARTEN (2013). Auch GOLUB et al. (2016) kommen zu diesem Ergebnis, wobei sie mit einem Harvestindex von 0,51 unter durchschnittlichen Bedingungen und mit 0,41 unter widrigen Bedingungen (Trockenstress) noch deutlichere Unterschiede ermittelten.

Dass die Annahme eines starren Harvestindex bzw. Korn-Stroh-Verhältnisses fehlerhaft sein kann, zeigt auch der Zusammenhang zwischen der Höhe des Kornertrages und den beiden Indizes, der mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,54 bzw. 0,53 zwar nur mäßig, aber dennoch signifikant war (Tabelle 41). Bei hohen Kornerträgen über  $100 \text{ dt ha}^{-1}$

<sup>1</sup> wurde dabei ein geringeres Korn-Stroh-Verhältnis unter 1:1 ermittelt, bei Kornerträgen unter 100 dt ha<sup>-1</sup> entsprechend ein höheres Korn-Stroh-Verhältnis über 1:1, sodass ein negativer Zusammenhang mit dem Kornertrag bestand (*Abbildung 5*). Wird also ein mittleres Korn-Stroh-Verhältnis von 1:0,93 für die Abschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohs verwendet, kann es bei geringen Kornerträgen zu einer Unterschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohs, bei hohen Kornerträgen zu einer Überschätzung kommen. Zu diesem Ergebnis kamen auch LIZOTTE et al. (2015b). LINDEN et al. (2000) konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass die Variabilität des Harvestindex primär durch Stressfaktoren (z. B. Wassermangel) verursacht wird, wohingegen sich Unterschiede im Anbau (Bodenbearbeitung, Düngemenge) gleichermaßen auf die Erträge von Korn und Maisstroh auswirken und somit den Harvestindex nicht beeinflussen.

Neben den Wachstumsbedingungen und dem Ertragsniveau des Kornes bestand außerdem ein klarer Effekt des Erntetermins auf den Harvestindex bzw. das Korn-Stroh-Verhältnis, wobei der Harvestindex im Verlauf der Abreife anstieg bzw. das Korn-Stroh-Verhältnis sank. Auch HUANG et al. (2012a) und WILHELM et al. (2011) stellten einen Anstieg des Harvestindex nach Erreichen der physiologischen Kornreife fest. Vergleichbar mit dem Effekt des Erntetermins war auch die sortenbedingte Differenzierung der beiden Indizes.

Insgesamt erlaubt der Harvestindex bzw. das Korn-Stroh-Verhältnis also näherungsweise eine Abschätzung des anfallenden und somit potenziell erntbaren Maisstrohs, wobei die Annahme eines Korn-Strohverhältnisses von 1:1, wie es gemäß der Düngeverordnung (DüV, 2006) auch für Deutschland vorgesehen ist, im Mittel zutreffend scheint. Dennoch eignen sich die beiden Indizes nicht für eine präzise Vorhersage des potenziell erntbaren Maisstrohs, weil sich durch pflanzenbauliche Effekte (z. B. Sortenwahl, Wahl des Erntetermins, Ertragsniveau, Wachstumsbedingungen) sehr variable Verhältnisse ergeben, die mit einer starren Schätzung nicht erfasst werden. Zu dieser Einschätzung kommt auch BARTEN (2013).

#### **6.1.4 Stoffliche Zusammensetzung des potenziell erntbaren Maisstrohs**

Die stoffliche Zusammensetzung von Maisstroh (*Tabelle 24*) unterschied sich grundlegend von der Zusammensetzung der Gesamtpflanze zur Siloreife (Silomais) (*Tabelle 21*). Während die Stärke der mitunter bedeutendste Inhaltsstoff beim Silomais ist und im Mittel der drei Versuchsjahre fast 35 % betrug, ist der Stärkegehalt beim Maisstroh mit unter 1 % unbedeutend. Aufgrund der fehlenden Körner, bei denen die Gehalte an Protein, Fett und Nichtfaser-Kohlenhydraten in Summe über 80 % betragen (MENARDO et

al., 2015a), waren die Proteingehalte beim Maisstroh um ca. ein Drittel, die Fettgehalte sogar um rund zwei Drittel geringer als bei Silomais. Umgekehrt waren die Fasergehalte bzw. die Hemicellulose- und Cellulosegehalte, aber auch die Zuckergehalte beim Maisstroh fast doppelt so hoch wie beim Silomais, die Ligningehalte sogar mehr als doppelt so hoch.

Verglichen mit den Literaturangaben zur stofflichen Zusammensetzung von Maisstroh (*Tabelle 3*) wurden jedoch deutlich abweichende Gehalte ermittelt (*Tabelle 24*). So sind die Hemicellulosegehalte, die im vorliegenden Versuch im Mittel 30,3 % betragen, in zahlreichen Untersuchungen unter 30 % (z. B. MENARDO et al., 2015b; MENARDO & BALSARI, 2012; HUANG et al., 2012b; WRIGHT et al., 2005) und nur selten höher als im vorliegenden Versuch (z. B. TOLERA et al.). Umgekehrt verhält es sich mit den Gehalten an Cellulose. Hier übersteigen die Literaturangaben oftmals den im vorliegenden Versuch ermittelten Gehalt von durchschnittlich 35,2 % (LI et al., 2013a; MENARDO & BALSARI, 2012; HUANG et al., 2012b; ZHONG et al., 2011). Noch deutlicher sind die Abweichungen bei den Ligningehalten, für die in einigen Untersuchungen mehr als doppelt so hohe Gehalte ermittelt wurden (MENARDO et al., 2015b; LI et al., 2013a; ZHONG et al., 2011), aber in keiner der in *Tabelle 3* aufgeführten Literaturstellen, der hier gemessene Ligningehalt von im Mittel 4,1 % unterschritten wurde. TEMPLETON et al. (2009), die gezielt die Variabilität der stoffliche Zusammensetzung von Maisstroh an 47 Standorten in acht Corn Belt-Staaten untersucht haben, bezifferten den Ligningehalt im Mittel auf 13,3 %, wobei sie Werte zwischen 11,2 und 17,8 % ermittelt hatten.

Deshalb ist anzunehmen, dass sich nicht nur die TM-Gehalte von Korn und Maisstroh (vgl. Kapitel 6.1.2), sondern auch die Maisstrohqualität unter den Standortbedingungen Süddeutschlands deutlich zur Qualität des Maisstrohs in anderen Ländern unterscheidet. Da sich jedoch gegebenenfalls auch die Methoden der Futtermittelanalytik unterscheiden und zudem nähere Angaben zur Erntemethode, dem Erntezeitpunkt oder den enthaltenen Biomassefraktionen des untersuchten Maisstrohs fehlen, ist unklar, inwiefern die Unterschiede tatsächlich auf Qualitätsunterschiede zurückzuführen sind.

Während die Sortendifferenzierung zur Siloreife nur gering war und sich im Wesentlichen auf Unterschiede zwischen dem Genotyp SM E0115 und den anderen vier Sorten beschränkte (durch signifikant höhere Gehalte an Rohfett, signifikant geringere Gehalte an Hemicellulose und tendenziell höhere Zuckergehalte), waren die Unterschiede beim Maisstroh größer. Signifikante Unterschiede ergaben sich insbesondere für den Rohaschegehalt, den Rohproteingehalt und den Ligningehalt, wobei sich die beiden stay-green Genotypen Danubio und SM E0115 durch signifikant höhere Proteingehalte und (signifikant) geringere Gehalte an Lignin von den anderen Sorten unterschieden. Der

Genotyp SM E0115 zeichnete sich außerdem durch signifikant geringere Gehalte an Rohfaser bzw. Cellulose und die tendenziell/signifikant höchsten Zuckergehalte aus. Da beide stay-green Sorten die höchsten Zuckergehalte aufwiesen, kann ein Zusammenhang zwischen dem Zuckergehalt und dem stay-green Charakter vermutet werden. Allerdings konnte auch PFALSDORF (2017) bei einer Vielzahl von Sorten keine eindeutige Korrelation zwischen dem Zuckergehalt und dem stay-green Charakter (gemessen am Chlorophyll-Gehalt) zeigen.

Ein signifikanter Sorteneinfluss auf die stoffliche Zusammensetzung von Maisstroh wurde auch von TEMPLETON et al. (2009) nachgewiesen, wobei die Autoren dem Erntejahr und den Standortbedingungen einen weitaus größeren Anteil an der Variabilität der Inhaltsstoffe attestierten. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kam auch BARTEN (2013), der die stoffliche Zusammensetzung von Maisstroh als sehr variabel bezeichnete und als Variationsursache vornehmlich die jahresspezifischen Bedingungen und die Bestandesdichte und nur zu einem kleineren Grad die Sorte nannte.

Zusätzlich zum Sorteneinfluss beeinflusste im vorliegenden Versuch auch der Erntetermin die Maisstrohqualität. So veränderte sich mit zunehmender Abreife die stoffliche Zusammensetzung des Maisstrohs, wobei lediglich beim dritten Erntetermin signifikante Unterschiede festgestellt wurden. Der letzte Erntetermin war durch einen signifikanten Zuckerabbau und zugleich signifikant höhere Gehalte an Faserbestandteilen (Rohfaser, Lignin und Cellulose) gekennzeichnet. Auch HUANG et al. (2012b) ermittelten in einer Ernteterminstudie für die Blätter und Halme signifikant steigende NDF-, ADF-, und Ligningehalte, wobei die Ligningehalte, die mit fortschreitender Abreife von 4,7 auf 6,4 % zunahmen, wesentlich stärker als im vorliegenden Versuch zunahmen. Steigende Ligningehalte, insbesondere bei den Blättern, wurden auch von PORDESIMO et al. (2005) bestätigt. Auch TOLERA et al. (1998) bestätigten steigende NDF-, ADF- und Ligningehalte im Verlauf von drei Ernteterminen. Während jedoch in den vorliegenden Untersuchungen die Rohproteingehalte unverändert waren, ermittelten HUANG et al. (2012b) und auch TOLERA et al. (1998) sinkende Werte.

Auch im Hinblick auf die stoffliche Zusammensetzung scheint also eine möglichst frühe Ernte des Maisstrohs sinnvoll, um einen Abbau von Zucker und die Zunahme der schwer verdaulichen Faserbestandteile, insbesondere des Lignins, die allgemein auch für die Nutzung in der Biogasanlage unerwünscht sind, zu vermeiden. Auch HUANG et al. (2012b) schlussfolgerten aus Sicht der Tierernährung einen sinkenden Futterwert mit zunehmend späterem Erntetermin sinkt.

### **6.1.5 Methanausbeute und Methanhektarertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs und der Einfluss von Sorte, Erntetermin sowie ertrags- und qualitätsbestimmenden Parametern**

Die Gesamtpflanze zur Siloreife (Silomais), lieferte im vorliegenden Versuch eine mittlere Methanausbeute von  $364 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  (*Tabelle 20*). Auch wenn der Wert nur auf wenigen Einzelproben basiert, wurde ein vergleichbarer Wert zu aktuellen Studien erreicht, in denen die Methanausbeute von Silomais umfangreich untersucht worden war. So haben RATH et al. (2013) für 96 Silomais-Proben eine mittlere Methanausbeute von  $373 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$  gemessen, wobei die Werte von 317 bis  $476 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$  reichten. Ähnliche Methanausbeuten ermittelten auch HERRMANN et al. (2016) für Silomais mit 355 ( $n = 47$ ) bzw.  $364 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$  ( $n = 24$ ) in zwei unterschiedlichen Laboren.

Bei der Vergärung von Maisstroh wurde im vorliegenden Versuch eine mittlere Methanausbeute von  $324 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$  gemessen (*Tabelle 25*), was einer relativen Methanausbeute von 89 % im Vergleich zu Silomais entspricht. HERRMANN et al. (2016) ermittelten für 93 verschiedene Fruchtarten, Artenmischungen bzw. Entwicklungsstadien – ebenfalls anhand von Batchversuchen gemäß VDI 4630 (2006) in Deutschland – relative Methanausbeuten von 35 – 114 % im Vergleich zu Silomais. Eine ähnliche (oTM-) Methanausbeute relativ zu Silomais wurde dabei beispielsweise von Raps (Zeitpunkt Blüte und Fruchtentwicklung), einer Kleegrasmischung (Folgeschnitt, spät geerntet) oder Luzerne (1. Schnitt, spät geerntet) erreicht. Zahlreiche Fruchtarten lagen aber auch deutlich darunter, z. B. eine einjährige Biogasblümmischung (69 %), die Durchwachsene Silphie (67 %), Igniscum (41 %), Sonnenblume (75 %) oder Luzerne (Folgeschnitt, spät geerntet; 77 %). Folglich können die für Maisstroh erzielten Methanausbeuten als hoch eingestuft werden.

Ähnlich wie bei den Inhaltsstoffen (vgl. Kapitel 6.1.4), bestehen deutliche Diskrepanzen beim Vergleich der erzielten Methanausbeuten von Maisstroh im vorliegenden Versuch und den Literaturangaben zur Methanausbeute von Maisstroh (*Tabelle 4*). So finden sich in der Literatur nur vereinzelt Werte über  $300 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  (LI et al., 2016; DJATKOV et al., 2015; DINUCCIO et al., 2010; CHANDRA et al., 2012), wohingegen mehrheitlich Werte unter  $250 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  ermittelt wurden (MENARDO et al., 2015b; LI et al., 2013b; LI et al., 2013a; MENARDO et al., 2012; LIEW et al., 2012; CHEN et al., 2010). Unklar ist auch hierbei, inwieweit die unterschiedlichen Ergebnisse auf eine abweichende Untersuchungsmethodik oder tatsächlich Qualitätsunterschiede beim Maisstroh zurückzuführen sind, weil oftmals nähere Angaben zum Anbauverfahren, dem Erntetermin, den enthaltenen Biomassefraktionen, dem Versuchsumfang und der genauen Versuchsdurchführung fehlen.

Der Anbau verschiedener Sorten im beschriebenen Versuch bewirkte eine nur marginale Variation bei den Methanausbeuten des Maisstrohs. Signifikante Unterschiede konnten lediglich zwischen der Sorte Danubio mit der höchsten Methanausbeute und den Sorten Grosso und SM E0115 mit den geringsten Methanausbeuten ermittelt werden, wobei die absoluten Unterschiede mit maximal  $13 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  insgesamt gering waren. DJATKOV et al. (2015) ermittelten ebenfalls eine signifikante Sortendifferenzierung bei der Methanausbeute, wobei in ihren einjährigen Untersuchungen wesentlich größere Unterschiede von bis zu  $92 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  zwischen fünf Sorten auftraten. Allerdings hatten die Autoren Sorten aus sehr unterschiedlichen Reifebereichen (FAO 490 – 700) gewählt, wohingegen im vorliegenden Versuch alle Sorten aus dem mittelfrühen Reifebereich stammten.

Eine stay-green Eigenschaft erwies sich nicht als konsistent vorteilhaft. Während die stay-green Sorte Danubio zwar die höchsten Methanausbeuten erzielte, wurden für den stay-green Genotyp SM E0115 die geringsten Methanausbeuten ermittelt.

Eine ähnliche Differenzierung wie sie durch die Sortenwahl erreicht wurde, ergab sich auch durch die jahresspezifischen Standort- und Witterungsbedingungen. Während 2014 und 2016 vergleichbare Methanausbeuten erzielt wurden, waren die Methanausbeuten 2015 mit  $12 - 17 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  signifikant höher. Ein Grund für die hohen Methanausbeuten war vermutlich die ungewöhnlich frühe Ernte im Versuchsjahr 2015. Dafür spricht auch der eindeutige Effekt des Erntetermins auf die Methanausbeute. Je später geerntet wurde, desto signifikant geringer waren die Methanausbeuten, wobei ein konstanter Abfall von je  $14 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  zwischen jedem Erntetermin lag, sodass der Effekt des Erntetermins im Vergleich zum Sorten- und Jahreseffekt wesentlich stärker war. Auch LI et al. (2016) bestätigten für früh geerntetes Maisstroh (noch grün) wesentlich höhere Methanausbeuten als für spät geerntetes Maisstroh, wobei der Unterschied mit  $85 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  sehr deutlich war, der Zeitabstand zwischen den beiden Ernteterminen mit zwei Monaten jedoch ebenfalls wesentlich größer war als im vorliegenden Versuch.

Während für Silomais sehr häufig kein negativer Zusammenhang zwischen der Methanausbeute und einem späteren Erntetermin nachgewiesen werden konnte (BRUNI et al., 2010; EDER, 2010; SCHITTENHELM, 2008) und ebenso kein relevanter Zusammenhang zwischen der Sortenwahl und der Methanausbeute ermittelt werden konnte (BRUNI et al., 2010; EDER, 2010; SCHITTENHELM, 2008), scheinen pflanzenbauliche Effekte die Methanertragsfähigkeit von Maisstroh stärker zu beeinflussen. Denkbar ist, dass sich beim Maisstroh durch den späteren Erntezeitraum und die fehlenden Körner, die beim Silomais einen essentiellen Anteil haben und damit eine gleichbleibende Konstante

darstellen, qualitative Veränderungen gravierender auswirken. EDER (2010) stellte in ihren Untersuchungen für die Gesamtpflanze eine gleichbleibende Verdaulichkeit fest, obwohl die Restpflanzenverdaulichkeit mit steigender Wachstumsdauer sank. Deshalb schlussfolgerte die Autorin, dass die Abnahme der Restpflanzenverdaulichkeit durch den Zuwachs an Stärke kompensiert wurde. Die abnehmende Restpflanzenverdaulichkeit führte jedoch in Abhängigkeit vom Abreifeverhalten zu deutlichen Sortenunterschieden in ihren Untersuchungen und ist damit konsistent zu den vorliegenden Ergebnissen. Um folglich möglichst hohe Methanausbeuten des potenziell erntbaren Maisstrohs zu erreichen, ist eine frühzeitige Ernte, unmittelbar nach Erreichen der Druschreife vorteilhaft. Konträr dazu ermittelten jedoch PORDESIMO et al. (2005) für alle Biomassefraktionen von Maisstroh und für alle Erntetermine im Verlauf der Abreife einen grundsätzlich gleichbleibenden Energiegehalt im Bereich von  $16,7 - 20,9 \text{ kJg}^{-1}$ , weshalb sie schlussfolgerten, dass es unerheblich ist, welche Fraktionen oder zu welchem Zeitpunkt geerntet wird, sofern sich die Erträge nicht ändern.

Obwohl der Anbau verschiedener Sorten, die Ernte zu drei zeitlich gestaffelten Ernteterminen und die jahresspezifischen Standort- und Witterungsbedingungen signifikante Unterschiede bei der stofflichen Zusammensetzung und den Methanausbeuten bewirkten, konnte kein konsistenter Zusammenhang zwischen der Methanausbeute und den qualitätsbestimmenden Parametern hergestellt werden. Ein signifikanter, mit Korrelationskoeffizienten von maximal 0,31 aber nur schwacher Einfluss, ging vom Protein, dem Zucker- und dem Ligningehalt auf die Methan- bzw. Biogasausbeute aus, wobei höhere Protein- und Ligningehalte die Methan- und Biogasausbeuten negativ beeinflusste, der Zuckergehalt jedoch positiv korreliert war. Während beispielsweise für den Einfluss des Erntetermins plausible Zusammenhänge ermittelt wurden (steigenden Ligningehalte, sinkende Zuckergehalte und demzufolge sinkende Methanausbeuten im Verlauf der Abreife), ergaben sich für die Sortenunterschiede nicht die gleichen Zusammenhänge. So wurden z. B. beim Genotyp SM E0115 trotz signifikant geringerer Ligningehalte und den höchsten Zuckergehalten, die geringsten Methanausbeuten gemessen, während die Sorte Danubio mit den zweithöchsten Zuckergehalten und den zweitniedrigsten Ligningehalten die höchsten Methanausbeuten erreichte. Mit keinem der untersuchten Inhaltsstoffe war es also möglich, die Variation der Methanausbeute von Maisstroh mit Hilfe eines einfachen monokausalen Modells zufriedenstellend zu erklären. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Variation der untersuchten Inhaltsstoffe, gemessen am Variationskoeffizienten (*Tabelle 38*), eher mäßig und wesentlich geringer war als in anderen Studien, die sich primär mit dem Zusammenhang der Inhaltsstoffe und der Methan- bzw. Biogasausbeute

beschäftigten (z. B. DANDIKAS et al., 2014; EDER, 2010). Zudem merken RATH et al. (2013) an, dass oftmals anstelle einer einfachen Regression eine multiple Regression notwendig ist, um den Erklärungsgehalt der stofflichen Zusammensetzung für die Methanausbeute adäquat einschätzen zu können, was jedoch im vorliegenden Versuch nicht untersucht wurde.

Für die Bewertung der Substrateignung ist die Methanausbeute zwar ein wesentlicher Parameter, der Methanhektarertrag (Berechnung siehe Kapitel 4.3.2) jedoch weitaus zielführender, da er ertrags- und qualitätsbestimmende Merkmale umfasst.

Für die Ernte des Bestandes zur Siloreife wurden im Mittel Methanhektarerträge von rund  $7099 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (bei Annahme eines Rohaschegehaltes von 3,5 % für Silomais) erreicht. EDER (2010) bezifferte in ihren Untersuchungen den durchschnittlichen Methanhektarertrag (für verschiedene Sorten, Erntetermine, Standorte und Versuchsjahre) auf nur  $6000 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ . SCHITTENHELM (2008) erreichten jedoch deutlich höhere Methanhektarerträge von  $7453 - 9370 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ .

Gemittelt über alle untersuchten Sorten, Erntetermine und Versuchsjahre erzielte das potenziell erntbare Maisstroh Methanhektarerträge von  $3509 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ . Obwohl der Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs geringer war als der Kornertrag und die Methanausbeute im Mittel 89 % von Silomais betrug, erreichte das potenziell erntbare Maisstroh also fast 50 % des Methanhektarertrages von Silomais unter gleichen Standort- und Witterungsbedingungen, wobei der Ertragszuwachs von der Siloreife zur Kornreife einen gewissen Anteil des Minderertrages kompensierte. Aufgrund des sehr unterschiedlichen Ertragsniveaus war der Jahreseffekt mit fast  $1000 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  weitaus größer als der Einfluss des Erntetermins mit maximalen Unterschieden von  $740 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ . Dennoch führte bereits der mittlere Erntetermin, der unter Praxisbedingungen vermutlich eine höhere Relevanz als der frühe Erntetermin hat, zu signifikanten Einbußen beim Methanhektarertrag. Noch gravierender waren jedoch die Einbußen von über  $500 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  beim dritten Erntetermin, weil gegenüber dem mittleren Erntetermin sowohl signifikante Ertrags- als auch Qualitätseinbußen auftraten. Der Faktor mit dem geringsten Einfluss auf den Methanhektarertrag war die Sortenwahl. Hier wurden Unterschiede von maximal  $650 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  ermittelt, die jedoch ebenfalls eine hochsignifikante Differenzierung erlaubten. Die Sorten mit den höchsten Methanhektarerträgen waren dabei die Sorten Danubio und SY Kardona, die sich durch hohe Erträge in Kombination mit hohen Methanausbeuten ausgezeichnet hatten. Der Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs hatte dabei einen wesentlich größeren Einfluss auf den Methanhektarertrag als die Methanausbeute bzw. die qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffe. So konnten bereits 87 % der Variation des Methanhektarertrages durch den

TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs erklärt werden. Der Qualitätsparameter mit der besten Korrelation zum Methanhektarertrag war der Zuckergehalt, der aber nur ein unzureichendes Bestimmtheitsmaß von 30 % erreichte. Auch die Methanausbeute korrelierte nur unzureichend mit dem Methanhektarertrag. Für den Methanhektarertrag als Zielgröße der Substrateignung für die Biogasproduktion spielt also der Flächenertrag des Maisstrohs eine größere Rolle als die Qualität. Auch für die Nutzung von Maisstroh in der Ethanolproduktion kamen MOURTZINIS et al. (2016) und TUMBALAM et al. (2016) zu dem Ergebnis, dass die Quantität entscheidender ist als die Qualität (in diesem Fall die Konzentration an Kohlenhydraten), um den Ethanolertrag je Fläche zu maximieren.

## 6.2 Erntetechnikversuche

Das Ziel der Erntetechnikversuche war es, ausgehend vom pflanzenbaulichen Potenzial, in Bezug auf Ertrag, Qualität und Methanertragsfähigkeit das technologische Potenzial zu bestimmen, das sich bei der Bergung von Körnermaisstroh auf einem typischen Maisstandort in Süddeutschland beim Einsatz der in Deutschland und Österreich verfügbaren Erntetechniken ergibt. Bislang liegen hierzu keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor und es fehlen auch Informationen, welche Verluste in den einzelnen Verfahrensschritten der Maisstrohbergung auftreten und welche Einflussfaktoren eine Rolle spielen.

### 6.2.1 Methodik und Datengrundlage

In der Literatur gibt es mehrere Untersuchungen zum potenziell erntbaren Maisstroh (z. B. GOLUB et al., 2016; LIZOTTE et al., 2015b; WILHELM et al., 2011; vgl. *Tabelle 1*) und den abgefahrenen Stroherträgen (z. B. MENARDO et al., 2015a; SHINNERS et al., 2007b; SOKHANSANJ et al., 2002; vgl. *Tabelle 2*). Dabei wurden aber nur selten beide Parameter im selben Versuch erhoben und oftmals vereinfachte Annahmen zur Ableitung einer der beiden Parameter (meist des potenziell erntbaren Maisstrohs) (z. B. GOLUB et al., 2016; SHINNERS et al., 2012; KEENE et al., 2012; HOSKINSON et al., 2007; vgl. *Tabelle 2*) unterstellt. Eine exakte Ermittlung der Abfuhraten bzw. der Ernteverluste ist damit aber nicht möglich. Außerdem fehlen bislang bei den zwei- und mehrstufigen Verfahren, bei denen das Stroh vor der Bergung auf Schwad gelegt wird, Erkenntnisse zum Strohertrag im Schwad, was eine Zuordnung der Ernteverluste zu den einzelnen Verfahrensschritten der Maisstrohbergung verhindert. Demzufolge konnte in der vorliegenden Arbeit erstmals eine auf Messdaten basierende, systematische und vollständige Bilanz der relevanten Erträge und Verluste für die einzelnen Verfahrensschritten Dreschen, Schwaden und Bergen erstellt werden.

Als Versuchsmethodik wurden feldexperimentelle Analysen in einem größer dimensionierten Maßstab (Großparzellen von mindestens 630 m<sup>2</sup> Größe) gewählt, um die Ernteverfahren gezielt unter Praxisbedingungen vergleichen zu können und damit eine Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis zu ermöglichen. Durch die Anlage eines randomisierten Versuchsdesigns und die Prüfung in drei aufeinanderfolgenden Jahren war dennoch eine standardisierte Datenerhebung möglich und damit Vorteile gegenüber einer Erhebungen auf Praxisschlägen gegeben.

Da es sich 2014 und 2016 um den identischen Schlag handelte und 2015 der benachbarte Schlag verwendet wurde, können einheitliche Standortbedingungen für den Einsatz der verschiedenen Ernteverfahren unterstellt werden. Außerdem wurde in allen drei Versuchsjahren dieselbe Sorte angebaut und für die Ernte ein vergleichbares Zeitfenster eingehalten. Nicht standardisiert war jedoch der Einsatz aller an der Ernte beteiligten Maschinen, da eine Anpassung an die vorherrschenden Bedingungen erforderlich war (z. B. hinsichtlich der Arbeitshöhe), verschiedene Witterungsbedingungen vorlagen, in manchen Versuchsjahren zudem andere oder technisch veränderte Maschinen eingesetzt werden mussten und die Maschinenbedienung durch verschiedene Personen erfolgte, weshalb zahlreiche, nicht quantifizierbare Einflussfaktoren vorlagen. Insgesamt kann dennoch von vergleichbaren Rahmenbedingungen für die einzelnen Ernteverfahren ausgegangen werden, weshalb erstmals ein direkter Vergleich der in Deutschland und Österreich verfügbaren Erntetechniken möglich war.

Zu Versuchsbeginn gab es nur sehr wenige Erfahrungen zur Bergung von Maisstroh, weshalb von einem Lerneffekt im Laufe der drei Versuchsjahre ausgegangen werden kann. Ein optimierter Einsatz der Techniken war dabei insbesondere im dritten Versuchsjahr möglich (gezielte Einhaltung von maschinenspezifischen Arbeitshöhen und Fahrtrichtungen).

Für die Erhebung der einzelnen Ertragsparameter wurden unterschiedliche Erhebungsmethoden verwendet. So wurden die Erträge des potenziell erntbaren Maisstrohs und des auf Schwad gelegten Maisstrohs durch eine manuelle Ernte einer nur kleinen Fläche (wenige  $\text{m}^2$  groß, vgl. Kapitel 4.4.4) ermittelt, wohingegen für das Zielmerkmal *abgefahrener Strohertrag* eine tatsächliche Bergung des Maisstrohs von einer Fläche von  $360 \text{ m}^2$  erfolgte. Dies hat Konsequenzen für die Genauigkeit und Repräsentativität der einzelnen Ertragsparameter und erschwert es, die einzelnen Parameter in Beziehung zu setzen. Während für die abgefahrenen Stroherträge, aufgrund von umfangreichen Erhebungen (insgesamt 156 Ertragserhebungen in drei Jahren) und einer aufwändigen und sehr genauen Ertragsermittlung durch eine Bodenwaage (Palettenwaage), von einer zuverlässigen Ertragsermittlung bei nur mäßigen Standardabweichungen auszugehen ist, waren die Ergebnisse der auf Schwad gelegten Stroherträge weitaus variabler und eine statistische Unterscheidung der einzelnen Varianten aufgrund von z. T. sehr hohen Standardabweichungen bzw. Variationskoeffizienten (*Tabelle 38*) nicht möglich. Eine großflächigere Beprobung dieses Ertragsparameters hätte vermutlich zu besseren Ergebnissen geführt. Da der auf Schwad gelegte Strohertrag aber nur durch das Aufsammeln von Hand erfasst werden kann, ergeben sich versuchstechnische Grenzen. Außerdem ist bei den auf Schwad gelegten

Stroherträgen zu berücksichtigen, dass sich dieser Parameter aus der tatsächlich geschwadeten Strohmenge als auch einem gewissen Anteil, der bereits vor dem Schwaden im Schwadbereich lag, zusammensetzt. Letzterer wird maßgeblich von dem Verhältnis der Schwadbreite zur Arbeitsbreite (*Tabelle 33, Tabelle 34*) bestimmt. Dieser Anteil ist z. B. beim Mais Star\* Collect höher als bei den anderen Schwadtechniken. Die Ermittlung des auf Schwad gelegten Strohertrages ist dadurch beeinträchtigt, weshalb sich dieser Parameter nur bedingt für die Beurteilung der Erträge und Verluste beim Verfahrensschritt Schwaden eignet. Für die Ermittlung des potenziell erntbaren Maisstrohs im Erntetechnikversuch wurden 2,3 m<sup>2</sup> beprobt. In der Literatur wurden für diesen Parameter oftmals nur wenige Einzelpflanzen geerntet (z. B. fünf Einzelpflanzen bei GOLUB et al., 2016 oder WILHELM et al., 2011; vgl. *Tabelle 1*) oder kleinere Teilflächen (z. B. maximal 1,4 m<sup>2</sup> bei LIZOTTE et al., 2015b oder SHINNERS & BINVERSIE, 2007; vgl. *Tabelle 1*), sodass die Erhebung als zuverlässig gewertet werden kann.

Da es im Versuchsjahr 2016 während der Bergung (bzw. beim Mais Star\* Collect während des Dreschens/der Bergung) geregnet hatte (16,8 mm Niederschlag am 18.10.2016), bestand die Gefahr, dass aufgrund von austretendem Wasser in den TM-Proben fehlerhafte TM-Gehalte ermittelt worden waren, die zu einer Überschätzung der Stroherträge geführt hätten. Diese Bedenken konnten aber weitestgehend ausgeräumt werden, da kein Wasser aus den Proben austrat und anhand einer Plausibilitätsprüfung viele Beobachtungen aus den Vorjahren auch für das Versuchsjahr 2016 bestätigt wurden (z. B. die gleichen abgefahrenen Stroherträge für den selbstfahrenden Feldhäcksler und den Kurzschnittdewagen, ein vergleichbares Verhältnis der auf Schwad gelegten und der abgefahrenen Stroherträge, ähnliche Standardabweichungen bei den einzelnen Ertragsparametern). Die Hälfte der Erhebungen des auf Schwad gelegten Strohertrages war außerdem noch unter niederschlagsfreien Bedingungen durchgeführt worden, wobei ein Effekt des Niederschlages nicht quantifiziert werden konnte.

Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse muss insgesamt berücksichtigt werden, dass den Ergebnissen nur ein Standort zugrunde liegt und die jahresspezifischen Ergebnisse auf einen großen Einfluss der Witterungs- und Erntebedingungen schließen lassen, was die Allgemeingültigkeit der Resultate mindert.

### 6.2.2 Bilanz der Stroherträge und Ernteverluste bei der Strohernte

Während in Bayern die durchschnittlichen **Korn-TM-Erträge** in der Praxis 93,7 dt ha<sup>-1</sup> (2014) und 70,9 dt ha<sup>-1</sup> (2015) betragen (TM-Ertrag bei 100 % TM-Gehalt; Wert für 2016 liegt noch nicht vor) (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2016), wurden im

Erntetechnikversuch für die Sorte LG 32.58 mit Erträgen von jeweils über 115 dt ha<sup>-1</sup> in allen drei Versuchsjahren weit überdurchschnittliche Erträge erzielt, obwohl die Bewirtschaftung unter praxisnahen Bedingungen erfolgte (Einsatz von Großtechnik anstelle von Versuchstechnik, z. T. organische Düngung, kein Vereinzeln der Pflanzen nach dem Feldaufgang). Dies kann auf eine optimierte Bewirtschaftung und gute Standortbedingungen zurückgeführt werden.

Trotz der überdurchschnittlichen Erträge wurde jedoch das Ertragsniveau der Sorten- und Ernteterminversuche (Parzellenversuche) nicht erreicht. So waren die Kornerträge 2014 und 2016 jeweils rund 15 dt ha<sup>-1</sup> niedriger als im Sorten- und Ernteterminversuch (vgl. Kapitel 6.1.2). Eine Ausnahme war das Trockenjahr 2015, in welchem ein Großteil der Maisbestände in Bayern (wie auch der Sorten- und Ernteterminversuch in Pulling) unter Trockenstress litt, der Maisbestand im Erntetechnikversuch jedoch überwiegend von einer ausreichenden standortbedingten Wasserversorgung (anmooriger Boden) in Kombination mit überdurchschnittlichen Temperaturen profitierte und folglich mit einem Korn-TM-Ertrag von 115,7 dt ha<sup>-1</sup> weit höhere Kornerträge erreicht wurden als im Sorten- und Ernteterminversuch mit nur 92,3 dt ha<sup>-1</sup>. Teilflächen waren aber dennoch auch im Erntetechnikversuch von Trockenstress betroffen, was sich in einer höheren Ertragsvariabilität im Versuchsjahr 2015 äußerte.

Der **TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs** für die Sorte LG 32.58 war in allen drei Jahren niedriger als der Kornertrag, wie es auch für den Sorten- und Ernteterminversuch in den Jahren 2014 und 2016 galt und ebenso mehrheitlich in der Literatur beschrieben ist (vgl. Kapitel 6.1.2). Bei einem mittleren TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs von 107,1 dt ha<sup>-1</sup> wurde ein **Korn-Stroh-Verhältnis** von im Mittel 1:0,88 erreicht, das gut mit den Korn-Stroh-Verhältnissen von 1:0,86 - 1:0,89 im Sorten- und Ernteterminversuch übereinstimmte, sofern das Trockenjahr 2015 aus der Betrachtung ausgeklammert wird (*Tabelle 22*). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass im Gegensatz zum Sorten- und Ernteterminversuch die Stoppeln im Erntetechnikversuch Bestandteil des potenziell erntbaren Maisstrohs waren. In Abhängigkeit vom Versuchsjahr und auch der Sortenwahl (2015) wurden insgesamt variable Korn-Stroh-Verhältnisse von 1:0,85 bis 1:1,00 ermittelt, die eine vergleichbare Spannbreite wie im Sorten- und Ernteterminversuch abdeckten (*Tabelle 22*).

Da beide Fraktionen durch eine manuelle Ernte erfasst wurden, ist von nahezu verlustfreien Maximalerträgen auszugehen, sodass die Kornerträge im Vergleich zum tatsächlich gedroschenen Kornertrag vermutlich überschätzt wurden. Auch BIRRELL et al. (2014) konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass der Kornertrag bei einer manuellen Ernte höher ist als die beim Dreschen ermittelten Kornerträge. Demzufolge sind die Korn-

Stroh-Verhältnisse auf der Grundlage des gedroschenen Kornertrages gegebenenfalls enger.

Das im vorliegenden Versuch ermittelte Korn-Stroh-Verhältnis von 1:0,88 liegt deutlich unter dem Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1, das oftmals vereinfacht zur Abschätzung des anfallenden, also potenziell erntbaren, Maisstrohs angenommen wird (z. B. SHINNERS et al., 2012; KEENE et al., 2012; vgl. *Tabelle 2*). Die Annahme eines Korn-Stroh-Verhältnisses von 1:1 ermöglicht folglich nur einen groben Anhaltspunkt für die nach dem Körnerdrusch vorhandene, also potenziell erntbare Menge an Maisstroh und erlaubt keine korrekte Berechnung der Abfuhrdaten bzw. Ernteverluste. Zu dieser Einschätzung kommen auch BIRRELL et al. (2014) und SOKHANSANJ et al. (2002). Um eine Überschätzung des anfallenden, potenziell erntbaren Maisstrohs und damit auch der nach der Ernte zurückbleibenden Ernterückstände (beispielsweise für ökologische Bewertungen) zu vermeiden, scheint für die überschlägige Abschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohertrages ein eher konservatives Verhältnis von maximal 1:0,9 anstelle des oftmals verwendeten Verhältnisses von 1:1 sinnvoll.

Ein großer Anteil des potenziell erntbaren Maisstrohs, in 2014 und 2015 sogar über 50 %, konnte bei der Bergung mit den geprüften Erntetechniken nicht geerntet werden. So lagen bei mittleren **abgefahrenen Stroherträgen** von 48,7, 47,6 und 62,4 dt ha<sup>-1</sup> (Sorte LG 32.58, Ernte nach kurzer Feldliegezeit) in den drei Versuchsjahren, die **Abfuhrdaten** bei 49, 44 und 54 %. Die ermittelten abgefahrenen Stroherträge decken sich jedoch weitgehend mit den Angaben der Literatur für zwei- und mehrstufige Ernteverfahren (*Tabelle 2*), die überwiegend im Bereich von 46 dt ha<sup>-1</sup> (SHINNERS et al., 2012) bis 59 dt ha<sup>-1</sup> (SOKHANSANJ et al., 2002) liegen.

Eine Ausnahme stellen die von MENARDO et al. (2015a) in Italien ermittelten abgefahrenen Stroherträge von bis zu 92 dt ha<sup>-1</sup> dar, die bei ähnlichem bzw. geringerem potenziell erntbarem Maisstrohertrag von 99 dt ha<sup>-1</sup> deutlich über den abgefahrenen Stroherträgen in dieser Arbeit liegen. Allerdings wurden nach Auskunft der Autoren (AIROLDI, 2017) Prototypen verwendet und nur geringe Arbeitsgeschwindigkeiten realisiert, sodass unnatürliche und nicht-praxisnahe Bedingungen vorlagen.

Deutlich unter den in diesem Versuch ermittelten abgefahrenen Stroherträgen lagen dagegen die von GOLUB et al. (2016) bezifferten Erträge von 31 – 38 dt ha<sup>-1</sup>, die jedoch aufgrund von geschätzten Ernteverlusten wenig zuverlässig sind. Auch SHINNERS et al. (2012) ermittelten für ein mehrstufiges Ernteverfahren in einer einjährigen Erhebung geringere Stroherträge von nur 38 dt ha<sup>-1</sup>, was vermutlich auf schlechtere Erntebedingungen zurückzuführen ist, die aber nicht näher erläutert wurden. In

weiterführenden Betrachtungen wurden z. T. ebenfalls deutlich geringere abgefahrene Stroherträge unterstellt. So nahmen CANTER et al. (2016) für die Erstellung einer Ökobilanz zur Produktion von Ethanol aus Maisstroh einen abgefahrenen Strohertrag von nur

22 dt ha<sup>-1</sup> an. Die Herleitung dieser Annahme wurde jedoch nicht beschrieben.

Ein direkter Vergleich der Abfuhraten aus dem vorliegenden Versuch mit den Abfuhraten anderer Untersuchungen, die auf 40 – 93% beziffert wurden (*Tabelle 2*), ist nicht zielführend, da die berechnete Abfuhrate wesentlich vom vorhandenen potenziell erntbaren Maisstroh beeinflusst wird. Damit können sich auch bei ähnlichen abgefahrenen Stroherträgen deutliche Unterschiede in der Abfuhrate ergeben, bedingt durch Unterschiede im potenziell erntbaren Maisstrohertrag. Bei einer Schätzung des potenziell erntbaren Maisstrohertrages auf Basis des Kornertrages kann die Abfuhrate außerdem fehlerhaft sein. Demzufolge ist die Abfuhrate unter uneinheitlichen Rahmenbedingungen ein ungeeigneter Parameter für den Vergleich von Stroherträgen.

Die **Ernteverluste** lagen in den Einzeljahren bei 48,9, 60,8 und 53,2 dt ha<sup>-1</sup> und waren mit Ausnahme des Versuchsjahres 2016 größer als die abgefahrenen Stroherträge, sodass aus technischer Sicht die vorhandenen Potenziale nur unbefriedigend ausgeschöpft wurden.

Die Gesamtverluste setzen sich aus den Ernteverlusten beim Schwaden und weiteren Verlusten bei der Bergung des geschwadeten Strohs zusammen, wobei durch die getrennte Ermittlung der auf Schwad gelegten und abgefahrenen Stroherträge die weitaus größten Ernteverluste den technischen Restriktionen beim Verfahrensschritt Schwaden zugeordnet werden konnten. So wurden im Mittel 45,8 dt ha<sup>-1</sup>, also rund 43 % des potenziell erntbaren Maisstrohs, nicht auf Schwad gelegt, wohingegen die Bergungsverluste bei der Aufnahme mit der Pick-up am selbstfahrenden Feldhäcksler bzw. am Kurzschnittladewagen mit 8,4 dt ha<sup>-1</sup> bzw. 8 % des potenziell erntbaren Maisstrohs vergleichsweise gering waren.

Die Ernteverluste beim Verfahrensschritt Schwaden können zusätzlich aufgeteilt werden in die Stoppeln, die nicht geschwadet und demzufolge auch nicht geborgen werden können, und weitere Ernteverluste, die bei der Aufnahme bzw. Querförderung des Maisstrohs zum Schwad entstanden sind. Von den gesamten Verlusten in Höhe von 45,8 dt ha<sup>-1</sup> beim Schwaden entfiel jedoch nur ein kleiner Anteil von im Mittel 6,7 dt ha<sup>-1</sup> bzw. 7 % des potenziell erntbaren Maisstrohs auf die Stoppeln (die erst ab 2015 erfasst wurden). Die restlichen Ernteverluste beim Schwaden in Höhe von 36 % des potenziell erntbaren Maisstrohs sind also den Verlusten bei der Aufnahme bzw. Querförderung durch die Schwadtechnik zuzuordnen, sodass hier die größten

Optimierungsmöglichkeiten gegeben sind. Eine Steigerung der abgefahrenen Stroherträge ist auch durch möglichst geringe Stoppelhöhen denkbar. Dabei können sich durch die Ernte eines zusätzlichen Anteils des potenziell erntbaren Maisstrohs direkte Ertragseffekte (in Form von zusätzlicher Biomasse) ergeben, die jedoch vermutlich auf wenige  $\text{dt ha}^{-1}$  beschränkt sind und gegebenenfalls Konsequenzen auf die Maisstrohqualität (z. B. die Verschmutzung des Ernteguts) haben. Zudem können sich – in Abhängigkeit vom eingesetzten Ernteverfahren – auch indirekte Effekte ergeben, wenn beispielsweise das nachfolgende Schwaden oder Bergen durch geringere Stoppellängen begünstigt ist (vgl. nachfolgendes Kapitel).

### 6.2.3 Einfluss der Ernteverfahren auf den Maisstrohertrag

Aufgrund verschiedener Funktionsweisen (*Tabelle 17*) sind Unterschiede zwischen den **Schwadtechniken** hinsichtlich der Abfuhraten bzw. Ernteverluste beim Schwaden und Bergen naheliegend. Außerdem ist anzunehmen, dass beim Schwaden die Aufnahme des Maisstrohs vom Boden im Vergleich zu einer Schwadablage ohne Bodenkontakt erschwert ist und damit ein- bzw. zweistufige Ernteverfahren grundsätzlich begünstigt sind.

Im vorliegenden Versuch lagen jedoch sowohl die auf Schwad gelegten ( $58,5 - 64,7 \text{ dt ha}^{-1}$ ) als auch die abgefahrenen Stroherträge ( $51,9 - 54,3 \text{ dt ha}^{-1}$ ) bei allen drei Schwadtechniken auf einem sehr ähnlichen Niveau, sodass im dreijährigen Mittel zwischen den geprüften Schwadtechniken (BioChipper, Mais Star\* Collect und Merge Maxx 900/902) keine signifikanten Unterschiede festgestellt wurden. Ebenso hatte die Anzahl an Verfahrensschritten keinen signifikanten Effekt, sodass kein Unterschied zwischen dem zweistufigen Ernteverfahren Mais Star\* Collect und den dreistufigen Verfahren (BioChipper und Merge Maxx 900/902) bestand. Obwohl beim Mais Star\* Collect das Maisstroh ohne Zwischenablage auf dem Boden in die Unterfangwanne befördert wird und alle Bestandteile, die den Mähdrescher passieren, weitgehend verlustfrei auf dem Schwad abgelegt werden können, war die Summe der Ernteverluste ähnlich hoch, wie bei den dreistufigen Verfahren. Folglich muss ein nicht unerheblicher Teil der kolbenlosen Restpflanzen (der Kolben passiert den Mähdrescher) die Auffangwanne unter dem Pflücker verfehlt haben oder bei der Querförderung verlorengegangen sein. Mögliche Gründe sind eine falsch dimensionierte Unterfangwanne oder eine unzureichende Wurfleistung der gekröpften Häckselmesser, die die zerkleinerte Restpflanze in die Unterfangwanne befördern. Auch die Fahrgeschwindigkeit kann eine Rolle spielen.

Die Einordnung der erzielten Erträge in den Kontext der in der Literatur beschriebenen Studien ist schwierig, weil bislang nur wenige Versuche zum Vergleich verschiedener Ernteverfahren vorliegen (*Tabelle 2*) und oftmals Angaben zu den verwendeten Ernteverfahren bzw. der genauen Funktionsweise der Maschinen wie auch den Erntebedingungen fehlen. Die in der Literatur beschriebenen Ergebnisse deuten jedoch auf eine Überlegenheit von Ernteverfahren mit einer geringeren Anzahl an Verfahrensschritten hin (MENARDO et al., 2015a; SHINNERS et al., 2012). Auch GOLUB et al. (2016) unterstellten in ihren Berechnungen den vierstufigen Verfahren höhere Ernteverluste als den zweistufigen Verfahren, weil sie annahmen, dass bei den zweistufigen Verfahren geringere Verluste der Spindeln und Lieschen auftreten.

Im vorliegenden Versuch war das zweistufige Verfahren lediglich unter den Bedingungen des Versuchsjahres 2015 den dreistufigen Verfahren überlegen und die auf Schwad gelegten als auch die abgefahrenen Stroherträge signifikant höher, obwohl die Schwadbreite die Pick-up-Breite der Kurzschnittladewagen geringfügig überschritt (*Tabelle 34*) und ein kleiner Teil des äußeren Bereiches vom Schwad bei den Kurzschnittladewagen-Varianten nicht geborgen werden konnte. Für die Versuchsjahre 2014 und 2016 sind jedoch Einschränkungen zu berücksichtigen. 2014 war vermutlich ein optimaler Einsatz des Mais Star\* Collect nicht möglich gewesen. Aufgrund eines Sturmereignisses wenige Tage vor der Ernte lagerte der Maisbestand teilweise. Die Ernte mit dem Mais Star\* Collect war dabei erschwert, weil der Pflücker keine Lagermaisschnecken besaß. Pflanzen, die nicht vom Pflücker erfasst werden, können auch nicht geschwadet werden. Im Versuchsjahr 2016 hat es beim Einsatz des Mais Star\* Collect geregnet, wohingegen die anderen Schwadtechniken unter niederschlagsfreien Bedingungen eingesetzt wurden. Deshalb ist unklar, ob das schlechtere Abschneiden des Mais Star\* Collect einer möglicherweise durch die Nässe beeinträchtigten Funktionsweise geschuldet ist. Für die zuverlässige Klärung der Frage, ob ein Unterschied zwischen zwei- und dreistufigen Verfahren besteht, wären also weitere Untersuchungen notwendig.

Auch mit dem Direc Disc 500, das ebenfalls ein zweistufiges Ernteverfahren darstellt, aber gänzlich ohne den Verfahrensschritt Schwaden auskommt, konnten keine höheren Stroherträge erzielt werden. Der im Mittel erzielte abgefahrene Ertrag von 42 dt ha<sup>-1</sup> (einjähriges Ergebnis) lag sogar signifikant unter den Erträgen der anderen Schwadtechniken. Der Unterschied zu den anderen Schwadtechniken ist dabei größtenteils durch die höheren Stoppelmengen von 22,5 dt ha<sup>-1</sup> erklärbar, die nicht mit der Arbeitshöhe des Direct Disc in Verbindung stehen, sondern mit dem Überfahren von zwei Maisreihen durch den Mähdrescher. Diese können anschließend vom Direct Disc nicht mehr geerntet werden. Mit einer speziellen Bereifung beim Mähdrescher könnte dieses

Problem jedoch verhindert werden. Die übrigen Ernteverluste sind vermutlich den zu Boden gefallenen Spindeln, Lieschen und abgeknickten Pflanzenteilen oberhalb des Kolbens zuzuordnen.

Zwischen den beiden **Bergungsarten** gab es keine Ertragsunterschiede. Da die Aufnahme des geschwadeten Maisstrohs sowohl beim selbstfahrenden Feldhäcksler als auch dem Kurzschnittladewagen gleich ist (über eine Pick-up), war die Wahl der Bergungsart für die abgefahrenen Erträge unerheblich. Allerdings scheint die Wahl der Schwadtechnik einen Effekt auf die Bergungsverluste zu haben. So wurden nach dem Einsatz des Schwadhäckslers UP-6400 im Vergleich zum BioChipper tendenziell größere Verluste bei der Bergung des geschwadeten Strohs verursacht, obwohl beide Schwadtechniken das Maisstroh vergleichbar ablegen und die Erträge des auf Schwad gelegten Maisstrohs wie auch die Stoppellängen gleich waren. Demzufolge ist der Effekt möglicherweise auf den unterschiedlichen Zerkleinerungsgrad zurückzuführen, wobei das stärker zerkleinerte Maisstroh des Schwadhäckslers UP-6400 (s. Kapitel 6.2.5), schwieriger zu bergen war.

#### **6.2.4 Einfluss der Erntebedingungen auf den Maisstrohertrag**

Auch wenn die einzelnen Schwadtechniken im Mittel der drei Versuchsjahre ähnliche Stroherträge (auf Schwad gelegt und abgefahren) erzielt haben und demzufolge keine signifikanten Unterschiede bestanden, lagen in den Einzeljahren durchaus signifikante Unterschiede zwischen den Schwadtechniken vor. Außerdem bestand ein deutlicher Unterschied in den abgefahrenen Stroherträgen zwischen dem Versuchsjahr 2016, in welchem alle Schwadtechniken die jeweils höchsten abgefahrenen Stroherträge erzielten, und den anderen beiden Versuchsjahren. Dabei verursachten die jahresbedingten Effekte einen mittleren Ertragsunterschied von bis zu 15 dt ha<sup>-1</sup> bzw. einen Unterschied von 10 %-Punkten in der Abfuhrate (Abfuhrate in den Einzeljahren zwischen 44 und 54 %). Für einzelne Schwadtechniken wie beispielsweise den BioChipper war der Unterschied zwischen den Versuchsjahren mit 19 dt ha<sup>-1</sup> sogar noch höher. Jahresbedingte Ertragsunterschiede beim Einsatz derselben Erntetechnik werden auch von anderen Autoren beschrieben. So ermittelten SHINNERS et al. (2012 und 2007b) in zweijährigen Untersuchungen Unterschiede von 8 - 9 dt ha<sup>-1</sup>. Auch BIRRELL et al. (2014) bestätigten in einer vierjährigen Studie für ein mehrstufiges Ernteverfahren Unterschiede von bis zu 34 dt ha<sup>-1</sup>, obwohl hinsichtlich der Kornerträge ähnliche Ertragsbedingungen vorlagen. Folglich haben die jahresspezifischen Erntebedingungen einen wesentlichen Einfluss auf das Abschneiden der Ernteverfahren. Weil die beiden Bergungstechniken in den Einzeljahren nahezu konstante Bergungsverluste verursachten, kann geschlussfolgert

werden, dass die Erntebedingungen primär Auswirkungen auf die Arbeitsweise der Schwadtechniken haben.

Ein möglicher Einflussfaktor auf die grundsätzliche Höhe der Stroherträge (auf Schwad gelegt bzw. abgefahren) ist der **Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs**. So sind gegebenenfalls die höheren Stroherträge (geschwadet als auch abgefahren) im Versuchsjahr 2016 mit dem rund  $18 \text{ dt ha}^{-1}$  höheren Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs (verglichen mit 2014) zu erklären. Dagegen fanden SOKHANSANJ et al. (2002) in ihren Untersuchungen trotz eines enormen Ertragsunterschiedes von  $41 \text{ dt ha}^{-1}$  beim potenziell erntbaren Maisstroh zwischen zwei Jahren nur eine Differenz von  $5 \text{ dt ha}^{-1}$  im abgefahrenen Strohertrag. Auch im vorliegenden Versuch konnten im Versuchsjahr 2015 im Vergleich zu 2014 keine höheren Stroherträge abgefahren werden, obwohl der TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs 2015 um fast  $11 \text{ dt ha}^{-1}$  höher war als 2014.

Möglicherweise wurden jedoch im Versuchsjahr 2015 (trotz des höheren potenziell erntbaren Maisstrohertrages) keine höheren Stroherträge abgefahren, weil auch die Stoppelmengen bzw. **Stoppellängen** 2015 signifikant höher als 2014 und 2016 waren (*Tabelle 28, Stoppellänge von 21 cm erreicht*.

*Tabelle 36*), da nicht bewusst tief gedroschen worden war. Das hat möglicherweise zu einer Beeinträchtigung der beiden Schwadtechniken Mais Star\* Collect und Merge Maxx 900/902 geführt, bei denen die Stoppellänge durch die Arbeitshöhe beim Dreschen festgelegt wird. Dadurch wird einerseits ein geringerer Anteil auf Schwad gelegt und andererseits ist durch die höheren Stoppeln auch eine erschwerte Aufnahme des Maisstrohs mit der Pick-up anzunehmen. Während beim Mais Star\* Collect durch die höheren Stoppeln lediglich die Bergung erschwert ist, wird beim Merge Maxx 900/902 zusätzlich auch das Schwaden (Pick-up) beeinträchtigt, wodurch sich höhere Stoppellängen noch gravierender auf das Ernteergebnis auswirken können. Das kann ein Grund für das schlechtere Abschneiden des Merge Maxx 902 im Versuchsjahr 2015 sein.

Deshalb wurde bei der Ernte im Versuchsjahr 2016 auf eine möglichst geringe Arbeitshöhe des Mähdreschers in den Parzellen des Mais Star\* Collect und des Merge Maxx 902 geachtet. Zudem wurde der Kurzschnittladewagen und der Merge Maxx 902 in derselben Fahrtrichtung wie der Mähdrescher eingesetzt, weil für die Pick-up eine bessere Aufnahme des Maisstrohs bei Übereinstimmung der Fahrtrichtung mit der Knickrichtung der Stoppeln vermutet wurde, was möglicherweise zu den insgesamt höheren Erträgen im Versuchsjahr 2016 beigetragen hat. Auch beim BioChipper wurde

ein optimierter Einsatz im Versuchsjahr 2016 angestrebt. Dazu wurde etwas höher gedroschen, weil vermutet wurde, dass aktiv geschlegeltes Maisstroh besser aufgenommen wird als auf dem Feld liegendes Maisstroh. Diese Annahmen konnten im Rahmen des Versuches jedoch nicht überprüft werden. In Kombination mit dem höheren Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs und den technischen Optimierungen am BioChipper (s. Kapitel 4.4.2) könnte es jedoch zu den deutlich höheren Erträgen des BioChippers im Versuchsjahr 2016 gekommen sein.

Zusätzlich zur Höhe des potenziell erntbaren Maisstrohs, den technischen Veränderungen an der Maschine und unterschiedlichen Arbeitshöhen des Mähdreschers bzw. der Schwadtechniken kann auch die Beschaffenheit des Maisstrohs den Erfolg bei der Ernte beeinflussen.

Eine längere **Feldliegezeit**, also eine Verzögerung der Ernte, die im vorliegenden Versuch mit nur zwei Tagen Zeitabstand zwischen dem Dreschen und Schwaden relativ kurz war und für Praxisbedingungen aus arbeitswirtschaftlichen Gründen als realistisch eingeschätzt werden kann, führte im Versuch bereits zu signifikant geringeren Stroherträgen, wobei die einzelnen Schwadtechniken davon unterschiedlich beeinflusst wurden (*Tabelle 29*). 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 erschweren Aufnahme des Maisstrohs beim Schwaden kommen, was die teilweise signifikanten Ertragseinbußen von BioChipper und Schwadhäcksler UP-6400 unter diesen Bedingungen erklären kann. Beim Mais Star\* Collect sind die Verfahrensschritte Dreschen und Schwaden gekoppelt, wodurch sich die Ernteverzögerung lediglich auf die nachfolgende Bergung auswirken konnte (*Tabelle 18*). Erwartungsgemäß ergaben sich für den Mais Star\* Collect keine Unterschiede in dem auf Schwad gelegten Strohertrag zwischen der langen und der kurzen Feldliegezeit. Beim Merge Maxx 900/902 wurden unter den Bedingungen der längeren Feldliegezeit sogar tendenziell höhere Stroherträge geschwadet und abgefahren. Es wäre denkbar, dass eine höhere Lagerungsdichte den Substratfluss bei der Aufnahme des Maisstrohs mit der Pick-up des Merge Maxx 900/902 verbessert.

Ertragseinbußen bei einer verzögerten Ernte bestätigen auch SHINNERS et al. (2007b). Allerdings sanken in ihren Untersuchungen die Abfuhraten wesentlich deutlicher ab (von 33/41 % auf 50/57 % in zwei Versuchsjahren), wobei auch die Zeitverzögerung mit ein bis sechs Wochen größer war. Zugleich waren die TM-Gehalte bei der späteren Ernte

wesentlich höher, sodass die Effekte der verzögerten Ernte und der höheren TM-Gehalte nicht mehr klar zu trennen waren.

Nicht nur die Feldliegezeit kann die physikalische Beschaffenheit des Maisstrohs verändern, sondern z. B. auch die **Sortenwahl**. Wesentliche Merkmale, die durch den Genotyp beeinflusst werden, sind die Menge und der TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs, woraus sich unterschiedliche Stroheigenschaften zur Ernte ergeben können. Da für den TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs zwar signifikante, für den TM-Ertrag aber nur tendenzielle Unterschiede zwischen den drei angebauten Sorten vorlagen (*Tabelle 27*), war die sortenbedingte Variation zur Ernte insgesamt eher mäßig und es konnte kein signifikanter Effekt der Sortenwahl auf den Strohertrag (auf Schwad gelegt und abgefahren) festgestellt werden (*Tabelle 30*). Tendenziell wurden jedoch bei den beiden Sorten SY Talisman und KWS 9361 höhere Stroherträge auf Schwad gelegt und abgefahren als bei der Sorte LG 32.58, sodass wiederum ein positiver Zusammenhang zwischen dem Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs der drei Sorten und dem abgefahrenen Strohertrag festgestellt wurde, obwohl die Ernte der Sorten SY Talisman und KWS 9361 um zwei Tage verzögert war (*Tabelle 18*) und deshalb nachteilige Erntebedingungen unterstellt werden können. Eine gleichzeitige Ernte aller drei Sorten hätte gegebenenfalls zu einer stärkeren Differenzierung zwischen den drei Sorten geführt. Denkbar wäre auch ein Effekt des Maisstroh-TM-Gehaltes auf den abgefahrenen Strohertrag – abhängig von der jeweiligen Funktionsweise der einzelnen Schwadtechniken. SHINNERS et al. (2007b) vermuteten, dass feuchtes Maisstrohs besser von der Pick-up aufgenommen werden kann als trockenes. Aufgrund der insgesamt hohen TM-Gehalte im abgefahrenen Stroh im Versuchsjahr 2015 (im Mittel 59,1 %, *Tabelle 31*) und den nur tendenziellen Unterschieden zwischen den drei Sorten, konnte jedoch der Zusammenhang zwischen dem TM-Gehalt und den abgefahrenen Stroherträgen im vorliegenden Versuch nicht geklärt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die Sortenwahl zeitgleich der TM-Gehalt, der Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs und gegebenenfalls weitere Eigenschaften, wie z. B. die fraktionelle Zusammensetzung des Maisstrohs beeinflusst werden, wodurch ein singulärer Effekt der einzelnen Faktoren auf die Abfuhraten nicht messbar ist. Eine isolierte Veränderung beider Parameter könnte zu deutlicheren Effekten führen und weitere Erkenntnisse über die maschinenspezifisch optimalen Erntebedingungen liefern. Außerdem ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass der Datenumfang für die Ermittlung eines quantitativen Zusammenhanges zwischen dem abgefahrenen Strohertrag und einzelnen Merkmalen, wie z. B. dem potenziell erntbaren Maisstroh, zu gering ist.

Veränderte Erntebedingungen können sich auch durch unterschiedliche **Witterungsverhältnisse** ergeben. Im vorliegenden Versuch war lediglich die Bergung (und der Einsatz des Mais Star\* Collect) im Versuchsjahr 2016 von Niederschlägen betroffen, während ansonsten niederschlagsfreie Bedingungen vorlagen. Die Witterung während der Ernte kann jedoch zu deutlich stärkeren oder auch anderen Effekten führen, wie sie ansatzweise durch die Feldliegezeit und die Sortenwahl simuliert wurden. Eine Abschätzung der Ernteleistung unter verschiedenen Witterungsverhältnissen oder auch in anderen Boden-Klima-Regionen ist deshalb nicht ohne Weiteres möglich.

### 6.2.5 Einfluss der Ernteverfahren und Erntebedingungen auf die Qualität des abgefahrenen Maisstrohs

Für die nachfolgende Verwertung von Maisstroh in der Biogasproduktion, spielt neben der Quantität auch die Qualität des geernteten Maisstrohs eine maßgebliche Rolle, wobei im Hinblick auf die Konservierung und den Einsatz in der Biogasanlage verschiedene physikalische (TM-Gehalt, Zerkleinerungsgrad) und chemische Parameter (Rohaschegehalt) von Bedeutung sind.

Im vorliegenden Versuch waren die **TM-Gehalte** des tatsächlich geborgenen Maisstrohs sehr variabel und lagen je nach Versuchsjahr im Mittel zwischen 26,8 % (bedingt durch den Niederschlag zur Ernte) und 59,1 % (warme, windige Bedingungen) (*Tabelle 31*). Auch in der Literatur finden sich extrem variable und mit 51 – 83 % meist wesentlich höhere TM-Gehalte für das abgefahrene Maisstroh (*Tabelle 2*). Eine Ausnahme bilden lediglich die von MENARDO et al. (2015a) erhobenen TM-Gehalte von nur 33 %.

Auffallend ist die deutliche Diskrepanz zwischen den TM-Gehalten, die im stehenden Bestand ermittelt wurden und den TM-Gehalten des tatsächlich geborgenen Maisstrohs. Bei einem für Körnermais üblichen Erntezeitpunkt betragen im vorliegenden Versuch die TM-Gehalte des potenziell erntbaren Maisstrohs, also unmittelbar vor der Ernte von Korn und Maisstroh (ermittelt im stehenden Bestand), in Abhängigkeit vom Versuchsjahr bzw. der Sorte im Mittel mindestens 30,6 % und höchstens 36,9 % (*Tabelle 26, Tabelle 27*) und lagen damit innerhalb der im Sorten- und Ernteterminversuch erzielten Schwankungsbreite von 29,5 – 39,8 % (*Tabelle 22*) und den TM-Gehalten, die auch bei einer Silierung von Silomais angestrebt werden (28 - 35 %, SPIEKERS, 2017).

Ein Grund für die sehr variablen TM-Gehalte nach der Bergung und ihre Abweichung zu den TM-Gehalten des potenziell erntbaren Maisstrohs, ist der Witterungseinfluss im Zeitraum zwischen dem Dreschen und dem Bergen des Maisstrohs. In allen

Versuchsjahren lag mindestens ein Tag zwischen dem Dreschen des Körnermaises und der tatsächlichen Strohbergung (*Tabelle 18*). In Abhängigkeit von den vorherrschenden Witterungsbedingungen kam es dabei zu einer Nachtrocknung (2014 und 2015) oder auch zu einer Feuchtigkeitsaufnahme (2016 aufgrund von Niederschlägen) des Substrates, was sich mit den Ergebnissen von SHINNERS et al. (2007b) und WOMAC et al. (2005) deckt. Die enorme Nachtrocknung im Versuchsjahr 2015 lässt sich dabei durch eine ungewöhnlich frühe Ernte (einen Monat früher als 2014) bei hohen Tagestemperaturen und zudem einer höheren Windgeschwindigkeit erklären, was im Vergleich zur typischen Herbstwitterung in Süddeutschland eher eine Ausnahme darstellt. Eine ähnliche Beobachtung findet sich auch bei SHINNERS et al. (2007b), der bereits innerhalb von wenigen Stunden einen sprunghaften Anstieg der TM-Gehalte von 37 auf 61 % ermittelte. Dagegen war die Abtrocknung des Maisstrohs während der Strohernte unter den typischen Herbst-Witterungsbedingungen im Versuchsjahr 2014 nur gering, sodass sich für das abgefahrene Maisstroh nur etwas höher TM-Gehalte (40,9 %) als beim potenziell erntbaren Maisstroh (36,9 %) ergaben und diese auch bei einer längeren Feldliegezeit nicht zunahmten. Um folglich im abgefahrenen Maisstroh möglichst den im Bereich von Silomais liegenden TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs aufrecht zu erhalten und eine unerwünschte Nachtrocknung zu verhindern, ist eine möglichst schnelle Bergung des Maisstrohs anzustreben. Durch eine unmittelbare Ernte des Maisstrohs innerhalb von wenigen Stunden, wie es im vorliegenden Versuch aus versuchstechnischen Gründen nicht möglich war, sind vermutlich auch im abgefahrenen Maisstroh TM-Gehalte im Bereich von Silomais realisierbar, wie von MENARDO et al. (2015a) beschrieben.

Neben den Witterungsbedingungen bestehen auch verfahrenstechnische Einflüsse auf den TM-Gehalt. So wurden mit dem zweistufigen Verfahren Mais Star\* Collect im zweijährigen Vergleich (2014 und 2015; FLESCHHUT et al., 2016) signifikant geringere TM-Gehalte erzielt, wohingegen die dreistufigen Verfahren auf einem sehr einheitlichen Niveau lagen. Der Grund dafür ist die unmittelbare Schwadablage des Maisstrohs während des Dreschens beim Mais Star\* Collect, wodurch die Nachtrocknung im Vergleich zu einer Breitverteilung des Maisstrohs beim Dreschen und einem nachfolgend separaten Verfahrensschritt reduziert ist. Durch die Niederschläge im Versuchsjahr 2016 waren die TM-Gehalte im Wesentlichen vom Zeitpunkt der Beprobung und der gefallenen Niederschlagsmenge abhängig, weshalb sich kein nachvollziehbarer Zusammenhang zur Schwadtechnik ergab und die Ergebnisse für eine Bewertung der verfahrenstechnischen Einflüsse ausgeklammert werden sollten.

Auch SHINNERS et al. (2012) bestätigten für ein zweistufiges Verfahren geringere TM-Gehalte als für ein mehrstufiges Verfahren. Bei einstufigen Verfahren findet vermutlich aufgrund der unverzüglichen Ernte aus dem stehenden Bestand kaum eine Trocknung des Maisstrohs statt. So ermittelten SHINNERS et al. (2012) für ein einstufiges auch signifikant geringere TM-Gehalte als mit zwei- und mehrstufigen Verfahren. Zudem fanden SHINNERS et al. (2012) und WOMAC et al. (2005) bei Techniken mit einem höherem Zerkleinerungsgrad des Maisstrohs stärkere Änderungen beim TM-Gehalt. Dieser Zusammenhang konnte im vorliegenden Versuch, trotz signifikanter Unterschiede im Zerkleinerungsgrad zwischen den Schwadtechniken, nicht bestätigt werden, allerdings war der Untersuchungszeitraum mit maximal fünf Tagen auch verhältnismäßig gering für die Beurteilung der TM-Gehalte im Zeitverlauf. Weitere Einflussfaktoren, wie z. B. die Tageszeit oder die Bodenfeuchte, die den TM-Gehalt ebenfalls beeinflussen (WOMAC et al., 2005), wurden nicht untersucht.

Im Vergleich zu den enormen Witterungseinflüssen war der verfahrenstechnische Unterschied mit maximal 5 %-Punkten zwischen den zwei- und dreistufigen Verfahren im vorliegenden Versuch jedoch von untergeordneter Bedeutung.

Der TM-Gehalt ist insbesondere für die nachfolgende Silierung von Bedeutung. Für Maisstroh ist dabei eine Sickersaftbildung durch Unterschreiten eines TM-Gehaltes von 30 % (GERIGHAUSEN, 2011) kaum zu befürchten. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass unter extremen Trocknungsbedingungen auch sehr hohe TM-Gehalte beim abgefahrenen Maisstroh erreicht werden, die möglicherweise die Verdichtbarkeit und damit auch den Siliererfolg beeinträchtigen. Auch aus prozesstechnischer Sicht sind zu trockene Substrate unerwünscht, um beim gängigen Nassgärverfahren die Obergrenze von 15 % beim TM-Gehalt im Fermenter einzuhalten (EDER, 2012).

Gemäß SHINNERS et al. (2011) ist die aerobe Lagerung von Maisstroh jedoch erst ab Stroh-TM-Gehalten von 75 % erfolgreich. Da im vorliegenden Versuch auch unter sehr guten Trocknungsbedingungen (im Versuchsjahr 2015) TM-Gehalte von maximal 59,1 % erreicht wurden, ist anzunehmen, dass unter den Standortbedingungen Süddeutschlands nicht ausreichend hohe TM-Gehalte für eine trockene Bergung und Lagerung von Maisstroh erreicht werden. SHINNERS et al. (2011) konnten jedoch in ihren Untersuchungen zeigen, dass die Silierung von Maisstroh eine geeignete Konservierungsmethode über weite Bereiche des TM-Gehaltes (bis zu 65 %) ist. Auch OSTERTAG & FLESCHHUT (2016) ermittelten für Maisstroh mit TM-Gehalten von 34,0 bis 60,8 % (aus dem Erntetechnikversuch) eine gute Siliereignung. Ungeklärt sind aber Zusammenhänge zwischen dem TM-Gehalt von Maisstroh und der Verdichtbarkeit bzw.

der aeroben Stabilität. Demzufolge ist ein Zielbereich für den optimaler TM-Gehalt des abgefahrenen Maisstrohs bislang nicht bekannt.

Zusätzlich zum TM-Gehalt des Maisstrohs spielt auch der **Zerkleinerungsgrad** eine wesentliche Rolle für den Transport des Substrates, die Verdichtung im Silo und für die prozesstechnischen Eigenschaften in der Biogasanlage, wobei davon auszugehen ist, dass ein möglichst hoher Zerkleinerungsgrad im Erntegut erstrebenswert ist.

Die vier Schwadtechniken erzielten beim Schwaden eine signifikant unterschiedliche Zerkleinerung des Maisstrohs (*Abbildung 7*), wobei ein nachvollziehbarer Zusammenhang zur Funktionsweise (*Tabelle 17*) bestand. Dabei hoben sich die Schwadtechniken mit einer aktiven Zerkleinerung des Maisstrohs deutlich vom Merge Maxx 900/902 ab, der das Stroh beim Schwaden ohne Zerkleinerung aufnimmt. Durch die Schlegelmesser (Schwadhäcksler UP-6400) wurde außerdem eine stärkere Zerkleinerung als mit den Hammerschlegeln (BioChipper) erreicht, sodass der Schwadhäcksler UP-6400 die höchste Zerkleinerung erzielte.

Entscheidend für den Zerkleinerungsgrad des Maisstrohs war jedoch die Bergungstechnik, wobei erwartungsgemäß mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler eine signifikant stärkere Zerkleinerung als mit dem Kurzschnittladewagen erreicht wurde. Ein hoher Zerkleinerungsgrad der Schwadtechnik begünstigte dabei die Zerkleinerung bei der Bergung. Das galt insbesondere für die Bergung mit dem Kurzschnittladewagen, wohingegen bei einer Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler aufgrund der intensiven Zerkleinerung kaum mehr relevante Unterschiede zwischen den einzelnen Schwadtechniken vorlagen – lediglich die intensivere Zerkleinerung durch den Schwadhäcksler UP-6400 war auch nach der Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler noch erkennbar. Im Hinblick auf eine intensive Zerkleinerung, ist folglich eine starke „Vorzerkleinerung“ durch die Schwadtechnik vorteilhaft, allerdings deuten die höheren Bergungsverluste nach dem Einsatz des Schwadhäcksler UP-6400 auf eine erschwerte Aufnahme des stark zerkleinerten Maisstrohs hin (vgl. Kapitel 6.2.3). Denkbar sind Verluste an der Pick-up durch einen schlechteren Substratfluss.

Die Vermutung von SHINNERS et al. (2007b), dass beim Häckseln von vorzerkleinertem und geschwadetem Maisstroh ein schlechteres Häckselergebnis erzielt wird als beim Häckseln aus dem stehenden Bestand, konnte nicht bestätigt werden. So wurde mit dem BioChipper in Kombination mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler als Bergungsvariante eine sehr ähnliche Zerkleinerung wie beim Direct Disc 500, welches das Maisstroh aus dem stehenden Bestand häckseln, erreicht. Allerdings konnte dieser Vergleich nur einjährig geprüft werden.

Vergleichbar zu den Ergebnissen von SHINNERS et al. (2012; 2007b) wurden die theoretischen Häcksellängen des selbstfahrenden Feldhäckslers (8 – 16 mm) und des Kurzschnittladewagens (37/38 mm) nicht ganz eingehalten und bei beiden Bergungsarten nicht unwesentliche Anteile von größeren Häcksellängen ermittelt. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist jedoch schwierig, da es verschiedene Methoden für die Bestimmung der Häcksellängen gibt, die nicht unmittelbar vergleichbar sind (MAULFAIR & HEINRICHS, 2012). Der Einsatz der Trommelsiebmaschine ist zur Klassifizierung von Holzhackschnitzeln etabliert (BÖHM & HARTMANN, 2002), für die Bewertung der Häcksellängen von Futtermitteln oder landwirtschaftlichen Substraten aber bislang nicht verbreitet. Die Ergebnisse erlauben deshalb nur einen relativen Vergleich der Ernteverfahren, wohingegen ein Zusammenhang zwischen den Häcksellängen und der Lagerungsdichte bzw. der Verdichtbarkeit nicht beschrieben ist und die weiterführende Einordnung der Ergebnisse erschwert.

Neben den physikalischen Substrateigenschaften TM-Gehalt und Häcksellänge ist auch die stoffliche Zusammensetzung des Maisstrohs nach der Bergung von Bedeutung. Ein entscheidender Parameter ist der **Rohaschegehalt**, der beim Silierprozess die Ansäuerung des Substrates behindert (JEROCH et al., 1993) und als inertes Material bei allen biochemischen Verwertungen unerwünscht ist (LACEY et al., 2016). Im Versuchsmittel lag der Rohaschegehalt bei 7,6 % (*Tabelle 31*) und ist damit wesentlich höher als bei Silomais, für welchen unter Praxisbedingungen in Bayern im Mittel 3,4 % (n = 1710, 2016; LfL, 2017b) erreicht wurden. Im Vergleich zu Grassilage, das als zweitbedeutendstes Substrat unter den nachwachsenden Rohstoffen etabliert ist (DBFZ, 2015) und einen mittleren Rohaschegehalt von 9,1 % hat (n = 2605, 2016; LfL, 2017b), erreicht Maisstroh jedoch geringere Rohaschegehalte und kann hinsichtlich der Verschmutzung als unproblematisch eingestuft werden. Da im Sorten- und Ernteterminversuch ein Rohaschegehalt von 4,3 % für das Maisstroh ermittelt wurde, der als physiologischer Rohaschegehalt gewertet werden kann, kann von einem mittleren verfahrenstechnischen Schmutzeintrag in Höhe von 3,3 % ausgegangen werden.

Die ermittelten Rohaschegehalte im Bereich von 6,0 bis 9,2 % (Mittel der Einzeljahre) stimmen sehr gut mit den von SHINNERS et al. (2012) erhobenen Werten von 5,8 bis 9,8 % bei zwei- und mehrstufigen Verfahren überein. SHINNERS et al. (2012) ermittelten in ihren Untersuchungen einen signifikanten Unterschied zwischen den zwei- und mehrstufigen Ernteverfahren. Auch DARR & WEBSTER (2014) und VADAS & DIGMAN (2013) beschreiben den Zusammenhang zwischen der Verschmutzung und der Anzahl an Verfahrensschritten. Dieser Zusammenhang konnte im vorliegenden Versuch nur bedingt

bestätigt werden. So waren die Rohaschegehalte bei einer Ernte mit dem zweistufigen Verfahren (Mais Star\* Collect) im zweijährigen Vergleich signifikant geringer als bei den dreistufigen Verfahren (FLESCHHUT et al., 2016), dreijährig konnten aber aufgrund der insgesamt hohen Rohaschegehalte im Versuchsjahr 2016 und der damit einhergehenden hohen Standardabweichungen keine signifikanten Unterschiede mehr festgestellt werden. Auch das zweistufige Verfahren Direct Disc 500 erreichte deutlich, aber nicht signifikant, geringere Rohaschegehalte im einjährigen Vergleich.

Zwischen den Bergungsvarianten selbstfahrender Feldhäcksler und Kurzschnittladewagen konnten keinerlei Unterschiede festgestellt werden, was vor dem Hintergrund einer ähnlichen Bergungsweise (Aufnahme über einen Pick-up) nachvollziehbar ist.

Die großen Unterschiede im Rohaschegehalt zwischen den einzelnen Versuchsjahren lassen auf einen Einfluss der Witterungsbedingungen während der Ernte schließen. So wurden unter trockenen Erntebedingungen (2015) signifikant geringere Rohaschegehalte erzielt als unter nassen Erntebedingungen (2016). DARR & WEBSTER (2014) konnten zudem feststellen, dass der Rohaschegehalt positiv mit der Abfuhrate korreliert, weshalb die höheren Rohaschegehalte im Versuchsjahr 2016 auch z. T. durch die höheren Stroherträge entstanden sein können und möglicherweise ein Zielkonflikt zwischen der Maximierung der Abfuhrate und der Minimierung des Schmutzeintrages besteht.

LACEY et al. (2016) ermittelten unterschiedliche Rohaschegehalte für die einzelnen Fraktionen des Maisstrohs, wobei die Blätter die höchsten Gehalte von 10,4 % und die Spindeln mit 1,5 % die geringsten hatten. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch LIZOTTE et al. (2015a). Neben den tatsächlichen verfahrenstechnischen Effekten, die sich bei der Bergung auf den Rohaschegehalt ergeben, hat möglicherweise auch die quantitative Zusammensetzung der einzelnen Biomasse-Fraktionen einen Einfluss auf den physiologischen Rohaschegehalt des Substrates. Denkbar wäre, dass beispielsweise der Spindel- und Lieschenanteil beim Mais Star\* Collect höher ist als bei den anderen Schwadtechniken, weil die beiden Biomasse-Fraktionen den Mähdrescher passieren und auf dem Schwad abgelegt werden.

### 6.3 Pflanzenbauliches und technologisches Potenzial von Körnermaisstroh

Werden Ertrag, Qualität und die Methanausbeute des potenziell erntbaren Maisstrohs aus dem Sorten- und Ernteterminversuch zugrunde gelegt, um gemessen am Methanhektarertrag das pflanzenbauliche Potenzial zu beziffern, ergibt sich im Mittel ein Potenzial von  $3509 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ . Dieses pflanzenbauliche Potenzial ist als maximal mögliches Potenzial zu verstehen, weil durch die „unnatürliche“ Ernte keine nennenswerten Ertrags- und Qualitätsverluste aufgetreten sind. Verglichen mit Silomais erreichte Maisstroh unter diesen Voraussetzungen einen Methanhektarertrag von 49 %. Wie anhand der Variationskoeffizienten deutlich wird, ist dieses pflanzenbauliche Potenzial durch eine entsprechende Sortenwahl und auch die Terminierung des Erntetermins zu beeinflussen und somit optimierbar.

Nach der Abfuhr von Maisstroh unter Praxisbedingungen wurde in den Erntetechnikversuchen ein technologisches Potenzial von im Mittel nur  $1510 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  ermittelt, welches als realistisches Potenzial für die nachfolgende Lagerung und Nutzung angenommen werden kann und 21 % im Vergleich zu Silomais beträgt. Aufgrund von Restriktionen bei der Strohernte konnten also nur 43 % des pflanzenbaulichen Potenzials (der Sorten- und Ernteterminversuche) ausgeschöpft werden. Da in Bezug auf das Ertragsniveau von Korn und potenziell erntbarem Maisstroh vergleichbare Ausgangsbedingungen in beiden Versuchen vorlagen, könnte auch für die praxisnahen Bedingungen des Erntetechnikversuches ein ähnliches pflanzenbauliches Potenzial unterstellt werden.

Der deutliche Unterschied zwischen dem pflanzenbaulichen und dem technologischen Potenzial ist dabei primär auf die hohen Ertragsverluste bei der Strohernte zurückzuführen. So konnten nur weniger als 50 % des potenziell erntbaren Maisstrohs geborgen werden. Die Ergebnisse zeigten, dass dabei die größten Restriktionen und demzufolge auch die größten Optimierungspotenziale für den Verfahrensschritt Schwaden bestehen (vgl. Kapitel 6.2.2).

Da in beiden Versuchen die Inhaltsstoffe des Maisstrohs erfasst wurden, war zudem auch ein Qualitätsvergleich zwischen dem potenziell erntbaren Maisstroh und dem abgefahrenen Maisstroh nach der Bergung möglich. Auch wenn die Probenanzahl im Erntetechnikversuch deutlich geringer war und ein direkter Vergleich nur eingeschränkt möglich ist, weil das Maisstroh aus zwei verschiedenen Versuchen stammte (andere Sorten, andere Standortbedingungen), deuten die Ergebnisse auf eine veränderte stoffliche Zusammensetzung des Maisstrohs nach der Bergung hin, die über die bereits

diskutieren Veränderungen beim TM-Gehalt und dem Rohaschegehalt (vgl. Kapitel 6.2.5) hinausgehen.

Auffallend waren die höheren Stärkegehalte des abgefahrenen Maisstrohs (1,7 %), die um ein Vielfaches höher waren als im potenziell erntbaren Maisstroh, was darauf hindeutet, dass Maisstroh unter Praxisbedingungen aufgrund von Verlusten beim Dreschen Korn- bzw. Kolbenanteile enthält. Umgekehrt waren die Zuckergehalte des abgefahrenen Maisstrohs im Vergleich zum potenziell erntbaren Maisstroh um mehr als die Hälfte geringer, was die sorten- und ernteterminbedingte Variabilität in den Sorten- und Ernteterminversuchen deutlich überstieg und folglich nur schwer durch pflanzenbauliche Effekte zu erklären war. Somit war es offensichtlich zu einem Abbau von Zucker während der Zeitdauer der Ernte gekommen. Auch MENARDO et al. (2015b) erwähnen einen Verlust von Zucker beim Anwelken von Maisstroh auf dem Feld. Ebenso nennen TEMPLETON et al. (2009) verfahrenstechnische Einflüsse und die Zeitdauer bei der Ernte als Gründe für eine veränderte stoffliche Zusammensetzung. Um jedoch versuchsbedingte Unterschiede in der Maisstrohqualität von einem tatsächlichen Qualitätsverlust unterscheiden zu können, wäre eine konsequente Erfassung der Inhaltsstoffe zu allen Verfahrensschritten in den Erntetechnikversuchen notwendig gewesen.

Neben den Unterschieden in der stofflichen Zusammensetzung deuten auch die (geringfügigen) Unterschiede in der Methanausbeute von  $10 \text{ l CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$  auf eine Qualitätsminderung des Maisstrohs nach der Ernte im Vergleich zum Ausgangsbestand hin. Gemessen an den Ertragseinbußen durch die Strohernte haben die Qualitätseinbußen jedoch nur einen geringen Erklärungsgehalt für den deutlichen Unterschied zwischen dem pflanzenbaulichen und technologischen Potenzial.

Eine Gesamtbewertung macht deutlich, dass die wesentlichen Stellschrauben für eine Optimierung der Methanhektarerträge nicht pflanzenbaulicher Art sondern technologischer Natur sind, wobei ein Hauptaugenmerk auf die Erhöhung der Abfuhraten zu legen ist.

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das wesentliche Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, für Maisstroh anhand von ertrags- und qualitätsbestimmenden Faktoren das pflanzenbaulich vorhandene und das technologisch realisierbare Potenzial zu quantifizieren. Anhand der Ergebnisse können dabei folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Beim Anbau von Körnermais fallen als Reststoff relevante Mengen an potenziell erntbarem Maisstroh an, die in den vorliegenden Versuchen auch unter praxisnahen Bedingungen einen TM-Ertrag von  $100 \text{ dt ha}^{-1}$  überschritten. Die Parameter Korn-Stroh-Verhältnis und Harvestindex erlauben aufgrund der hohen Ertragsvariabilität von Korn und Maisstroh nur eine grobe Abschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohertrages. Für die Praxis empfiehlt sich dabei die Verwendung eines konservativen Korn-Stroh-Verhältnisses von 1:0,9, um eine Überschätzung des potenziell erntbaren Maisstrohs (und damit auch der Ernterückstände) zu vermeiden. Die TM-Gehalte des potenziell erntbaren Maisstrohs sind mit 30 – 40 % unter süddeutschen Bedingungen vergleichbar zu Silomais (28 – 35 %) und liegen damit im silierfähigen Bereich
- Für die Ernte von Maisstroh stehen praktikable Ernteverfahren zur Verfügung, wobei jedoch erhebliche Ernteverluste auftreten, welche mehrheitlich die abgefahrenen Stroherträge übersteigen. Die Abfuhraten liegen knapp unter 50 % des potenziell erntbaren Maisstrohs, wobei die höchsten Ernteverluste beim Verfahrensschritt Schwaden verursacht werden und die Verluste bei der Bergung verhältnismäßig gering sind. Die TM-Gehalte nach der Abfuhr können in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen zur Ernte sehr variabel sein und bis zu ca. 60 % erreichen. Eine schmutzarme Bergung mit Rohaschegehalten unter 10 % ist möglich.
- Für die Ertragshöhe des abgefahrenen Maisstrohs ist die Wahl der Schwad- und Bergungstechnik unerheblich, es bestehen jedoch Unterschiede in Bezug auf die erhobenen Qualitätsparameter im abgefahrenen Maisstroh. Hinsichtlich eines geringeren TM- und Rohaschegehaltes erweist sich das zweistufige Ernteverfahren gegenüber den dreistufigen Verfahren als vorteilhaft. Auch der Zerkleinerungsgrad des Maisstrohs ist abhängig von der Schwadtechnik und bei einer Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler grundsätzlich größer als beim Kurzschnittladewagen. Im Vergleich zu den Ernteverfahren haben die Erntebedingungen (Witterung, Feldliegezeit, Menge und Beschaffenheit des

- Maisstrohs) einen größeren Einfluss auf Ertrag und Qualität des Maisstrohs, weshalb in der Praxis mit sehr variablen Erträgen und Qualitäten zu rechnen ist.
- Die stoffliche Zusammensetzung von Maisstroh unterscheidet sich grundlegend von Silomais, dennoch ist die Vergärbarkeit mit Methanausbeuten von rund 90 % relativ zu Silomais sehr hoch, sodass sich Methanhektarerträge von knapp 50 % von Silomais ergeben. Eine Optimierung der Methanausbeute ist durch eine geeignete Sortenwahl möglich, wobei ein stay-green Charakter nicht eindeutig überlegen ist. Da der Ertrag und die Methanausbeute des potenziell erntbaren Maisstrohs im Verlauf der Abreife sinken, ist jedoch bei einer Doppelnutzung von Korn und Maisstroh eine möglichst frühe Ernte (unter Berücksichtigung des optimalen Erntetermins für das Korn) anzustreben. Durch äußere Einflüsse während der Strohernte (verfahrenstechnische Einflüsse, Zeitdauer, Witterung) ist mit weiteren Qualitätseinbußen des Maisstrohs zu rechnen. Die gängigen Parameter der Futtermittelanalytik zeigen keinen Einfluss auf die Höhe der Methanausbeute und der Methanhektarertrag ist im Wesentlichen vom TM-Ertrag des Maisstrohs abhängig. Als Zielgröße und Selektionskriterien sind folglich ertragsbestimmende Parameter den inhaltsstofflichen Qualitätsmerkmalen überlegen.
  - Gemessen am Methanhektarertrag (als ertrags- und qualitätsumfassender Parameter) beträgt das technologische Potenzial von Maisstroh nach der Strohbergung mit ca.  $1500 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  etwa 21 % des Methanhektarertrages von Silomais. Damit ist der Reststoff Maisstroh ein aussichtsreiches Substrat für die Biogasproduktion, weil durch die Maisstrohernte von 1 ha Körnermais ohne zusätzlichen Flächenbedarf und Produktionsaufwand überschlägig 0,2 ha Silomais ersetzt werden können. Da das pflanzenbauliche Potenzial allerdings mehr als doppelt so hoch ist, sind die technologischen Restriktionen noch sehr hoch. Aufgrund der hohen Verluste beim Verfahrensschritt Schwaden sind Optimierungen der Schwadtechnik am aussichtsreichsten.

### **Ausblick**

Anhand der vorliegenden Versuche konnte das potenziell erntbare und auch das tatsächlich abgefahrene Maisstroh quantifiziert und charakterisiert sowie wesentliche pflanzenbauliche und technologische Zusammenhänge für die Zielgröße Methanhektarertrag geklärt werden. Dennoch konnten nicht alle Fragen beantwortet werden und es haben sich z. T. neue Fragestellungen im Verlauf der Versuche ergeben.

Durch die begrenzte Sortenzahl war es beispielsweise nicht möglich, einen idealen Sortentyp für die Doppelnutzung von Körnermais zu identifizieren. Da MENARDO et al. (2015a) unterschiedliche Methanausbeuten für die einzelnen Maisstroh-Fractionen ermittelten, wären weitere Informationen zur fraktionellen Zusammensetzung (z. B. dem Spindelanteil) hilfreich, da möglicherweise ein Zusammenhang zwischen der Morphologie einer Sorte und ihrer Methanertragsfähigkeit besteht. Auch die Bedeutung der stay-green Eigenschaft für Ertrags- und Qualitätseigenschaften könnte bei einem größeren Sortenumfang eindeutig geklärt werden. Denkbar wäre beispielsweise, dass sich stay-green Sorten durch eine höhere Ertragsstabilität im Verlauf der Abreife auszeichnen. Da aktuelle Sorten nicht an die Anforderungen einer Koppelnutzung angepasst sind, ist eine züchterische Bearbeitung bzw. Selektion sicherlich notwendig.

Während für die Strohernte der Ertrag und die wesentlichen Qualitätsparameter des abgefahrenen Maisstrohs (TM-Gehalt und Rohaschegehalt) mithilfe der Erntetechnikversuche ermittelt werden konnten, ist die Bedeutung der Erntebedingungen für die Variabilität von Ertrag und Qualität des abgefahrenen Maisstrohs noch kaum verstanden. Für eine gezielte Optimierung der Maisstrohernte sind die (quantitativen) Zusammenhänge zwischen den geprüften Einflussfaktoren (Feldliegezeit und Strohverhältnisse), aber auch weiteren Einflussfaktoren, wie z. B. der Witterung, dem Ertrag des potenziell erntbaren Maisstroh, der Stoppelhöhe oder dem Abreifegrad der Pflanzen auf den Ertrag, die Qualität und in letzter Konsequenz auch den Methanhektarertrag des abgefahrenen Maisstrohs von Bedeutung.

Da in Deutschland erst seit wenigen Jahren Interesse an der Nutzung von Maisstroh besteht, sind die vorhandenen Ernteverfahren wenig ausgereift und technische Optimierungen vermutlich nicht ausgeschöpft. Außerdem ist im Verlauf der Versuche mit dem Strohmax 5000 (M & R/Maschinen- und Fahrzeughandel GmbH, Deutschland) ein neues Ernteverfahren entwickelt worden. Dabei handelt es sich um ein zweistufiges Ernteverfahren, bei dem jedoch die Verfahrensschritte Schwaden und Bergen kombiniert sind, wobei das Maisstroh (vergleichbar zum BioChipper) ebenfalls über eine rotierende Schlegelwelle aufgenommen und durch eine Querförderung zur Mitte – ohne Schwadablage auf dem Boden – direkt dem selbstfahrenden Feldhäcksler zugeführt wird. Eine weitere Möglichkeit der Maisstrohernte, die auf die Nutzung etablierter Technik zurückgreift, besteht darin, den Mähdrusch auf das Pflücken der Kolben zu reduzieren und die kolbenlose Restpflanze anschließend aus dem stehenden Bestand mithilfe eines Direktschneidwerkes am selbstfahrenden Feldhäcksler zu ernten. Welche Ergebnisse mit diesen Ernteverfahren erzielt werden, sollte künftig ebenfalls untersucht werden. Denkbar wäre auch, dass sich bei einer künftig umfangreicheren Nutzung von Maisstroh auch

einstufige Verfahren etablieren, die in Bezug auf die Überrollhäufigkeit oder die Verschmutzung Vorteile hätten.

Während Maisstroh anhand des Methanhektarertrages als aussichtsreiches Substrat bewertet kann, ist für eine vollständige Bewertung der Substrateignung eine Vielzahl an weiteren Parametern und Eigenschaften zu untersuchen. Dazu gehören beispielsweise die Siliereignung, prozess- und anlagentechnische Eigenschaften sowie die Abbaukinetik bei der Maisstrohvergärung. 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 & LAL, 2009; LINDSTROM, 1986), ist die Kenntnis der Abfuhraten und Ernterückstände auch eine wesentliche Voraussetzung für die nachfolgende Einschätzung ökologischer Effekte. WILHELM et al. (2007) nehmen beispielsweise an, dass aus ökologischer Sicht 55 dt ha<sup>-1</sup> als Ernterückstände notwendig sind.

Ganzheitlich betrachtet ist die Bestimmung des technologischen Potenzials folglich nur der Ausgangspunkt für die Erhebung weiterer prozesstechnischer, ökologischer, ökonomischer oder gesellschaftspolitischer Restriktionen, um in letzter Konsequenz das tatsächlich erschließbare Potenzial der Nutzung von Maisstroh in der Biogasproduktion zu ermitteln.

## 8 Siliereignung von Maisstroh

Voraussetzung für die ganzjährige Nutzung von Maisstroh ist eine entsprechende Siliereignung. Aufgrund der höheren TM-Gehalte und der im Vergleich zu Silomais geringeren Zerkleinerung, war für Maisstroh eine schlechte Siliereignung erwartet worden. Standardisierte Silierversuche im Weckglasansatz haben jedoch gezeigt, dass Maisstroh grundsätzlich gut siliert und die TM-Verluste gering sind, sofern Sauerstoffabschluss gewährleistet ist. Auch die aerobe Stabilität war nach der Öffnung der Silos überwiegend hoch. Dies konnte in den Versuchen auch bei höheren TM-Gehalten und schlechteren Maisstrohqualitäten (zum Beispiel bei längeren Feldliegezeiten) bestätigt werden, wobei in diesen Fällen vermutlich Verluste durch Umsetzungsprozesse auf dem Feld vorausgegangen sind. Eine Herausforderung stellt sicherlich die Verdichtbarkeit von Maisstroh im Silo dar. Bei einem ersten Silierversuch im Silotunnel lagen die ermittelten Dichten bei nur rund der Hälfte von Silomais. Das hat Konsequenzen für den erforderlichen Siloraum und birgt die Gefahr des Verderbs bei Luftzutritt. Inwiefern die Ergebnisse des Silotunnels auch auf die Silierung in Fahrsilos übertragen werden können, ist bislang unklar und wird im Folgeprojekt untersucht. Die Methodik und Ergebnisse der Silierversuche sind detailliert dem beigefügten Bericht „Untersuchungen zum Einfluss von Sorte, Erntetermin und Ernteverfahren auf den Ertrag und die Eignung von Maisstrohsilage als Substrat für die Biomethanerzeugung“ in der LfL-Schriftenreihe 6/2016 zu entnehmen.

## 9 Ökonomie der Maisstrohnutzung

Die Vollkosten der Maisstrohbereitstellung vom Schwad bis zum Fermenter betragen 243 Euro je ha bei einer Ernte von  $49 \text{ dt ha}^{-1}$  an Maisstroh (TM) mit dem Feldhäcksler, einem Transport von 5 km ins Fahrsilo und der Annahme von 8 % Lagerverlusten. Bei einer Verstromung des entstehenden Methanhektarertrages von  $1.237 \text{ Nm}^3$  (mit einem Wirkungsgrad von 40 Prozent), konnten Vollkosten in Höhe von 4,9 Cent je erzeugter elektrischer kWh berechnet werden, wobei folgende Annahmen gemacht wurden: Das Maisstroh steht tatsächlich kostenfrei „liegend auf dem Feld“ zur Verfügung und sämtliche mögliche (negative wie positive) Nebeneffekte hinsichtlich Pflanzenbau, Anlagentechnik oder Management (z. B. Effekte auf den Humushaushalt, die Nährstoffbilanz, die Feldhygiene, die Bodenverdichtung) wurden nicht ökonomisch berücksichtigt. Da viele maisbetont gefütterte Biogasanlagen mit einem Substratkostenniveau („frei Eintrag“) von mehr als 10 Cent je eingespeister kWh arbeiten und sich die Vollkosten klassischer Maissilage ohne Flächennutzungskosten bereits auf 8,9 Cent belaufen, ist die Vergärung

von Maisstroh mit 4,9 Cent je erzeugbarer elektrischer kWh wirtschaftlich und für die erwähnten einzelbetrieblichen Nebeneffekte mit gut 5 Cent je kWh (umgerechnet ungefähr 250 Euro je ha) auch noch ein Puffer vorhanden. Die detaillierte Beschreibung zur Ökonomie der Maisstrohnutzung ist dem beigefügten Bericht „Körnermaisstroh – ein Substrat, das Hoffnungen weckt“ im Biogas Journal 2/2017 zu entnehmen.

## 10 Wissenstransfer

Da es sich bei der Nutzung von Maisstroh um ein innovatives Thema handelt, das bislang kaum in der Praxis verbreitet ist, wurde ein großes Augenmerk auf den Bereich Wissenstransfer gelegt. Die im Rahmen des Projektes gehaltenen Vorträge (*Tabelle 39*) und auch Veröffentlichungen (*Tabelle 40*) waren dabei primär praxisorientiert. Nachfolgende Tabellen geben einen Überblick über sämtliche Vorträge, Zeitschriftenbeiträge, Filmbeiträge und sonstige Veröffentlichungen. Eine Auswahl an Veröffentlichungen ist dem Abschlussbericht beigefügt.

Da das öffentliche Interesse an der Maisstrohnutzung im Laufe des Projektes deutlich gestiegen ist, wurde im Projektjahr 2016 zusätzlich zum Erntetechnikversuch ein Infotag in Grub veranstaltet, bei welchem sich die Teilnehmer in Fachvorträgen über das Thema „Maisstroh als Biogassubstrat“ umfassend informieren konnten. Dabei wurden die Ergebnisse zur Ernte, Silierung und Methanertragsfähigkeit aus den beiden Versuchen vorgestellt. Ebenso wurde die Ökonomie der Maisstrohnutzung beleuchtet und in Form von Gastvorträgen ein Erfahrungsbericht eines Praktikers über die Maisstrohnutzung wie auch Untersuchungen der BOKU Wien zur Vorbehandlung von Maisstroh vorgestellt. Im Anschluss an die Fachvorträge wurden die Erntetechniken in Form einer Maschinenvorführung auf dem Feld demonstriert. Mit rund 130 Teilnehmern war der Infotag gut besucht.

*Tabelle 39: Vorträge im Rahmen des Projektes*

Datum	Titel des Vortrags	Veranstaltung	Ort	Teilnehmerzahl
20.05.2014	Corn stover for biogas production	Projektvorstellung an der TUM	Freising	ca. 10
03.06.2014	Körnermaisstroh für die Biogasproduktion - erste Ergebnisse	Austausch mit Projektpartnern	Freising	6
09.12.2014	Körnermaisstroh - ein potenzieller Reststoff für die	Projektstatusseminar StMELF	München	ca. 40

	Biogasproduktion?			
11.02.2015	Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	Forschungskolloquium Bioenergie	Straubing	52
19.02.2015	Körnermaisstroh - ein potenzieller Reststoff für die Biogasproduktion?	Austausch mit Projektpartnern	Freising	6
19.03.2015	Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	IPZ-Kolloquium	Freising	?
30.03.2015	Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	IPZ-Dienstbesprechung	Freising	?
05.05.2015	Körnermaisstroh – ein interessantes Substrat ohne Flächenbedarf	Projektvorstellung beim Ministerium	Grub	ca. 15
09.12.2015	Maisstroh als Biogassubstrat – aktuelle Erkenntnisse bezüglich Erntetechnik und pflanzenbaulichen Einflüssen	Projektstatusseminar StMELF	München	ca. 40
01.03.2016	Maisstroh als Biogassubstrat – aktuelle Erkenntnisse bezüglich Erntetechnik und pflanzenbaulicher Einflüsse	22. Treffen der Arbeitsgruppe „Prozessbiologie, -bewertung und Analytik“ vom Biogas Forum Bayern	Freising	12
07.03.2016	Feldexperimentelle Analysen pflanzenbaulicher und technologischer Potenziale von Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	Seminar am Lehrstuhl für ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme der TUM	Freising	ca. 12
15.03.2016	Maisstroh als innovatives Biogassubstrat – aktuelle Erkenntnisse bezüglich Erntetechnik und pflanzenbaulicher Einflüsse	Dienstbesprechung höherer Dienst	Freising	ca. 25
20.04.2016	Maisstroh als Biogassubstrat	Vorlesung an der HSWT	Freising	20
26.04.2016	Maisstroh als Biogassubstrat – aktuelle Erkenntnisse bezüglich Erntetechnik und pflanzenbaulicher Einflüsse	Biogas-Innovationskongress	Osnabrück	ca. 150
15.06.2016	Maisstroh als innovatives Biogassubstrat – Erntetechnik und pflanzenbauliche Aspekte	DLG-Feldtage, Forum 1	Haßfurt	ca. 20
25.08.2016	Körnermaisstroh – das Potenzial eines Reststoffes	Energiepflanzenfeldtag	Rotthalmünster	28
30.08.2016	Maisstroh als innovatives Biogassubstrat – Erntetechnik und pflanzenbauliche Aspekte	Fachtagung Biogas aus Stroh	Heiden	200
13.09.2016	Maisstroh als Biogassubstrat – pflanzenbauliches und	Statusseminar Biogas 2020	Würzburg	63

	technologisches Potenzial			
28.09.2016	Pflanzenbauliches Potenzial von Körnermaisstroh als Biogassubstrat	GPW-Tagung	Gießen	20
20.10.2016	Körnermaisstroh – ein Substrat mit überraschendem Potenzial: Erträge und Methanausbeuten	Infotag Maisstroh	Grub	130
17.11.2016	Maisstroh als Biogassubstrat – pflanzenbauliches und technologisches Potenzial	Biogas Convention	Hannover	80
02.12.2016	Maisstroh als Biogassubstrat – Bilanz nach 3 Forschungsjahren	Projektstatusseminar StMELF	München	26
25.01.2017	Körnermaisstroh – Ernte und Biogasausbeute – Forschungsergebnisse	Stroh, Gras – Biogas Tagung	Dingolfing	ca. 80
16.02.2017	Körnermaisstroh – Ernte und Biogasausbeute – Forschungsergebnisse	Biogastag	Hohenheim	ca. 30
16.03.2017	Körnermaisstroh für die Biogasanlage	Treffen der Erzeugergemeinschaft Markt Schwaben	Markt Schwaben	ca. 10
24.07.2017	Körnermaisstroh als Biogassubstrat	Projekt-Abschlusstreffen	Freising	27

*Tabelle 40: Zeitschriftenbeiträge, Filmbeiträge und sonstige Veröffentlichungen im Rahmen des Projektes*

<b>Jahr</b>	<b>Art</b>	<b>Titel</b>	<b>Zeitschrift/Medium/Veranstaltung</b>
2014	Bericht	Bewertung der Substrateignung von Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	IPZ-Jahresbericht 2013
2014	Bericht	Vergleich verschiedener Erntetechniken für die Maisstrohnutzung in der Biogasproduktion	ILT-Jahresbericht 2013
2014	Zeitschriftenbeitrag	Hoffnungsträger Maisstroh?!	Joule 4/2014
2015	Zeitschriftenbeitrag	Maisstroh – ein potenzieller Reststoff für die Biogasproduktion	Mais 3/2015
2015	Zeitschriftenbeitrag	Doppelernte beim Körnermais – Korn und Maisstroh	DSV-Innovation 4/2015

2015	Poster, Tagungsbandbeitrag	Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	Forschungskolloquium Bioenergie, Straubing
2015	Bericht	Vergleich verschiedener Erntetechniken für die Maisstrohbergung	ILT-Jahresbericht 2014
2015	Bericht	Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	LfL-Jahresbericht 2014
2015	Bericht	Verwertung von Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	Zwischenbericht ans StMELF
2015	Poster, Tagungsbandbeitrag	Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	Biogaskongress, Potsdam
2015	Poster, Tagungsbandbeitrag	Leistungspotenzial von Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	HEZ-Symposium „Innovative Biomasse Erzeugung“, Freising
2015	Poster (2x)	Ernte von Körnermaisstroh – Vergleich verschiedener Ernteverfahren; Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	LfL-Tag der offenen Tür in Grub
2016	Bericht	Ernte von Körnermaisstroh – Vergleich verschiedener Erntetechniken hinsichtlich Ernteleistung und Maisstrohqualität	ILT-Jahresbericht 2015
2016	Bericht	Pflanzenbauliche Aspekte bei der Nutzung von Körnermaisstroh in der Biogasproduktion	IPZ-Jahresbericht 2015
2016	Tagungsbandbeitrag	Untersuchungen zum Einfluss von Sorte, Erntetermin und Ernteverfahren auf den Ertrag und die Eignung von Maisstrohsilage als Substrat für die Biomethanerzeugung	LfL-Schriftenreihe 6/2016
2016	Tagungsbandbeitrag	Maisstroh als Biogassubstrat – aktuelle Erkenntnisse bezüglich Erntetechnik und pflanzenbaulicher Einflüsse	Biogas-Innovationskongress, Osnabrück
2016	Tagungsbandbeitrag, Poster	Körnermaisstroh als Biogassubstrat	Tagung AG Agrar- und Produktionsökologie, Freising
2016	Tagungsbandbeitrag	Maisstroh als innovatives Biogassubstrat –Erntetechnik und pflanzenbaulicher Aspekte	Tagung „Biogas aus Stroh“, Heiden
2016	Tagungsbandbeitrag	Pflanzenbauliches Potenzial von Körnermaisstroh als Biogassubstrat	GPW-Tagung, Gießen
2016	Bericht	Verwertung von Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	Zwischenbericht ans StMELF
2016	Zeitschriftenbeitrag	Analysis of different corn stover harvest technologies	Landtechnik/Agricultural Engineering 71 (6)/2016

2016	Tagungsbandbeitrag (3x)	Körnermaisstroh als Biogassubstrat	LfL-Information (zum Infotag "Körnermaisstrohs als Biogassubstrat")
2016	Poster (2x)	Ernte von Körnermaisstroh – Vergleich verschiedener Ernteverfahren; Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	DLG-Feldtage, Haßfurt
2016	Poster (2x)	Ernte von Körnermaisstroh – Vergleich verschiedener Ernteverfahren; Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	Landesgartenschau, Bayreuth
2016	Filmbeitrag	Grüner Strom aus Ernteresten	BR „Unser Land“
2017	Zeitschriftenbeitrag	Körnermaisstroh – ein Substrat, das Hoffnungen weckt	Biogas Journal 2/2017
2017	Tagungsbandbeitrag	Körnermaisstroh – Ernte und Biogausausbeute – Forschungsergebnisse	Stroh, Gras – Biogas-Tagung, Dingolfing
2017	Filmbeitrag	Stroh, Gras - Biogas	Donau TV
2017	Bericht	Verwertung von Körnermaisstroh für die Biogasproduktion	Abschlussbericht ans StMELF

## 11 Zusammenfassung

Körnermaisstroh, das als Koppelprodukt beim Maisdrusch anfällt, ist ein interessantes Substrat für die Biogasproduktion, weil es zahlreiche Vorteile gegenüber dem Einsatz von Energiepflanzen bietet. So handelt es sich um ein bislang nicht genutztes Substrat, das als Reststoff grundsätzlich kostengünstig anfällt, keine Flächen- und Nutzungskonkurrenzen erzeugt und auch im EEG 2017 keiner gesetzlichen Restriktion unterliegt.

Bislang ist jedoch unklar, ob sich Maisstroh als Biogassubstrat eignet, weil wesentliche Parameter der Substrateignung unter den Standortbedingungen Deutschlands nicht bekannt sind. Dazu zählen grundlegende Kennzahlen wie der Strohertrag und die Maisstrohqualität, sowohl für das anfallende, also *potenziell erntbare Maisstroh* (vor der Strohernte) als auch für das *abgefahrene Maisstroh* (nach der Strohbergung). Bislang sind die Abfuhraten und die Ernteverluste, die mit den in Deutschland verfügbaren Ernteverfahren erzielt werden können, nicht bekannt. Auch die Methanausbeuten bzw. der Methanhektarertrag von Maisstroh sind in der internationalen Literatur nicht hinreichend beschrieben und in Deutschland gänzlich unbekannt. Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es folglich, ertrags- und qualitätsbestimmende Parameter von Maisstroh im Hinblick auf die Nutzung in Biogasanlagen systematisch zu

untersuchen und das *pflanzenbauliche* wie auch das *technologische Potenzial* zu quantifizieren.

Dazu wurden zwei eigenständige Feldversuche jeweils dreijährig durchgeführt. Das Ziel des „Sorten- und Ernteterminversuchs“ war es, in standardisierten Parzellenversuchen zusätzlich zum Kornertrag den Ertrag und TM-Gehalt des *potenziell erntbaren Maisstrohs* zu bestimmen und die Kennzahlen Harvestindex und Korn-Stroh-Verhältnis zu ermitteln. Ebenso sollte die Qualität des *potenziell erntbaren Maisstrohs* anhand der gängigen Futtermittelanalytik (Weender/Van-Soest-Analysen) beschrieben und die Methanertragsfähigkeit auf der Grundlage von Batchversuchen im Labormaßstab analysiert werden. Durch den Anbau von fünf verschiedenen Sorten und die Ernte zu drei zeitlich gestaffelten Ernteterminen konnten pflanzenbauliche Einflüsse auf die genannten Parameter untersucht werden. Dabei sollte auch geklärt werden, ob stay-green Sorten höhere Methanausbeuten erzielen und ein kausaler Zusammenhang zwischen den Inhaltsstoffen und der Methanausbeute besteht. Das übergeordnete Ziel der Sorten- und Ernteterminversuche war es, das *pflanzenbauliche Potenzial* von Maisstroh (unter verlustfreien Idealbedingungen) anhand des Methanhektarertrages zu quantifizieren.

In einem weiteren Schritt sollte anhand des Methanhektarertrages im „Erntetechnikversuch“ das *technologische Potenzial* beziffert werden, das sich bei der Strohbergung aufgrund von Ertragsverlusten und qualitativen Restriktionen beim Einsatz verschiedener Ernteverfahren unter praxisnahen Bedingungen ergibt. Primäres Ziel dieser Versuche war es, die Erträge und Verluste getrennt für die einzelnen Verfahrensschritten der Strohernte (Dreschen, Schwaden, Bergen) zu erheben und die Abfuhrraten und Ernteverluste zu bestimmen. Zudem sollte die Qualität des abgefahrenen Maisstrohs anhand der Parameter TM-Gehalt, Verschmutzungs- und Zerkleinerungsgrad sowie in reduziertem Umfang anhand der stofflichen Zusammensetzung und der Methanausbeuten ermittelt werden. Dazu wurden vier verschiedene Schwadtechniken (ein einstufiges Verfahren und drei dreistufige Verfahren) und die beiden Bergungstechniken „selbstfahrender Feldhäcksler“ und „Kurzschnittladewagen“ unter variierenden Erntebedingungen vergleichend bewertet.

Die Versuche zeigten, dass unter den Standortbedingungen Süddeutschlands für das potenziell erntbare Maisstroh sowohl in den „Sorten- und Ernteterminversuchen“ als auch unter den praxisnahen Bedingungen der „Erntetechnikversuche“ ein mittlerer TM-Ertrag von rund 110 dt ha<sup>-1</sup> erreicht wurde, der jeweils geringer als der Korn-TM-Ertrag war – ausgenommen unter den Trockenstressbedingungen im Versuchsjahr 2015. Beim Anbau von Körnermais fallen demnach relevante Mengen an *potenziell erntbarem Maisstroh*, wobei die erzielten TM-Gehalte im Bereich von 30 – 40 % überwiegend vergleichbar mit

Silomais sind. Die Parameter Korn-Stroh-Verhältnis und Harvestindex erlauben aufgrund der hohen Ertragsvariabilität von Korn und Maisstroh nur eine grobe Abschätzung des *potenziell erntbaren Maistrohertrages*. Für die Praxis empfiehlt sich dabei die Verwendung eines konservativen Korn-Stroh-Verhältnisses von 1:0,9, um eine Überschätzung des *potenziell erntbaren Maisstrohs* (und damit auch der Ernterückstände) zu vermeiden.

Die Ernteverfahren erwiesen sich als praktikabel und es konnten in den Einzeljahren *abgefahrene Stroh-TM-Erträge* von 48 bis 63 dt ha<sup>-1</sup> erzielt werden, wobei die Ernteverluste sehr hoch waren und mehrheitlich die *abgefahrenen Stroherträge* überstiegen. Die Abfuhrraten lagen demzufolge zwischen 43 und 53 %. Die Ernteverluste konnten vorwiegend dem Verfahrensschritt Schwaden zugeordnet werden konnten (Verluste von rund 43 % des *potenziell erntbaren Maisstrohs*), wohingegen die Verluste bei der Bergung des geschwadeten Maisstrohs verhältnismäßig gering waren (Verluste von rund 8 % des *potenziell erntbaren Maisstrohs*). Trotz der geringen TM-Gehalte des *potenziell erntbaren Maisstrohs* wurden nach der Strohbergung, in Abhängigkeit von den Witterungseinflüssen während der Ernte, sehr variable TM-Gehalte von bis zu 59 % erreicht. Die Rohaschegehalte lagen im Mittel bei 7,6 %, sodass eine schmutzarme Bergung möglich war.

Hinsichtlich der Erträge des abgefahrenen Maisstrohs waren die geprüften Schwadetechniken und auch die beiden Bergungstechniken gleichwertig, wobei aufgrund des Einflusses verschiedener Erntebedingungen (z. B. Feldliegezeit des Maisstrohs) und zahlreicher unkontrollierter Einflussfaktoren (Fahrweise, Witterung, technische Einstellungen) signifikante Unterschiede zwischen den Schwadetechniken in den Einzeljahren ermittelt wurden. In Bezug auf die erhobenen Qualitätsparameter erwies sich das zweistufige Ernteverfahren gegenüber den dreistufigen Verfahren aufgrund von geringeren TM- und Rohaschegehalten im *abgefahrenen Maisstroh* als vorteilhaft. Auch der Zerkleinerungsgrad des *abgefahrenen Maisstrohs* war von der Schwadetechnik abhängig und bei einer Bergung mit dem selbstfahrenden Feldhäcksler signifikant größer als beim Kurzschnittladewagen.

Obwohl sich die stoffliche Zusammensetzung von Maisstroh grundlegend von Silomais unterschied, war die Methanausbeute des *potenziell erntbaren Maisstrohs* im Versuchsmittel mit 324 l (kg oTM)<sup>-1</sup> (90 % im Vergleich zu Silomais) sehr hoch, wobei signifikante Sorten- und Ernteterminunterschiede vorlagen. Stay-green Sorten zeigten dabei keine eindeutige Überlegenheit, was jedoch anhand der geringen Sortenzahl nicht abschließend zu klären war. Zwischen den Inhaltsstoffen und der Methanausbeute bestand kein monokausaler Zusammenhang. Der Methanhektarertrag, der im Versuchsmittel rund 3500 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> erreichte (49 % im Vergleich zu Silomais) und das

*pflanzenbauliche* (also maximal mögliche) *Potenzial* von Maisstroh widerspiegelt, war im Wesentlichen von der Höhe des TM-Ertrages abhängig. Da der Methanhektarertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs im Verlauf der Erntetermine sank, ist eine möglichst frühe Ernte des Maisstrohs anzustreben.

Das *abgefahren* *Maisstroh* zeichnete sich durch eine veränderte stoffliche Zusammensetzung aus, wobei die Methanausbeute im Mittel dennoch  $314 \text{ l (kg oTM)}^{-1}$  erreichte, sodass die Qualitätseinbußen durch verfahrenstechnische und äußere Einflüsse bei der Strohernte nur gering waren. Unter Berücksichtigung der Erträge des abgefahrenen Maisstrohs konnten als *technologisches Potenzial* Methanhektarerträge von rund  $1500 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$  (21 % im Vergleich zu Silomais) ermittelt werden, sodass durch den Anbau von 1 ha Körnermais und die Ernte des anfallenden Maisstrohs rund 0,2 ha Silomais ersetzt werden könnten. Gemessen am *pflanzenbaulichen Potenzial* sind damit die Optimierungsmöglichkeiten bei weitem nicht ausgeschöpft.

Weitere Versuche zur Siliereignung haben zudem die grundsätzliche Silierfähigkeit von Maisstroh gezeigt und erste Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit der Maisstrohnutzung die Wettbewerbsfähigkeit des Substrates belegt.

Insgesamt sind also wesentliche Parameter der Substrateignung erfüllt, weshalb Maisstroh ein aussichtsreiches Substrat für die künftige Biogasproduktion darstellt. Ungeklärt sind derzeit aber insbesondere noch Fragen zum Verhalten des Substrates im Durchflussbetrieb und der notwendigen Anlagentechnik.

## 12 Literatur

- AIROLDI, G. (2017): Stover Harvest Hechnologies in Italy. E-Mail.
- ATCHISON, J. & HETTENHAUS, J. (2003): Innovative Methods for Corn Stover Collecting, Handling, Storing and Transporting. Subcontractor Report-National Renewable Energy Laboratory, Colorado. [www.nrel.gov/docs/fy04osti/33893.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33893.pdf) (04.02.2017).
- ATHMANATHAN, A., EMERY, I., KUCZEK, T. & MOSIER, N. (2015): Impact of Temperature, Moisture, and Storage Duration on the Chemical Composition of Switchgrass, Corn Stover, and Sweet Sorghum Bagasse. *BioEnergy Research* 8 (2), S. 843–856.
- BARTEN, T. (2013): Evaluation and prediction of corn stover biomass and composition from commercially available corn hybrids. Dissertation, Iowa.
- BAUER, A., LIZASOAIN, J., PAVLISKA, O., GITTINGER, J., SAYLOR, M., KRAL, I. & PIRINGER, G. & A. GRONAUER (2015): Agricultural residues for anerobic digestion: Technologies to open up new resources. In: Kovačev, I. (Hrsg.): Proceedings of the 43rd International Symposium on Agricultural Engineering. Actual Tasks on Agricultural Engineering, 24th-27th February 2015, Opatija, Croatia.
- (Bayerisches Landesamt für Statistik) (2016): GENESIS-Onlinedatenbank, Erntestatistiken.  
<https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/data?operation=previous&levelindex=2&levelid=1493118570210&levelid=1493118550484&step=1> (25.04.2017).
- Biokraft-NachV (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung) (2009): Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen. <http://www.gesetze-im-internet.de/biokraft-nachv/> (11.02.2017).
- BioKraftQuG (Biokraftstoffquotengesetz) (2006): Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften.
- BIRRELL, S., KARLEN, D. & WIRT, A. (2014): Development of Sustainable Corn Stover Harvest Strategies for Cellulosic Ethanol Production. *BioEnergy Research* 7 (2), S. 509–516.
- 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), S. 418–426.
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2016): Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe - Nutzen und Bedeutung der Bioenergie.  
[https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/Bioenergie/\\_texte/Bioenergie.html](https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/Bioenergie/_texte/Bioenergie.html) (07.05.2016).

- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2016): Erneuerbare Energien in Zahlen 2015. Nationale und Internationale Entwicklung im Jahr 2015.  
<http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/erneuerbare-energien-in-zahlen-2015.html> (19.02.2017).
- BÖHM, T. & HARTMANN, H. (2002): Größenverteilung von Holzhackschnitzeln. *Landtechnik/Agricultural Engineering* 57 (3), S. 152–153.
- BONDESSON, P.-M., GALBE, M. & ZACCHI, G. (2013): Ethanol and biogas production after steam pretreatment of corn stover with or without the addition of sulphuric acid. *Biotechnology for biofuels* 6 (11), S. 1–11.
- BONINI, C., D'AURIA, M., DI MAGGIO, P. & FERRI, R. (2008): Characterization and degradation of lignin from steam explosion of pine and corn stalk of lignin: The role of superoxide ion and ozone. *Industrial Crops and Products* 27 (2), S. 182–188.
- BRUNI, E., JENSEN, A., PEDERSEN, E. & ANGELIDAKI, I. (2010): Anaerobic digestion of maize focusing on variety, harvest time and pretreatment. *Applied Energy* 87 (7), S. 2212–2217.
- BSA (Bundessortenamt) (2000): Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen (Überarbeitete Richtlinie Mais, März 2008). *Landbuch Verlagsgesellschaft mbH, Hannover*.
- CANTER, C., DUNN, J., HAN, J., WANG, Z. & WANG, M. (2016): Policy Implications of Allocation Methods in the Life Cycle Analysis of Integrated Corn and Corn Stover Ethanol Production. *BioEnergy Research* 9 (1), S. 77–87.
- CENTER, C., JONES, G. & CARTER, M. (1970): Dry Matter Accumulation and Depletion in Leaves, Stems, and Ears of Maturing Maize. *Agronomy Journal* 62 (4), S. 535–537.
- CHANDRA, R., TAKEUCHI, H. & HASEGAWA, T. (2012): Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (3), S. 1462–1476.
- CHEN, G., ZHENG, Z., YANG, S., FANG, C., ZOU, X. & LUO, Y. (2010): Experimental co-digestion of corn stalk and vermicompost to improve biogas production. *Waste management (New York, N.Y.)* 30 (10), S. 1834–1840.
- CHERUBINI, F. & ULGIATI, S. (2010): Crop residues as raw materials for biorefinery systems – A LCA case study. *Applied Energy* 87 (1), S. 47–57.
- 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), S. 2017–2028.
- DANDIKAS, V., HEUWINKEL, H., LICHTI, F., DREWES, J. & KOCH, K. (2014): Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. *Bioresource Technology* 174, S. 316–320.

- DARBY, H. & LAUER, J. (2002): Harvest Date and Hybrid Influence on Corn Forage Yield, Quality, and Preservation. *Agronomy Journal* 94, S. 559–566.
- DARR, M. & WEBSTER, K. (2014): Corn Stover Harvesting Machinery. Iowa State University Extension and Outreach. <https://store.extension.iastate.edu/Product/14074> (05.03.2017).
- DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum) (2015): Stromerzeugung aus Biomasse (Vorhaben Ila Biomasse). Zwischenbericht Mai 2015. <https://www.dbfz.de/index.php?id=587&L=0> (29.01.2017).
- Destatis (Statistisches Bundesamt) (2016): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Wachstum und Ernte - Feldfrüchte - 2015. <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/FeldfruechteGruenland/Tabellen/FeldfruechteZeitreihe.html> (22.05.2016).
- DINUCCIO, E., BALSARI, P., GIOELLI, F. & MENARDO, S. (2010): Evaluation of the biogas productivity potential of some Italian agro-industrial biomasses. *Bioresource Technology* 101 (10), S. 3780–3783.
- (Directive 2009/28/EC) (2009): Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
- 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, S. 635–644.
- DONALD, C. & HAMBLIN, J. (1976): The Biological Yield and Harvest Index of Cereals as Agronomic and Plant Breeding Criteria. *Advances in Agronomy* 28, S. 361–405.
- DüV (Düngeverordnung) (2006): Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert.
- EDER, B. (HRSG.) (2012): Biogas-Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, Umwelt. Ökobuch-Verlag, Staufen bei Freiburg.
- EDER, B. (2010): Pflanzenbauliche Untersuchungen zum Einfluss von Genotyp und Anbauverfahren auf die Ertragsbildung und das Methanbildungspotenzial von Mais (*Zea mays* L.). Dissertation, Weihenstephan.
- EDER, B., EDER, J., PAPST, C., DARNHOFER, B., MUKENGELE, M., HEUWINKEL, H. & OECHSNER, H. (2009): Welcher Maissortentyp zur Biogaserzeugung? In: Bayerische

- Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.): Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009. LfL-Schriftenreihe 15, Freising.
- EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) (2017): Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien. [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/index.html#BJNR106610014BJNE000103360](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/index.html#BJNR106610014BJNE000103360) (11.02.2017).
- EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) (2012): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Gesetze-Verordnungen/eeg\\_2012\\_bf.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Gesetze-Verordnungen/eeg_2012_bf.html) (11.02.2017).
- EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) (2009): Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften. [www.iwr.de/recht/eeg/eeg2009.pdf](http://www.iwr.de/recht/eeg/eeg2009.pdf) (11.02.2017).
- EEWärmeG (Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz) (2008): Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich.
- EZE, J. & OJIKE, O. (2012): Anaerobic production of biogas from maize wastes. *International Journal of the Physical Sciences* 7 (6).
- (Fachverband Biogas e.V.) (2016): Biogas Segment Statistics 2014/2015. [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de\\_branchenzahlen](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de_branchenzahlen) (28.07.2016).
- FLESCHHUT, M., HÜLSBERGEN, K.-J., THURNER, S. & EDER, J. (2016): Analysis of different corn stover harvest systems. *Landtechnik/Agricultural Engineering* 71 (6), S. 252–270.
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (2015): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2015. <https://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/biogas/basisdaten-bioenergie.html> (07.05.2016).
- GARLOCK, R., CHUNDAWAT, S., BALAN, V. & DALE, B. (2009): Optimizing harvest of corn stover fractions based on overall sugar yields following ammonia fiber expansion pretreatment and enzymatic hydrolysis. *Biotechnology for biofuels* 2 (1), S. 29.
- GERIGHAUSEN, H.-G. (2011): *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung*. DLG-Verlag, Frankfurt (Main).
- GLASSNER, D., HETTENHAUS, J. & SCHECHINGER, T. (1998): Corn stover potential: a scenario that can recast the corn sweetener industry. In: Janick, J. (Hrsg.): *Perspectives on new crops and new uses. Proceedings of the Fourth National Symposium: New Crops and New Uses, Biodiversity and Agricultural Sustainability*. ASHS Press, Arizona.
- GOLECHA, R. & GAN, J. (2016): Effects of corn stover year-to-year supply variability and market structure on biomass utilization and cost. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57, S. 34–44.

- 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), S. 72–79.
- GOLUB, M., MARTINOV, M., BOJIC, S., VISKOVIC, M., DJATKOV, D., DRAGUTINOVIC, G. & DALLEMAND, J. (2016): Investigation on Possibilities for Sustainable Provision of Corn Stover as an Energy Source: Case Study for Vojvodina. *Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America* 47 (4), S. 7–15.
- GRAHAM, R., NELSON, R., SHEEHAN, J., PERLACK, R. & WRIGHT, L. (2007): Current and Potential U.S. Corn Stover Supplies. *Agronomy Journal* 99 (1), S. 1–11.
- HADDAD, M. & ANDERSON, P. (2008): A GIS methodology to identify potential corn stover collection locations. *Biomass and Bioenergy* 32 (12), S. 1097–1108.
- HAY, R. (1995): Harvest index. A review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annals of Applied Biology* 126 (1), S. 197–216.
- HERRMANN, C., PLOGSTIES, V., WILLMS, M., HENGELHAUPT, F., EBERL, V., ECKNER, J. & STRAUß, C., C. IDLER & M. HEIERMANN (2016): Methane production potential of various crop species grown in energy crop rotations. *Landtechnik/Agricultural Engineering* 71 (6).
- HEUWINKEL, H., ASCHMANN, A., GERLACH, R. & GRONAUER, A. (2009): Die Genauigkeit der Messung des Gasertragspotentials von Substraten mit der Batchmethode. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.): Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, S. 95–103.
- 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, S. 126–136.
- HUANG, H., FAULKNER, D., BERGER, L. & ECKHOFF, S. (2012a): Harvest Date Influence on Dry Matter Yield and Moisture of Corn and Stover. *Transactions of the ASABE* 55 (2), S. 593–598.
- HUANG, H., FAULKNER, D., SINGH, V., DANAQ, M. & ECKHOFF, S. (2012b): Effect of Harvest Date on Yield, Composition, and Nutritive Value of Corn Stover and DDGS. *Transactions of the ASABE* 55 (5), S. 1859–1864.
- IGATHINATHANE, C., WOMAC, A., SOKHANSANJ, S. & (Lo Pordesimo) (2007): Moisture sorption thermodynamic properties of corn stover fractions. *Transactions of the ASABE* 50 (6), S. 2151–2160.
- IGATHINATHANE, C., WOMAC, A., SOKHANSANJ, S. & PORDESIMO, L. (2006): Mass and Moisture Distribution in Aboveground Components of Standing Corn Plants. *Transactions of the ASABE* 49 (1), S. 97–106.

- IOANNIDOU, O., ZABANIOTOU, A., ANTONAKOU, E., PAPAIZI, K., LAPPAS, A. & ATHANASSIOU, C. (2009): Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (4), S. 750–762.
- JEROCH, H., FLACHOWSKY, G. & WEIßBACH, F. (1993): *Futtermittelkunde*. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart.
- 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), S. 1377–1382.
- KADAM, K. & MCDILLAN, J. (2003): Availability of corn stover as a sustainable feedstock for bioethanol production. *Bioresource Technology* 88 (1), S. 17–25.
- 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, S. 47–55.
- KEENE, J., SHINNERS, K., HILL, L., STALLCOP, A., WEMHOFF, S., ANSTEY, D. & BRUNS, A. & JOHNSON (2012): Single-Pass Baling of Corn Stover. 2012 ASABE Annual International Meeting, Dallas.  
<http://agriculturalmachineryengineering.weebly.com/uploads/9/0/5/7/9057090/asabepaper121337628.pdf> (16.05.2016).
- KIM, S. & DALE, B. (2004): Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy* 26 (4), S. 361–375.
- KUMAR, A., WANG, L., DZENIS, Y., JONES, D. & HANNA, M. (2008): Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. *Biomass and Bioenergy* 32 (5), S. 460–467.
- LACEY, J., EMERSON, R., THOMPSON, D. & WESTOVER, T. (2016): Ash reduction strategies in corn stover facilitated by anatomical and size fractionation. *Biomass and Bioenergy* 90, S. 173–180.
- LAMSAL, B., WANG, H. & JOHNSON, L. (2011): Effect of corn preparation methods on dry-grind ethanol production by granular starch hydrolysis and partitioning of spent beer solids. *Bioresource Technology* 102 (12), S. 6680–6686.
- 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, S. 515–522.
- LEIBNITZ, E. (HRSG.) (1974): *Brockhaus-abc Landwirtschaft*. Brockhaus VEB, Leipzig.
- Leopoldina (German National Academy of Sciences) (2012): *Bioenergy – Chances and limits*, Halle (Saale).

- <http://www.leopoldina.org/de/publikationen/detailansicht/publication/bioenergie-moeglichkeiten-und-grenzen-20122013/> (03.03.2017).
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2017a): Agrarmeteorologie Bayern. <http://www.wetter-by.de/Internet/AM/inetcntrBY.nsf/cuhome.xsp?src=L941ES4AB8&p1=K1M7X321X6&p3=10VER48553> (02.02.2017).
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2017b): Auswertung der Gras- und Maisqualitäten 2016. <https://www.lfl.bayern.de/ite/rind/135145/index.php> (04.05.2017).
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2017c): Sortenberatung Körnermais: Ergebnisse der Landessortenversuche. Versuchsberichte Körnermais. <https://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/029867/index.php> (01.08.2017).
- LfL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft) (2017d): Sortenberatung Silomais: Ergebnisse der Landessortenversuche. Versuchsberichte Silomais. <https://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/021680/index.php> (01.08.2017).
- LI, D., HUANG, X., WANG, Q., YUAN, Y., YAN, Z., LI, Z. & HUANG, Y. & X. LIU (2016): Kinetics of methane production and hydrolysis in anaerobic digestion of corn stover. *Energy* 102, S. 1–9.
- LI, H., XU, L., LIU, W., FANG, M. & WANG, N. (2014): Assessment of the nutritive value of whole corn stover and its morphological fractions. *Asian-Australasian journal of animal sciences* 27 (2), S. 194–200.
- LI, Y., ZHANG, R., LIU, G., CHEN, C., HE, Y. & LIU, X. (2013a): Comparison of Methane Production Potential, Biodegradability, and Kinetics of Different Organic Substrates. *Bioresource Technology* 149, S. 565–569.
- LI, Y., ZHANG, R., LIU, X., CHEN, C., XIAO, X., FENG, L. & HE, Y. & G. LIU (2013b): Evaluating Methane Production from Anaerobic Mono- and Co-digestion of Kitchen Waste, Corn Stover, and Chicken Manure. *Energy & Fuels* 27 (4), S. 2085–2091.
- LI, Y., ZHU, J., WAN, C. & PARK, S. (2011): Solid-State Anaerobic Digestion of Corn Stover for Biogas Production. *Transactions of the ASABE* 54 (4), S. 1415–1421.
- LIEW, L., SHI, J. & LI, Y. (2012): Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy* 46, S. 125–132.
- LINDEN, D., CLAPP, C. & DOWDY, R. (2000): Long term corn grain and stover yields as a function of tillage and residue removal in east central Minnesota. *Soil Tillage Research* 56, S. 167–174.
- LINDSTROM, M. (1986): Effects of residue harvesting on water runoff, soil erosion and nutrient loss. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 16, S. 103–112.
- LIZOTTE, P. & SAVOIE, P. (2011): Spring Harvest of Corn Stover. *Applied Engineering in Agriculture* 27 (5), S. 697–703.

- LIZOTTE, P.-L., SAVOIE, P. & CHAMPLAIN, A. de (2015a): Ash Content and Calorific Energy of Corn Stover Components in Eastern Canada. *Energies* 8 (6), S. 4827–4838.
- LIZOTTE, P.-L., SAVOIE, P., LEFSRUD, M. & ALLARD, G. (2015b): Yield and moisture content of corn stover components in Québec, Canada. *Canadian Biosystems Engineering* 56 (1), S. 8.1.
- LORENZ, A., ANEX, R., ISCI, A., COORS, J., LEON, N. de & WEIMER, P. (2009): Forage quality and composition measurements as predictors of ethanol yield from maize (*Zea mays* L.) stover. *Biotechnology for biofuels* 2 (1), S. 5.
- MAULFAIR, D. & HEINRICHS, A. (2012): Review. Methods to measure forage and diet particle size in the dairy cow1. *The Professional Animal Scientist* 28 (5), S. 489–493.
- MENARDO, S., AIROLDI, G. & BALSARI, P. (2012): The effect of particle size and thermal pre-treatment on the methane yield of four agricultural by-products. *Bioresource Technology* 104, S. 708–714.
- MENARDO, S., AIROLDI, G., CACCIATORE, V. & BALSARI, P. (2015a): Potential biogas and methane yield of maize stover fractions and evaluation of some possible stover harvest chains. *Biosystems Engineering* 129, S. 352–359.
- MENARDO, S. & BALSARI, P. (2012): An Analysis of the Energy Potential of Anaerobic Digestion of Agricultural By-Products and Organic Waste. *BioEnergy Research* 5 (3), S. 759–767.
- MENARDO, S., BALSARI, P., TABACCO, E. & BORREANI, G. (2015b): Effect of Conservation Time and the Addition of Lactic Acid Bacteria on the Biogas and Methane Production of Corn Stalk Silage. *BioEnergy Research* 8 (4), S. 1810–1823.
- MINIHUBER, J. (2007): Eignung verschiedener Energiemaissortentypen zur Biogaserzeugung unter den Standortbedingungen des nordöstlichen Hausruckviertels. Diplomarbeit, Wien.
- MOREY, R., KALIYAN, N., TIFFANY, D. & SCHMIDT, D. (2010): A Corn Stover Supply Logistics System. *Applied Engineering in Agriculture* 26 (3), S. 455–461.
- MOURTZINIS, S., CANTRELL, K., ARRIAGA, F., BALKCOM, K., NOVAK, J., FREDERICK, J. & KARLEN, D. (2016): Carbohydrate and nutrient composition of corn stover from three southeastern USA locations. *Biomass and Bioenergy* 85, S. 153–158.
- NEGRI, M., BACENETTI, J., MANFREDINI, A., LOVARELLI, D., FIALA, M., MAGGIORE, T. & BOCCHI, S. (2014): Evaluation of methane production from maize silage by harvest of different plant portions. *Biomass and Bioenergy* 67, S. 339–346.
- OSTERTAG, J. & FLESCHHUT, M. (2016): DMK-Tagung Futterkonservierung und Fütterung. LfL Schriftenreihe. 29.05.2017  
(<https://www.lfl.bayern.de/publikationen/schriftenreihe/041001/index.php>).

- 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, S. 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), S. 603–612.
- PFALSDORF, L. (2017): Development of Dual Use Maize Cultivars - Corn as Food and Stover for Biogas Production, Göttingen.
- PINTO, J., CRUZ, D., PAIVA, A., PEREIRA, S., TAVARES, P., FERNANDES, L. & VARUM, H. (2012): Characterization of corn cob as a possible raw building material. *Construction and Building Materials* 34, S. 28–33.
- PORDESIMO, L., EDENS, W. & SOKHANSANJ, S. (2004a): Distribution of aboveground biomass in corn stover. *Biomass and Bioenergy* 26 (4), S. 337–343.
- PORDESIMO, L., HAMES, B., SOKHANSANJ, S. & EDENS, W. (2005): Variation in corn stover composition and energy content with crop maturity. *Biomass and Bioenergy* 28 (4), S. 366–374.
- PORDESIMO, L., SOKHANSANJ, S. & EDENS, W. (2004b): Moisture and yield of corn stover fractions before and after grain maturity. *Transactions of the ASAE* 47 (5), S. 1597–1603.
- PREWITT, R., MONTROSS, M., SHEARER, S., STOMBAUGH, T., HIGGINS, S., MCNEILL, S. & SOKHANSANJ, S. (2007): Corn Stover Availability and Collection Efficiency Using Typical Hay Equipment. *Transactions of the ASABE* 50 (3), S. 705–711.
- QIANG, Z. & THOMSEN, A. (2012): Fuel Ethanol Production from Wet Oxidised Corn Stover by *S. Cerevisiae*. *Advanced Materials Research* 343-344, S. 963–967.
- RATH, J., HEUWINKEL, H. & HERRMANN, A. (2013): Specific Biogas Yield of Maize Can Be Predicted by the Interaction of Four Biochemical Constituents. *BioEnergy Research* 6 (3), S. 939–952.
- 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), S. 1889–1897.
- SCHITTENHELM, S. (2008): Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. *European Journal of Agronomy* 29 (2-3), S. 72–79.
- SESMERO, J. & GRAMIG, B. (2013): Farmers' Supply Response, Price of Corn Residue, and Its Economic Viability as an Energy Feedstock. *BioEnergy Research* 6 (2), S. 797–807.

- SHAH, A., DARR, M., WEBSTER, K. & HOFFMAN, C. (2011): Outdoor Storage Characteristics of Single-Pass Large Square Corn Stover Bales in Iowa. *Energies* 4 (12), S. 1687–1695.
- 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), S. 117–146.
- 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), S. 355–363.
- SHINNERS, K., BENNETT, R. & HOFFMAN, D. (2012): Single- and two-pass corn grain and stover harvesting. *Transactions of the ASABE* 55 (2), S. 341–350.
- SHINNERS, K. & BINVERSIE, B. (2007): Fractional yield and moisture of corn stover biomass produced in the Northern US Corn Belt. *Biomass and Bioenergy* 31 (8), S. 576–584.
- SHINNERS, K., BINVERSIE, B., MUCK, R. & WEIMER, P. (2007b): Comparison of wet and dry corn stover harvest and storage. *Biomass and Bioenergy* 31 (4), S. 211–221.
- 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), S. 51–60.
- SHINNERS, K., WEPNER, A., MUCK, R. & WEIMER, P. (2011): Aerobic and Anaerobic Storage of Single-pass, Chopped Corn Stover. *BioEnergy Research* 4 (1), S. 61–75.
- 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), S. 75–81.
- SOKHANSANJ, S. & TURHOLLOW, A. (2002): BASELINE COST FOR CORN STOVER COLLECTION. *Applied Engineering in Agriculture* 18 (5), S. 525–530.
- SOKHANSANJ, S., TURHOLLOW, A., CUSHMAN, J. & CUNDIFF, J. (2002): Engineering aspects of collecting corn stover for bioenergy. *Biomass & Bioenergy* 23 (5), S. 347–355.
- SPIEKERS, H. (2017): Nutritional requirements in silage quality.  
<https://www.lfl.bayern.de/ite/futterwirtschaft/030320/index.php?fontsize=1> (04.08.2017).
- STRAETER, J. (2011): Cornrower System of stover harvest. 2011 ASABE Annual International Meeting, Kentucky.  
<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=37239&t=2&redir=&redirType=> (04.02.2017).
- TEMPLETON, D., SLUITER, A., HAYWARD, T., HAMES, B. & THOMAS, S. (2009): Assessing corn stover composition and sources of variability via NIRS. *Cellulose* 16 (4), S. 621–639.
- THOMPSON, J. & TYNER, W. (2014): Corn stover for bioenergy production. Cost estimates and farmer supply response. *Biomass and Bioenergy* 62, S. 166–173.

- TOLERA, A. & SUNDSTØL, F. (1999): Morphological fractions of maize stover harvested at different stages of grain maturity and nutritive value of different fractions of the stover. *Animal Feed Science and Technology* 81 (1-2), S. 1–16.
- TOLERA, A., SUNDSTØL, F. & SAID, A. (1998): The effect of stage of maturity on yield and quality of maize grain and stover. *Animal Feed Science and Technology* 75 (2), S. 157–168.
- TUMBALAM, P., THELEN, K., ADKINS, A., DALE, B., BALAN, V., GUNAWAN, C. & GAO, J. (2016): Corn stover ethanol yield as affected by grain yield, Bt trait, and environment. *Biomass and Bioenergy* 85, S. 119–125.
- UNKOVICH, M., BALDOCK, J. & FORBES, M. (2010): Chapter 5 – Variability in Harvest Index of Grain Crops and Potential Significance for Carbon Accounting: Examples from Australian Agriculture. *Advances in Agronomy* 105, S. 173–219.
- USDA (United States Department of Agriculture) (2010): Field Crops Usual Planting and Harvesting Dates 10/29/2010.  
<http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1251>  
(28.03.2017).
- VADAS, P. & DIGMAN, M. (2013): Production costs of potential corn stover harvest and storage systems. *Biomass and Bioenergy* 54, S. 133–139.
- VDI 4630 (Verein Deutscher Ingenieure) (2006): Guideline VDI 4630 - Fermentation of Organic Materials Characterisation of the Substrate, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests. Beuth-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) (2012): The chemical analysis of feedstuffs. Method book III. incl. 8th supplement delivery. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten) (2010): Quality report for NIRS-analytic of VDLUFA-DMK-silage maize network, Kassel.
- WANG, J., STEINBERGER, Y., WANG, X., HU, L., CHEN, X. & XIE, G. (2014): Variations of Chemical Composition in Corn Stover Used for Biorefining. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy* 8 (6), S. 633–640.
- WEBSTER, K. (2011): Single-pass corn stover harvest system productivity and cost analysis. Master thesis, Iowa.
- WILHELM, W., JOHNSON, J., HATFIELD, J., VOORHEES, W. & LINDEN, D. (2004): Crop and Soil Productivity Response to Corn Residue Removal: A Literature Review. *Agronomy Journal* 96 (1), S. 1–17.

- WILHELM, W., JOHNSON, J., KARLEN, D. & LIGHTLE, D. (2007): Corn Stover to Sustain Soil Organic Carbon Further Constrains Biomass Supply. *Agronomy Journal* 99 (6), S. 1665.
- WILHELM, W., JOHNSON, J., LIGHTLE, D., KARLEN, D., NOVAK, J., BARBOUR, N. & LAIRD, D., J. BAKER, T. E. OCHSNER, A. D. HALVORSON, D. W. ARCHER & F. ARRIAGA (2011): Vertical Distribution of Corn Stover Dry Mass Grown at Several US Locations. *BioEnergy Research* 4 (1), S. 11–21.
- 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), S. 2073–2083.
- WRIGHT, C. (2005): Effect of Harvest Method on the Nutrient Composition of Baled Cornstalks. *South Dakota Beef Report*, South Dakota State University, USA.  
[http://www.sdstate.edu/sites/default/files/ars/species/beef/beef-reports/upload/Beef\\_2005-10\\_Wright-1.pdf](http://www.sdstate.edu/sites/default/files/ars/species/beef/beef-reports/upload/Beef_2005-10_Wright-1.pdf) (22.03.2017).
- WRIGHT, C., PRYFOGLE, P., STEVENS, N., STEFFLER, E., HESS, JR & ULRICH, T. (2005): Biomechanics of wheat/barley straw and corn stover. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 121, S. 5–19.
- XU, F. & LI, Y. (2012): Solid-state co-digestion of expired dog food and corn stover for methane production. *Bioresource Technology* 118, S. 219–226.
- YUAN, X. (2011): Enhancing the Anaerobic Digestion of Corn Stalks Using Composite Microbial Pretreatment. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 21 (7), S. 746–752.
- ZELLER, V., THRÄN, D., ZEYMER, M., BÜRZLE, B., ADLER, P. & PONITKA, J. (2012): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung. *DBFZ Report Nr. 13* (13.03.2013).
- ZHANG, Y., GHALY, A. & LI, B. (2012): Physical Properties of Corn Residues. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology* 8 (2), S. 44–53.
- ZHAO, Y., YU, J., LIU, J., YANG, H., GAO, L., YUAN, X. & CUI, Z.-J. & X. WANG (2016): Material and microbial changes during corn stalk silage and their effects on methane fermentation. *Bioresource Technology* 222, S. 89–99.
- ZHENG, M., LI, X., LI, L., YANG, X. & HE, Y. (2009): Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment. *Bioresource Technology* 100 (21), S. 5140–5145.
- ZHONG, W., ZHANG, Z., LUO, Y., QIAO, W., XIAO, M. & ZHANG, M. (2012): Biogas productivity by co-digesting Taihu blue algae with corn straw as an external carbon source. *Bioresource Technology* 114, S. 281–286.

- ZHONG, W., ZHANG, Z., LUO, Y., SUN, S., QIAO, W. & XIAO, M. (2011): Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. *Bioresource Technology* 102 (24), S. 11177–11182.
- ZHOU, M. & PILARSKI, K. (2011): Preliminary Comparison of Biogas Productivity from maize silage and maize straw silage. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 56 (2).
- ZHOU, S., ZHANG, Y. & DONG, Y. (2012): Pretreatment for biogas production by anaerobic fermentation of mixed corn stover and cow dung. *Energy* 46 (1), S. 644–648.
- ZHU, Y. & LEE, Y. (2011): Bioconversion of Corn Stover into Value-Added Chemicals. Dilute Sulfuric Acid Pretreatment, Xylo-Oligosaccharides Production and Lactic Acid Fermentation. LAP Lambert Academic Publishing.
- ZSCHEISCHLER, J. (1990): Handbuch Mais. Umweltgerechter Anbau ; wirtschaftliche Verwertung. DLG-Verl; BLV-Verl.-Ges, Frankfurt (Main), München.
- ZUO, Z. & YANG, X. (2011): Ethanol Production from Corn stover Using Soaking Pretreatment. *Advanced Materials Research* 171-172, S. 261–265.

## Anhang

R	R	R	R	R	R	R	R
R	1/1-3	4/3-3	2/2-3	2/1-3	1/2-3	2/3-3	R
R	3/3-3	4/2-3	3/1-3	1/3-3	4/1-3	3/2-3	R
R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R
R	4/3-2	3/1-2	4/2-2	2/3-2	3/2-2	1/1-2	R
R	2/1-2	1/2-2	3/3-2	4/1-2	1/3-2	2/2-2	R
R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R
R	4/1-1	1/1-1	2/3-1	3/2-1	3/1-1	1/3-1	R
R	2/2-1	3/3-1	1/2-1	2/1-1	4/3-1	4/2-1	R
R	R	R	R	R	R	R	R

R: Rand  
 Codierung: Sorte/Erntetermin-Wiederholung  
 Sorte: 1: Grosso; 2: SY Kardona; 3: SY Talisman; 4: Danubio  
 Erntetermin: 13.10.14 27.10.14 04.11.14  
 Parzellenlänge: 3 m (+ 1,2 m Weg)  
 Parzellenbreite: 6 m  
 Versuchsdesign: Zweifaktorielle Blockanlage

Abbildung 10: Versuchsdesign im Sorten- und Ernteterminversuch in 2014

R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	2/1-3	5/2-3	4/1-3	3/3-3	3/2-3	5/1-3	4/2-3	2/3-3	R
R	1/3-3	R	5/3-3	2/2-3	1/1-3	4/3-3	3/1-3	1/2-3	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	4/3-2	3/1-2	1/3-2	5/1-2	2/2-2	3/3-2	5/2-2	2/1-2	R
R	1/2-2	2/3-2	4/1-2	4/2-2	5/3-2	1/1-2	R	3/2-2	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	1/1-1	4/2-1	2/1-1	R	2/3-1	1/2-1	4/1-1	1/3-1	R
R	3/3-1	5/1-1	3/2-1	4/3-1	5/2-1	3/1-1	5/3-1	2/2-1	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

R: Rand  
 Codierung: Sorte/Erntetermin-Wiederholung  
 Sorte: 1: Grosso; 2: SY Kardona; 3: SY Talisman; 4: Danubio; 5: Stay-green Testhybride  
 Erntetermin: 18.09.15 06.10.15 14.10.15  
 Parzellenlänge: 3 m (+ 1,2 m Weg)  
 Parzellenbreite: 6 m  
 Versuchsdesign: Zweifaktorielle Blockanlage

Abbildung 11: Versuchsdesign im Sorten- und Ernteterminversuch in 2015

R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	2/1-3	5/2-3	R	5/3-3	2/2-3	3/1-3	1/2-3	2/3-3	R
R	3/3-3	4/1-3	1/3-3	3/2-3	1/1-3	4/3-3	5/1-3	4/2-3	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	4/3-2	3/1-2	2/3-2	4/1-2	1/2-2	3/3-2	4/2-2	1/1-2	R
R	2/2-2	1/3-2	5/1-2	3/2-2	5/3-2	2/1-2	R	5/2-2	R
R	R	R	R	R	R	R		R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
R	1/2-1	3/3-1	5/1-1	3/2-1	R	2/1-1	5/2-1	2/3-1	R
R	5/3-1	2/2-1	4/3-1	1/1-1	4/2-1	3/1-1	1/3-1	4/1-1	R
R	R	R	R	R	R	R	R	R	R

R: Rand  
 Codierung: Sorte/Erntetermin-Wiederholung  
 Sorte: 1: Grosso; 2: SY Kardona; 3: SY Talisman; 4: Danubio; 5: Stay-green Testhybride  
 Erntetermin: 30.09.16 14.10.16 27.10.16  
 Parzellenlänge: 3 m (+ 1,2 m Weg)  
 Parzellenbreite: 6 m  
 Versuchsdesign: Zweifaktorielle Blockanlage

Abbildung 12: Versuchsdesign im Sorten- und Ernteterminersuch in 2016



Abbildung 13: Einsatz des BioChippers (Versuchsjahr 2015)



Abbildung 14: Blick von unten in den BioChipper (Foto: Josef Höckner)



*Abbildung 15: Einsatz des Schwadhäckslers UP-6400 (Prototyp) (Versuchsjahr 2015)*



*Abbildung 16: Blick von unten in den Schwadhäcksler UP-6400*



Abbildung 17: Einsatz des Merge Maxx 900 (Versuchsjahr 2014)



Abbildung 18: Detailfoto vom Merge Maxx 900



*Abbildung 19: Einsatz des Mais Star\* Collect (Versuchsjahr 2015)*



*Abbildung 20: Detailfoto vom Unterbau des Mais Star\* Collect*

1/1/2-4	3/2/1-4
1/1/1-4	3/2/2-4
2/1/2-4	4/2/1-4
2/1/1-4	4/2/2-4
3/1/2-4	1/2/2-4
3/1/1-4	1/2/1-4
4/1/1-4	2/2/2-4
4/1/2-4	2/2/1-4
3/2/2-3	4/1/1-3
3/2/1-3	4/1/2-3
4/2/1-3	2/1/2-3
4/2/2-3	2/1/1-3
2/2/2-3	1/1/2-3
2/2/1-3	1/1/1-3
1/2/1-3	3/1/1-3
1/2/2-3	3/1/2-3
2/2/2-2	1/1/1-2
2/2/1-2	1/1/2-2
3/2/1-2	4/1/2-2
3/2/2-2	4/1/1-2
4/2/1-2	2/1/2-2
4/2/2-2	2/1/1-2
1/2/2-2	3/1/2-2
1/2/1-2	3/1/1-2
4/1/1-1	2/2/2-1
4/1/2-1	2/2/1-1
2/1/2-1	3/2/2-1
2/1/1-1	3/2/1-1
1/1/2-1	4/2/2-1
1/1/1-1	4/2/1-1
3/1/1-1	1/2/2-1
3/1/2-1	1/2/1-1

Codierung:	Schwadtechnik/Feldliegezeit/Bergungsart-Wiederholung	
Schwadtechnik:	1: Schwadhäcksler UP-6400; 2: Mais Star* Collect; 3: BioChipper; 4: Merge Maxx 900/902	
Feldliegezeit:	1: Lang	2: Kurz
Bergungsart:	1: Kurzschnittdewagen; 2: selbstfahrender Feldhäcksler	
Parzellenlänge:	140 m	
Parzellenbreite:	6 m bzw. 9 m bzw. 12 m (je nach Schwadtechnik)	
Versuchsdesign:	dreifaktorielle dreistufige Spaltanlage	

Abbildung 21: Versuchsdesign im Erntetechnikversuch in 2014

1/1/2-4	3/3/1-4	
1/1/1-4	2/3/1-4	
2/1/1-4	1/3/1-4	
2/1/2-4	4/3/1-4	
3/1/2-4	1/2/1-4	
3/1/1-4	3/2/1-4	
4/1/1-4	4/2/1-4	
4/1/2-4	2/2/1-4	
3/3/1-3	4/1/1-3	4/2/1-1
1/3/1-3	4/1/2-3	3/2/1-1
2/3/1-3	2/1/2-3	2/2/1-1
4/3/1-3	2/1/1-3	1/2/1-1
1/2/1-3	1/1/2-3	1/3/1-1
4/2/1-3	1/1/1-3	4/3/1-1
3/2/1-3	3/1/2-3	3/3/1-1
2/2/1-3	3/1/1-3	2/3/1-1
2/2/1-2	1/1/1-2	3/1/2-1
4/2/1-2	1/1/2-2	3/1/1-1
3/2/1-2	4/1/1-2	4/1/1-1
1/2/1-2	4/1/2-2	4/1/2-1
4/3/1-2	2/1/2-2	2/1/1-1
1/3/1-2	2/1/1-2	2/1/2-1
3/3/1-2	3/1/1-2	1/1/2-1
2/3/1-2	3/1/2-2	1/1/1-1

Codierung:  
Schwadtechnik:

Schwadtechnik/Sorte/Bergungsart-Wiederholung  
1: Schwadhäcksler UP-6400; 2: Mais Star\* Collect; 3:  
BioChipper; 4: Merge Maxx 900/902

Sorte:

1: LG 32.58    2: SY Talisman    3: KWS 9361

Bergungsart:

1: Kurzschnittdewagen; 2: selbstfahrender Feldhäcksler

Parzellenlänge:

105 m

Parzellenbreite:

6 m bzw. 9 m bzw. 12 m (je nach Schwadtechnik)

Versuchsdesign:

zweifaktorielle Spaltanlage (wenn nur LG 32.58-Varianten bzw.  
nur Kurzschnittdewagen-Varianten betrachtet werden)

Abbildung 22: Versuchsdesign im Erntetechnikversuch in 2015

A	3/1-4
6/2-2	3/2-4
A	2/2-4
A	2/1-4
4/2-2	A
4/1-2	A
3/2-2	A
3/1-2	4/2-4
2/1-2	4/1-4
2/2-2	6/2-4
4/1-1	A
4/2-1	A
3/2-1	A
3/1-1	6/2-3
2/1-1	2/1-3
2/2-1	2/2-3
A	3/1-3
A	3/2-3
A	4/2-3
6/2-1	4/1-3

Codierung:	Schwadtechnik/Bergungsart-Wiederholung
Schwadtechnik:	2: Mais Star* Collect; 3: BioChipper; 4: Merge Maxx 900/902; 6: Direct Disc am selbstfahrenden Feldhäcksler
Bergungsart:	1: Kurzschnittdewagen; 2: selbstfahrender Feldhäcksler
Parzellenlänge:	108m
Parzellenbreite:	6 m bzw. 9 m bzw. 12 m (je nach Schwadtechnik)
Versuchsdesign:	dreifaktorielle dreistufige Spaltanlage
A:	Varianten die nicht beerntet werden konnten (Schwadhäcksler UP-6400, neue Variante)

Abbildung 23: Versuchsdesign im Erntetechnikversuch in 2016



Abbildung 24: Trommelsiebmaschine mit 6 Größenklassen

Tabelle 41: Korrelationsmatrix der Ertragsparameter im Sorten- und Ernteterminversuch, Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman ( $r$ ), Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine;  $n = 135$

	TM-Ertrag des potenziell erntbaren Maisstrohs (dt ha <sup>-1</sup> )	TM-Gehalt des potenziell erntbaren Maisstrohs (%)	Korn-TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	Korn-TM-Gehalt (%)	Gesamtpflanzen -TM-Ertrag (dt ha <sup>-1</sup> )	Gesamtpflanzen -TM-Gehalt (%)	Korn-Stroh-Verhältnis 1:x
TM-Gehalt des (potenziell erntbaren) Maisstrohs	-0,38***						
Korn-TM-Ertrag	0,80***	-0,31***					* $p < 0,05$
Korn-TM-Gehalt	-0,20*	0,84***	-0,17				** $p < 0,01$ *** $p < 0,001$
Gesamtpflanzen-TM-Ertrag	0,87***	-0,37***	0,88***	-0,16			$r <  0,5 $ keine oder geringe Korrelation
Gesamtpflanzen-TM-Gehalt	-0,19*	0,87***	-0,02	0,86***	-0,06		$ 0,5  < r <  0,8 $ mäßige Korrelation $ 0,8  < r <  1 $ starke Korrelation
Korn-Stroh-Verhältnis	-0,03	0,17*	-0,54***	0,23**	-0,30***	0,00	
Harvestindex	-0,02	-0,17*	0,53***	-0,22*	0,30***	0,00	-0,99***

Tabelle 42: Korrelationsmatrix der Inhaltsstoffe, der Ertragsparameter und der Methanausbeute im Sorten- und Ernteterminversuch, Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman ( $r$ ): Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine;  $n = 135$

	XA	XP	XL	XF	XZ	ST	NDF	ADF	ADL	HCEL	CEL	MSErt	KErt	GesErt	MA	BA
						(% TM)							(dt TM ha <sup>-1</sup> )		(I CH <sub>4</sub> (kg oTM) <sup>-1</sup> )	
XP	0,03															
XL	-0,02	0,38***														
XF	-0,13	-0,38***	-0,19*													
XZ	-0,17*	0,13	-0,07	-0,67***												
ST	-0,09	0,17*	0,47***	-0,16	-0,05											
NDF	0,16	-0,45***	-0,22**	0,77***	-0,79***	-0,13										
ADF	0,01	-0,26**	-0,15	0,80***	-0,71***	-0,14	0,82***									
ADL	-0,28***	0,03	0,06	0,44***	-0,24**	0,03	0,33***	0,48***								
HCEL	0,19*	-0,55***	-0,32***	0,38***	-0,45***	-0,12	0,69***	0,23**	-0,07							
CEL	0,15	-0,24**	-0,16	0,73***	-0,72***	-0,15	0,80***	0,94***	0,22*	0,25**						
MSErt	-0,53***	0,14	0,10	-0,14	0,49***	-0,06	-0,45***	-0,31***	0,31***	-0,39***	-0,47***					
KErt	-0,48***	0,26**	0,18*	-0,09	0,24***	-0,03	-0,38***	-0,25**	0,38***	-0,39***	-0,43***	0,80***				
GesErt	-0,55***	0,22*	0,20*	-0,15	0,42***	0,01	-0,46***	-0,31***	0,33***	-0,42***	0,48***	-0,87***	0,88***			
MA	0,16	-0,25**	-0,16	-0,02	0,21*	-0,11	-0,06	-0,12	-0,24**	0,12	-0,09	0,06	-0,18*	-0,06		
BA	0,15	-0,31***	-0,18*	0,00	0,22**	-0,12	-0,04	-0,11	-0,25**	0,16	-0,07	0,03	-0,22*	-0,10	0,98***	
MHE	-0,43***	0,04	0,04	-0,13	0,51***	-0,10	-0,43***	-0,32***	0,18*	-0,33***	-0,45***	0,92***	0,65***	0,75***	0,40***	0,36***

XA: Rohasche; XP: Rohprotein; XL: Rohfett; XF: Rohfaser; XZ: Zucker (reduzierend); ST: Stärke; NDF: Neutral-Detergenzfaser; ADF: Säure-Detergenzfaser; ADL: Lignin; HCEL: Hemicellulose; CEL: Cellulose; MSErt: TM-Ertrag des (potenziell embaren) Maisstrohs; KErt: Korn-TM-Ertrag; GesErt: Gesamtpflanze-TM-Ertrag; MA: Methanausbeute; BA: Biogasausbeute; MHE: Methanhektarertrag

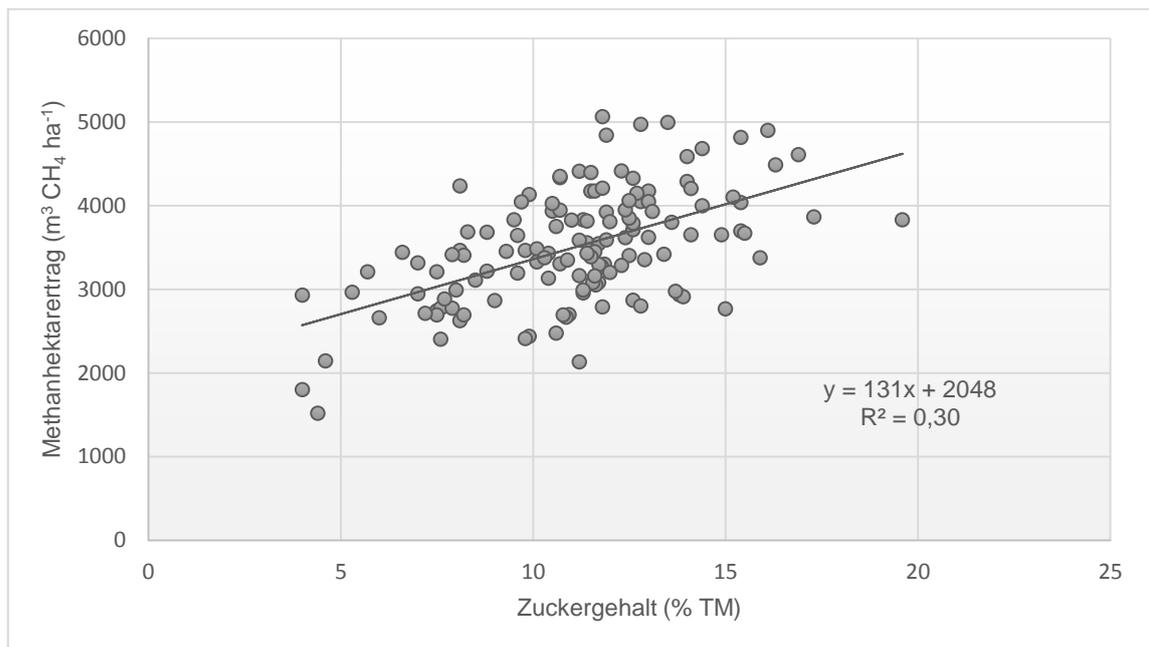


Abbildung 25: Einfluss des Zuckergehaltes auf den Methanhektarertrag; Mittel über alle Versuchsjahre, Sorten und Erntetermine;  $n = 135$