

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
Institut für Landtechnik  
Verfahrenstechnik in der tierischen Erzeugung  
Prof. Dr. agr. habil. Wolfgang Büscher

**Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die  
Siliereigenschaften von Mais**

**Inaugural-Dissertation**

zur

Erlangung des Grades

**Doktor der Agrarwissenschaften**

**(Dr. agr.)**

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 27. Oktober 2005

von

Dipl.-Ing. agr. Kristina Leurs

aus Neuss

Referent: Prof. Dr. W. Büscher  
Korreferent: Prof. Dr. K.-H. Südekum  
Tag der mündlichen Prüfung: 20. Januar 2006

Sigel der Deutschen Zentralbibliothek für Landbauwissenschaften: D 98

Copyright 2006  
Im Selbstverlag  
Kristina Leurs  
Institut für Landtechnik  
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, und des Nachdrucks sowie jede Art der photomechanischen Wiedergabe, auch auszugsweise, bleiben vorenthalten.

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn [http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss\\_online](http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online) elektronisch publiziert.

Erscheinungsjahr 2006

## **Danksagung**

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Büscher für die Überlassung des Themas und seine Diskussions- und Hilfsbereitschaft.

Herrn Prof. Karl-Heinz Südekum für die Übernahme des Korreferates und

Herrn Prof. Karl Schellander für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Frau Dr. Andrea Wagner für die unermüdliche Bereitschaft sowohl profane Fragen als auch komplexe Theorien zu diskutieren und für die hervorragende Zusammenarbeit und Unterstützung im gesamten Projekt.

Der Firma Syngenta Seeds für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

Den Mitarbeitern der Landwirtschaftskammer NRW und der Lehr- und Versuchsanstalt Rheinland, Haus Riswick, für die große Hilfe bei der Versuchsdurchführung und der Diskussion von Ergebnissen.

Den Mitarbeitern des Institutes für Landtechnik für das angenehme Betriebsklima und die große Hilfsbereitschaft.

Den Firmen BAG Budissa Agro Service, CLAAS und John Deere für die Bereitstellung der Erntemaschinen.

Meinen Eltern, die mir durch ihre großzügige Unterstützung das Studium ermöglicht haben.

Joachim Wagner für seine Geduld und Unterstützung.



## **Kurzfassung**

Wirtschaftseigene Grundfutter bilden unter den derzeitigen Produktionsbedingungen in der Milcherzeugung die Hauptbestandteile der TMR. Insbesondere gewinnt Mais zur Energieversorgung der Kühe an Bedeutung, wobei die Konservierungsprobleme zunehmen. Hohe Häckslerleistungen und nicht ausreichende Verdichtung bei der Einsilierung stellen ein Problem in der Verfahrenskette dar.

Um den Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die Siliereigenschaften von Mais zu untersuchen, wurden in zwei Ernteperioden Versuche durchgeführt. Im ersten Erntejahr (2003) wurden zwei Sorten in drei Häcksellängen (5,5; 14,0 und 21,0 mm) mit zwei Spaltweiten (1,0 und 2,0 mm) gehäckselt. Im zweiten Versuch (Erntejahr 2004) wurden drei Sorten in zwei verschiedenen Häcksellängen (5,0 und 21,0 mm) mit konstanter Spaltweite (1,0 mm) gehäckselt. Die Silagen wurden in unterschiedliche Siloformen einsiliert und zusätzlich im Labormaßstab untersucht.

Eine Steigerung von theoretischer Häcksellänge und Spaltweite führte zu einer Steigerung des Überlängenanteils (>25 mm). Ein hoher Trockenmassegehalt hatte einen gleichgerichteten Einfluss auf den Überlängenanteil.

Die kurzen Häcksellängen (5,0 bzw. 5,5 mm) führten zu Dichtesteigerungen von bis zu 25 % im Vergleich zu langen Häcksellängen (21,0 mm). Eine Steigerung der Schnitthöhe führte nochmals zu einer um 21 % höheren Dichte. Ein direkter Einfluss von Spaltweite und Trockenmassegehalt auf die Verdichtbarkeit war nicht abzuleiten. Erhebliche Unterschiede in den Trockenmassegehalten erschwerten die Interpretation des Sorteneinflusses auf die Verdichtbarkeit.

Die Dichten in Flach- und Schlauchsilos lagen durchweg unter einem Zielwert von 250 kg TM/m<sup>3</sup>. Die Folge war deutliche Nacherwärmung an den Anschnittflächen nahezu aller Schlauchsilos, die mit steigender Häcksellänge zunahm.

Die gesteigerten Häcksellängen führten überwiegend zu geringeren Energiegehalten und zu hohen Gärverlusten in den Schlauchsilos. Aus technischer Sicht besteht bei der Verdichtung von Flach- und Schlauchsilos erheblicher Entwicklungsbedarf.

## **Abstract**

Under the present conditions in dairy farming, basic feeds produced on the farm are the main component in the total mixed ration. Especially maize is gaining importance in the energy supply to cows, while difficulties in conservation are increasing. High capacities of harvesters and insufficient compaction during the ensiling are problems in the process chain.

Two experiments were conducted to evaluate the influence of chop length, mechanical processing and variety on the ensiling characteristics of maize. In the first crop year (2003) two breeds were chopped at three different chop lengths (5.5; 14.0 and 21.0 mm) and two different clearance settings (1.0 and 2.0 mm). In the second experiment (crop year 2004) three breeds were harvested with a theoretical chop length of 5.0 and 21.0 and a constant clearance setting of 1.0 mm. Corn silage was stored in different kinds of silo and investigated on a laboratory scale.

Increased chop length and clearance settings led to a higher proportion of the overlength fraction (>25 mm). A high dry matter content affected the overlength fraction in the same way.

Short chop lengths (5.0; 5.5 mm) caused an increase in density of up to 25 % in comparison to longer chop lengths (21.0 mm). Increasing the height of cut led to a 21 % rise in density additionally. There was no direct influence of clearance setting and dry matter content on compactibility. The interpretation of the effects of variety on compactibility was complicated by considerable differences in dry matter content.

Densities in bunker silos and tube silos dropped below the desirable value of 250 kg DM/m<sup>3</sup>. Due to lower densities, nearly all the tube silos were affected by undesirable temperature increases, which were intensified with increasing chop lengths.

Increased chop lengths tended to induce lower energy contents and higher fermentation losses in tube silos. From a technical point of view, there is a high demand for development concerning the compaction in bunker silos as well as in tube silos.

## Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>	
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung	3
<b>2</b>	<b>Kenntnisstand</b>	<b>4</b>
2.1	Einfluss der Rationsgestaltung auf die Pansenphysiologie	4
2.2	Allgemeiner Aufbau des Feldhäckslers	5
2.3	Einfluss untersuchungsrelevanter Parameter auf die Pansenphysiologie	6
2.3.1	Einfluss des Zerkleinerungsgrades auf die Pansenphysiologie	6
2.3.2	Einfluss der Maissorte auf die Pansenphysiologie	9
2.3.3	Einfluss des Aufbereiteters auf die Pansenphysiologie	11
2.4	Silierprozess	14
2.4.1	Rahmenbedingungen und mikrobielle Einflussfaktoren	14
2.4.2	Fermentationsverlauf	16
2.4.3	Vergärbarkeit	18
2.5	Nacherwärmung	19
2.6	Verdichtbarkeit	20
2.6.1	Einflussfaktoren auf die Verdichtbarkeit	20
2.6.2	Einfluss des Rohfasergehalts	21
2.6.3	Einfluss von Zerkleinerungsgrad und Trockenmassegehalt	21
2.7	Partikellängenfraktionierung	23
2.7.1	Überlängen	23
2.7.2	Relevanz der effektiven Häcksellänge	24
2.7.3	Verfahren zur Erfassung der effektiven Häcksellänge	24
2.7.3.1	Penn State Particle Separator (Schüttelbox)	25
2.7.3.2	Plansieb	26
2.7.3.3	Trogschnecke	27
2.7.3.4	Kritik an der Siebanalyse	28
2.7.3.5	Bildanalytische Methoden	29
2.7.4	Zusammenhänge zwischen theoretischer Häcksellänge, effektiver Häcksellänge und Aufbereitungsgrad bei der Siebanalyse	31
2.8	Verdichtungs- und Silierverfahren	34
2.8.1	Untersuchungen zur Verdichtung in Flachsilos	34
2.8.2	Schlauchsilos	35

2.8.3	Untersuchungen zur Verdichtung in Strohpressen	36
2.8.4	Untersuchungen zur Verdichtbarkeit in Presstöpfen	38
2.9	Untersuchungen zum Einfluss der Verdichtung auf die Nacherwärmung	44
2.10	Entnahmetechnik	45
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>48</b>
3.1	Versuchsaufbau	48
3.1.1	Versuchsaufbau im Erntejahr 2003	48
3.1.2	Versuchsaufbau im Jahr 2004	50
3.1.3	Charakterisierung des Ausgangsmaterials	51
3.1.4	Materialprüfmaschine	53
3.1.5	Untersuchungen an den verschiedenen Siloformen	54
3.1.5.1	Siliergläser	54
3.1.5.2	Kleinsilos (220 l-Behälter)	55
3.1.5.3	Schlauchsilos	56
3.1.5.4	Flachsilos	58
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>60</b>
4.1	Ergebnisse der Vorversuche	60
4.1.1	Vorversuch zur Körnerseparation	60
4.1.2	Vorversuche zur Partikellängenfraktionierung	61
4.1.3	Vorversuche zur Verdichtbarkeit (220 l-Behälter)	63
4.2	Ergebnisse im Erntejahr 2003	65
4.2.1	Beschreibung des Ausgangsmaterials für das Erntejahr 2003	65
4.2.1.1	Trockenmasseschnellbestimmung (Mikrowelle)	65
4.2.1.2	Analyse von Roh Nährstoffen, Nitrat, Pufferkapazität und Milchsäurebakterien (VDLUFA) im Erntejahr 2003	66
4.2.2	Untersuchungen zur Verdichtbarkeit im Erntejahr 2003	68
4.2.2.1	Untersuchungen zur Verdichtbarkeit mit der Materialprüfmaschine im Erntejahr 2003	68
4.2.2.2	Untersuchungen zur Verdichtbarkeit in 220 l-Behältern (Kleinsilos) im Erntejahr 2003	69
4.2.2.3	Dichtekalkulation an den Schlauchsilos im Erntejahr 2003	71
4.2.2.4	Dichtemessungen an den Flachsilos im Erntejahr 2003	72
4.2.3	Temperaturverlauf in den verschiedenen Siloformen im Erntejahr 2003	73
4.2.3.1	Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos im Erntejahr 2003	73
4.2.3.2	Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos im Erntejahr 2003	75

4.2.3.3	Temperaturverlauf im Kern der Flachsilos im Erntejahr 2003	78
4.2.3.4	Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Flachsilos im Erntejahr 2003	79
4.2.4	Rohnährstoffe, Gärsäuremuster und geschätzter Futterwert in den Maissilagen im Erntejahr 2003	80
4.2.5	Gärparameter im Erntejahr 2003	83
4.3	Ergebnisse im Erntejahr 2004	84
4.3.1	Beschreibung des Ausgangsmaterials im Erntejahr 2004	84
4.3.1.1	Trockenmasseschnellbestimmung (Mikrowelle) im Erntejahr 2004	84
4.3.1.2	Analyse von Rohnährstoffen, Nitrat, Pufferkapazität und Milchsäurebakterien (VDLUFA) im Erntejahr 2004	84
4.3.1.3	Partikellängenfraktionierung im Erntejahr 2004	86
4.3.2	Untersuchungen zur Verdichtbarkeit im Erntejahr 2004	88
4.3.2.1	Untersuchungen zur Verdichtbarkeit mit der Materialprüfmaschine im Erntejahr 2004	88
4.3.2.2	Untersuchungen zur Verdichtbarkeit in den 220 l-Behältern im Erntejahr 2004	91
4.3.2.3	Dichtemessungen an den Schlauchsilos (Erntejahr 2004)	93
4.3.3	Temperaturverlauf in den verschiedenen Siloformen im Erntejahr 2004	95
4.3.3.1	Temperaturverlauf im Schlauchinneren im Erntejahr 2004	95
4.3.3.2	Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos im Erntejahr 2004	98
4.3.4	Rohnährstoffe, Gärsäuremuster und geschätzter Futterwert in den Maissilagen im Erntejahr 2004	101
4.3.5	Messung der aeroben Stabilität und der Gärverluste im Erntejahr 2004	103
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>105</b>
5.1	Bewertung der Vorversuche	105
5.2	Bewertung des Ausgangsmaterials	106
5.2.1	Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials	106
5.2.2	Einfluss des Ausgangsmaterials auf die statistische Auswertung	108
5.3	Partikellängenfraktionierung und Bewertung der Überlängenfraktion	109
5.4	Bewertung der Verdichtbarkeitsuntersuchungen	111
5.4.1	Materialprüfmaschine und 220 l-Behälter	111
5.4.2	Schlauch- und Flachsilos	115
5.4.3	Übertragbarkeit der Dichten der verschiedenen Verdichtungsmethoden	116
5.5	Bewertung der Temperaturverläufe in den verschiedenen Siloformen	117
5.6	Bewertung der Silagequalität	119

5.7	Bewertung von aerober Stabilität und Gärverlusten	124
5.8	Verbesserungsmöglichkeiten in zukünftigen Versuchen	124
5.8.1	Statistische Auswertung	124
5.8.2	Homogenität des Materials	125
5.8.3	Reduktion der Variantenzahl	125
5.8.4	Partikellängenfraktionierung	126
5.8.5	Vorschub	126
5.8.6	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	127
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>129</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>139</b>

## Tabellenverzeichnis

	<u>Seite</u>
Tab. 1: Mittlere Anteile von Körnern und Kornbruchstücken in Abhängigkeit von Häcksellänge, TM-Gehalt und Aufbereitereinsatz (modifiziert nach SCHWARZ et al., 1997)	12
Tab. 2: Ansprüche und Stoffwechselaktivität der wichtigsten Mikroorganismen für die Silierung (modifiziert nach JEROCH et al., 1999)	15
Tab. 3: Lagerdichte von Silomais (HONIG und ROHR, 1985)	23
Tab. 4: Trockensubstanzgehalte und Strukturanalyse von drei Maissilagen (Angaben in %) (modifiziert nach SCHWARZ und KIRCHGESSNER, 1982)	31
Tab. 5: Einfluss von theoretischer Häcksellänge, Trockenmassegehalt und Aufbereitungsgrad auf die mittlere Häcksellängenverteilung (modifiziert nach SCHWARZ et al., 1997)	32
Tab. 6: Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Penn State Particle Separator (modifiziert nach JOHNSON et al., 2002a)	33
Tab. 7: Schüttdichten verschiedener Pflanzenteile von Mais in Abhängigkeit von TM- Gehalt und Häcksellänge (modifiziert nach KROMER, 1993)	42
Tab. 8: Sorteneigenschaften und Varianten im Erntejahr 2003	49
Tab. 9: Sorteneigenschaften und Varianten im Erntejahr 2004	51
Tab. 10: Massenanteile der Körner an getrocknetem Häckselgut ( $\bar{x} \pm s$ )	60
Tab. 11: Trockenmassegehalte der Varianten (Mikrowellentrocknung) im Erntejahr 2003 ( $\bar{x}$ )	65
Tab. 12: Lagerungsdichte von Maishäckselgut (Flachsilos) im Erntejahr 2003	72
Tab. 13: Vergleich von Energiegehalten und DLG-Punkteverteilung der Maissilagen in den verschiedenen Siloformen im Erntejahr 2003	80
Tab. 14: Gärparameter (Siliergläser) im Erntejahr 2003	83
Tab. 15: Trockenmassegehalte der Varianten (Mikrowellentrocknung) im Erntejahr 2004	84
Tab. 16: Dichteprofil von Maishäckselgut in den Schlauchsilos (Bohrstockmessung) im Erntejahr 2004	93
Tab. 17: Dichte von Maishäckselgut in den Schlauchsilos in Abhängigkeit von der Messmethode im Erntejahr 2004	94
Tab. 18: Vergleich von Energiegehalten und DLG-Punkteverteilung der Maissilagen in verschiedenen Siloformen im Erntejahr 2004	101
Tab. 19: PH-Wert, aerobe Stabilität und Gärverluste (Siliergläser) im Erntejahr 2004	103
Tab. 20: Gärverluste (Schlauchsilos) im Erntejahr 2004	104

Tab. 21:	Spannweiten verdichtungsrelevanter Parameter im Erntejahr 2003	106
Tab. 22:	Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf den Massenanteil von Partikeln > 25 mm (Erntejahr 2003)	109
Tab. 23:	Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf den Massenanteil von Partikeln > 25 mm (Erntejahr 2004)	110
Tab. 24:	Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf die erzielten Dichten in Kleinsilos und im Labormaßstab (Erntejahr 2003)	111
Tab. 25:	Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf die erzielten Dichten im Labormaßstab (Erntejahr 2004)	114
Tab. 26:	Übertragbarkeit der Verdichtung im Labormaßstab (Materialprüfmaschine) auf die Dichten im Flachsilos (Erntejahr 2003)	117
Tab. 27:	Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf die erzielten Dichten in den Schlauchsilos und die Maximaltemperaturen an der Anschnittfläche (Erntejahr 2004)	118
Tab. 28:	Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf die erzielten Dichten in den Schlauchsilos und die Maximaltemperaturen an der Anschnittfläche (Erntejahr 2004)	123
Tab. A 1:	Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Verdichtungs- und Silierversuche (Erntejahr 2003)	140
Tab. A 2:	Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Schlauchsilos (Erntejahr 2003)	140
Tab. A 3:	Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Flachsilos (Erntejahr 2003)	141
Tab. A 4:	Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Verdichtungs- und Silierversuche (Erntejahr 2004)	141
Tab. A 5:	Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Schlauchsilos (Erntejahr 2004)	142
Tab. A 6:	Massenanteile von erntefrischem Häckselgut in den verschiedenen Größenklassen (Erntejahr 2003) ( $\bar{x} \pm s$ )	143
Tab. A 7:	Massenanteile von getrocknetem Häckselgut in den verschiedenen Größenklassen des Siebturms (Erntejahr 2003) ( $\bar{x} \pm s$ )	144
Tab. A 8:	Massenanteile von erntefrischem Häckselgut in den verschiedenen Größenklassen der Schüttelbox (Erntejahr 2004) ( $\bar{x} \pm s$ )	144
Tab. A 9:	Massenanteile von getrocknetem Häckselgut in den verschiedenen Größenklassen des Siebturms (Erntejahr 2004) ( $\bar{x} \pm s$ )	145
Tab. A 10:	Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,45 MPa und nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2003 ( $\bar{x} \pm s$ )	145

Tab. A 11:	Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,45 MPa und nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )	146
Tab. A 12:	Dichte von Maishäckselgut bei einer Dreifachverdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )	146
Tab. A 13:	Dichte von Maishäckselgut nach einer Dreifachverdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (Materialprüfmaschine) und 1 min Rückfederung im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )	147
Tab. A 14:	Dichte von Maishäckselgut nach Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) im Erntejahr 2003 ( $\bar{x} \pm s$ )	147
Tab. A 15:	Dichte von Maishäckselgut nach Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) und einer min Rückfederung im Erntejahr 2003 ( $\bar{x} \pm s$ )	148
Tab. A 16:	Dichte von Maishäckselgut nach Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )	148
Tab. A 17:	Dichte von Maishäckselgut nach Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) und einer min Rückfederung im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )	149
Tab. A 18:	Zielwerte für die Inhaltsstoffe von Maissilage (modifiziert nach HERTWIG, 2004)	149
Tab. A 19:	Analyseergebnisse von siliertem Material aus den Siliergläsern (Erntejahr 2003) ( $\bar{x} \pm s$ )	150
Tab. A 20:	Analyseergebnisse von siliertem Material aus den 220 l-Behältern (Erntejahr 2003)	151
Tab. A 21:	Analyseergebnisse von siliertem Material aus den Schlauchsilos (Erntejahr 2003)	151
Tab. A 22:	Analyseergebnisse von siliertem Material aus den Flachsilos (Erntejahr 2003)	152
Tab. A 23:	Analyseergebnisse von siliertem Material aus den Siliergläsern (Erntejahr 2004) ( $\bar{x} \pm s$ )	153
Tab. A 24:	Analyseergebnisse von siliertem Material aus dem Schlauchsilos der Variante B HL 5,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )	154
Tab. A 25:	Analyseergebnisse von siliertem Material aus dem Schlauchsilos der Variante B HL 5,0 HS (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )	155
Tab. A 26:	Analyseergebnisse von siliertem Material aus dem Schlauchsilos der Variante C HL 5,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )	156
Tab. A 27:	Analyseergebnisse von silierten Material aus dem Schlauchsilos der Variante C HL 21,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )	157

Tab. A 28:	Analyseergebnisse von silierten Material aus dem Schlauchsilo der Variante D HL 5,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )	158
Tab. A 29:	Analyseergebnisse von siliertem Material aus dem Schlauchsilo der Variante D HL 21,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )	159

## Abbildungsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Abb. 1:     Prinzipieller Aufbau eines selbstfahrenden Häckslers (HAFFERT, 2003)	5
Abb. 2:     Schematische Darstellung der Siebung mit dem Penn State Particle Separator (KONONOFF, 2002)	25
Abb. 3:     Plansiebmaschine zur Schnellbestimmung der Häcksellängenverteilung (KROMER, 1993)	26
Abb. 4:     Schematische Darstellung der Bestimmung von Überlängenanteilen im Silomais mit Trogschnecken (SCHURIG et al., 1996)	27
Abb. 5:     Schematischer Aufbau eines Bildanalyseystems (nach KÖDITZ und HILLJE, 1987), zitiert aus GUTH, 1995	30
Abb. 6:     Gemessene Dichten in Abhängigkeit von Trockenmassegehalt und Walzfahrzeug (modifiziert nach SPIEKERS et al., 2004)	35
Abb. 7:     Verlauf des Relaxationsdruckes $p(t)$ (oben) und der Nachverdichtungsdichte $\rho(t)$ (unten) über der Zeit für jeweils fünf wiederholte Relaxations- bzw. Nachverdichtungsversuche (WOLF-REGETT, 1988)	37
Abb. 8:     Volumenfaktoren ( $f_v=V/V_0$ ) bei Verdichtung unterschiedlicher Laubarten mit unterschiedlichen Wasseranteilen (U) (SCHEUFLER und MEHRKENS, 1981)	40
Abb. 9:     Einfluss der Häcksellänge auf die Trockenmassedichte (modifiziert nach DERNEDDE und HONIG, 1977)	43
Abb. 10:    Temperaturen in 60 Maissilos (SPIEKERS et al., 2004)	44
Abb. 11:    Versuchsaufbau im Erntejahr 2003	48
Abb. 12:    Versuchsaufbau im Erntejahr 2004	50
Abb. 13:    Materialprüfmaschine	53
Abb. 14:    Versuchsaufbau zur standardisierten Verdichtbarkeitsmessung in Kleinsilos	55
Abb. 15:    Größenklassenverteilung von erntefeuchtem Häckselgut im Erntejahr 2003	61
Abb. 16:    Größenklassenverteilung von getrocknetem Häckselgut im Erntejahr 2003	62
Abb. 17:    Dichte von Maishäckselgut in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bei einem Verdichtungsdruck von 0,2 MPa	63
Abb. 18:    Dichte von Maishäckselgut in Abhängigkeit von der Dauer der Rückfederung	64
Abb. 19:    Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,45 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2003	68

Abb. 20:	Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,2 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (220 l-Behälter) im Erntejahr 2003	69
Abb. 21:	Steigerung der Dichte von Maishäckselgut nach einer Minute Rückfederung durch Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) im Erntejahr 2003	70
Abb. 22:	Dichte von Maishäckselgut (Schlauchsilos) im Erntejahr 2003	71
Abb. 23:	Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte A) nach Siloöffnung am 08.04.04 (Erntejahr 2003)	73
Abb. 24:	Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte B) nach Siloöffnung am 08.04.04 (Erntejahr 2003)	74
Abb. 25:	Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte A) nach Siloöffnung am 08.04.04 (Erntejahr 2003)	75
Abb. 26:	Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte B) nach Siloöffnung am 08.04.04 (Erntejahr 2003)	77
Abb. 27:	Temperaturverlauf im Kern der Flachsilos (Sorte A) nach Siloöffnung am 13.02.04 (Erntejahr 2003)	78
Abb. 28:	Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Flachsilos (Sorte A) nach Siloöffnung am 13.02.04 (Erntejahr 2003)	79
Abb. 29:	Größenklassenverteilung von erntefeuchtem Häckselgut (Schüttelbox) im Erntejahr 2004	86
Abb. 30:	Größenklassenverteilung von getrocknetem Häckselgut (Siebturm) im Erntejahr 2004	87
Abb. 31:	Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,45 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2004	88
Abb. 32:	Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei Dreifachverdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2004	90
Abb. 33:	Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei Fünffachschichtung und Verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (220 l-Behälter) im Erntejahr 2004	91
Abb. 34:	Steigerung der Dichte nach Rückfederung von Maishäckselgut bei Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) im Erntejahr 2004	92
Abb. 35:	Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte B) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)	95
Abb. 36:	Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte C) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)	96
Abb. 37:	Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte D) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)	97

Abb. 38:	Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte B) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)	98
Abb. 39:	Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte C) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)	99
Abb. 40:	Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte D) im Erntejahr 2004	100

## Abkürzungsverzeichnis

ADF	Acid detergent fibre
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
ECM	Energiekorrigierte Milch
FM	Frischmasse
$f_v$	Volumenfaktor
g	Gramm
HL	Häcksellänge
HS	Hochschnitt
kg	Kilogramm
$l_{th}$	Theoretische Häcksellänge
m	Meter
MJ	Megajoule
MPa	Megapascal
MS	Milchsäure
N	Newton
NDF	Neutral detergent fibre
NEL	Nettoenergielaktation
Pa	Pascal
s	Standardabweichung
SW	Spaltweite
TM	Trockenmasse
TMR	Totale Mischraktion
U	Wasseranteil
V	Volumen
$V_0$	Ausgangsvolumen
VDLUFA	Verein Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
$\bar{x}$	Mittelwert (arithmetisches Mittel)
XF	Rohfaser

## Berechnung verwendeter Druckeinheiten

1 MPa

1.000.000 Pa

1.000.000 N/m<sup>2</sup>

1.000.000 kg/(m · s<sup>2</sup>)

100.000 kg/m<sup>2</sup>

10 kg/cm<sup>2</sup>

10 bar



## **1 Einleitung**

Aufgrund der aktuellen agrarpolitischen Entwicklungen und des geplanten Wegfalls der Milchquoten geraten die Milcherzeuger aus betriebswirtschaftlicher Sicht zunehmend unter Druck. Aus Milch- und Tierverkäufen resultiert eine Leistung von durchschnittlich 0,39 Euro/kg ECM (DLG, 2005). Dem stehen Direktkosten in Höhe von 0,24 Euro/kg ECM gegenüber. Da ein langfristig rückläufiger Trend der Milchauszahlungspreise absehbar ist (RICHARDS, 2005), muss eine Kostensenkung angestrebt werden.

Bei den Direktkosten fallen insbesondere die Futterkosten mit einem Anteil von nahezu 80 % ins Gewicht. Der Anteil der Kraftfutterkosten liegt über 30 %. Eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit kann durch eine Reduktion des Kraftfutterzukaufes erreicht werden (GUTH, 1995). Fraglich ist, wie die entsprechende Energiekonzentration in einer Futterration für Hochleistungskühe mit reduziertem Kraftfutteraufwand gewährleistet werden kann. Sollen Aspekte der Kostensenkung im Vordergrund stehen, muss der Versuch unternommen werden, die Energieaufnahme aus Grundfutter zu steigern.

Eine Möglichkeit, die Energieaufnahme aus dem Grundfutter zu steigern, ist eine Erhöhung der Energiekonzentration in der Ration. Diese ist durch eine Steigerung des Maissilageanteils mit einem Energiegehalt von mindestens 6,5 MJ NEL (HERTWIG, 2004) zu Lasten des Grassilageanteils mit etwa 5,8 bis 6,2 MJ NEL theoretisch möglich. Hierzu muss allerdings gewährleistet werden, dass die gesteigerten Maissilageanteile die Pansenphysiologie nicht negativ beeinflussen.

Aus ernährungsphysiologischer Sicht ist eine Steigerung der Häcksellänge von Maissilage verstärkt Gegenstand der Diskussion geworden. Diese Häcksellängensteigerung führt möglicherweise zu pansenphysiologischen Vorteilen und kann eine Steigerung des Maissilageanteils und somit des Energiegehaltes in der Ration ermöglichen.

Unterstützt wird die Diskussion über die richtige Häcksellänge von Maissilage auch durch die steigende Nachfrage nach Maissilage als Koferment für Biogasanlagen.

## **1.1 Problemstellung**

Die Voraussetzung für Leistungen von 10.000 kg Milch und mehr ist unter anderem eine hervorragende Futterqualität mit hohem Energiegehalt. Neben züchterischen und pflanzenbaulichen Maßnahmen ist eine Konservierungstechnik erforderlich, die das ganze Jahr über die Vorlage eines energiereichen und stabilen Grundfutters ermöglicht. Bezüglich der Konservierungstechnik besteht in der Praxis jedoch erhöhter Handlungsbedarf. Nacherwärmung von Maissilage und damit verbundene Verluste von Energie, Schmackhaftigkeit und Belastung mit Mykotoxinen stellen nach wie vor erhebliche Probleme dar. Eine entscheidende Maßnahme zur Vermeidung von Nacherwärmung ist eine ausreichende Verdichtung des Häckselgutes im Silo. Aufgrund der steigenden Leistung von Feldhäckslern und damit verbundenen Durchsatzleistungen von über 200 t Frischmasse pro Stunde wird die Walzarbeit jedoch mehr denn je zur Schwachstelle der Häckselkette. Nach dem Entladen des Materials ist zunächst ein aufwendiges Verteilen des Häckselgutes im Silo erforderlich. Ziel ist eine gleichmäßige Schichtdicke als Voraussetzung für eine gleichmäßige Verdichtung. In Abhängigkeit von der Silogeometrie sind nach der Durchführung dieser Maßnahme nur noch wenige Überfahrten durch das Walzfahrzeug möglich, bis die nächste Transporteinheit das Silo erreicht und die nächste Schicht entsteht.

Eine Häcksellängensteigerung erschwert den Verdichtungsprozess zusätzlich. Fraglich ist, ob gesteigerte Häcksellängen eine ausreichende Verdichtung des Futterstocks zulassen und ob die Qualität des erzeugten Futters den Ansprüchen von Hochleistungstieren genügen kann. Des Weiteren muss der Versuch unternommen werden, die Siliereigenschaften durch Maßnahmen wie Sortenwahl (z.B. Sorten mit „greening-effect“) und Einstellung der Aufbereitungsorgane (Spaltweite des „Corn Crackers“) positiv zu beeinflussen.

## 1.2 Zielsetzung

Übergeordnetes Ziel der Untersuchung ist es daher, die Auswirkung einer gesteigerten Häcksellänge auf den gesamten Silierprozess zu untersuchen. Im Rahmen der Untersuchung sollen auch eventuelle Vorteile durch Einsatz von „stay-green“-Sorten und unterschiedliche Aufbereitungsgrade miteinbezogen werden.

Folgende Fragen sollen durch experimentelle Bearbeitung beantwortet werden:

- Wie stark beeinflusst die theoretische Häcksellänge die effektive Häcksellänge?
- Welche zusätzliche Wirkung hat die Aufbereitung auf die effektive Häcksellänge?
- Wie beeinflusst die theoretische Häcksellänge die Verdichtbarkeit des Häckselgutes?
- Wie lässt sich die Verdichtbarkeit durch die Aufbereitereinstellung steigern?
- Welchen zusätzlichen Nutzen bringen Variationen der Verdichtungstechnik (Anzahl der Verdichtungs Vorgänge, Steigerung des Verdichtungsdruckes, schichtweise Verdichtung)?
- Welchen Einfluss haben Häcksellänge und Lagerungsdichte auf das Nacherwärmungsrisiko?
- Welche Unterschiede ergeben sich bei Verwendung unterschiedlicher Siloformen?

## **2 Kenntnisstand**

Maisbetonte Mischrationen sind grasbetonten in vielerlei Hinsicht überlegen. Ein Vergleich der Energiekonzentrationen von Gras- und Maissilagen verdeutlicht die mit angestrebten 6,5 MJ NEL/kg TM (HERTWIG, 2004) deutlich höheren Konzentrationen im Mais im Vergleich zu Grassilagen mit etwa 5,8 bis 6,2 MJ NEL/kg TM. Ein weiterer Vorteil der Maissilage besteht in der Verbesserung der energetischen Stärkenutzung durch geringere ruminale Abbaubarkeit von Maisstärke im Vergleich zu Stärke aus anderen Getreidearten (LANGENHOFF, 2002). Folge ist ein erhöhtes Stärkeangebot im Dünndarm, wo sie bis zu einer gewissen Menge energetisch effizienter genutzt werden kann (MATTHÉ, 2001). Hintergrund sind die geringeren Stoffwechselverluste durch die Pansenmikroben (WEISS, 2003).

Somit stellt eine Erhöhung der Maissilageanteile in der Ration eine effektive Maßnahme zur Steigerung der Energiekonzentrationen im Grundfutter dar.

### **2.1 Einfluss der Rationsgestaltung auf die Pansenphysiologie**

Der Rationsgestaltung sind aus pansenphysiologischen Gründen Grenzen gesetzt. Hintergrund ist die Gewährleistung eines stabilen pH-Wertes in der Vormagenflüssigkeit von 5,5 bis 7,0. Eine effektive Pufferung durch den Speichel bleibt aus, wenn das kohlenhydratreiche Futter strukturarm ist und dadurch das Wiederkauen vermindert und die Speichelproduktion reduziert werden (ENGELHARDT et al., 2000). Folge ist die Pansenacidose und daraus resultierende Leistungseinbußen. Die Kauaktivität wird unter anderem durch Rohfasergehalt und Partikelgröße beeinflusst (JEROCH et al., 1999). LAMMERS et al. (1996) betonten besonders die Relevanz der Partikellänge im Hinblick auf die Funktionalität des Pansens. Die aus reduzierter Partikellänge resultierende geringere Kauzeit führt zu einem Abfall des Pansen pH-Wertes. Folge ist eine Verschiebung des Essig-/Propionsäure-Verhältnisses im Pansen zu Gunsten der Propionsäure und eine Verringerung der Milchfettgehalte.

## 2.2 Allgemeiner Aufbau des Feldhäckslers

Um den Einfluss der Häckslereinstellungen auf die Partikeleigenschaften nachvollziehbar zu machen, sollen im Folgenden der Aufbau des Feldhäckslers sowie die Schneid- und Aufbereitungsvorgänge beschrieben werden (Abb. 1).

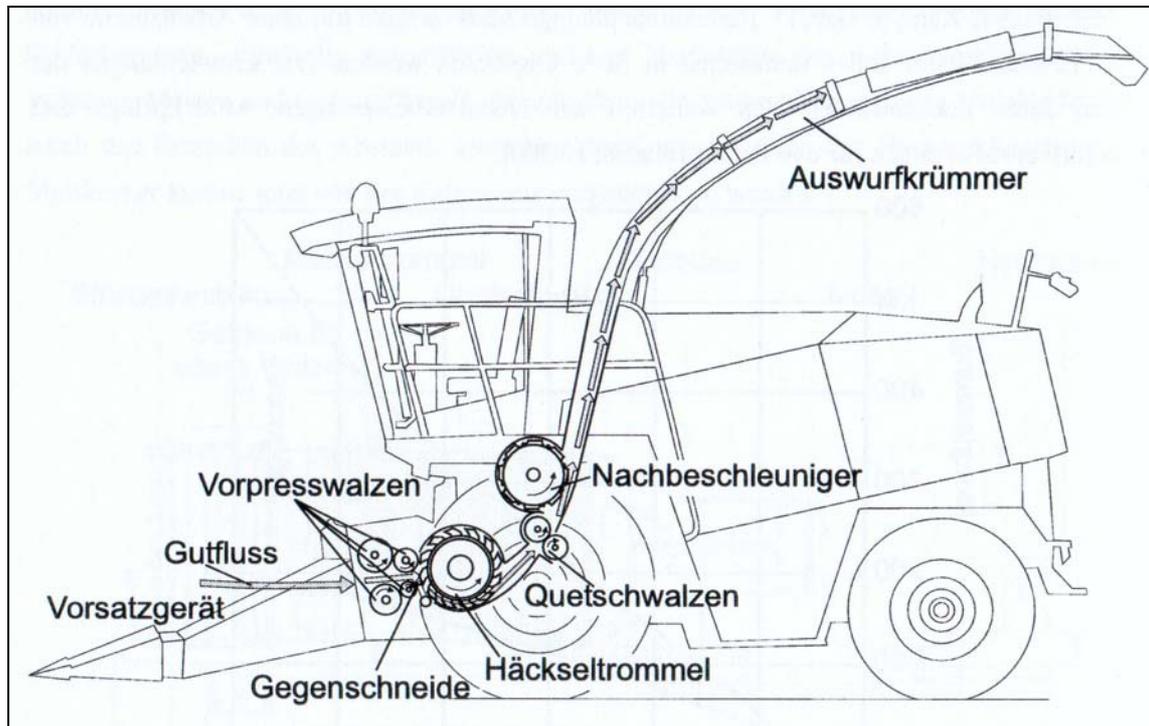


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau eines selbstfahrenden Häckslers (HAFFERT, 2003)

Durch das Vorsatzgerät des Feldhäckslers wird der Mais aufgenommen und den Vorpresswalzen zugeführt. Die Vorpresswalzen bündeln und komprimieren die Pflanzenteile, um den Schneidvorgang mit Hilfe der Messer der Häckseltrommel zu optimieren. Zum Schneiden wird das zu zerkleinernde Gut über die Gegenschneide hinausgeschoben und von der sich drehenden Messertrommel erfasst. Bei den Messertrommeln sind V-förmig angeordnete Messer besonders verbreitet. Diese Anordnung führt zu einem „ziehenden Schnitt“ (HAFFERT, 2003) sowie zu einem erneuten Bündeln des Häckselgutes vor dem Zuführen zu den nachfolgenden Aufbereitungsorganen. In Abhängigkeit von der Drehzahl der Vorpresswalzen wird die Häcksellänge beeinflusst. Die Drehzahl wird über Getriebe eingestellt, die teils in Abstufungen, teils auch stufenlos regelbar sind. Nach dem Schneiden und dem Passieren

der Messertrommel wird das Häckselgut zu den Quetschwalzen befördert. In diesen Quetschwalzen wird das Häckselgut gequetscht und durch die Differenzdrehzahl (unterschiedliche Drehzahl der Walzen) zusätzlich zerrieben. Der Abstand der Quetschwalzen liegt bei 1 bis 2 mm. Soll die Wirkung der Quetschwalzen bei anderen Gutarten, wie beispielsweise Gras, ausgeschaltet werden, wird der Abstand in der Regel auf 25 mm gesteigert. Folglich ist bei diesem Abstand von keiner zerkleinernden Wirkung mehr auszugehen.

Ziel des Quetschwalzen- oder Aufbereitereinsatzes ist das Zerkleinern der Maiskörner. Die Relevanz dieses Zerkleinerungsvorganges soll im nachfolgenden Kapitel 2.3.1 erläutert werden.

Nach der Körnerzerkleinerung wird die Geschwindigkeit des Häckselgutes im Nachbeschleuniger erhöht, um ein möglichst verlustarmes Überladen auf das Transportfahrzeug zu ermöglichen.

## **2.3 Einfluss untersuchungsrelevanter Parameter auf die Pansenphysiologie**

### **2.3.1 Einfluss des Zerkleinerungsgrades auf die Pansenphysiologie**

Bereits Ende der sechziger Jahre wurden erste Untersuchungen durchgeführt, die sich intensiv mit dem Zerkleinerungsgrad von Maissilage beschäftigten (BUCK et al., 1969; MILLER et al., 1969). Ergebnisse weiterer Untersuchungen zeigten zum einen die positive Auswirkung der intensiven Zerkleinerung von Maissilage auf die Verdaulichkeit von N-freien Extraktstoffen und Stärke, nicht zuletzt wegen der verbesserten Aufbereitung der Körner (SCHWARZ und KIRCHGESSNER, 1982; ROHR et al. 1983). Zum anderen ging daraus jedoch deutlich die negative Auswirkung auf die Verdaulichkeit der Rohfaser und pflanzlichen Gerüstsubstanzen hervor (SCHWARZ et al. 1988a; HEIMBECK et al., 1988). In neueren Untersuchungen steht nicht mehr der Rohfasergehalt im Mittelpunkt des Interesses, sondern neuere Systeme zur Bewertung der Futterstruktur (JUNCK et al., 2005). In diesen Untersuchungen wird unter Einbeziehung strukturbestimmender Parameter (XF bzw. NDF) eine Strukturbewertung vorgenommen (HOFFMANN, 1990; DE BRABANDER et. al., 1999; MERTENS, 2000; LAMMERS, 1996). Allerdings existieren eine Reihe verschiedener Ansätze zur Bestimmung der Strukturwirksamkeit.

HOFFMANN (2005) bezeichnet einen „trockenen und in Wasser weitestgehend beständigen Futterpartikel“ von mindestens 5 bis 8 mm Länge als „strukturwirksam“.

Dabei gelten 5 mm für kleine Wiederkäuer und 8 mm für Rinder. Daraus wurde abgeleitet, dass die Rohfaser in Grobfuttermitteln, deren physikalische Form durch Mahlen, Pelletieren und andere extreme Zerkleinerungsformen nicht verändert wurde, als strukturwirksam eingestuft werden kann. Nach HOFFMANN (1990) ergibt sich der Gehalt an strukturwirksamer Rohfaser der Einzelfuttermittel aus dem analytisch ermittelten Rohfasergehalt multipliziert mit dem Strukturfaktor  $f$ . Dieser wird für Gras- und Leguminosensilagen, Maissilagen, gehäckseltes Trockengrünfutter, Heu und gehäckseltes Stroh mit 1 beziffert. Zur Bewertung von Mischrationen ist neben der Menge an aufgenommener strukturwirksamer Rohfaser je Tier und Tag die Partikelgrößenverteilung auf der Grundlage einer standardisierten Siebanalyse der lufttrockenen Substanz durchzuführen. Diese soll in der Fraktion  $<8$  mm maximal 50 % und  $>20$  mm um 10 % betragen.

Gegenstand der Untersuchungen von DE BRABANDER et al. (1999) ist der „Strukturwert“, eine dimensionslose Zahl, die über Fress-, Kau- und Wiederkaudauer sowie Beobachtung von Strukturmangelerscheinungen (Rückgang von Milchfettgehalt, Futteraufnahme und Milchleistung) ermittelt wird. Die Arbeitsgruppe führte Untersuchungen zur Auswirkung der Häcksellänge von Maissilage auf die oben genannten Parameter durch (DE BOEVER et al., 1993). Sie untersuchten 14 verschiedene Maissilagen mit unterschiedlichen Häcksellängen (4 bis 16 mm) und Abreifegraden (Milchreife bis CCM-Reife). Die Silagen wurden „ad libitum“ gefüttert, den Rationen wurden jeweils 2 kg Sojaextraktionsschrot zugelegt. Neben Fress-, Kau- und Wiederkauzeiten wurden die Gehalte von Rohfaser, ADF (acid detergent fibre) und NDF (neutral detergent fibre) ermittelt. Des Weiteren wurde das Material durch Siebanalyse in getrocknetem Zustand in vier Größenklassen (9,51; 4,76; 3,35 und 2,38 mm) eingeteilt. Die Ergebnisse der Untersuchung bestätigten den Zusammenhang zwischen einer Steigerung der Häcksellänge von 4-8 mm auf 14 mm bei Maissilage in der Milchreife und einer erhöhten Kauaktivität, also einer positiven Auswirkung auf die Pansenphysiologie. Steigende Gehalte von Zellwandbestandteilen (ADF, NDF und Rohfaser) hatten ebenfalls einen positiven Effekt auf Kau- und Wiederkauaktivität. Neuere Untersuchungen stellen diese Ergebnisse in Frage. KRAUSE und COMBS (2003) führten einen Versuch an Milchkühen in einem  $2 \times 2 \times 2$ -Design durch. Der Ausdruck „ $2 \times 2 \times 2$ -Design“ bedeutet in diesem Fall, dass die Arbeitsgruppe zwei verschiedene Häcksellängen (mittlere Länge 5,6 und 2,8 mm), zwei Trockensubstanzgehalte im Korn (89,7 und 73,1 %) und zwei

verschiedene Rationen (ausschließlich Luzerne und eine Mischration aus Luzerne und Mais mit einem Mischungsverhältnis von 50:50) untersuchte. Sie stellten eine verringerte Trockensubstanzaufnahme mit verringerten Häcksellängen fest. Auch eine steigende Rohfaserkonzentration verringerte die Futteraufnahme und führte zu geringeren Proteingehalten in der Milch. Die Verdaulichkeit der organischen Substanz sank mit verringerter Häcksellänge. Die Reduktion der Häcksellänge wirkte sich tendenziell positiv auf die Milchleistung der Tiere aus, allerdings mit geringfügig reduzierten Milchfettgehalten. Die Fresszeiten bei der grob gehäckselten Silage (4,6 h/d) überstiegen die Fresszeiten bei der fein gehäckselten Silage (3,4 h/d). Auch die Kauzeiten wurden durch eine verringerte Partikellänge reduziert. Bezüglich der Pansenphysiologie konnte die Arbeitsgruppe in ihrer Untersuchung jedoch keinen Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Pansen-pH-Wert feststellen.

COOKE und BERNARD (2005) bezogen neben der theoretischen Häcksellänge auch die Einstellung des Corn Crackers in ihre Untersuchung ein. In dieser Untersuchung wurde Mais in den Häcksellängen 19 und 25,4 mm jeweils mit Spaltweiten von 2 und 8 mm gehäckselt. Als Kontrollvariante wurde der Mais zusätzlich auf eine Länge von 19 mm ohne Corn Cracker gehäckselt. Während die Trockensubstanzaufnahme nicht durch die verschiedenen Varianten beeinflusst wurde, wirkten sich unterschiedliche Häcksellängen und Corn Cracker-Einstellungen besonders auf die Verdaulichkeiten aus. Die Verdaulichkeit der Trockenmasse und die ADF-Verdaulichkeit lagen bei der größeren Häcksellänge über dem Niveau der kürzeren Häcksellänge. Die Ausnahme stellte die 25,4 mm-Variante dar, die mit einer Spaltweite des Corn Crackers von 8 mm gehäckselt wurde. Für diese Variante ergaben sich die geringsten Verdaulichkeiten von Trockensubstanz, Rohprotein und ADF. Auch in Bezug auf die anderen Varianten wurde der Einfluss der Corn Cracker-Einstellung deutlich. Die (Roh-) Faserverdaulichkeit war ohne Corn Cracker geringer als bei den 2 mm und 8 mm Einstellungen. Die Stärkeverdaulichkeit stieg mit geringerer Spaltweite. Auch bezüglich der Leistung der Tiere konnte eine Wechselwirkung zwischen Theoretischer Häcksellänge und Corn Cracker festgestellt werden. Sowohl die Milchleistung als auch Milchfett- und Milchproteingehalt sowie energiekorrigierte Milchleistung lagen bei der 25,4 mm Variante mit 2 mm Spaltweite auf dem höchsten Niveau. Mit einer Spaltweite von 8 mm lag diese Variante auf dem niedrigsten Niveau. Bei der 19,5 mm-Variante war kein Einfluss des Corn Crackers auf die Leistung feststellbar.

MAHLKOW-NERGE et al. (2005) führten einen Versuch durch, in dem an zwei Gruppen von Milchkühen Maissilagen mit 7 bzw. 22 mm theoretischer Häcksellänge in stark maissilagebetonten Rationen verfüttert wurden. In dieser Untersuchung konnte kein positiver Einfluss der längeren Häcksellänge auf die Futteraufnahme festgestellt werden. Sowohl bei der Milchmenge und den Milchinhaltsstoffen Fett, Eiweiß, Harnstoff, Laktose, Zellzahl und Azeton als auch bei den Gewichten und den Körperkonditionen der Tiere waren keine offensichtlich positiven Effekte der längeren Häcksellänge erkennbar. Die Auswertung der täglichen Milchmenge ergab für die Tiere der Gruppe 1 (kurze Häcksellänge) eine durchschnittliche Leistung von 36,4 kg, für die Tiere der Gruppe 2 (lange Häcksellänge) eine Milchmenge von 34,8 kg je Tier und Tag. Mit dem Ziel, Aussagen über Stoffwechselfparameter zu treffen, wurden den Tieren Blut- und Harnproben entnommen. Weder bezüglich des Säure-Basen-Haushaltes noch hinsichtlich des Kohlenhydrat-Fett-Energiestoffwechsels konnten Unterschiede zwischen den Gruppen festgestellt werden.

Aufgrund dieser verschiedenen, sich teilweise widersprechenden Ergebnisse, konnte bisher noch keine eindeutige Antwort auf die Frage gefunden werden, ob eine Steigerung der Häcksellänge bei Silomais tatsächlich erhöhte Maissilageanteile in der Ration erlaubt.

### **2.3.2 Einfluss der Maissorte auf die Pansenphysiologie**

Eine weitere Möglichkeit, die Pansenphysiologie zu beeinflussen, besteht möglicherweise in der Variation der Maissorte. Mit fortschreitender Abreife werden die Assimilationsprodukte der Maispflanze zunehmend in Form von Stärke in den Kolben eingelagert. Folglich nimmt der Rohfaseranteil im Kolben relativ ab, während der Energiegehalt durch die Stärkeeinlagerung relativ zunimmt (PHIPPS, 1996). FLACHOWSKY (1994) stellte in Versuchen mit fistulierten Kühen und *in-sacco*-Messungen des Weiteren eine Veränderung des Kornaufbaus und der Stärke fest. Die Stärke in gut ausgereiftem Mais übersteht die Pansenverdauung zum Teil, gelangt in den Dünndarm und steht dort der energetisch günstigeren enzymatischen Verdauung zur Verfügung (OWENS et al., 1986). Mit späterem Erntezeitpunkt steigt jedoch auch der Gehalt an NDF, ADF und Lignin, gepaart mit einer verringerten TM-, ADF- und NDF-Abbaubarkeit (FLACHOWSKY et al., 1993). Ein weiterer wichtiger Parameter für den Futterwert von Maissilagen ist die Verdaulichkeit. Sowohl die Anteile der einzelnen

Pflanzenfraktionen als auch deren chemische Zusammensetzung bleiben während der Wachstumsperiode nicht konstant. Folglich ist davon auszugehen, dass Unterschiede in der Verdaulichkeit der verschiedenen Silomaisorten bestehen (SCHLAGHECK et al., 2000). Dieser Frage wurde bereits in verschiedenen Arbeitsgruppen nachgegangen. LANGENHOFF et al. (2002) untersuchten die Verdaulichkeit zweier verschiedener Maishybriden (A und B) an wachsenden Bullen. Sie stellten unterschiedliche Stärke- und Fasergehalte in den Maissorten fest, was zu unterschiedlichen Leistungen der Tiere führte. Für die Sorte A ergab sich ein Stärkegehalt von 37,4 %, während der Wert bei der Sorte B mit 31,9 % deutlich geringer war. Die NDF-Gehalte lagen bei 40,1 bzw. 48,1 %. Infolgedessen zeigten die Bullen, die die Maishybride A vorgelegt bekamen, signifikant höhere Tageszunahmen, als die Tiere, die die Sorte B erhielten. In einem weiterführenden Versuch wurde neben der *in sacco*-Verdaulichkeit die ruminale und die Gesamtverdaulichkeit von Trockensubstanz, NDF und Stärke an Milchkühen untersucht. Die *in sacco*-Verdaulichkeit wurde nach der „Nylon bag Methode“ an 2 fistulierten Kühen über eine Inkubationszeit von 24 Stunden ermittelt. Bei der Nylon bag Methode wird eine zu untersuchende Futtermenge in einen Beutel eingewogen und durch die Pansenfistel in den Pansen gehängt. Nach 24 bis 72 Stunden werden die Beutel entnommen und der verbliebene Rest auf seine Inhaltsstoffe analysiert. Ziel ist die Messung der Abbaubarkeit des untersuchten Futtermittels (JEROCH et al., 1999). Die Untersuchung der ruminale Verdaulichkeit erfolgte an vier fistulierten Tieren und wurde als Differenz aus Nährstoffaufnahme und Anflutung am Duodenum errechnet. Die Feststellung der Gesamtverdaulichkeit erfolgte mit Hilfe der Verdaulichkeitsmessung am kleinen Wiederkäuer („Hammeltest“). Die kalkulierte metabolische Energie ergab nur geringe Unterschiede zwischen den Maissorten (10,8 und 10,7 MJ ME/kg TM für Sorte A und B). Die *in sacco*-Abbaubarkeit von Trockensubstanz und NDF bei der Sorte A überstieg die Werte der Sorte B signifikant. Bei der ruminale Verdaulichkeit zeigte sich ebenfalls für die Sorte A ein tendenziell höherer Abbau von Organischer Substanz, NDF und Stärke. Bezüglich der Gesamtverdaulichkeit lag die NDF-Verdaulichkeit der Sorte B mit 64,4 % signifikant über der Sorte A (58,1 %).

Wie diese Untersuchung zeigt, bestehen Unterschiede in der Verdaulichkeit der verschiedenen Sorten und der daraus resultierenden Leistung. HÖNER et al. (2002) führten eine ähnliche Untersuchung durch, in der zunächst die Körner 26 verschiedener Maissorten auf ihre *in sacco*-Abbaubarkeit untersucht wurden. Aus den beiden Sorten mit der höchsten Abbaubarkeit und den beiden Sorten mit der geringsten Abbaubarkeit wurden

Silagen erstellt. Sowohl die Inhaltsstoffe der Silagen als auch die *in sacco*-Abbaubarkeit am fistulierten Tier wurden untersucht. Des Weiteren wurden Pansenparameter, Nährstoffflüsse am Duodenum sowie Mikrobenprotein an Tieren mit Pansen- und Duodenalkanülen untersucht. Mit Ausnahme der Sorte A, die mit 82 % die höchste *in sacco*-Abbaubarkeit für die Trockenmasse aufwies, ergaben sich für die anderen Sorten mit 71 bis 73 % geringfügige Unterschiede. Bezüglich der Abbaubarkeit von NDF lagen die Sorten A und D (53 und 51 %) deutlich über den anderen (45 und 46 %). Bei der Verdaulichkeitsmessung am Tier wurden für die Sorte B die höchsten Werte ermittelt.

Mit der Züchtung sogenannter „stay-green“-Sorten wurde der Versuch unternommen, die hohe Stärkeausbeute einer komplett abgereiften Pflanze mit einer guten Zellwandverdaulichkeit zu verbinden. „Stay-green“-Sorten gewähren ein größeres Zeitfenster für die Ernte, da die Restpflanze nicht in dem Maße an Trockenmasse zunimmt wie eine konventionell abreifende Sorte. Zur Überprüfung dieser Annahme untersuchten HARTMANN und GEIGER (2001) das Abreifeverhalten von 20 Maissorten an verschiedenen Standorten. Die Sorten wurden an drei verschiedenen Ernteterminen (30-31 % TS, 33-34% TS und 37-39 % TS) untersucht. An diesen Ernteterminen wurden die folgenden Parameter erfasst: Trockensubstanz von Kolben, Rest- und Gesamtpflanze, Kolbenanteil, Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten und Verdaulichkeit. Bereits beim ersten Erntetermin wurde der wesentlich höhere Einfluss des Restpflanzen-TM-Gehaltes auf die Trockensubstanzgehalte in der Gesamtpflanze im Vergleich zum Kolben-TM-Gehalt deutlich. Dieser Einfluss vergrößerte sich mit zunehmendem TM-Gehalt in der Gesamtpflanze. Die Unterschiede in der Abreife wurden insbesondere auf trockeneren, warmen Standorten deutlich. Es ergab sich für die „stay-green“-Sorten insgesamt eine vier bis fünf Tage längere Periode der Silierfähigkeit.

### **2.3.3 Einfluss des Aufbereiteters auf die Pansenphysiologie**

Die Aufbereitung von Maishäckselgut erfolgt bei modernen Feldhäckslern durch sogenannte Crackerwalzen. Diese Press- und Quetschwalzen sind der Häckseltrommel nachgelagert, so dass das gesamte Häckselgut zunächst die Häckseltrommel und in einem zweiten Schritt die Crackerwalzen passiert.

Ziel des Aufbereitereinsatzes ist das Anschlagen bzw. das vollständige Zerstören der im Häckselgut enthaltenen Körner. Durch diesen Vorgang soll vermieden werden, dass nicht

angeschlagene Körner unverdaut wieder ausgeschieden werden. Aufgrund der hohen Energiekonzentrationen im Korn ist ein ungenutztes Ausscheiden dieser Körner in jedem Fall zu vermeiden. Folglich ist der Einsatz von Aufbereitern insbesondere aus ökonomischer Sicht zu empfehlen. Mit steigender Häcksellänge und steigendem TM-Gehalt nimmt auch der Ganzkornanteil im Maishäckselgut zu (BARRINGTON and JORGENSEN, 1976). Die Anteile sind mit 0,3 bis 7,2 % der Körner-TM quantifizierbar (JORGENSEN, 1978).

HONIG und ROHR (1982a) kamen zu ähnlichen Ergebnissen. Sie untersuchten im Tierversuch die Körnerverluste im Kot von Milchkühen. Es genügt nicht, die Körner nur anzuschneiden, folglich wird der Einsatz von Walzen- oder Scheibenquetschen empfohlen. Gerade bei sehr trockenen Körnern wird die Zerkleinerung der Körner erschwert, da es zum Wegspringen der Körner von der Messerschneide kommt. Im Rahmen der Versuche wurde eine TM-Spanne von 28-34 % untersucht. Es stellte sich heraus, dass sich die Ausscheidungen ganzer Körner mit steigender TM von 2,5 auf 6 % der aufgenommenen Silagetrockenmasse erhöhte. Resümierend wird empfohlen, bei TM-Gehalten über 30 % eine wirksame Nachzerkleinerungseinrichtung zu verwenden. SCHWARZ et al. (1997) führten verschiedene Untersuchungen zur Effektivität des Aufbereiters durch. Einige Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Mittlere Anteile von Körnern und Kornbruchstücken in Abhängigkeit von Häcksellänge, TM-Gehalt und Aufbereitereinsatz (modifiziert nach SCHWARZ et al., 1997)

Versuchsreihe	Häcksellänge [mm]	Einsatz des Corn Crackers	Trockenmassegehalt [%]	Körner- und Kornbruchstücke [%]
VR 2	6	mit CC	32,1	9,6 <sup>*)</sup>
	8	ohne CC	30,8	15,2
	8	mit CC	31,7	9,1 <sup>*)</sup>
VR 3	4	ohne CC	37,1	29,5
	4	mit CC	35,5	15,8 <sup>*)</sup>
	8	ohne CC	36,4	38,5
	8	mit CC	38,9	19,1 <sup>*)</sup>

\*) nur Kornbruchstücke

Wie Tabelle 1 zeigt, waren in den Varianten, die ohne Aufbereitereinsatz gehäckselt wurden, mit 15,2 bis 38,5 % erhebliche Anteile von ganzen Körnern zu finden. Die Varianten, bei denen ein Corn Cracker eingesetzt wurde, enthielten ausschließlich Kornbruchstücke, jedoch keinerlei ganze Körner. In Versuchsreihe 3 stiegen mit steigender Häcksellänge auch die Anteile ganzer Körner in den nicht aufbereiteten Varianten an. Allerdings hatten diese Varianten auch höhere Trockenmassegehalte als die aufbereiteten Varianten. Neben dem deutlichen Einfluss des Corn Crackers auf den Aufbereitungsgrad der Körner ist folglich auch von einem Einfluss von Häcksellänge und TM-Gehalt auf den Anteil ganzer Körner auszugehen. Allerdings sind die Wirkungsgrade der Faktoren TM-Gehalt und Häcksellänge anhand dieser Untersuchung nicht quantifizierbar. In VR 2 konnten bezüglich der Nährstoffverdaulichkeit weder beim Rind noch beim Schaf Unterschiede festgestellt werden. Lediglich bei der Stärke zeigte sich beim Rind eine tendenziell höhere Verdaulichkeit. In der dritten Versuchsreihe (V 3) lag die Stärkeverdaulichkeit beim Rind mit Aufbereitung der Körner bei etwa 96 %, in Abhängigkeit von der Häcksellänge ergaben sich ohne Aufbereiter jedoch nur 91 % (4 mm) bzw. 83 % (8 mm). Die Verdaulichkeiten von Rohfett und organischer Substanz waren ebenfalls mit Aufbereitereinsatz erhöht. Die deutlichste Steigerung der Verdaulichkeit der organischen Substanz ergab sich durch eine Reduktion der Häcksellänge mit Einsatz des Aufbereiters. Diese Variation führte im Vergleich zur 8 mm-Variante ohne Aufbereitereinsatz zu einer Steigerung der Verdaulichkeit der organischen Substanz um 6 %.

Untersuchungen an Mastbullen (SCHWARZ et al., 1985) führten zu ähnlichen Ergebnissen. In einem Fütterungsversuch führten aufbereitete Silagen mit 7 mm Häcksellänge zu 40 kg höheren Endmastgewichten im Vergleich zu nicht aufbereiteten Silagen. SCHURIG (1985) untersuchte die Aufbereitung von Körnern mit verschiedenen Aufbereitungsorganen bei einer Häcksellänge von 6 bis 7 mm. Dabei ergab sich für Maschinen mit Quetschwalzen ein Anteil von ganzen Körnern von unter einem Prozent an der Trockenmasse der Gesamtpflanze.

## **2.4 Silierprozess**

### **2.4.1 Rahmenbedingungen und mikrobielle Einflussfaktoren**

Die Trockenmasse der Maispflanzen bei der Ernte lässt sich zum einen durch die Sortenwahl, zum anderen durch den Erntezeitpunkt beeinflussen. Die Trockenmasse spielt eine entscheidende Rolle bei der Zerkleinerung der Maispflanzen (KROMER und SCHMITTMANN, 1999). Optimale Trockenmassegehalte liegen bei 28-35 % in der Gesamtpflanze in Abhängigkeit vom Kolbenanteil (SPIEKERS, 2004). Neben den Anforderungen der Rinderfütterung sind in diesem Zusammenhang insbesondere die Anforderungen der Silierung an das Material ausschlaggebend.

Zunächst soll kurz das Prinzip der Silierung erläutert werden. Ziel der Silierung ist die Konservierung von Grundfutter, begründet durch die zeitliche Diskrepanz von Futteranfall und Futterbedarf (JEROCH et al., 1999). Wird die Überlegung auf Mais beschränkt, kann festgehalten werden, dass das gesamte Grundfutter im Zeitraum von Mitte September bis Mitte Oktober anfällt. Zur Gewährleistung einer ganzjährigen Versorgung mit hochwertigem Grundfutter müssen somit die Verderbnisprozesse gestoppt werden. Im Falle der Silierung geschieht dies durch Lagerung unter anaeroben Bedingungen in Verbindung mit einer Erhöhung der Azidität. Die anaeroben Bedingungen werden durch das Abdecken des Silos mit luftdichter Folie und weitere Maßnahmen erreicht, die im Folgenden noch detailliert geschildert werden sollen. Nach dem Abdecken des Silos erfolgt in der Regel ein sprunghafter Anstieg der im Häckselgut bereits vorhandenen Milchsäurepopulation. Hierbei werden der heterofermentative und der homofermentative Typ unterschieden: Besonders erwünscht sind die homofermentativen Milchsäurebakterien, da diese eine besonders verlustarme Gärung gewährleisten. Sie verstoffwechseln die vorhandene Glucose und Fructose zu Milchsäure, was mit sehr geringen Masseverlusten einhergeht. Es werden lediglich 3 % der Glucose frei. Bei den Stoffwechselprozessen des heterogenen Typs entstehen neben Milchsäure auch Ethanol und/oder Essigsäure, Mannitol und CO<sub>2</sub>, es handelt sich also um eine verlustreichere Form der Vergärung. Infolge der erhöhten Milchsäurekonzentration im Häckselgut kommt es zu einem pH-Wert-Abfall auf einen Wert von etwa 4,0 innerhalb weniger Stunden. Voraussetzung sind optimale Lebensbedingungen für die Milchsäurebakterien, zu denen neben den anaeroben Bedingungen vor allem geeignete Temperaturen sowie eine ausreichende Konzentration von wasserlöslichen Kohlenhydraten zählen.

Sowohl der geringe pH-Wert als auch die anaeroben Bedingungen wirken hemmend auf unerwünschte Mikroorganismen, die häufig auch als „Gärschädlinge“ bezeichnet werden.

Eine besonders unerwünschte Gattung stellen die Clostridien dar. Diese werden zum einen durch erdige Verschmutzungen, zum anderen durch Wirtschaftsdünger in das Häckselgut eingebracht (ADLER, 2002). Clostridien sind obligat anaerob, reagieren jedoch empfindlich auf die starke pH-Wert-Absenkung. Auch das Vorhandensein von Nitrat hemmt die Entwicklung von Clostridien (SPOELSTRA, 1985). Gefördert werden die Clostridien im Laufe der Silierung durch hohe Lagertemperaturen, geringe Trockenmassegehalte und hohe Pufferkapazitäten (ADLER, 2002). Clostridien sind grundsätzlich unerwünscht, sie verstoffwechseln Kohlenhydrate vermehrt zu Buttersäure, wirken der Konservierung durch Abbau der Milchsäure entgegen und beeinflussen nachhaltig negativ den Geschmack des Futters. Tabelle 2 zeigt die Ansprüche und Stoffwechselaktivitäten der wichtigsten Mikroorganismen für die Silierung.

Tab. 2: Ansprüche und Stoffwechselaktivität der wichtigsten Mikroorganismen für die Silierung (modifiziert nach JEROCH et al., 1999)

<b>Mikroben- gruppe</b>	<b>Verhalten zu Luftsauerstoff</b>	<b>Aktivitäts- grenze bei pH</b>	<b>Kohlenhydrat- vergärung</b>	<b>Eiweiß- abbau</b>
<b>Milchsäure- bakterien</b>	Fakultativ bis obligat anaerob	3,0-3,6	Stark zu Milchsäure, Alkohol, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O (Essigsäure)	Ohne
<b>Coli-Aerogenes- Gruppe (Coliforme Keime)</b>	Fakultativ anaerob	4,3-4,5	Stark zu Essigsäure, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O (Ameisensäure)	Ohne oder schwach
<b>Clostridien -Saccharolyten</b>	Obligat anaerob	4,2-4,4	Stark zu Buttersäure, CO <sub>2</sub> , 2 H (Essigsäure)	Ohne
<b>Fäulnisbakterien</b>	Aerob bis fakultativ anaerob	4,2-4,8	Stark	Sehr stark
<b>Hefen</b>	Aerob bis fakultativ anaerob	1,3-2,2	Stark zu Alkohol, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O (Acetaldehyd)	Vorhanden
<b>Schimmelpilze</b>	Obligat	2,5-3,0	Stark	Stark

Die Aktivität von Essigsäurebakterien (Acetobacter) ist abhängig von der Menge an Restsauerstoff im Silo. Bis zu einem gewissen Grad ist die Essigsäurebildung erwünscht, da diese hemmend auf Hefen wirkt. Angestrebt wird ein Verhältnis Milchsäure:Essigsäure von 3:1 (WILHELM, 1993). Bazillen sind in der Regel in nur sehr geringen Mengen im Häckselgut vorhanden, sie können sich jedoch besonders „mit fortgeschrittenem aeroben Verderb vor allem bei Silagen mit hoher Trockenmasse zur dominanten Keimart entwickeln.“ (ADLER, 2002). Enterobakterien und Pseudomonaden dominieren vielfach die epiphytische (naturegegebene) Mikroflora. In den ersten Tagen nach der Silobefüllung können ihre Keimzahlen sich noch erheblich erhöhen. In der Regel ist jedoch davon auszugehen, dass sie infolge der Milchsäurebildung und der damit verbundenen pH-Wert-Absenkung dauerhaft stark dezimiert werden. Sollte die Gärung allerdings verzögert ablaufen oder aerober Verderb einsetzen, kann das Vorhandensein von Enterobakterien und Pseudomonaden zu erneuten Problemen führen.

Schimmelpilze benötigen für ihr Wachstum Sauerstoff. In der Regel wird der Schimmelpilzbesatz zum einen durch den Luftabschluss, zum anderen durch den starken pH-Wert-Abfall und die Entstehung von CO<sub>2</sub> deutlich reduziert. Im Mais sind neben Schimmelpilzen häufig Fusarien vorhanden. Diese reagieren jedoch ähnlich empfindlich auf das entstehende Milieu, so dass bei einem luftdicht abgeschlossenen Silo weder eine deutliche Vermehrung von Fusarien noch eine erwähnenswerte Entstehung von Mykotoxinen stattfindet. Zur Feldpilzflora zählen auch die Hefen, die aufgrund ihrer Säuretoleranz und ihrer Fähigkeit, ihren Stoffwechsel sowohl auf aerobe als auch auf anaerobe Verhältnisse einzustellen, zum Hauptverursacher des Verderbs von Silagen werden. Ähnlich wie bei den anderen Feldpilzen treten die Probleme besonders nach Siloöffnung und mit Lufteintritt in das Silo auf.

#### **2.4.2 Fermentationsverlauf**

Bei raschem Luftabschluss kommt der aerobe Stoffwechsel der Pflanzenzellen („Restatmung“) und der von Epiphyten innerhalb weniger Stunden zum Erliegen. Innerhalb der folgenden ein bis zwei Tage kommt es zu einer sprunghaften Vermehrung fakultativ anaerober Keime, insbesondere der Milchsäurebakterien. Innerhalb der nächsten ein bis zwei Wochen tritt die Hauptgärphase ein, die Milchsäurebakterien erreichen den Höhepunkt ihrer Entwicklung. Nach Unterschreitung des kritischen pH-Wertes oder

Mangel an vergärbaren Kohlenhydraten endet die Milchsäuregärung. Liegt der pH-Wert allerdings über der Aktivitätsgrenze der Clostridien, so kommt es zu einer Vermehrung der „Buttersäurebildner“, einhergehend mit dem Abbau von Milchsäure und Energie. Somit kommt es zu einem pH-Wert-Anstieg. Diese Entwicklung schafft anderen Gärschädlingen, wie beispielsweise Fäulnisbakterien, wiederum akzeptable Lebensbedingungen, wodurch der völlige Verderb der Silage droht.

Um diese Prozesse nachvollziehen zu können und bereits während der Silierung messbar zu machen, entwickelte die DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft) die „DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit“ (DLG, 2000). Dieses Verfahren dient ursprünglich dem Wirksamkeitsnachweis von Siliermitteln. Dabei handelt es sich um chemische oder biologische Zusätze, die den Siliervorgang positiv beeinflussen.

Im Rahmen dieser Silierversuche wird Häckselgut zunächst für die Analysen auf Weender Rohnährstoffe, Nitrat, wasserlösliche Kohlenhydrate, Pufferkapazität und Besatz an Milchsäurebakterien beprobt und zwecks Silierung unter Luftabschluss in Weckgläser gegeben.

Nach dem zweiten Tag erfolgt die erste pH-Wert-Messung. Zu diesem Zeitpunkt soll der pH-Wert bereits einen Wert von etwa 4,0 erreicht haben, in diesem Fall ist von einer ausreichenden Milchsäurebildung auszugehen. Die pH-Wert-Messung wird, gemäß den DLG-Richtlinien, am 90. Tag (Abschluss der Silierung) wiederholt. Jeweils am 30., 60. und 90. Tag werden die Gläser gewogen, um die Gärverluste zu bestimmen. Geringfügige Gärverluste entstehen auch bei der gewünschten Milchsäuregärung. Deutlich erhöhte Gärverluste gehen in der Regel mit einem kritischen Gärsäuremuster einher. Es weist also auf das Vorhandensein von Gärschädlingen hin. Eine genaue Bestimmung des Gärsäuremusters und damit der Kausalität der Verluste erfolgt erst zum Abschluss der Silierung. Zur Messung der aeroben Stabilität werden die Siliergläser jeweils am 28. und 42. Tag für 24 Stunden geöffnet, um „aeroben Stress“ zu induzieren. Am 49. Tag wird das Material aus den Gläsern ausgelagert und in mit Temperaturfühlern ausgestattete Dosen umgefüllt. Diese Messung simuliert die Siloöffnung. Erwärmt sich das Material innerhalb einer Woche um mehr als 3 K, so gilt es als aerob instabil. Die aerobe Instabilität weist auf einen Besatz mit unerwünschten Mikroorganismen und die daraus resultierende Gefahr einer Nacherwärmung dieses Materials im Silo hin. Die Bedeutung und die Folgen von Nacherwärmung sollen im Kapitel 2.5 genauer erläutert werden.

Nach Abschluss der Silierung erfolgt erneut eine Analyse des Materials auf Weender Rohnährstoffe zwecks Quantifizierung der (Energie-)Verluste. Von besonderem Interesse ist die Analyse des Gärsäuremusters. In der Regel werden Milch-, Butter-, Essig- und Propionsäure bestimmt, um mögliche Fehlgärungen und Energieverluste nachvollziehbar zu machen.

### **2.4.3 Vergärbarkeit**

Die Vergärbarkeit des Häckselgutes ergibt sich aus den Inhaltsstoffen des Futters. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die wasserlöslichen Kohlenhydrate, die den Milchsäurebakterien als Nahrung dienen. Ohne eine ausreichende Konzentration von wasserlöslichen Kohlenhydraten kommt es also nicht zu einer ausreichenden Milchsäurebildung und damit auch nicht zu der erforderlichen pH-Wert-Absenkung. Die Menge an Milchsäure, die für eine Ansäuerung auf einen pH-Wert von 4,0 notwendig ist, wird in dem Parameter „Pufferkapazität“ ausgedrückt. Die Pufferkapazität wird beeinflusst durch sogenannte „puffernde Substanzen“. Darunter sind Substanzen wie Rohprotein oder basische Mineralstoffe zu verstehen, die einen pH-Wert-Abfall verlangsamen oder verhindern. Die beiden Parameter Zucker und Pufferkapazität werden in einem Quotienten zusammengefasst (Z/PK-Quotient).

Ebenfalls von Bedeutung ist der Trockenmassegehalt des Häckselgutes. Je höher der Trockenmassegehalt, desto langsamer laufen mikrobielle Stoffwechselforgänge ab. Die Verlangsamung von Stoffwechselprozessen kann zu Problemen im Silierprozess führen: Es kommt zu einer Verschiebung der pH-Wert-abhängigen Wachstumsgrenze der Clostridien, dem „kritischen pH-Wert“. Diese Verschiebung des kritischen pH-Wertes ist wiederum vernetzt mit der erforderlichen Menge an Milchsäure und damit an Zucker für die Ansäuerung hin zu diesem pH-Wert. Ein sehr hoher Trockensubstanzgehalt erschwert somit die Silierung. Allerdings sollte die Trockensubstanz ebenso eine gewisse Untergrenze nicht unterschreiten, da auch sehr hohe Wassergehalte den Siliervorgang erschweren.

Ein weiterer Parameter für die Qualität des Silierprozesses ist der Nitratgehalt des Futters. Eine Mindestmenge von 3 g/kg TM ist erforderlich, um die Entstehung von Buttersäure zu hemmen (JEROCH, 1993).

## 2.5 Nacherwärmung

Wie bereits erwähnt, können aerobe Mikroorganismen wie Hefen, Schimmelpilze und Essigsäurebakterien trotz anaerober Bedingungen im Silo überdauern. Bei Öffnung des Silos kann es, in Abhängigkeit von der Intensität des Sauerstoffeintritts, zu einer sprunghaften Vermehrung dieser Mikroorganismen und infolgedessen zu einem Verderb der Silage kommen. Die damit einhergehende Wärmebildung resultiert aus den Stoffwechselaktivitäten der Mikroorganismen. Die Energie- und Qualitätsverluste sind beträchtlich. Der Begriff „Nacherwärmung“ wurde von verschiedenen Arbeitsgruppen definiert.

Einige Arbeitsgruppen sprechen erst ab einem Temperaturanstieg von mehr als 10 K von Nacherwärmung (STEINHÖFEL und WEBER, 2004). Ähnlich äußerten sich THAYSEN (2003) und SPIEKERS (2002), die von Nacherwärmung ausgehen, wenn die Temperatur in der Silage um 10 K und mehr über die Umgebungstemperatur ansteigt.

Unabhängig von der Umgebungstemperatur wird eine Kerntemperatur von ausgekühlten Silagen von 10 bis 15°C (SPIEKERS UND POTTHAST, 2004) bzw. von 15°C (SPIEKERS et al., 2004) als nicht erwärmt eingestuft. Dagegen ist bei Silagen, die eine mittlere Temperatur von 20°C aufweisen, sicher von Nacherwärmung auszugehen.

Nach ROUEL und WYSS (1994) ist eine Silage instabil, sobald ihre Temperatur um mehr als 1 K über die Lokaltemperatur ansteigt.

Bei Eintritt von Sauerstoff in das Silo stellt also ein hoher Besatz mit Hefen, Pilzen und Acetobacter ein erhebliches Nacherwärmungsrisiko dar. Risikomindernd wirken sich das Vorhandensein von Alkohol, Milchsäure und Restzucker sowie ausreichende Wassergehalte aus (RUSER und PAHLOW, 2003).

Das Auftreten von Nacherwärmung ist mit folgenden Qualitätsveränderungen verbunden:

- Energieverluste durch aerobe Stoffwechselfvorgänge im Futter
- Verminderte Futteraufnahme durch veränderte Schmackhaftigkeit
- Mykotoxinbildung im Futter durch Pilzwachstum.

Eine Nacherwärmung von 10 K führt zu Energieverlusten in Höhe von 0,1 MJ NEL pro kg Trockensubstanz und Tag (SPIEKERS et al., 2003).

Die Nacherwärmung führt also zu Energieverlusten, verminderter Futter- und Energieaufnahme, tierphysiologischen Problemen und damit verbunden zu diversen wirtschaftlichen Nachteilen.

Nach RUSER und PAHLOW (2003) ist neben dem Ausgangsmaterial, der Gärqualität und der Jahreszeit bzw. der Umgebungstemperatur insbesondere die Siliertechnik von Bedeutung bei der Vermeidung von Nacherwärmung.

Die Siliertechnik beginnt mit der Siloplanung. Aus baulicher Sicht sind Silos mit festen Seitenwänden nicht zwingend notwendig (GERIGHAUSEN, 2004). Allerdings sollen Rangier- und Lagerflächen betoniert sein. Die Mindestbreite eines Flachsilos liegt bei 6-7 m, um einen Parallelbetrieb von Walzarbeit und Abladevorgang zu ermöglichen. Aus Schichthöhen von 30 cm beim Abladen bzw. Verteilen von Mais im Silo ergibt sich eine Mindestlänge von 25 bis 30 m, so dass auch großdimensionierte Fahrzeuge Verwendung finden können.

Neben Silobreite und -länge ist auch die Silohöhe zu planen. Ziel ist die Schaffung einer Anschnittfläche, die auf die tägliche Futterentnahme abgestimmt ist. Die Anschnittfläche ist so zu planen, dass ein Vorschub von „1 bis 1,5 m pro Woche in der kühlen Jahreszeit und 2,5 m in der wärmeren Jahreszeit“ erreicht wird (GERIGHAUSEN, 2004). Gerade bei Silagen, die anfällig für Nacherwärmung sind, ist ein entsprechender Vorschub von besonderer Relevanz.

## **2.6 Verdichtbarkeit**

### **2.6.1 Einflussfaktoren auf die Verdichtbarkeit**

Die Nacherwärmung und die damit verbundenen Energie- und Qualitätsverluste führen in der Praxis nach wie vor zu erheblichen Problemen. Der Grund für die Nacherwärmung ist das Eindringen von Sauerstoff in den Silostock nach Öffnung des Silos. Nach SPIEKERS und SCHIBORRA (2002) ist die beste Absicherung gegen Nacherwärmung eine ausreichende Verdichtung des Häckselgutes. Als Richtgröße werden 230 kg TM/m<sup>3</sup> für einen TM-Gehalt von 28 % und 270 kg TM/m<sup>3</sup> für einen TM-Gehalt von 33 % angegeben. Für jeden Prozentpunkt, um den ein Trockenmassegehalt von 33 % überschritten wird, wird eine Steigerung der Lagerungsdichte um 10 kg TM/m<sup>3</sup> gefordert. Eine Unterschreitung der Zielgröße um 30 kg TM/m<sup>3</sup> und mehr ist aufgrund der Silierverluste, der erhöhten Neigung zur Nacherwärmung und der damit einhergehenden finanziellen

Verluste inakzeptabel (SPIEKERS, 1998). In zurückliegenden Untersuchungen wurden Schätzformeln für Mais und Gras entwickelt. In Anlehnung an diese Untersuchungen wurde die These aufgestellt, dass die erreichbare Lagerungsdichte ausschließlich anhand des TM-Gehaltes des Materials zu ermitteln sei (MESSER and HAWKINS, 1977). Die Intensität des Lufteintritts ist jedoch auch abhängig von den physikalischen Eigenschaften des Materials, welche wiederum das Ausmaß von Gas- und Wärmeaustausch bestimmen. Die physikalische Form wird durch Teilchen- bzw. Partikelgröße, geometrische Form (Länge, Durchmesser) sowie die Schüttdichte charakterisiert (HOFFMANN, 1983). Wesentliche Einflussgrößen auf die Verdichtbarkeit von Siliergut sind zum einen die Parameter TM-Gehalt und Rohfasergehalt, zum anderen die Häcksellänge (DERNEDDE, 1983). Des Weiteren werden die Faktoren Sorte, Abreifegrad, Siloform, Aufbereitungsgrad, Messtechnik und Verdichtungsdruck genannt (JOHNSON et al., 2002b).

### **2.6.2 Einfluss des Rohfasergehalts**

DERNEDDE (1983) stellte einen deutlichen Effekt des Rohfasergehaltes auf die Verdichtbarkeit fest. Mit steigendem Rohfasergehalt erhöhen sich die Sperrigkeit und das Rückstellungsvermögen. Daher wird für Mais der anzustrebende Rohfasergehalt aus siliertechnischer Sicht mit < 200 g/kg TM beziffert (HERTWIG, 2004).

### **2.6.3 Einfluss von Zerkleinerungsgrad und Trockenmassegehalt**

Bereits Ende der siebziger Jahre wurde auf den Zusammenhang zwischen Zerkleinerung und Verdichtung bei Silomais hingewiesen (DERNEDDE und HONIG, 1977). Mit kürzeren Häcksellängen geht eine höhere Verschiebbarkeit der Partikel gegeneinander einher, folglich können mit kürzerem Häckselgut Zwischenräume deutlich besser genutzt werden (DERNEDDE, 1983). Die Schüttdichte von kurz gehäckseltem Material ist höher als die Lagerungsdichte von Material mit einem geringeren Zerkleinerungsgrad. Ähnliche Tendenzen stellten MUCK und HOLMES (2004) in Untersuchungen an Schlauchsilos fest. Sie bezifferten die Verringerung der Lagerungsdichte im Schlauchsilo mit 4,1 kg TM/m<sup>3</sup> pro mm Partikellängensteigerung. Des Weiteren wird durch die Zerkleinerung des sperrigen Materials die Steife der einzelnen Pflanzenteile verringert (BAADER, 1970). Die Wahl der Häcksellänge ist dem Trockenmassegehalt anzupassen. Bei Gras liegen eine

Vielzahl von Untersuchungen zum Zusammenhang von Häcksellänge, Trockensubstanzgehalt und erzielter Lagerungsdichte vor (AHMELS und ISENSEE, 1994; MOHENSIN und ZASKE, 1976). Bei Mais ist zu berücksichtigen, dass die Pflanze sehr formenreich ist und die einzelnen Pflanzenteile (Körner, Spindeln, Restpflanze) aufgrund ihrer unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften auch unterschiedliche Verdichtungs- und Zerkleinerungseigenschaften haben (KROMER, 1993). Zu morphologischen, und damit zerkleinerungsrelevanten Eigenschaften, zählen genetische Herkunft (Sorte), der Reifeverlauf (Abreifeverhalten) und die Ertragsstruktur von Masse, Nährstoffen und Rohfaser. Eine Untersuchung von DERNEDDE und HONIG (1977) verdeutlicht diese Aussage. Sie stellten fest, dass der Einfluss des Zerkleinerungsgrades mit steigendem Kornanteil abnimmt. Für Mais-Stängel, -Blätter und -Lieschen ist infolge des ähnlichen morphologischen Aufbaus in Halmgütern eine ähnliche Betrachtung der mechanischen Eigenschaften wie bei Gras zulässig (KROMER, 1993).

Dennoch bestehen, unabhängig von der Pflanzenzusammensetzung, grundlegende Empfehlungen bezüglich der Zerkleinerung. Mit steigendem Trockenmassegehalt der Pflanze sollte die Häcksellänge aus siliertechnischer Sicht reduziert werden, um eine ausreichende Lagerungsdichte zu gewährleisten (SPIEKERS, 2002). Zur Beschreibung des Zusammenhangs von Häcksellänge und Verdichtbarkeit sowie der damit verbundenen Raumausnutzung wurden an der FAL Braunschweig in Presstopfversuchen die Dichten bei Häcksellängen unterhalb 20 mm bestimmt (DERNEDDE und HONIG, 1977). Bei diesen Versuchen wurde Material unterschiedlicher Häcksellänge (4, 7 und 14 mm) über 24 Stunden mit unterschiedlichen Drücken (0,25 bis 1,0 bar, entspricht 0,025 bis 0,1 MPa) belastet. Bei jeder Belastungsstufe stellten sie eine sinkende Trockensubstanzdichte mit steigender Häcksellänge fest. Während bei den 4 mm-Varianten mit einem Druck von 1 bar eine Lagerungsdichte von 310 kg TM/m<sup>3</sup> erreicht wurde, betrug die Lagerungsdichte bei den 14 mm Varianten lediglich 280 kg TM/m<sup>3</sup>. In weiteren Untersuchungen (ZIMMER und HONIG, 1979) wurden auch die TM-Gehalte in die Untersuchungen miteinbezogen. Bei einem Vergleich von 4, 7 und 14 mm Häcksellänge und zwei TM-Gehalten wurden die höchsten Lagerungsdichten bei den 4 mm-Varianten erreicht. Diese wurden bei beiden TM-Gehalt jeweils mit 100 Prozent bewertet. Die verbleibenden zwei Häcksellängen wurden in Relation dazu eingestuft. Bei einem TM-Gehalt von 27 % erreichte die 7 mm-Variante 95 % und die 14 mm-Variante 89 %. Bei 36 % TM lag der Wert für die 7 mm-

Variante bei 92 % und für die 14 mm-Variante bei 86 % des Ausgangswertes. Die absoluten Werte sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tab. 3: Lagerdichte von Silomais (HONIG und ROHR, 1985)

Theoretische Häcksellänge [mm]	Lagerdichte [kg T/m <sup>3</sup> ]	
	27 % TM	36 % TM
4	205	180
7	193	174
14	173	157

Aus diesen Untersuchungen kann also konstatiert werden, dass zum einen die Lagerungsdichte mit steigender Häcksellänge sinkt, zum anderen die Unterschiede der Lagerungsdichte zwischen den Häcksellängen mit steigendem TM-Gehalt ebenfalls ansteigen. Folglich sollte die Häcksellänge mit steigendem TM-Gehalt reduziert werden. In aktuellen Untersuchungen an Flachsilos (MUCK und HOLMES, 2000) konnten diese Tendenzen nicht bestätigt werden. Es ergaben sich steigende Trockenmassedichten mit steigendem TM-Gehalt.

Aus diesen Untersuchungen entstanden unterschiedliche Empfehlungen zur optimalen Häcksellänge. ZIMMER und HONIG (1979) leiteten eine Häcksellängeneempfehlung für Silomais von 6 bis 8 mm bzw. 4 bis 7 mm (Honig und ROHR, 1985) ab. SPIEKERS und SCHIBORRA (2002) empfehlen eine Häcksellänge von 4 bis 6 mm.

## 2.7 Partikellängenfraktionierung

### 2.7.1 Überlängen

Von besonderer Bedeutung für eine hohe angestrebte Lagerungsdichte sind die Überlängenanteile im Maishäckselgut. Bezüglich der Definition des Überlängenanteils existieren in der Literatur unterschiedliche Einstufungen.

ZIMMER und HONIG (1979) bezeichnen Partikel >25 mm als Überlängen und fordern einen Überlängenanteil von maximal 5 %. WENNER (1986) fordert keinerlei Anteile > 40 mm. KROMER (1971, 1993) fordert eine Obergrenze von 20 % für eine Partikellänge > 9,6 mm und von weniger als 10 % für eine Länge von 38 mm. GERS-GRAPPERHAUS (1992) definiert Partikellängen von > 16 mm als Überlängenfraktion und bezeichnet einen

Anteil von 5 % in dieser Fraktion als „noch tolerabel“. SCHURIG et al. (1996) bezeichnen 1 % im Bereich  $> 20$  mm als Maximalwert.

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Überlängen hauptsächlich aus zähen Lieschen bestehen, die sich nur schwer verdichten lassen. Somit ist der Überlängenanteil ein entscheidender Faktor für den späteren Verdichtungserfolg.

### **2.7.2 Relevanz der effektiven Häcksellänge**

Die Häcksellänge von Maishäckselsgut ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen mit unterschiedlichem Hintergrund. Bisher wurde dabei überwiegend die theoretische (am Häcksler eingestellte) Häcksellänge ( $l_{th}$ ) berücksichtigt. Diese spiegelt jedoch nur in begrenztem Maße die tatsächlich erreichte (effektive) Häcksellänge und damit die Partikelgröße wieder. Allein aufgrund des Abstumpfens der Messer im Ernteverlauf werden die Schneidkräfte bei der Zerkleinerung des Materials zumindest teilweise durch Reißkräfte ersetzt. Die Folge ist eine Steigerung der Partikellänge (GUTH, 1995), also der effektiven Häcksellänge. Somit muss möglicherweise von erheblichen Unterschieden zwischen theoretischer und effektiver Häcksellänge ausgegangen werden. Es ist demnach nicht ausreichend, für eine Beschreibung des Ausgangsmaterials ausschließlich die theoretische Häcksellänge heranzuziehen. Maßgeblich ist die Ermittlung der effektiven Häcksellänge.

### **2.7.3 Verfahren zur Erfassung der effektiven Häcksellänge**

Eine ebenso zweckmäßige wie exakte Erfassung der effektiven Häcksellänge ermöglicht die Vermessung der einzelnen Partikel per Hand. Die Genauigkeit dieser Methode wird zwar in der Regel anerkannt, steht jedoch in keinem Verhältnis zum personellen und zeitlichen Aufwand und wird infolgedessen nur in Ausnahmefällen eingesetzt (ORTH und PETERS, 1975). Eine Reihe von Untersuchungen nutzen zur Klassifizierung von Partikelgrößen die unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften von Partikeln (GUTH, 1995). Hierzu zählen die Absorptionsmethode, bei der von der Absorptionsfähigkeit auf die spezifische Oberfläche geschlossen wird, sowie Untersuchungen, die die unterschiedliche Magnetisierbarkeit, die Lichtbrechung oder den elektrischen Widerstand nutzen. Bei Körnern werden die unterschiedlichen

Fallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Korngröße genutzt (Sedimentations- und Sichtanalyse).

Eine deutlich weniger technisierte Methode ist die Siebanalyse. Die Größenklassenverteilung wird zum überwiegenden Teil durch die Partikelgröße determiniert. Bei nicht kugelförmigen Teilchen, wie beispielsweise Halmgut, nimmt jedoch die Ausrichtung der Partikel zusätzlich Einfluss auf die Partikelfraktionierung (WESSEL, 1968).

Seit Beginn der sechziger Jahre wurde eine Vielzahl von Methoden und Siebvorrichtungen entwickelt, deren vollständige Beschreibung zu weit führen würde. Im Folgenden soll daher lediglich eine Auswahl von neueren bzw. besonders verbreiteten Siebverfahren vorgestellt werden.

### 2.7.3.1 Penn State Particle Separator (Schüttelbox)

Der Penn State Particle Separator (Schüttelbox) besteht aus zwei übereinander positionierten Sieben und einer Auffangschale. Die Siebe haben Sieblochdurchmesser von 8 bzw. 19 mm, so dass eine Einteilung des Häckselgutes in die drei Fraktionen  $x < 8$ ,  $8 < x < 19$  und  $x > 19$  mm erfolgt. Das Material wird ohne vorherige Trocknung gesiebt, die Siebung wird von Hand nach einem definierten Schema (Abb. 2) durchgeführt (KONONOFF, 2002).

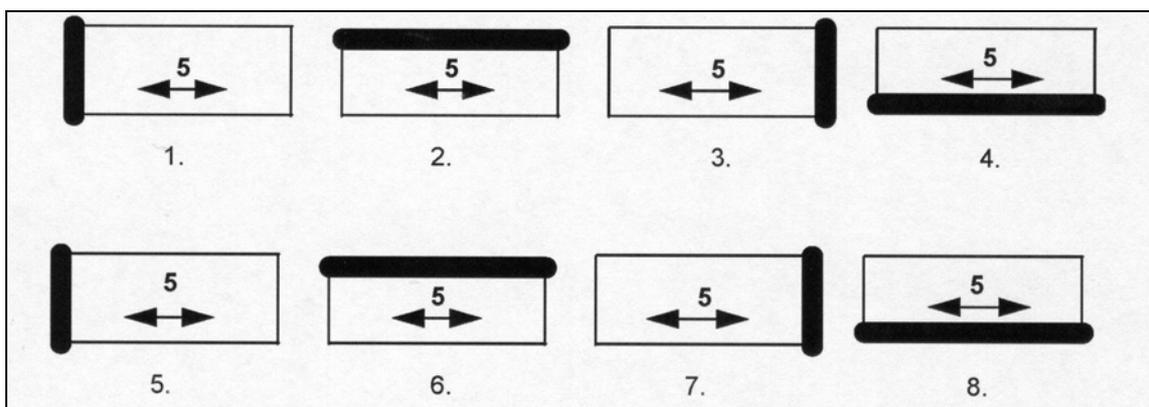


Abb. 2: Schematische Darstellung der Siebung mit dem Penn State Particle Separator (KONONOFF, 2002)

Das Ergebnis der Untersuchung ist jedoch beeinflussbar von der Kraft, mit der die Schüttelbox bewegt wird (KONONOFF et al., 2003). Eine Verringerung der Frequenz von 1,1 auf 0,9 Hz führte zu einer signifikanten Steigerung der Partikelmasse in der Größenklasse  $x > 19$  mm. Folglich ist die Methode nicht als standardisiert zu bezeichnen. Ergebnisse verschiedener Untersuchungen sind nur bedingt vergleichbar.

### 2.7.3.2 Plansieb

KROMER (1993) verwendete in seinen Untersuchungen eine Plansiebmaschine gemäß DIN 24041. Der Vorteil der Verwendung von genormten Siebvorrichtungen ist die bestmögliche Vergleichbarkeit von Untersuchungen, die mit solchen Sieben vorgenommen wurden. Die verwendete Plansiebmaschine ist in Abb. 3 schematisch dargestellt.

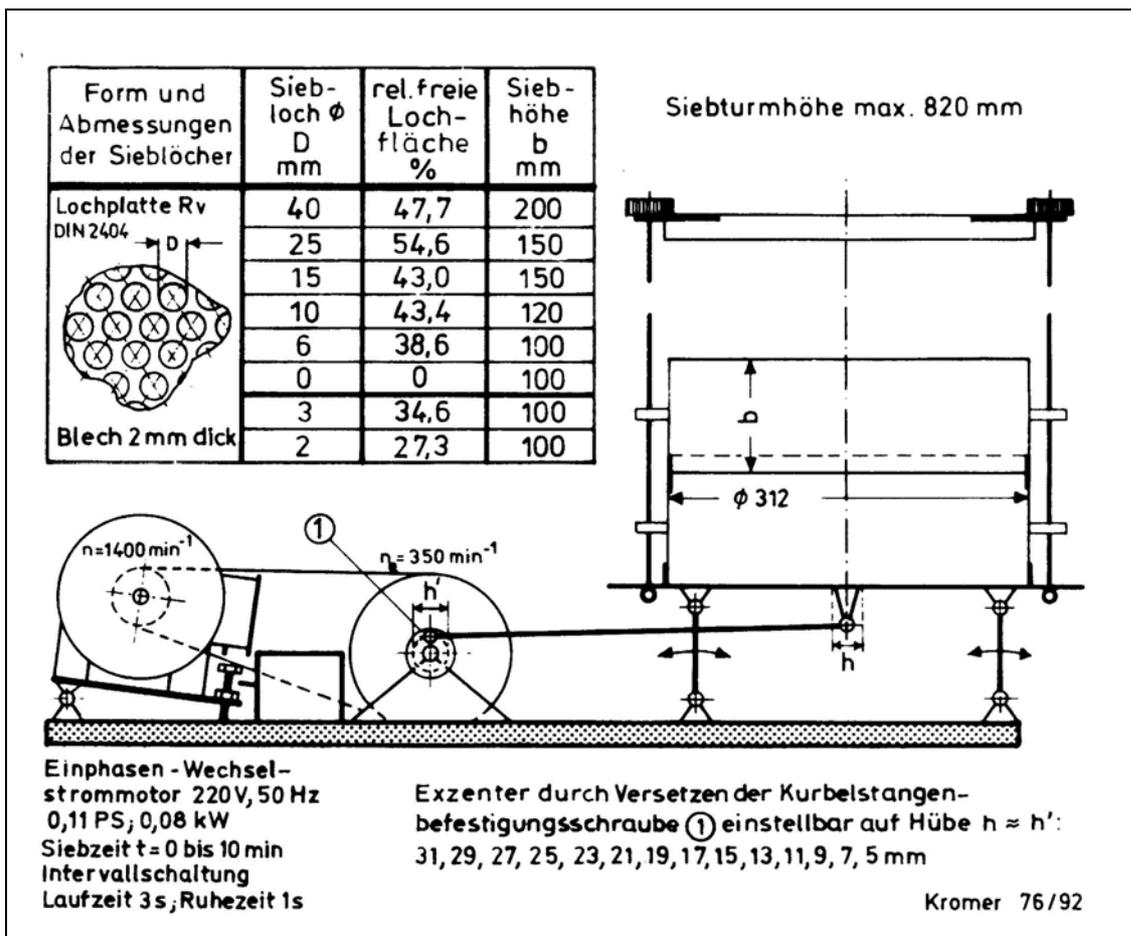


Abb. 3: Plansiebmaschine zur Schnellbestimmung der Häcksellängenverteilung (KROMER, 1993)

Der Siebturm wird mit Hilfe eines Elektromotors horizontal hin- und her bewegt. Der begrenzende Faktor der Siebgeschwindigkeit ist zum einen der zeitliche Aufwand, insbesondere im Rahmen von Reihenversuchen, zum anderen die Auflösung von Teilchenverbänden, die eine gewisse Siebdauer erfordert. In diesem Fall werden die Anforderungen durch eine Intervallschaltung erfüllt. Einer Laufzeit von 3 Sekunden folgte jeweils eine Ruhezeit von 1 Sekunden. Die gesamte Siebdauer betrug 5 Minuten. Das Fassungsvermögen der Siebe ermöglicht das Absieben eines Probenumfangs von 100 g. Die Vorteile der Plansiebmaschine liegen im einfachen Aufbau, dem störungsfreien Betrieb, dem geringen Platzbedarf und dem geringen Eigengewicht.

### 2.7.3.3 Trog­schnecke

Eine neuere Methode nutzt die Technik der Trog­schnecken­fütterung (SCHURIG et al., 1996). Der Blechtrog, in dem die Schnecke sich bewegt, wurde durch Sieb­loch­bleche mit quadratischer Lochung ersetzt (Abb. 4).

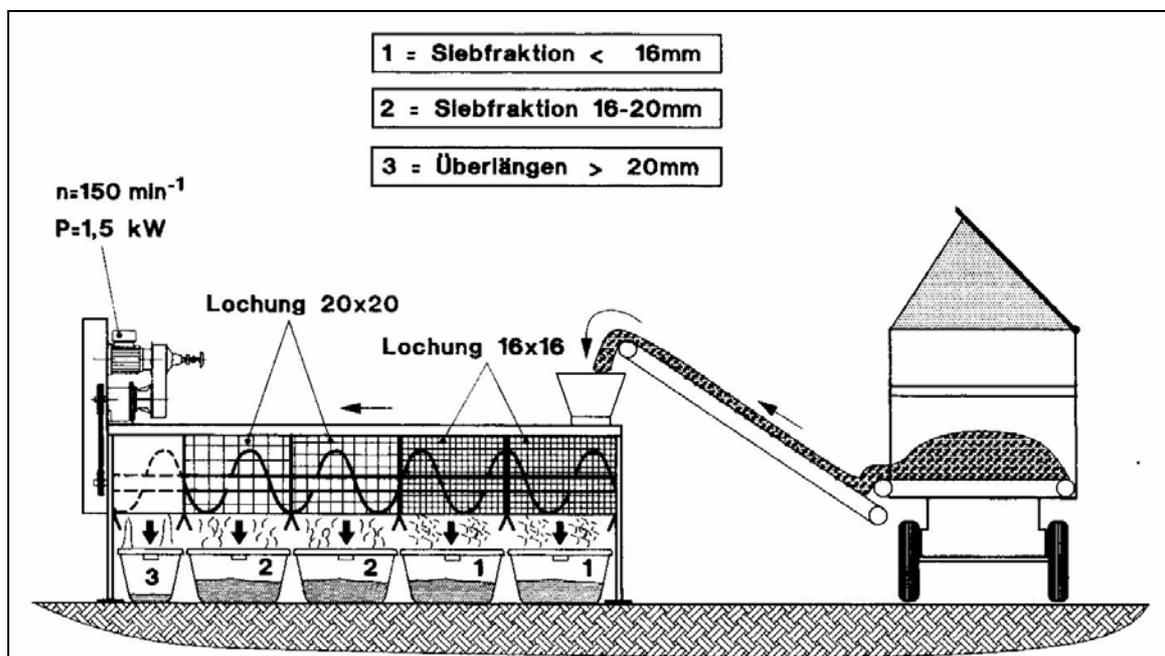


Abb. 4: Schematische Darstellung der Bestimmung von Überlängenanteilen im Silomais mit Trog­schnecken (SCHURIG et al., 1996)

Es besteht die Möglichkeit, vier Siebe einzusetzen, des Weiteren existiert ein Überlauf zum Auswurf von Überlängen. Die Schnecke arbeitet mit einer Drehzahl von  $150 \text{ min}^{-1}$  und ist mit Bürsten ausgestattet. Der Einsatz der Bürsten dient zum einen einer Versetzung des Häckselgutes und zum anderen der Reinigung des Siebes. Bezüglich der Genauigkeit bei der Ermittlung von Überlängenanteilen wird von einer guten Eignung der Methode ausgegangen. Untersuchungen zum Einfluss des TM-Gehaltes sowie der Qualität der Fraktionierung von einzelnen Größenklassen stehen noch aus.

#### **2.7.3.4 Kritik an der Siebanalyse**

Ein bedeutender Nachteil der Siebanalyse liegt in der gewichtsmäßigen Erfassung eines inhomogenen Materials. Die einzelnen Pflanzenteile haben stark variierende Dichten (KROMER, 1993). Wenngleich die Körner volumetrisch nur einen sehr geringen Anteil im Häckselgut ausmachen, haben sie einen gewichtsmäßigen Anteil von etwa 45 % an der Trockenmasse. Somit kann von den Massenanteilen in den Siebfractionen nur schwerlich auf die volumetrische, strukturbestimmende Beschaffenheit der Probe geschlossen werden. Ein weiterer Kritikpunkt liegt in der Ausrichtung der Teilchen im Sieb (DERNEDDE und HONIG, 1977). Im Gegensatz zur Klassifizierung per Hand besteht im Sieb keine Möglichkeit, zwischen Teilchenlänge und -breite zu unterscheiden. Kurzgeschnittene Partikel können folglich aufgrund ihrer Breite in eine Größenklasse fallen, die ihre Länge deutlich übersteigt. Ebenso besteht die Möglichkeit des senkrechten Passierens der Sieblöcher. Aufgrund der Bewegung werden die Partikel nicht nur horizontal verschoben, sondern möglicherweise auch nach oben geworfen, so dass sich ihre Ausrichtung ändert. Das Ausmaß der Verfälschung von Ergebnissen durch eine fehlerhafte Fraktionierung einzelner Partikel wird durch folgenden Zusammenhang verdeutlicht: Der Überlängenanteil liegt bei modernen Feldhäckslern in der Regel unter 3 % (SCHURIG et al., 1996). Bei einem Probenumfang von 100 g bestehen diese 3 % möglicherweise aus nur zwei Lieschblättern. Fällt eines der beiden Lieschblätter in die falsche Größenklasse, wird das Ergebnis halbiert. SCHURIG et al. (1996) führten eine Untersuchung durch, in der dieselbe Probe auf schonende Weise fünfmal gesiebt wurde. Bezüglich des Überlängenanteils belief sich der Maximalwert auf das Zweifache des Minimalwertes. Die Methode ist folglich fehlerbelastet.

Weiterhin wird kritisiert, dass die Vorgehensweise häufig auf die Empfindlichkeit des Häckselgutes abgestimmt wird, um Abrieb und damit eine Verfälschung der Partikelfraktionierung zu vermeiden (BATEL, 1971). Allerdings stellten KONONOFF et al. (2003) bei der Schüttelbox einen signifikanten Einfluss der aufgewendeten Kraft auf das Siebergebnis fest. Ein schonendes Siebverfahren verhindert folglich zwar den Abrieb, verfälscht aber dennoch das Ergebnis.

#### **2.7.3.5 Bildanalytische Methoden**

Der Bildanalyse liegt eine computergesteuerte Vermessung von Partikeln zugrunde. Das Material wird hierzu auf einem Förderband berührungslos ausgebreitet. Mit Hilfe des Förderbandes wird das Material in den Bildausschnitt senkrecht ausgerichteter Kameras transportiert. Die Bilder werden an einen Bildverarbeitungsprozessor weitergeleitet und in numerische Daten umgewandelt. Der schematische Aufbau eines Bildanalyzesystems ist in Abbildung 5 dargestellt.

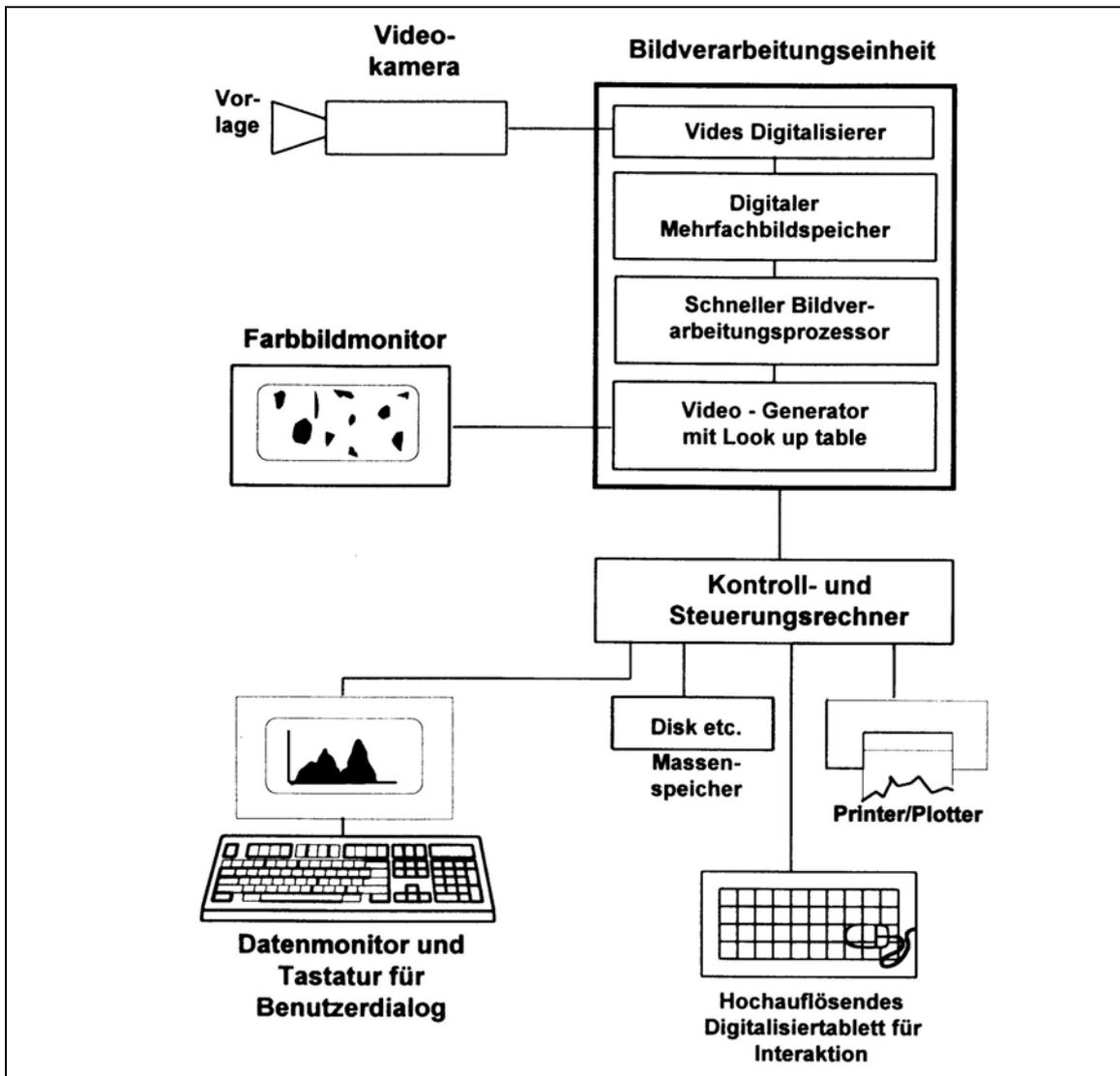


Abb. 5: Schematischer Aufbau eines Bildanalyse-Systems (nach KÖDITZ und HILLJE, 1987), zitiert aus GUTH, 1995

Aus diesen Daten können unter anderem Länge, Durchmesser, Fläche und Umfang ermittelt werden (GUTH, 1995). In der kleinsten Größenklasse (1-2 mm) lag der Fehler bei Stroh unter 2 %, in der mittleren Größenklasse (2-5 mm) bei 2 bis 8 % (GUTH et al., 1993). Problematisch ist allerdings die Dauer der Untersuchung von zwei Proben, diese beläuft sich auf 45,5 Stunden. Bei Maisproben lag der Zeitbedarf bei 10 Stunden nach vorheriger Vorsortierung (GUTH und BOCKISCH, 1992). Die Autoren stellen resümierend fest, dass noch erheblicher Entwicklungsbedarf besteht.

#### 2.7.4 Zusammenhänge zwischen theoretischer Häcksellänge, effektiver Häcksellänge und Aufbereitungsgrad bei der Siebanalyse

Bezüglich der theoretischen Häcksellänge ist ein deutlicher Einfluss auf die effektive Häcksellänge bekannt (KROMER, 1993). SCHWARZ und KIRCHGESSNER (1982) unterzogen Maissilagen drei verschiedener theoretischer Schnittlängen der Siebanalyse. Die Maissilagen hatten einen mittleren Trockenmassegehalt von 28 %. Im Vorhinein wurde die Maissilage nach der Entnahme aus dem Silo auf 93 % TM getrocknet. Sie verwendeten 7 Rundlochsiebe und fassten die Ergebnisse in den Fraktionen <6, 6-10 und >10 mm zusammen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tab. 4: Trockensubstanzgehalte und Strukturanalyse von drei Maissilagen (Angaben in %) (modifiziert nach SCHWARZ und KIRCHGESSNER, 1982)

	Theoretische Schnittlängen [mm] der Maissilagen		
	4	7	15
Trockensubstanz [%]	28,4 ± 0,4	27,4 ± 0,5	29,1 ± 1,0
Siebfraktionen: Lochweite [mm]			
> 10	20,1	24	44,6
6–10	29,2	37,5	34,7
< 6	50,7	38,6	20,6

Bei der 4 mm-Variante fiel etwa die Hälfte der Einwaage in die Größenklasse <6 mm, ein Fünftel lag über 10 mm. Dieser Wert ergab sich ebenfalls für die mittlere Häcksellänge (7 mm). Auf die Größenklassen <6 und 6-10 mm entfielen in etwa dieselben Anteile der eingewogenen Masse in Höhe von 38 %. Bei der längsten theoretischen Häcksellänge (15 mm) lagen knapp 45 % in der Größenklasse >10 mm, davon hatten etwa 15 % (Massenanteil) eine Länge von >25 mm. Diese Anteile setzten sich zum überwiegenden Teil aus Spindelstücken und Lieschblättern zusammen.

Moderne Feldhäcksler sind in der Regel mit Crackerwalzen zur Kornzerkleinerung ausgerüstet. Crackerwalzen haben nachweislich einen positiven Einfluss auf die Zerkleinerung der Maiskörner. Neben dieser Eigenschaft ist es wahrscheinlich, dass nicht nur die Körner, sondern das gesamte Häckselgut nachzerkleinert wird.

Der Einfluss des Aufbereiteters fand bereits in einer Vielzahl von Untersuchungen Berücksichtigung. Häufig erfolgten die Untersuchungen in Kombination mit einem Häcksellängenversuch. HONIG und ROHR (1982b) untersuchten zwei verschiedene Häcksellängen (4 und 7 mm), die mit und ohne Einsatz eines Aufbereiteters (Reibboden) gehäckselt wurden. Für beide Häcksellängen ergaben sich mit Aufbereitung deutlich höhere Massenanteile in der Größenklasse <5 mm und geringere Massenanteile in der Fraktion 5–20 mm. In den Größenklassen 20–100 mm und >10 mm zeigten sich keine klaren Tendenzen. SCHWARZ et al. (1997) untersuchten in drei Versuchsreihen den Zusammenhang von theoretischer und effektiver Häcksellänge sowie den Einfluss des Aufbereiteters (Tab. 5). Eine Häcksellängensteigerung von 4 auf 8 mm führte zu einem Anstieg der Massenanteile in den Größenklassen > 10 mm und in VR 1 zu einer Reduktion der Massenanteile < 10 mm. Aus dem Einsatz des Corn Crackers resultierte in VR 2 und VR 3 bei gleicher Schnittlänge ein Rückgang der Massenanteile in der Fraktion >10 mm. Folglich hat der Einsatz des Aufbereiteters nicht nur eine zerkleinernde Wirkung auf die Körner, sondern auch auf die Restpflanzenanteile.

Tab. 5: Einfluss von theoretischer Häcksellänge, Trockenmassegehalt und Aufbereitungsgrad auf die mittlere Häcksellängenverteilung (modifiziert nach SCHWARZ et al., 1997)

Versuch	Häcksellänge [mm]	Einsatz Corn Cracker	TM-Gehalt [%]	Siebfraktionen (Massenanteile %)			
				< 5 mm	5-10 mm	10-20 mm	> 20 mm
VR 1	4	ohne	26,8	18,0	66,5	14,5	1,0
	8	ohne	27,8	12,9	60,5	22,6	4,0
VR 2	6	mit	32,1	56,5	36,2	6,6	0,7
	8	ohne	30,8	44,5	40,9	11,1	3,5
	8	mit	31,7	33,8	58,4	7,1	0,7
VR 3	4	ohne	37,1	21,9	27,6	42,8	7,7
	4	mit	35,5	28,8	42,1	24,8	4,3
	8	ohne	36,4	13,9	21,8	54,4	9,9
	8	mit	38,9	24,0	40,3	30,8	4,9

In amerikanischen Untersuchungen (JOHNSON et al., 2002a) wurde der Zusammenhang von Abreife, theoretischer Häcksellänge und Aufbereitungsgrad auf die effektive Häcksellänge untersucht (Tab. 6). Der Mais wurde unter anderem bei 32 % TM (one-third milcline) und 36 % TM (two-thirds milcline) in den Häcksellängen 6,4 und 12,7 mm

gehäckselt. Des Weiteren wurde die eine Hälfte der Proben mit Aufbereiter (Corncracker, Spaltweite 1 mm), die andere ohne Aufbereiter gehäckselt. Die Häcksellängenverteilung wurde mit dem Penn State Particle Separator bestimmt.

Tab. 6: Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Penn State Particle Separator (modifiziert nach JOHNSON et al., 2002a)

Experiment	Theoretische Häcksellänge [mm]	TM-Gehalt [%]	Aufbereiter-einsatz	Massenanteile in den Größenklassen [%]		
				> 19	8–19	< 8
1	6,4	32	nein	2,4	76,1	21,6
			ja	5,9	73,1	21
		36	nein	2,8	77,4	19,8
			ja	3,7	76,3	19,9
2	12,7	32	nein	27,1	63,3	9,6
			ja	33,5	57	9,5
		36	nein	29,8	57,1	13,2
			ja	28,6	60,7	10,7

Bei der kurzen Häcksellänge (6,4 mm) waren in der Größenklasse <8 mm nur geringfügige Unterschiede bezüglich des Aufbereitungsgrades und der Abreife erkennbar. Die Massenanteile lagen zwischen 19,8 und 21,6 %. In der Größenklasse 8-19 mm waren die Unterschiede deutlicher, wurden jedoch mit fortschreitender Abreife geringer. Während die Werte sich bei 32 % TM mit (76,1 %) und ohne Einsatz des Aufbereiters (73,1 %) noch um 3 %-Punkte unterschieden, lagen sie bei 36 % TM mit 77,4 bzw. 76,3 % deutlich näher beieinander. Bei der mittleren Häcksellänge ergaben sich für die Varianten, die mit Corn Cracker gehäckselt wurden, mit 10,9 mm (32 % TM) und 11,4 mm (36 % TM) tendenziell geringere Werte als bei den Varianten, die keiner Aufbereitung unterzogen wurden (12,2 bzw. 11,7 mm).

Zusammenfassend muss jedoch festgehalten werden, dass deutliche Unterschiede zwischen der angestrebten theoretischen Häcksellänge von 6,4 mm und den aus den Ergebnissen berechneten (mittleren) Häcksellängen bestehen. Die Untersuchung der langen Häcksellänge (12,7 mm) ergab ähnliche Tendenzen. Allerdings schien hier in der Größenklasse 8-19 mm mit fortschreitender Abreife die Effektivität des Corn Cracker-Einsatzes abzunehmen. Bei den Varianten mit 32 % TM ergab sich mit Massenanteilen von 52,3 % (mit Aufbereiter) und 42,1 % (ohne Aufbereiter) ein Unterschied von über

10 %-Punkten zwischen den Varianten. Mit fortgeschrittener Abreife (36 % TM) liegen diese Varianten bei lediglich 1 %-Punkt. Auch in der Fraktion >19 mm ergaben sich für die Varianten mit 32 % TM Unterschiede von etwa 10 %-Punkten. In dieser Größenklasse lag die Variante, die nicht aufbereitet wurde (44,8 %), über der aufbereiteten Variante (34,9 %). Die Relationen bei 36 % TM waren gleichgerichtet, die Unterschiede jedoch deutlich geringer.

## **2.8 Verdichtungs- und Silierverfahren**

### **2.8.1 Untersuchungen zur Verdichtung in Flachsilos**

Neben der Lagerungsdichte, die durch den Trockenmasse- und Rohfasergehalt sowie die Häcksellänge und den Aufbereitungsgrad beeinflusst wird, ist die Verdichtungstechnik von besonderer Bedeutung. Mit dem Einsatz von schlagkräftigen Feldhäckslern mit Durchsatzleistungen von bis zu 135 t FM/h (THAYSEN, 2004a) wird die Verdichtungsarbeit am Flachsilo zunehmend zur Schwachstelle der Silierkette. Für eine ausreichende Verdichtung ist ein Walzschlepper mit mindestens 200 PS oder ein Radlader mit hohem Aufstandsdruck erforderlich. Des Weiteren wird der Einsatz von Zusatzgewichten (3 bis 4 t) und der Verzicht auf Zwillingsreifen empfohlen. Mit dem Ziel, einen höheren Aufstandsdruck zu erreichen, sind Einzelräder mit einem Reifendruck von 2 bis 3,5 bar zu verwenden. Es wird auf die besondere Relevanz der Sorgfalt und des Gleichmaßes bei der Verdichtung von Flachsilos hingewiesen. Bei Gras ergab sich aus mehrjährigen Untersuchungen eine unzureichende Verdichtung mit Werten von 116 kg TM/m<sup>3</sup> in den oberen 25 cm und 25 bis 50 cm in der Schicht 25 bis 50 cm in der Praxis (AHMELS und ISENSEE, 1994). Die mangelhafte Verdichtung wird durch einen Vergleich mit den Zielwerten verdeutlicht. Gefordert werden 200 kg TM/m<sup>3</sup> bei einem TM-Gehalt von 30 % und 250 kg TM/m<sup>3</sup> bei einem TM-Gehalt von 50 %. Bei Mais bestätigen aktuelle Praxiserhebungen die Bedeutung der Verdichtungsproblematik.

Im Rahmen des Projektes „Nacherwärmung“ der Landwirtschaftskammer NRW wurden auf 62 Betrieben Dichtemessungen an Maissilagen vorgenommen. Abb. 6 zeigt die deutliche Unterschreitung der Zielwerte sowohl bei Einsatz eines Radladers als auch bei Verwendung eines Schleppers.

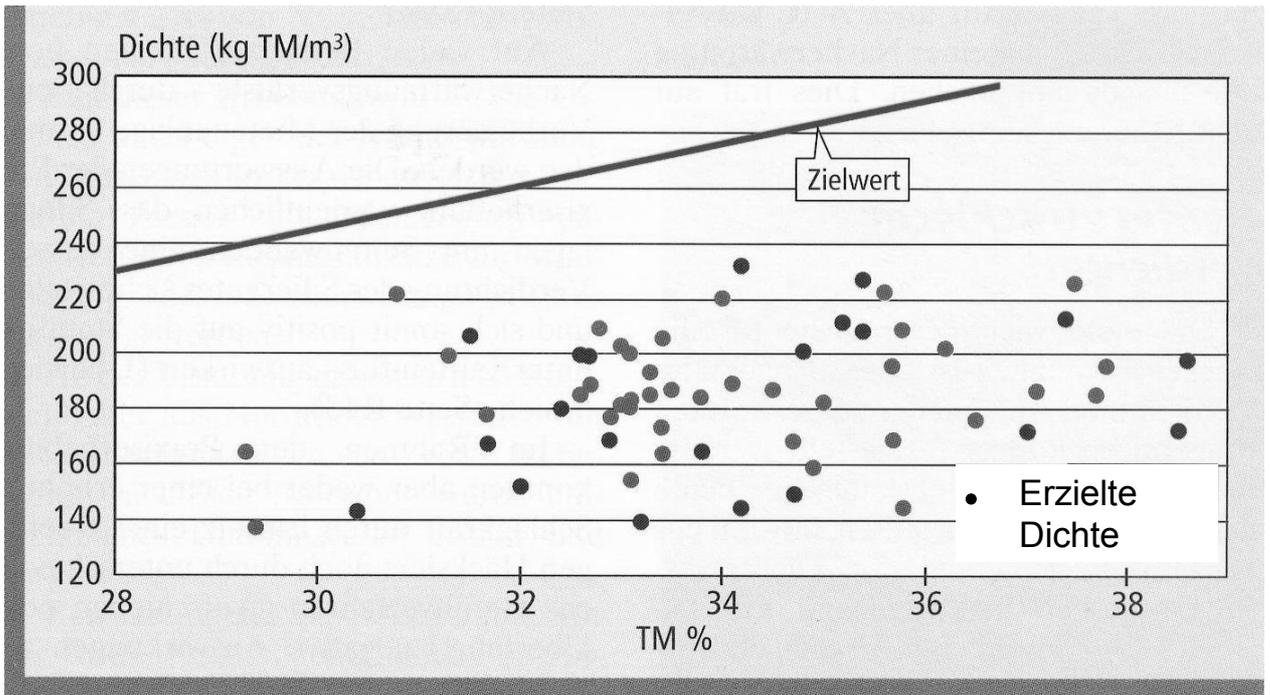


Abb. 6: Gemessene Dichten in Abhängigkeit von Trockenmassegehalt und Walzfahrzeug (modifiziert nach SPIEKERS et al., 2004)

Die aufgewendete Masse der Verdichtungsfahrzeuge lag zwischen 4 und 25 t. Des Weiteren wurde der Einsatz von Zwillingsreifen im Vergleich zur Einfachbereifung untersucht. Hier ergaben sich geringfügige Unterschiede zwischen dem Verdichtungserfolg mit (183 kg TM/m<sup>3</sup>) und ohne Zwillingsbereifung (188 kg TM/m<sup>3</sup>) (SPIEKERS et al., 2004). Die Spannweite der ermittelten Lagerungsdichten aller untersuchten Silagen lag zwischen 137 und 232 kg TM/m<sup>3</sup>. Aus den Werten ergab sich eine mittlere Lagerungsdichte von 186 kg TM/m<sup>3</sup>. Berücksichtigt man den durchschnittlichen Trockenmassegehalt der Silagen (34,1 %), errechnet sich ein anzustrebender mittlerer Zielwert von 270 kg TM/m<sup>3</sup>.

## 2.8.2 Schlauchsilos

Bei der Schlauchsilierung wird das Siliergut mit Hilfe einer Spezialmaschine in einen Schlauch gedrückt und dabei verdichtet (WOBSER, 1993). Durch die Kunststoffhülle wird ein luftdichter Abschluss gewährleistet. Das Prinzip der Schlauchsilierung beruht auf einer hydraulisch angetriebenen Befüllmaschine, bestehend aus Auffangwanne mit Rollboden und rotierenden Presswerkzeugen (Schnecke oder Rotor). Die Geräte haben eine Annahmelleistung von bis zu 120 t/h, in neueren Untersuchungen (STEINHÖFEL, 2001) wird die maximale Annahmelleistung auf 180 t/h beziffert. Der Grad der Verdichtung wird

durch Variation der Vorschubgeschwindigkeit der Maschine bestimmt, die Silagen werden auf 650 bis 800 kg/m<sup>3</sup> verdichtet. Neben einer höheren Futterqualität werden als Vorteile der Schlauchsilierung geringere Silier- und Trockenmasseverluste (2 bis maximal 7 %), keinerlei Randverluste, die Flexibilität bei der Wahl des Lagerortes sowie der Wegfall von Investitionskosten für eine feste Anlage angegeben. Des Weiteren werden optimale Silierbedingungen durch Verkürzung der aeroben Befüllphase, sofortigen Luftabschluss und Kaltgärung durch Sauerstoffentzug angeführt (STEINHÖFEL, 2001). Es besteht ein hohes Maß an Flexibilität bezüglich des Erntegutes und des Verwendungszweckes. Von Nachteil sind die Abhängigkeit von überbetrieblichen Dienstleistungen, die Möglichkeit von Fehleinstellungen durch den Bediener sowie die erschwerte Entnahme durch kleine Anschnittflächen. Obwohl das Verfahren der Schlauchsilierung auf Milchviehbetrieben in den USA sehr verbreitet ist, liegt nur eine geringe Zahl von Untersuchungen zur Schlauchsilierung vor (MUCK und HOLMES, 2005). Silierversuche mit Luzerne und Mais ergaben Lagerungsdichten von 160 bis 270 kg TM/m<sup>3</sup> (MUCK und HOLMES, 2004). Die Trockenmasseverluste werden hier mit 0 bis 40 % beziffert.

### **2.8.3 Untersuchungen zur Verdichtung in Strohpressen**

Bereits im Jahr 1938 führte SKALWEIT erste Untersuchungen an Strohpressen durch, in denen die Verdichtungseigenschaften durch den Zusammenhang von aufgewendetem Pressdruck und die dadurch erzielte Lagerungsdichte (Raumgewicht im Presskanal in kg/m<sup>3</sup>) beschrieben wurden. Jüngere Untersuchungen zielten zum einen auf die Beschreibung der Materialeigenschaften des Erntegutes, zum anderen auf die Beschreibung des Betriebsverhaltens und die Weiterentwicklung der Pressen ab (ORTH und PETERS, 1975). Bei Quaderballen liegt die erreichbare Dichte von Stroh mit etwa 150 kg/m<sup>3</sup> um etwa 30-40 % deutlich höher als bei Rundballen (WOLF-REGETT, 1988). Ein weiterer bedeutender Vorteil ist die technisch bedingte geringere Relaxation der einzelnen Presspakete in der Großballen-Packenpresse im Vergleich zur Normaldruck-Ballenpresse. Die einzelnen Presspakete werden während ihrer Verweildauer im Presskanal mit der Entstehung jedes Presspaketes nachverdichtet, was zu einer Dichtesteigerung des gesamten Ballens führt. Beim Binden des Ballens kommt es zur Expansion, bedingt durch den Überschuss des Bindemittels.

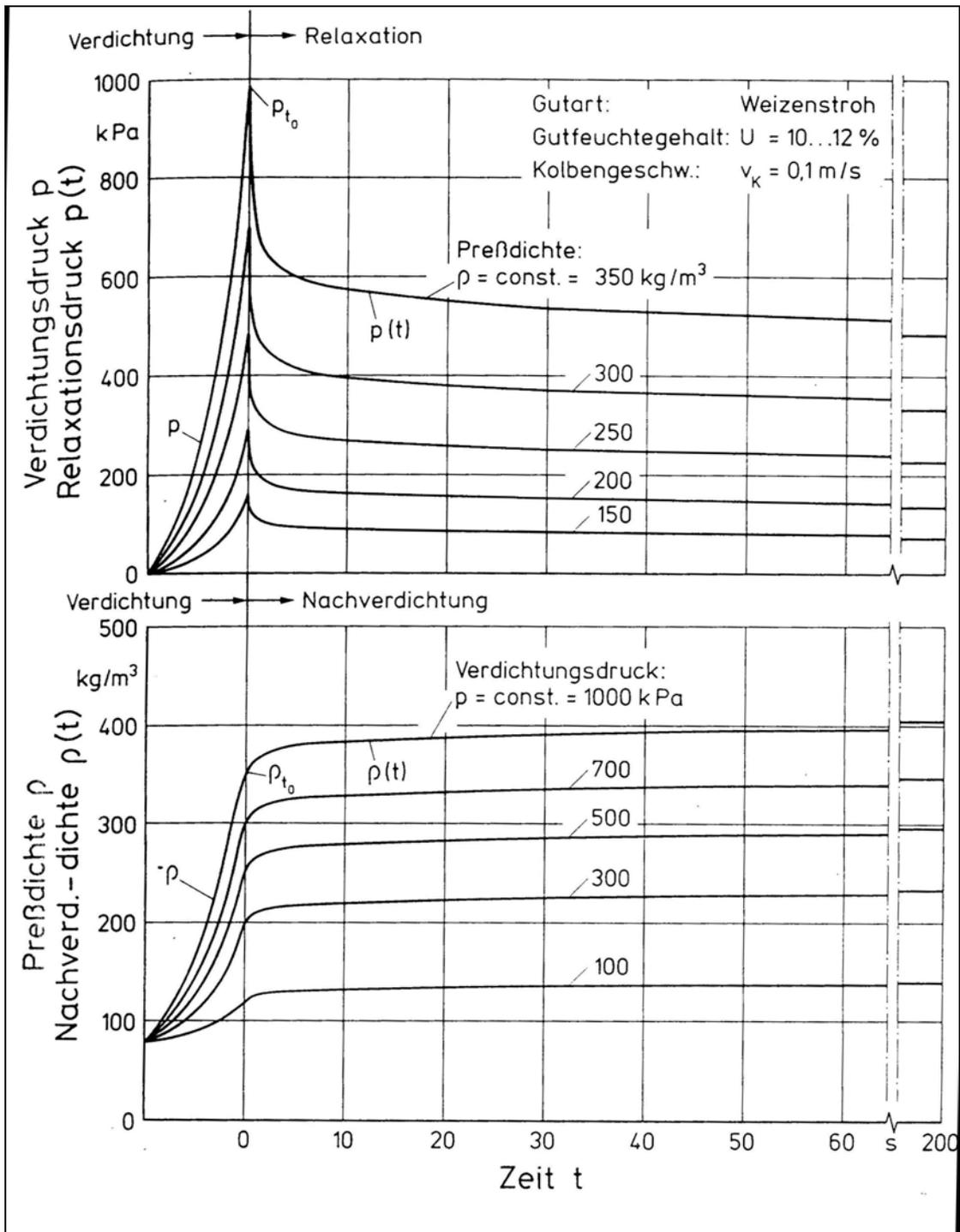


Abb. 7: Verlauf des Relaxationsdruckes  $p(t)$  (oben) und der Nachverdichtungs-dichte  $\rho(t)$  (unten) über der Zeit für jeweils fünf wiederholte Relaxations- bzw. Nachverdichtungsversuche (WOLF-REGETT, 1988)

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse einer Untersuchung an Weizenstroh. Die Graphik zeigt einen deutlichen Anstieg des Verdichtungsdrucks bis zum Erreichen der maximalen

Dichte. Bei konstanter Pressdichte fällt der Druck (Relaxationsdruck) stetig ab. Bei der Nachverdichtung (untere Abbildung) erfolgt ein erneuter steiler Dichteanstieg, bis die maximale Dichte des vorangegangenen Verdichtungsabschnittes erreicht wird. An diesem Punkt nimmt die Steigung der Kurve kontinuierlich ab und erreicht annähernd ein Plateau.

Das Relaxationsverhalten wird durch die Gutart beeinflusst. Grüngut weist ein ausgeprägteres Relaxationsverhalten auf als Stroh. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Gutfeuchte. Mit steigender Gutfeuchte sinkt der Relaxationsdruck im Zeitverlauf. Von besonderer Bedeutung ist der Erntezeitpunkt, da dieser in enger Verbindung zum Rohfasergehalt der Pflanzen steht. Dieser steigt mit fortschreitender Abreife an. Infolgedessen wird auch der Relaxationsdruck erhöht. Dieser Zusammenhang wurde allerdings nur bei Anwelkgut mit Feuchtegehalten von 40-50 % und nicht bei sehr trockenen Gütern (Heu) beobachtet. Eine mechanische Vorbehandlung (Conditioner) ermöglicht einen geringeren Verdichtungsdruck (5-15 %) und führt zu einem zügigeren Abfall des Relaxationsdruckes.

#### **2.8.4 Untersuchungen zur Verdichtbarkeit in Presstöpfen**

Im Vergleich zu Presstopfversuchen ist die nur bedingte Übertragbarkeit von Verdichtbarkeitsuntersuchungen an Pressen bekannt (ORTH und PETERS, 1975). Diese ergibt sich aus Parametern wie Temperatur und Verdichtungsgeschwindigkeit, die am Presstopf nur schwerlich zu simulieren sind. Die Vorteile der Presstopfversuche liegen in der weitestgehenden Standardisierung der Untersuchungen sowie in einem Informationsgewinn bezüglich der Materialeigenschaften mit vergleichsweise geringem Aufwand.

Verdichtungsversuche in Presstöpfen ergaben eine Reihe von Übereinstimmungen im Verdichtungsverhalten verschiedener Materialien (MEWES, 1959). Bei der Untersuchung von Rübenblättern, Gerstenstroh und Heu in einem Presstopf mit einer Querschnittfläche von 225 x 225 mm<sup>2</sup> und 177 mm Höhe stieg die erreichte Dichte mit zunehmendem Druck immer weiter an, die Graphen ließen sich bei doppelt logarithmischer Darstellung nahezu linear darstellen. Deutliche Unterschiede bestanden bei der maximal erreichten Dichte bis zu einem Druck von 10 kg/cm<sup>2</sup>. Als entscheidendes Kriterium für das Verhalten der Stoffe wird deren Feuchtigkeit genannt. Bei Heu mit geringeren Trockenmassegehalten stellte er eine höhere Dichte fest. Auch zwischen den verschiedenen Materialien zeigten sich

deutliche Unterschiede beim erforderlichen Druck zur Umsetzung einer vorgegebenen Soll-Trockensubstanzdichte.

Ein Vergleich verschiedener Materialien hinsichtlich ihres Verdichtungs- und Relaxationsverhaltens beim Pelletieren berücksichtigte sowohl die Trockenmassegehalte als auch die Partikellänge der Materialien (MOHENSIN und ZASKE, 1976). Die Versuche wurden in einem Stahlzylinder mit 38 mm Durchmesser und 254 mm Höhe durchgeführt. Beim Verdichtungsprozess wurde der Zylinder zusätzlich um 180 bzw. 360° gedreht. Ziel war die Messung der maximalen Dichte bei unterschiedlichen Drücken sowie die Messung der Spannungsrelaxation. Die Spannungsrelaxation beschreibt die zeitabhängige Abnahme der Spannung bei konstanter Verformung (BARGEL und SCHULZE, 2005), also die Differenz zwischen dem aufzuwendenden Druck zum Erreichen einer bestimmten Lagerungsdichte und dem Druck, der erforderlich ist, um diese Dichte über eine definierte Zeitspanne beizubehalten. Beim Vergleich von zerschreddertem Heu mit zwei verschiedenen Trockenmassegehalten (92 und 75 % TM) ergab sich für die trockenere Variante eine Spannungsrelaxation von 38 %, für die feuchtere Variante 49 %. Das Beibehalten der Lagerungsdichte erforderte also bei der trockeneren Variante einen höheren Druck als bei der feuchteren. Bei unzerschreddertem Material kehrten sich die Verhältnisse um. Das feuchte Material wies eine Spannungsrelaxation von 65 % auf, für die trockene Variante ergaben sich 60 %.

Der Einfluss des Zerkleinerungsgrades auf den Verlauf der Verdichtungsfunktionen wird auch bei anderen Materialien deutlich. Aufgrund der erheblichen Mengen von Laub, die in Grünanlagen von Stadtgebieten anfallen (SCHEUFLER und MEHRKENS, 1981), ist auch dort eine Optimierung hinsichtlich des zeitlichen und personellen Aufwandes von Vorteil. Die Verdichtungseigenschaften von Laub variieren in Abhängigkeit von Baumart und Zerkleinerungsgrad (physikalische Eigenschaften). Die Ergebnisse eines Presstopfversuches bezüglich der Verdichtbarkeit der Blätter verschiedener Baumarten sind in Abb. 8 dargestellt.

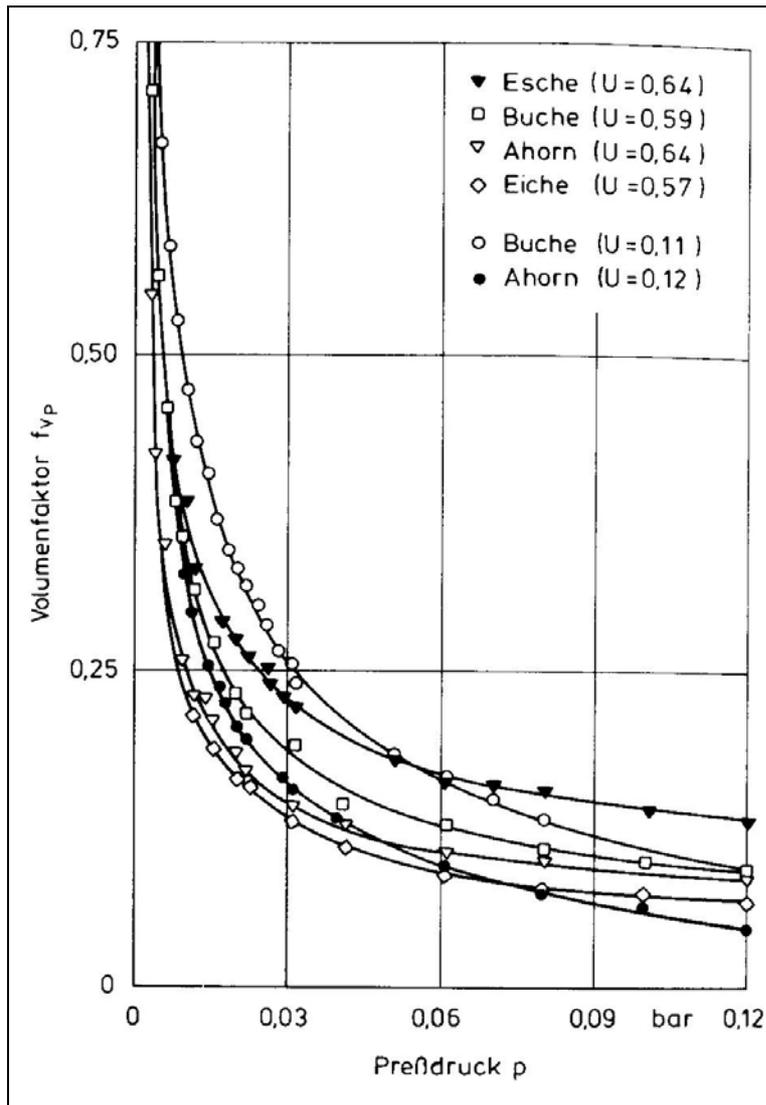


Abb. 8: Volumenfaktoren ( $f_v=V/V_0$ ) bei Verdichtung unterschiedlicher Laubarten mit unterschiedlichen Wasseranteilen ( $U$ ) (SCHEUFLER und MEHRKENS, 1981)

Zunächst fallen alle Kurven steil ab, das Verhältnis von Ausgangsvolumen zu Volumen unter Druckeinfluss wird mit einer Steigerung des Pressdruckes von 0 auf 0,03 bar bereits auf mindestens ein Drittel reduziert. In diesem Abschnitt wird größtenteils Luft aus dem Material gepresst, bei weiterer Verdichtung muss jedoch eine zunehmende Verformung und Verschiebung der Teilchen gegeneinander erfolgen. Somit wird die Steigung der Kurve trotz Drucksteigerung kontinuierlich geringer. Bei der Verdichtung von Eschenlaub flacht die Kurve als erstes ab, was möglicherweise in engem Zusammenhang mit der

geringen Blattgröße des Eschenlaubes und dem daraus resultierenden geringeren Ausgangsvolumen steht. Beim Ahornblatt zeigen sich die höchsten Verdichtungserfolge im Druckbereich 0,09 bis 0,12 bar. Diese Tatsache erklärt sich jedoch durch den sehr geringen Feuchtigkeitsgehalt. Die Blätter brechen wesentlich leichter. Die geringste Volumenänderung zeigt sich bei der kurz gehäckselten Variante. Allerdings hat auch diese möglicherweise ein sehr geringes Ausgangsvolumen.

Bei Verdichtungsversuchen ist neben den bisher genannten physikalischen Eigenschaften auch das Porenvolumen von Interesse (KUTZBACH et al., 1985). Die Verwendung von Mineralöl hat hier den Vorteil, dass die offenen Poren ebenfalls zur Volumenänderung des Materials beitragen können, ohne die Gutfeuchte zu verändern, wie es beim Einsatz von Wasser der Fall wäre. Die Beschreibung der Verdichtungseigenschaften von Mais-, Gersten- und Weizenkörnern an einer Instron-Universalprüfmaschine erfolgte mit Hilfe der Kompressibilität. Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen eingesetztem Verdichtungsdruck und erzielter Volumenänderung. Während sich für Weizen und Gerste nur geringfügige Unterschiede ergaben, wurde die Kompressibilität von Maiskörnern deutlich vom Feuchtegehalt beeinflusst. Bei Mais zeigte sich eine deutliche Zunahme der Kompressibilität mit steigender Feuchte. Da Wasser jedoch nahezu inkompressibel ist, muss diese Steigerung der Kompressibilität in Veränderungen der Materialeigenschaften des Maiskorns begründet sein. Eine Begründung für diese Art von Veränderungen kann lediglich gemutmaßt werden. Es besteht die Möglichkeit, dass sich längere Moleküle in feuchtem Zustand leichter verschieben lassen. Die Veränderung der Kompressibilität könnte jedoch auch auf eine erhöhte Atmungstätigkeit und eine resultierende höhere Gasmenge in der Zellflüssigkeit eines feuchten Korns zurückzuführen sein.

Maishäckselgut ist im Gegensatz zu den oben beschriebenen Materialien ein inhomogenes Gut, dessen Einzelkomponenten (Körner, Spindeln, Lieschen, Stängelanteile) sehr unterschiedliche physikalische Eigenschaften haben (KROMER, 1993). Die sehr unterschiedlichen Schüttdichten der Einzelkomponenten verdeutlichen diese Unterschiede (Tab. 7).

Tab. 7: Schüttdichten verschiedener Pflanzenteile von Mais in Abhängigkeit von TM-Gehalt und Häcksellänge (modifiziert nach KROMER, 1993)

<b>Pflanzenteil</b>	<b>Angenommener TM-Gehalt [%]</b>	<b>Häcksellänge [mm]</b>	<b>Schüttdichte [kg/m<sup>3</sup>]</b>
Maiskörner	75	—	656
Maiskolben	69	—	448
Maisspindeln	25 - 34	—	140 - 180
Gesamtpflanze	25	10	220 - 280
	35	10	209
	35	5 <sup>*)</sup>	234

<sup>\*)</sup> mit Nachzerkleinerung

Folglich ist bei Verdichtungsversuchen an Maishäckselgut ein Rückschluss auf die Materialeigenschaften des Gemisches erschwert.

Presstopfversuche an Maishäckselgut ergaben einen deutlichen Einfluss des Verdichtungsdrucks auf die erzielte TM-Dichte (DERNEDDE und HONIG, 1977). Gegenstand der Untersuchung war Maishäckselgut mit einem Trockenmassegehalt von 26 – 29 %. Abbildung 9 zeigt die erreichten Trockenmassedichten in Abhängigkeit vom Belastungsdruck nach 24 Stunden Belastungsdauer.

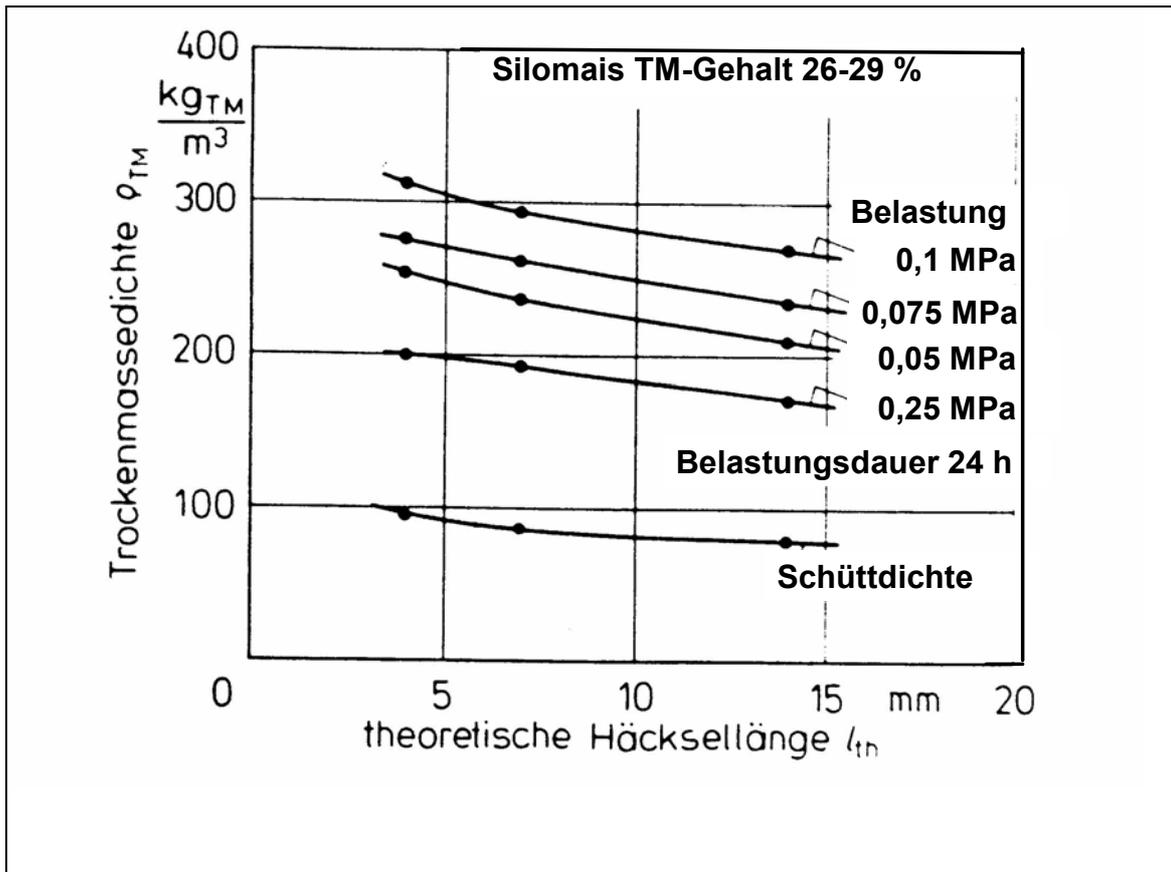


Abb. 9: Einfluss der Häcksellänge auf die Trockenmassedichte (modifiziert nach DERNEDDE und HONIG, 1977)

Mit steigendem Belastungsdruck steigt die erzielte TM-Dichte im Vergleich zur Schüttdichte. Eine Drucksteigerung von 0,25 auf 1 bar führt bei der 4 mm-Variante zu einer Steigerung der Lagerungsdichte von 200 auf 310  $kg_{TM}/m^3$ .

Neben dem Einfluss des Verdichtungsdruckes auf Material mit unterschiedlicher Häcksellänge wurde Material untersucht, das mit und ohne Aufbereiter gehäckselt wurde. Durch die Nachzerkleinerung konnte die TM-Dichte um etwa 20 % erhöht werden.

Bei Presstopfversuchen wurde darauf hingewiesen, dass nicht nur der Druck und die damit erzielte Materialdichte zu bewerten sei, sondern vielmehr eine explizite Differenzierung der angewandten Kräfte erfolgen müsse (ORTH und PETERS, 1975). Hier werden unter anderem die Wandkraft, die Bodenkraft und die Seitenkraft genannt.

## 2.9 Untersuchungen zum Einfluss der Verdichtung auf die Nacherwärmung

Das Projekt „Nacherwärmung“ der Landwirtschaftskammer NRW verdeutlichte die zu geringen Verdichtungserfolge in Praxisbetrieben (SPIEKERS et al., 2004). Mit dem Ziel, den Effekt der geringen Lagerungsdichten nach Öffnung der Silos zu untersuchen, wurden Temperaturmessungen an den Anschnittflächen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 10 dargestellt.

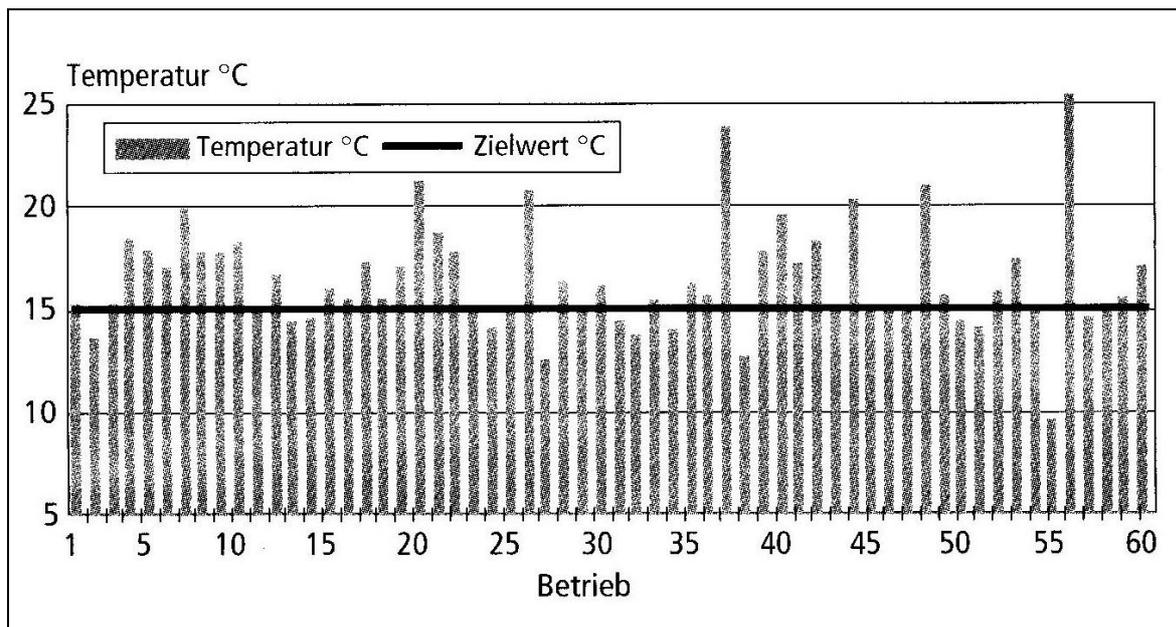


Abb. 10: Temperaturen in 60 Maissilos (SPIEKERS et al., 2004)

Bei den Temperaturmessungen wurde ein Zielwert von 15°C zu Grunde gelegt. Dies entspricht dem Grenzwert der Nacherwärmung nach der Definition von SPIEKERS et al. (2004). Mehr als die Hälfte (56 %) der untersuchten Silagen lagen über diesem Grenzwert. Über 10 % der Silos erreichten Temperaturen von 20°C und mehr. Diese deutliche Nacherwärmung resultiert aus deutlich unterschrittenen Soll-Dichten.

## 2.10 Entnahmetechnik

Voraussetzung für den Erhalt der Stabilität einer Silage ist eine schonende Entnahmetechnik. Vermeidung von Auflockerungen und eine glatte Anschnittfläche ohne lose Silagereste führen zu einem Erhalt der Lagerungsdichte im Anschnittbereich und somit zu einer Minimierung des Sauerstoffeintrittes in den Futterstock (HONIG, 1974; RUSER et al., 2003). Bei einer festen Anschnittfläche, guter Verdichtung und Abdeckung sind in Abhängigkeit der Lagerungsdauer außerhalb des Silos Trockenmasseverluste von 0,1 % (1 Tag Lagerung im Stall) und 1,3 % (4 Tage Lagerung im Stall) zu erwarten (PAHLOW, 2000). Bei einer lockeren Anschnittfläche und mäßiger Siliertechnik steigen diese Werte auf 2,0 % (1 Tag Lagerung im Stall) bzw. 15 % (4 Tage Lagerung im Stall) an. Die Auflockerung der Anschnittfläche und die entstehenden Unebenheiten sind in hohem Maße von der eingesetzten Entnahmetechnik abhängig (HONIG, 1974). Im Folgenden sollen die Entnahmetechniken kurz beschrieben werden, eingehende Darstellungen sind der Literatur zu entnehmen (SCHÖN, 1998).

Der Blockschneider wird an der Dreipunkthydraulik des Schleppers angebaut. Die Vorteile des Siloblockschniders liegen in den vergleichsweise geringen Anschaffungskosten, dem schnellen Entnahmevergange und der Erzeugung einer glatten Anschnittfläche (ANONYM, 1994). Von Nachteil sind die begrenzte Schnitthöhe (maximal 2 m Silohöhe) sowie die Notwendigkeit eines leistungsstarken Schleppers.

### *Fremdbefüllung*

Bei der Fremdbefüllung werden die Geräte zur Entnahme an einen Schlepper oder einen Radlader angebaut. Ziel ist die Befüllung eines Futtermisch- oder Futtermittelwagens. Der Vorteil dieser Methode ist die zügige und unproblematische Aufnahme jeglicher Futterarten. Nachteile stellen die hohen Kosten sowie lange Rüst- und Nebenkosten dar.

Bei der Verwendung einer (Frontlader-)Schaufel sind die zügige Arbeitsweise sowie die unproblematische Handhabung positiv zu bewerten. Bezüglich der Entnahmeequalität ist der Frontlader jedoch nicht empfehlenswert, da er die Anschnittfläche stark auflockert und zu Futterverlusten führt.

Die Greifschaufel ähnelt der Schaufel, allerdings ist die Greifschaufel mit bogenförmigen Zinken ausgestattet, die das Futter bei der Entnahme in der Schaufel festhalten. Diese Ausstattung macht die Greifschaufel vielseitig einsetzbar, die Futterverluste sind nur

gering. Nachteilig ist auch hier die Gefahr der Auflockerung, die sowohl von den technischen Eigenschaften der Schaufel, den physikalischen Eigenschaften des Futterstocks und von der Geschicklichkeit des Bedieners abhängt.

Silageschneidezangen eignen sich sowohl für das Befüllen von Futtermisch- und Verteilwagen als auch für das Verteilen ganzer Siloblöcke. Positiv ist die hohe Entnahmegeschwindigkeit, allerdings ist die Anschnittfläche weniger glatt als bei einem Siloblockschneider. Für loses Futter sind die Silageschneidzangen ungeeignet, Maissilagen können ebenfalls verstärkt von Bröckelverlusten betroffen sein. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dieser Problematik durch Schaufeleinsätze oder vollständig geschlossene Schaufeln entgegen zu wirken. Des Weiteren besteht auch hier die Gefahr des Auflockerns der Anschnittfläche durch unvollständige Schnittleistung und Rückfederung bei der Entnahme durch mangelnden Gegendruck.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass bei Fremdbefüllung durch unsachgemäße Bedienung das Risiko von Silo-Auflockerungen wesentlich größer ist als bei Techniken, die das gesamte Silo von oben nach unten schneiden bzw. aufnehmen. In der Kombination von „unsicherer Technik“ und „schlechter Bedienung“ ist das Risiko der Nacherwärmung am größten.

### ***Selbstbefüllung***

Die Silofräse wird in der Regel als Anhängerteil für den Fräsmischwagen eingesetzt. Von Vorteil sind die geringe Auflockerung des Silostockes sowie die gerade Anschnittfläche und die hohe Entnahmeleistung. Nachteilig ist der hohe Leitungsbedarf, der von Fassungsvermögen und Mischaggregat abhängig ist (WILHELM und WURM, 1999). Des Weiteren entstehen Probleme durch Futter, das während des Entnahmeproganges zu Boden gefallen ist und von dort aufgefräst werden muss. Stumpfe Messer können zu einem Auflockern der Anschnittfläche führen. Allerdings treten diese Nachteile in der Regel bei angehängten Geräten auf, so dass die Selbstfahrer als hervorragende Entnahmetechnik betrachtet werden können.

Schneidschilder sind eine verbreitete Entnahmetechnik für angehängte Futtermischwagen. Die Vorteile des Schneidschildes liegen in der nahezu verlustfreien Entnahme und der glatten Anschnittfläche, die allerdings leichte Wölbungen aufweisen kann. Der Wartungsaufwand ist vergleichsweise hoch.

Die Funktionsweise von Stanzschilden entspricht der von Schneidschilden mit dem Unterschied, dass bei den Stanzschilden nicht mit einem beweglichen Doppelmesser, sondern mit einem starren Stanzmesser gearbeitet wird. Die Wartungsarbeiten des Stanzschildes sind im Vergleich zum Schneidschild geringer. Zusätzlich erreicht das Stanzschild eine größere Arbeitshöhe und ist weniger kostspielig in der Anschaffung.

Reißkämme oder Kratzschilder stellen ebenfalls eine Form von Entnahmeschilden dar, allerdings sind sie nicht mit Messern, sondern mit Zinken ausgestattet. Der Grad der Auflockerung ist in hohem Maße von dem Geschick des Fahrers abhängig (ANONYM, 1994). Von Vorteil sind geringe Anschaffungskosten und ein geringer Wartungsaufwand.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Versuchsaufbau

##### 3.1.1 Versuchsaufbau im Erntejahr 2003

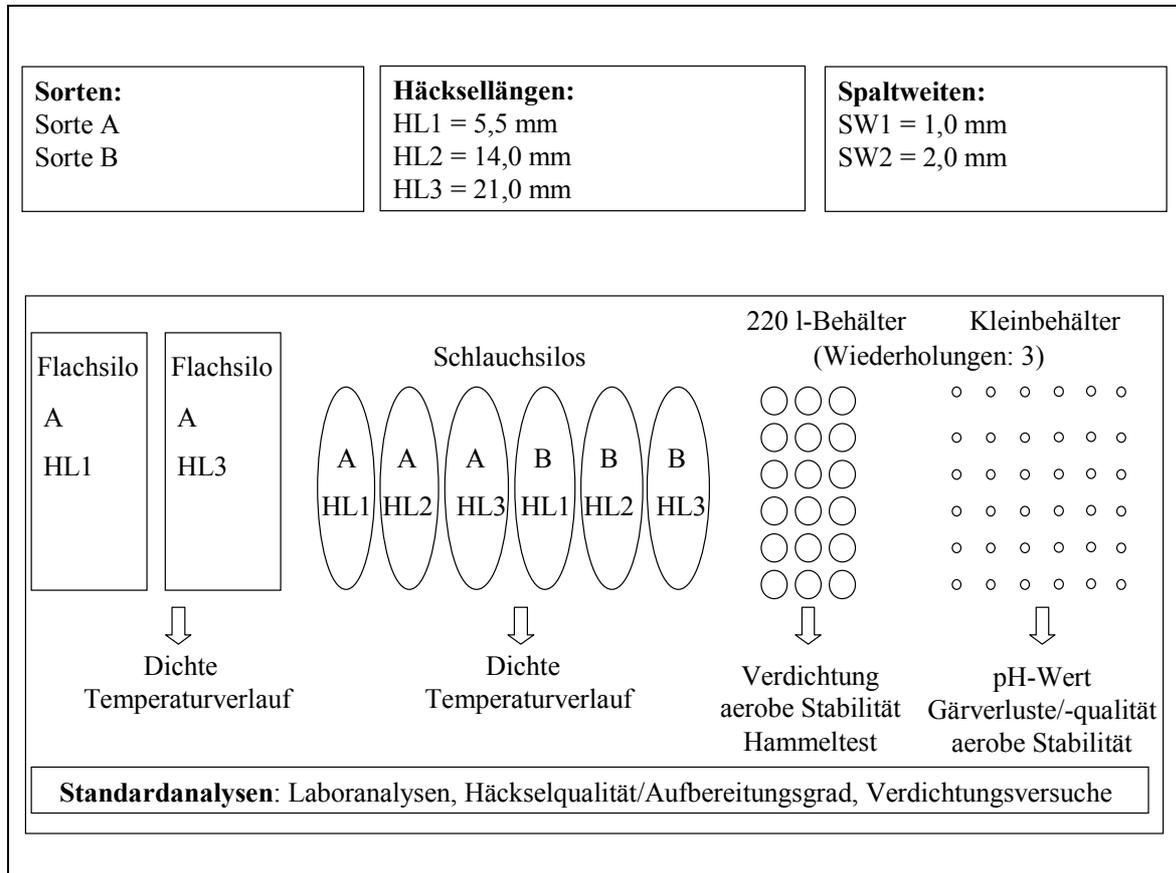


Abb. 11: Versuchsaufbau im Erntejahr 2003

Im Jahr 2003 wurden auf den Flächen der Lehr- und Versuchsanstalt für Tierhaltung der Landwirtschaftskammer NRW, „Haus Riswick“, in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen zwei Maissorten (A und B) angebaut (Abb. 11). Die Sorten wurden in drei verschiedenen Häcksellängen (5,5; 14,0 und 21,0 mm) und zwei Spaltweiten (1,0 und 2,0 mm) des Aufbereiters („Corn Cracker“) gehäckselt. Die Sorteneigenschaften sowie die verschiedenen Varianten sind in Tab. 8 dargestellt. Zusätzlich ist eine Variantenübersicht im Einband der Arbeit als Faltblatt eingefügt.

Tab. 8: Sorteneigenschaften und Varianten im Erntejahr 2003

Sorte	Eigenschaften	Varianten		
		Häcksellänge [mm]	Spaltweite [mm]	Bezeichnung
A "Oldham"	qualitätsbetont, leichter "greening-effect"	5,5	1,0	A HL 5,5 SW 1,0
		14,0	1,0	A HL 14,0 SW 1,0
		21,0	1,0	A HL 21,0 SW 1,0
		5,5	2,0	A HL 5,5 SW 2,0
		14,0	2,0	A HL 14,0 SW 2,0
		21,0	2,0	A HL 21,0 SW 2,0
B "PR 39 G 12"	restpflanzenbetont, ausgeprägter "greening-effect"	5,5	1,0	B HL 5,5 SW 1,0
		14,0	1,0	B HL 14,0 SW 1,0
		21,0	2,0	B HL 21,0 SW 2,0

Zur Ernte der Silomais-Bestände wurde ein selbstfahrender Feldhäcksler (CLAAS Jaguar 890) mit einer 24-Messer-Trommel eingesetzt. Die Einstellung der theoretischen Schnittlänge erfolgte bei konstanter Trommeldrehzahl über die Geschwindigkeit der Vorpresswalzen.

Als praxisübliches Konservierungsverfahren wurden Flach- und Schlauchsilos angelegt. Aufgrund der begrenzten Anbaufläche wurde ausschließlich die Sorte A in den beiden Extremvarianten (5,5 und 21,0 mm) in Flachsilos einsiliert.

Um alle drei Häcksellängen der zwei Sorten untersuchen zu können, wurden für die Untersuchung sechs Schlauchsilos mit einheitlicher Verdichtung im Schlauch angelegt. Schlauchsilos haben den Vorteil, dass sie für Versuchszwecke kleine Versuchseinheiten (2,40-2,70 m Durchmesser, 10-15 m Länge) darstellen und gleichzeitig die Möglichkeit des *praxisnahen* direkten Vergleichs bieten.

Des Weiteren wurden Kleinsilos (220 l-Behälter) und Siliergläser jeweils in dreifacher Wiederholung angelegt. Bei den Kleinsilos handelte es sich um Kunststoffbehälter mit einem Fassungsvermögen von 220 l. Ihr Vorteil besteht in der Möglichkeit der schichtweisen Befüllung und Verdichtung und damit einer besseren Vergleichbarkeit zur praxisüblichen Silobefüllung und -verdichtung. Des Weiteren ermöglichen die kleinen Einheiten eine mehrfache Wiederholung eines Verdichtungs Vorganges.

Die Siliergläser dienen der Beschreibung des Ausgangsmaterials hinsichtlich aerober Stabilität, pH-Wert-Verlauf und Gärqualität im Labormaßstab.

### 3.1.2 Versuchsaufbau im Erntejahr 2004

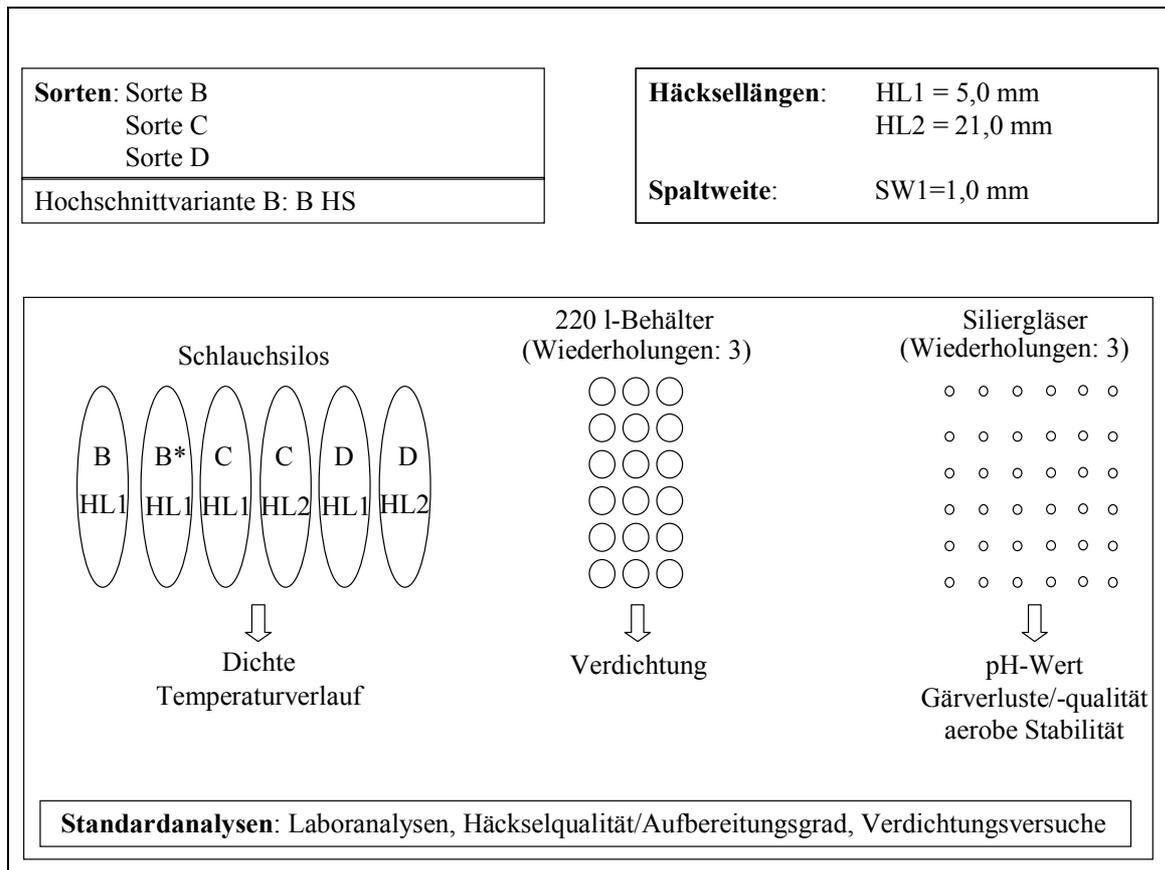


Abb. 12: Versuchsaufbau im Erntejahr 2004

Im Versuchsjahr 2004 wurden ebenfalls auf „Haus Riswick“ drei verschiedene Sorten (B, C, D) angebaut und in zwei Häcksellängen (5,0 und 21,0 mm) gehäckselt (Abb. 12). Die Ausnahme stellte die Sorte B dar, die ausschließlich auf 5,0 mm gehäckselt wurde. Die Variation bestand hier in einem Hochschnitt (70 cm Stoppelhöhe, B HS) und einer in konventioneller Höhe gehäckselten Variante. Die Spaltweite des Corn Crackers lag bei allen Varianten konstant bei 1,0 mm. Tabelle 9 zeigt die Sorteneigenschaften und die gehäckselten Varianten.

Tab. 9: Sorteneigenschaften und Varianten im Erntejahr 2004

Sorte	Eigenschaften	Varianten		
		Häcksellänge [mm]	Spaltweite [mm]	Bezeichnung
<b>B</b> "PR 39 G 12"	restpflanzenbetont, ausgeprägter "greening-effect"	5,0	1,0	B HL 5,0
		5,0	1,0	B HL 5,0 HS*
<b>C</b> "Moncada"	qualitäts- und ertragsbetont, ausgeprägter "greening-effect"	5,0	1,0	C HL 5,0
		21,0	1,0	C HL 21,0
<b>D</b> "Delitop"	qualitäts- und ertragsbetont, leichter "greening-effect"	5,0	1,0	D HL 5,0
		21,0	1,0	D HL 21,0

\*HS=Hochschnitt

In diesem Erntejahr wurde wiederum ein selbstfahrender Feldhäcksler (John Deere 7500) eingesetzt. Die Häcksellänge wurde über die Geschwindigkeit der Vorpresswalzen eingestellt, zusätzlich wurde die übliche 56-Messer-Trommel durch eine 48-Messer-Trommel ersetzt. Aufgrund der Ergebnisse des Vorjahres wurde die Vorgehensweise bei den Untersuchungen geringfügig verändert. Auf diese Details soll im Folgenden eingegangen werden.

### 3.1.3 Charakterisierung des Ausgangsmaterials

Um die Vergleichbarkeit des Ausgangsmaterials zu gewährleisten, wurden nach der Ernte die Inhaltsstoffe nach den Methoden des Verbands Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA, 1993) bestimmt. Des Weiteren wurden die Körner von den Restpflanzenanteilen im Häckselgut nach dem Sedimentationsprinzip getrennt. Die Längenfractionierung des Häckselgutes wurde nach einer standardisierten Methode mit einem Siebturm (Rundlochsieb) gemäß DIN 24041 durchgeführt. Zur Klärung methodischer Fragen wie Reproduzierbarkeit und Einfluss des Trocknungsvorganges wurde sowohl frisches als auch getrocknetes Material gesiebt (Siebdauer 5 Minuten mit einer Intervallschaltung im Verhältnis Laufzeit zu Ruhezeit von

30 s zu 1 s). Die Einwaage betrug jeweils 100 g, nach der Siebung ermöglichte die Rückwaage der Einzelfractionen die Berechnung der prozentualen Massenanteile von acht Größenklassen.

Im Erntejahr 2004 wurde zusätzlich eine Siebung mit dem „Penn State Particle Separator“ („Schüttelbox“) durchgeführt. Diese ist in Kapitel 2.7.3.1 beschrieben. Die Schüttelbox ermöglicht zwar eine weniger spezifizierte Größenklassenverteilung, findet jedoch in zahlreichen Untersuchungen Anwendung, insbesondere mit ernährungsphysiologischem Hintergrund. Somit ermöglicht diese zusätzliche Siebanalyse eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungsergebnissen.

Die Charakterisierung des Ausgangsmaterials (Inhaltsstoffe, Häcksellängenverteilung) ist grundlegend, um Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich Verdichtbarkeit und Silagequalität interpretieren zu können.

### 3.1.4 Materialprüfmaschine



Abb. 13: Materialprüfmaschine

Zur Untersuchung der Verdichtbarkeit an der Materialprüfmaschine wurde eine eigene Methode entwickelt. Das Häckselgut wird lose in einen Kunststoffzylinder mit einer Höhe von 30 cm eingefüllt und über einen Stempel mit einer Geschwindigkeit von 90 mm/min mit einer Materialprüfmaschine (Firma Zwick, Abb. 13) verdichtet. Die Höhe des Zylinders entspricht der Schichtdicke von 30 cm auf dem Flachsilo, die nach der offiziellen Beratung in der Praxis empfohlen wird.

Bei der Verdichtung mit der Materialprüfmaschine kann ein maximaler Druck von 0,45 MPa erreicht werden. Typische Belastungen im Silo liegen bei 0,2 MPa. Die Kraft zur Verdichtung des Materials wird über einen Kraftaufnehmer kontinuierlich gemessen, über den Weg aufgezeichnet und führt somit zu *Kraft-Weg-Diagrammen*. Die Kenntnis der eingewogenen Masse und des Zylindervolumens ermöglicht die Erstellung von *Druck-Dichte-Diagrammen*. Zusätzlich zu Dichteverlauf und maximaler Verdichtbarkeit ist auch die Rückfederung des Materials in die Betrachtung mit einzubeziehen. Dazu wird nach der Verdichtung und vorgegebener Wartezeit die Füllhöhe im Zylinder gemessen. Sowohl der Einfluss der Belastungsdauer als auch der Einfluss der Wartezeit vor Messung der Rückfederung wurden in Vorversuchen geprüft. Pro Variante wurden 6 Wiederholungen

angesetzt. Im Versuchsjahr 2004 wurden neben den Untersuchungen mit 0,45 MPa zusätzlich Verdichtbarkeitsuntersuchungen mit 0,2 MPa durchgeführt. Ziel war eine Verdichtung mit praxisüblichem Druck. Das mehrfache Überfahren durch den Schlepper wurde durch eine dreifache Verdichtung derselben Probe simuliert.

Die Untersuchungen mit der Materialprüfmaschine sind für das Projekt von besonderer Bedeutung: Sie ermöglichen eine Beschreibung der Materialeigenschaften unter standardisierten Bedingungen (PEIJS, 1998) und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse über den Bereich der Landwirtschaft hinaus.

### **3.1.5 Untersuchungen an den verschiedenen Siloformen**

#### **3.1.5.1 Siliergläser**

Die Untersuchungen in Siliergläsern bezüglich Temperaturverlauf (aerobe Stabilität) werden von der Lehr- und Versuchsanstalt für Tierhaltung der Landwirtschaftskammer NRW, „Haus Riswick“, nach den „DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichenfähigkeit“ (DLG, 2000) durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine standardisierte Methode, die eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Untersuchungen ermöglicht. Das Häckselgut wird für drei verschiedene Untersuchungen in dreifacher Wiederholung in Siliergläser gegeben, so dass pro Variante neun Gläser anzulegen sind. Die Gläser für die erste Untersuchung werden bereits am 2. Tag zwecks pH-Wert-Messung geöffnet. Der Verlauf des pH-Wertes gibt Aufschluss über die Konzentration von Milchsäure im Häckselgut und damit über den Silierverlauf des Materials. Drei weitere Gläser werden am 28. und 42. Tag geöffnet, um Luftstress zu induzieren. Nach 49 Tagen werden sie zur Untersuchung der aeroben Stabilität geöffnet. Die aerobe Stabilität dient der Untersuchung der Temperaturentwicklung unter Luftzutritt. Die Silage wird zu diesem Zweck in Dosen umgefüllt, die mit Temperaturfühlern ausgestattet sind und die Temperatur protokollieren. Die Silage gilt so lange als aerob stabil, bis ihre Temperatur die Umgebungstemperatur um 3 K übersteigt.

Die verbleibenden drei Gläser dienen der Kalkulation von Gärverlusten und der Bewertung der Gärqualität. Sie werden nach Ablauf von 90 Tagen geöffnet. Zur Bestimmung der Gärverluste werden die Gläser zu Beginn der Silierung und nach Beendigung des Siliervorgangs gewogen. Aus der Massedifferenz können die Trockensubstanzverluste

bestimmt werden. Anhand der Analyse von Weender Rohnährstoffen, Gärsäuremuster, sowie Alkohol und  $\text{NH}_3$  wird die Silagequalität beschrieben.

### 3.1.5.2 Kleinsilos (220 l-Behälter)

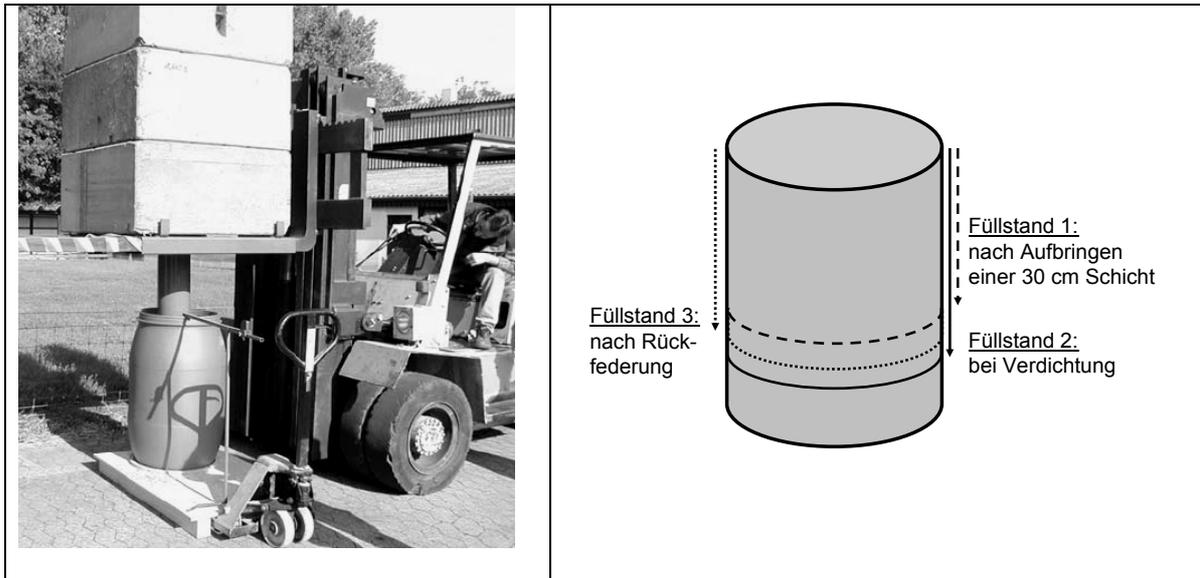


Abb. 14: Versuchsaufbau zur standardisierten Verdichtbarkeitsmessung in Kleinsilos

Bei der Verdichtung und Silierung von Häckselgut in Kleinsilos (Abb. 14) handelt es sich um eine von der Arbeitsgruppe modifizierte Methode. Aufgrund einer praxisüblichen, schichtweisen Verdichtung, die gleichzeitig standardisiert ist, stellt sie eine Methode dar, die als Zwischenstufe zwischen Labor- und Praxismaßstab eingestuft werden kann. Das Material wird in den Behälter eingefüllt, bis eine Füllhöhe von 30 cm (entsprechend der Schichtdicke im Silo) erreicht wird. Die eingefüllte Masse wird durch Wägung ermittelt. Das Erntematerial wird mit einem Druck von 0,2 MPa verdichtet. Um diesen Druck zu erreichen, wird mittels eines Gabelstaplers die Masse von 5 t (Betongewicht) über einen Stempel auf eine Metallplatte mit 56 cm Durchmesser abgesetzt und nach einem vorher festgelegten Zeitraum (1 Minute) wieder angehoben. Über den Füllstand vor der Verdichtung, nach der Verdichtung und der sich ergebenden Rückfederung können Aussagen zur erreichten Dichte gemacht werden. Nachdem die erste Schicht auf diese Weise verdichtet wurde, wird die nächste Schicht in den Behälter eingefüllt und auf

dieselbe Weise verdichtet. Nach dieser Methode wird fort gefahren, bis die volle Fasshöhe erreicht ist. In der Regel ist dies nach dem Einbringen von 5 Schichten der Fall. Sofort nach Abschluss der schichtweisen Verdichtung werden die Fässer einzeln luftdicht verschlossen und für die Dauer von 6 Monaten gelagert.

Die Verdichtungsversuche in den Kleinsilos wurden in dreifacher Wiederholung durchgeführt.

Nach Ablauf von 6 Monaten wurden die Kleinsilos geöffnet. Das silierte Material wurde hinsichtlich der Inhaltsstoffe und des Gär säuremusters untersucht. Um aeroben Stress zu induzieren, wurden die Fässer nach Ablauf von 90 Tagen in geöffnetem Zustand bei etwa 18°C Außentemperatur gelagert. Dabei wurde der Temperaturverlauf mit Hilfe von Messsonden erfasst.

### **3.1.5.3 Schlauchsilos**

Eine Möglichkeit des praxisnahen direkten Vergleichs der Silagequalität und Langzeitstabilität verschiedener Sorten- und Häcksellängen besteht in der Anlage von Schlauchsilos. Schlauchsilos haben den Vorteil, dass sie für Versuchszwecke kleine Versuchseinheiten darstellen. Darüber hinaus ist eine standardisierte Verdichtung für Vergleichszwecke möglich. Dabei lassen die vergleichsweise kleinen Anschnittflächen eine variable Vorschubgeschwindigkeit zu. Für die Untersuchung wurde der Verdichtungsaufwand im Schlauch für alle Varianten einheitlich eingestellt.

Im Versuchsjahr 2003 erfolgte die Schlauchbefüllung mit einer Schlauchpresse des Typs Euro-Bagger („Roto Press“, LKW-Version) am 1. und 2. September. Bei diesem Verfahren werden die Schläuche mit einer Schnecke befüllt. Der Durchmesser der Schläuche beträgt 2,40 m. Im ersten Erntejahr betrug die Länge der Schläuche etwa 15 m. Nach Abschluss der Befüllung wurden von oben mittels eines Flügelbohrers im Abstand von 5 m Löcher in die Schläuche gebohrt und Material bis zu einer Tiefe von 1,20 m entnommen, so dass Temperaturmessgeräte in den Kern der Schläuche eingebracht werden konnten. Bei den eingesetzten Messgeräten handelt es sich um Ein-Kanal Temperaturlogger (EN 12830) des Typs testo 175-T1 mit internem Sensor und einem Messbereich von -35 bis +70°C. Die Auflösung beträgt 0,1 K, die Genauigkeit liegt bei +/- 0,5 K. Das Messintervall wurde auf vier Stunden festgelegt. Nach dem Einbringen der Temperaturmessgeräte wurde das entnommene Material wieder in die entstandenen Bohrlöcher zurückgegeben, so dass die

Dichte an diesen Stellen unverändert blieb. Die Temperaturmessgeräte wurden in dreifacher Wiederholung in die Schläuche gegeben.

Die Öffnung der Schlauchsilos erfolgte am 2. April 2004. Die Lagerungsdauer beträgt somit 6 Monate. Die Dichte der Schlauchsilos wurde mit Hilfe der Silogeometrie und der einsilierten Masse errechnet. Nach Abschluss der Silierung wurden mit dem Vorschub Mischproben aus den Schlauchsilos entnommen, das Material wurde auf Inhaltsstoffe und Gärsäuremuster untersucht. Die Entnahme erfolgte mit Hilfe eines Frontladers (Hoftruck, Fa. Zettelmayer).

Im Laufe des Vorschubs wurde im Abstand von zwei bis drei Tagen die Temperatur an der Anschnittfläche der Schlauchsilos gemessen. Hierzu wurden mit einer Temperaturlanze in einer Messtiefe von 0,3 bzw. 0,5 m an drei Messpunkten („Flanke links“, „Mitte“, „Flanke rechts“) Temperaturmessungen durchgeführt.

Im Versuchsjahr 2004 wurde eine Schlauchpresse des Typs Ag-Bag (AG BAG 7000 G Europe) eingesetzt, hier werden die Schläuche per Rotor befüllt. Der Durchmesser der so entstandenen Schlauchsilos betrug 2,70 m, die Länge lag bei 17 bis 20 m. Der Vorteil der Presse bestand unter anderem in der Möglichkeit, durch zwei Klappen an der Vorderseite der Tunnelrückwand Bilanznetze mit den Temperaturmessgeräten an genau definierten Positionen einzubringen, ohne den Schlauch beschädigen zu müssen. Die Bilanznetze dienten zum einen der Kalkulation der Trockenmasseverluste, welche Rückschlüsse auf die Silierqualität zulassen, zum anderen als Schutz für die Temperaturmessgeräte. Die Bilanznetze wurden in jeweils zweifacher Wiederholung sowohl im Kern der Schläuche, als auch im oberen Bereich in der Mitte (etwa 1 m unterhalb der Folie) positioniert. Dieser Vorgang wurde einmal auf einer Länge von 10 m und einmal auf einer Länge von etwa 13 bis 14 m durchgeführt. Die Schlauchsilos wurden vom 7. Oktober 2004 (Erntetermin 2004) bis zum Februar 2005 (knapp 4 Monate lang) gelagert. Die Zeitpunkte der Siloöffnung unterschieden sich aus organisatorischen Gründen bei den 6 Varianten geringfügig. Am 4. Februar 2005 wurde das Schlauchsilo der Variante D 21,0 geöffnet. Es war notwendig, die Länge dieses Schlauchsilos zu reduzieren, um die Erreichbarkeit der anderen Schlauchsilos zu gewährleisten. Die Öffnung der Schlauchsilos der Sorte C erfolgte am 5. Februar. Am 8. Februar wurden die verbleibenden Varianten (*B HL 5,0*; *B HL 5,0 HS* und *D HL 5,0*) geöffnet.

Neben der Erfassung von Silogeometrie und der einsilierten Masse zur Dichteberechnung wurden zusätzlich mit einem Bohrstock (Fa. Pioneer Hi-Bred) horizontal, ausgehend von der Anschnittfläche, Proben entnommen (KLEINMANS et al., 2005). Mit Hilfe des Bohrkernvolumens und der entnommenen Masse wurde die Dichte berechnet. Werte  $<230 \text{ kg TM/m}^3$  wurden durch die Firma Pioneer nach einer Korrekturformel korrigiert. Diese wurde nach Herstellerangaben durch lineare Regression ermittelt und ist unveröffentlicht. Die Entnahme erfolgte wie im Erntejahr 2003 mit Hilfe eines Frontladers (Hoftruck). Mit dem Vorschub wurden die Bilanznetze mitsamt der Datenlogger entnommen. Das Material in den Bilanznetzen wurde nach den Methoden des VDLUFA (1993) auf Inhaltsstoffe und Gärsäuremuster untersucht. Aus den Gewichtsunterschieden und den Trockensubstanzgehalten wurden zusätzlich die Gärverluste für die Bilanznetze bestimmt. Hierzu wurde die Formel nach AUERBACH et al. (1998) angewandt.

Auch an den Anschnittflächen dieser Schläuche wurden Temperaturmessungen durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse des Vorjahres wurden allerdings die Messtiefen auf 0,5 und 1,0 m erhöht.

#### **3.1.5.4 Flachsilos**

Im Versuchsjahr 2003 wurden am 2. September Freigärhaufen ohne Seitenwände auf einer Betonplatte angelegt. Die Verdichtung des Materials erfolgte mit Hilfe eines Radladers (Komatsu, WA 270, 15 t) mit einem praxisüblichen Druck von 0,2 MPa. Dabei wurden jeweils zwei Varianten der Sorte A (5,5 und 21,0 mm) in Flachsilos einsiliert. Die Silos hatten eine Breite von 8 m, die Länge betrug jeweils etwa 25 m.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Temperaturverlauf wurden, ebenso wie in den Schlauchsilos, Temperaturmessgeräte (siehe Kapitel 3.1.6.3) in dreifacher Wiederholung zunächst in Bilanznetze gegeben, um die spätere Entnahme der Messgeräte von der Anschnittfläche aus zu vereinfachen. Die Bilanznetze wurden, nachdem das Silo bis zur Hälfte der Endhöhe befüllt war, im Abstand von 5 m in das Silo eingebracht. Zu diesem Zweck wurde an definierten Positionen auf dem verdichteten Flachsilo Material entnommen. Dieses wurde in Bilanznetze gefüllt, mit einem Datenlogger versehen und in die durch die Entnahme entstandenen Vertiefungen gelegt. Folglich waren die Temperaturmessgeräte nach Beendigung des Einsilierens jeweils im Kern der Silos positioniert.

Die Flachsilos wurden am 13. Februar 2004 geöffnet, somit ergab sich eine Lagerungsdauer von über 5 Monaten.

Die Dichtemessungen in den Flachsilos erfolgte mittels Siloblocksneider und Bohrstockmethode („Siloboy“, Fa. Paus, Borken). Bei dieser Methode wird der Bohrstock, in Form eines Schlagzylinders nahezu vollständig in das Silo geschlagen (BALLHEIMER, 2004). Anhand des Bohrstockvolumens und der Trockenmasse der entnommenen Silage wird die TM-Dichte berechnet.

Das Material aus den Flachsilos wurde mit einem selbstfahrenden und selbstbefüllenden Futtermischwagen der Firma „Siloking“ entnommen. Die Entnahme am Silo erfolgte durch eine Entnahmefräse mit 1,80 m Breite. Im Laufe des Vorschubes wurden Proben des einsilierten Materials entnommen, die in Form einer Mischprobe auf Inhaltsstoffe und Gärsäuremuster gemäß VDLUFA (1993) untersucht wurden.

Die Temperaturmessungen an den Anschnittflächen der Flachsilos erfolgten in Messtiefen von 0,3 und 0,5 m im Abstand von 2 bis 3 Tagen.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Ergebnisse der Vorversuche

#### 4.1.1 Vorversuch zur Körnerseparation

Die Ergebnisse des Vorversuches zur Körnerseparation sind in Tabelle 10 dargestellt. Die Körneranteile von getrocknetem Häckselgut liegen zwischen 32 und 45 Massen-%. Die Werte der Sorte A übersteigen mit einer Ausnahme signifikant die Werte der Sorte B.

Tab. 10: Massenanteile der Körner an getrocknetem Häckselgut ( $\bar{x} \pm s$ )

Sorte	Häcksellänge [mm]	Spaltweite [mm]	Körneranteil [%]
<b>A</b>	5,5	1,0	40 <sup>a</sup> ± 1
	14,0		43 <sup>a</sup> ± 0
	21,0		42 <sup>a</sup> ± 5
	5,5	2,0	45 <sup>a</sup> ± 2
	14,0		43 <sup>a</sup> ± 3
	21,0		34 <sup>b</sup> ± 3
<b>B</b>	5,5	1,0	32 <sup>b</sup> ± 1
	14,0	1,0	34 <sup>b</sup> ± 1
	21,0	2,0	33 <sup>b</sup> ± 3

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

#### 4.1.2 Vorversuche zur Partikellängenfraktionierung

Die Ergebnisse der Siebung von erntefeuchtem Häckselgut sind in Abbildung 15 dargestellt.

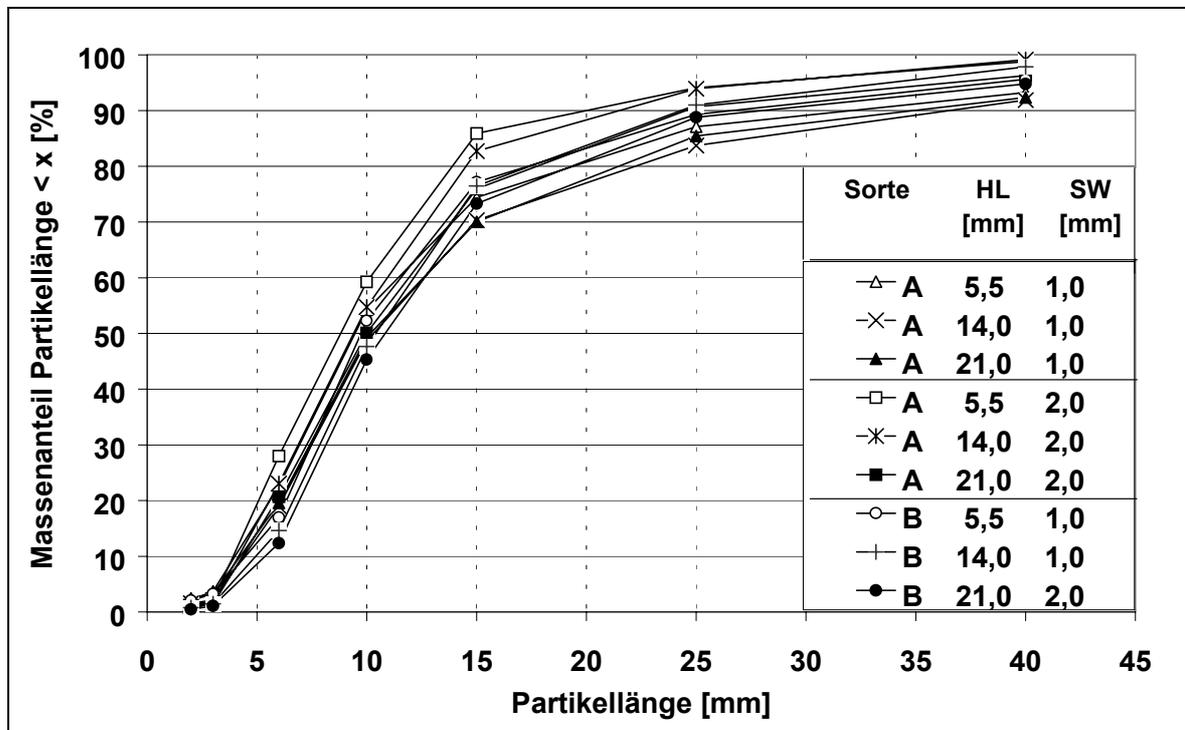


Abb. 15: Größenklassenverteilung von erntefeuchtem Häckselgut im Erntejahr 2003

In den Größenklassen  $x < 2$  und  $x < 3$  mm zeigt sich kein klarer Einfluss der Häcksellänge auf die Partikellängenfraktionierung. In der nächsten Größenklasse ( $x < 6$  mm) ist ein tendenzieller Einfluss der theoretischen Häcksellänge erkennbar. Die 5 mm-Varianten haben einen geringfügig höheren Anteil innerhalb derselben Sorte bzw. Aufbereitereinstellung. In der Fraktion  $x < 10$  mm zeigen sich ähnliche Tendenzen. Hier ergeben sich allerdings für die Varianten *A HL 5,5 SW 1,0* bis *A HL 21,0 SW 1,0* geringere Massenanteile, während in den Größenklassen  $x < 15$  mm keine Tendenzen erkennbar sind.

Die höchsten Massenanteile liegen bei allen Varianten in den Bereichen  $x < 25$  mm, die Häcksellänge ist ohne gerichteten Einfluss auf die Größenklassenverteilung. Wie die statistische Auswertung (Tab. A 6) zeigt, sind bei dieser Methodik nur in Einzelfällen signifikante Unterschiede zwischen den Varianten nachweisbar.

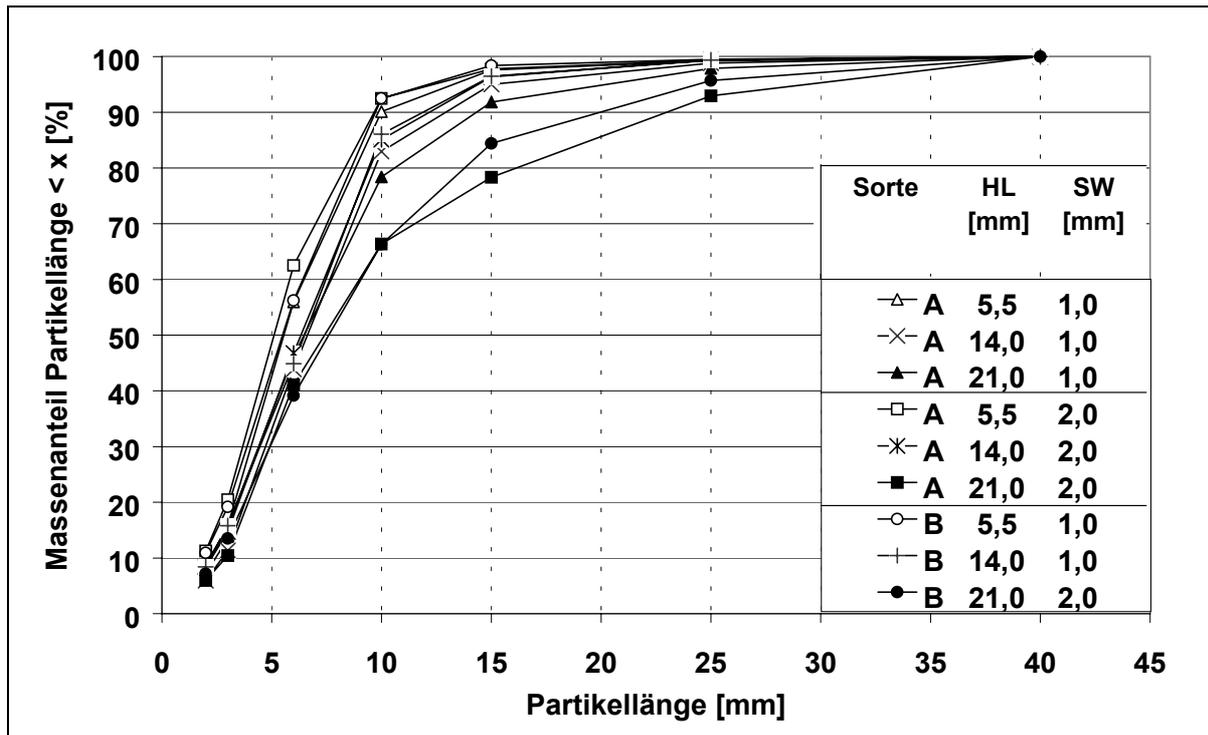


Abb. 16: Größenklassenverteilung von getrocknetem Häckselgut im Erntejahr 2003

Die 5,5 mm-Varianten haben bei der Partikellängenfraktionierung von getrocknetem Häckselgut (Abb. 16) mit 56 bis 62 % in der Größenklasse  $x < 6$  mm die höchsten Massenanteile. In der Größenklasse  $x < 10$  mm steigen die Massenanteile der 14 mm-Varianten deutlich an, so dass sie im Bereich  $x < 15$  mm mit 95 bis 96 % nahezu den Massenanteilen der 5,5 mm-Varianten entsprechen. Für die 21,0 mm-Varianten ergibt sich für diese Größenklasse ein Wert von 78 bis 92 %. Während die 5,5 und 14,0 mm-Varianten nahezu keine Partikel enthalten, die eine Länge von 25 mm übersteigen, setzt sich bei den 21,0 mm-Varianten im Bereich  $x > 25$  mm der Anstieg der Massenanteile weiter fort. Den deutlichsten Anstieg der Massenanteile im Bereich  $x > 15$  bis  $x > 25$  mm zeigt die 21,0 mm-Variante der Sorte A, die mit einer Spaltweite von 2,0 mm gehäckselt wurde (A HL 21,0 SW 1,0).

Die größten Massenanteile liegen bei allen Varianten zwischen den Größenklassen  $x < 2$  bis  $x < 10$  mm. Auf diesen Bereich entfallen die Maiskörner, die aufgrund ihres hohen spezifischen Gewichtes die Größenklassenverteilung deutlich beeinflussen.

Wie die statistische Auswertung zeigt (Tab. A 7), ist bei getrocknetem Häckselgut ein Anstieg der Partikellänge mit steigender Häcksellänge nachweisbar.

#### 4.1.3 Vorversuche zur Verdichtbarkeit (220 l-Behälter)

Die Ergebnisse der Vorversuche zum Einfluss der Belastungsdauer auf die Dichtezunahme in 220 l-Behältern sind in Abb. 17 dargestellt. Ziel dieser Untersuchung war es, die notwendige Belastungsdauer für die Verdichtungsversuche zu ermitteln. Nach Aufbringen des Gewichtes (5 t) auf das Häckselgut wurde der Füllstand im 220 l-Behälter über einen Zeitraum von 60 Sekunden dokumentiert. Nach Ablauf von 15 Sekunden war keine Veränderung des Füllstandes im 220 l-Behälter mehr feststellbar. Folglich blieben die aus dem Füllstand berechneten Lagerdichten ebenfalls nach Ablauf von 15 Sekunden konstant. Insgesamt wurde der Dichteverlauf von drei Schichten auf diese Art untersucht. Auch bei der zweiten und dritten Schicht zeigte sich nach Ablauf von 15 Sekunden keine weitere Steigerung der Lagerdichte.

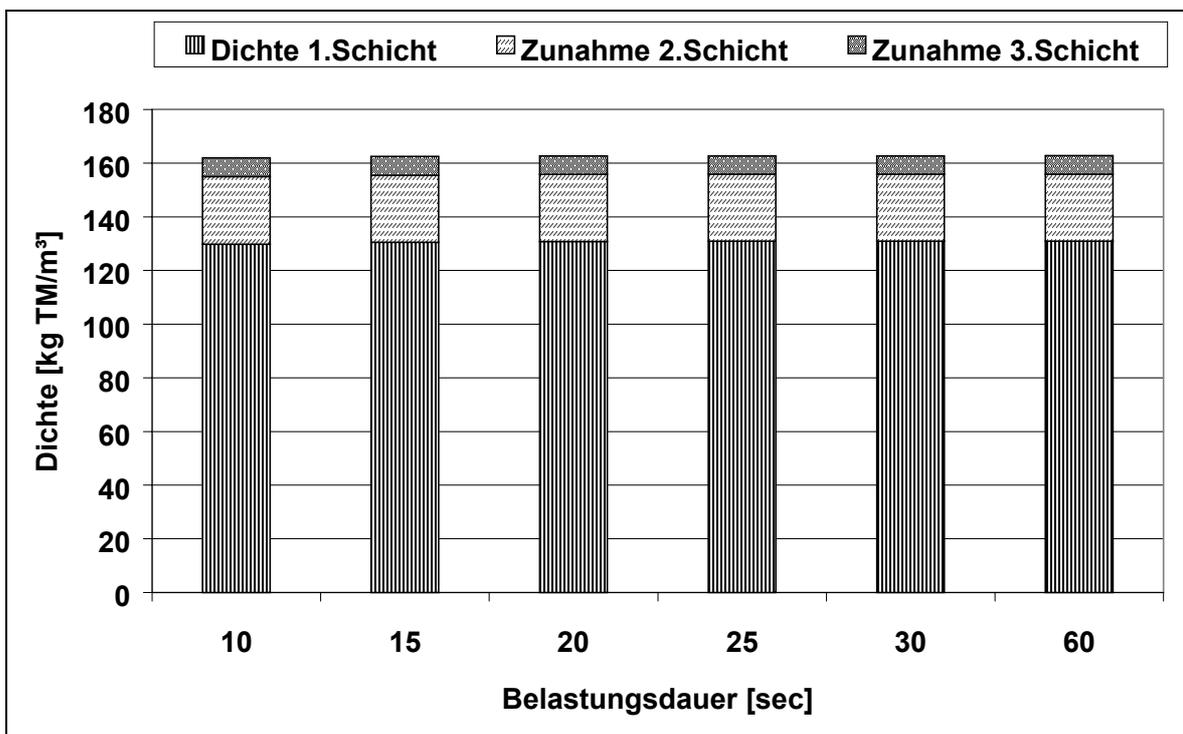


Abb. 17: Dichte von Maishäckselgut in Abhängigkeit von der Belastungsdauer bei einem Verdichtungsdruck von 0,2 MPa

In einem weiteren Vorversuch wurde der Frage nachgegangen, über welche Zeitspanne das verdichtete Material nach Wegnahme des Druckes zurückfederte. Um dieser Frage nachzugehen, wurde das Material zunächst mit 0,2 MPa verdichtet. Nach Wegnahme des

Druckes wurde der Füllstand über 3 Minuten protokolliert. Aus den gemessenen Füllständen wurde die Dichte nach Rückfederung errechnet (Abb. 18). Während innerhalb der ersten 60 Sekunden nach Wegnahme des Druckes noch eine Verringerung der Dichte durch die Rückfederung des Materials sichtbar ist, ist dieser Effekt nach Ablauf von 60 Sekunden zu vernachlässigen. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde in den folgenden Verdichtungsversuchen die Größe „Dichte nach Rückfederung“ nach Ablauf von 60 Sekunden ermittelt.

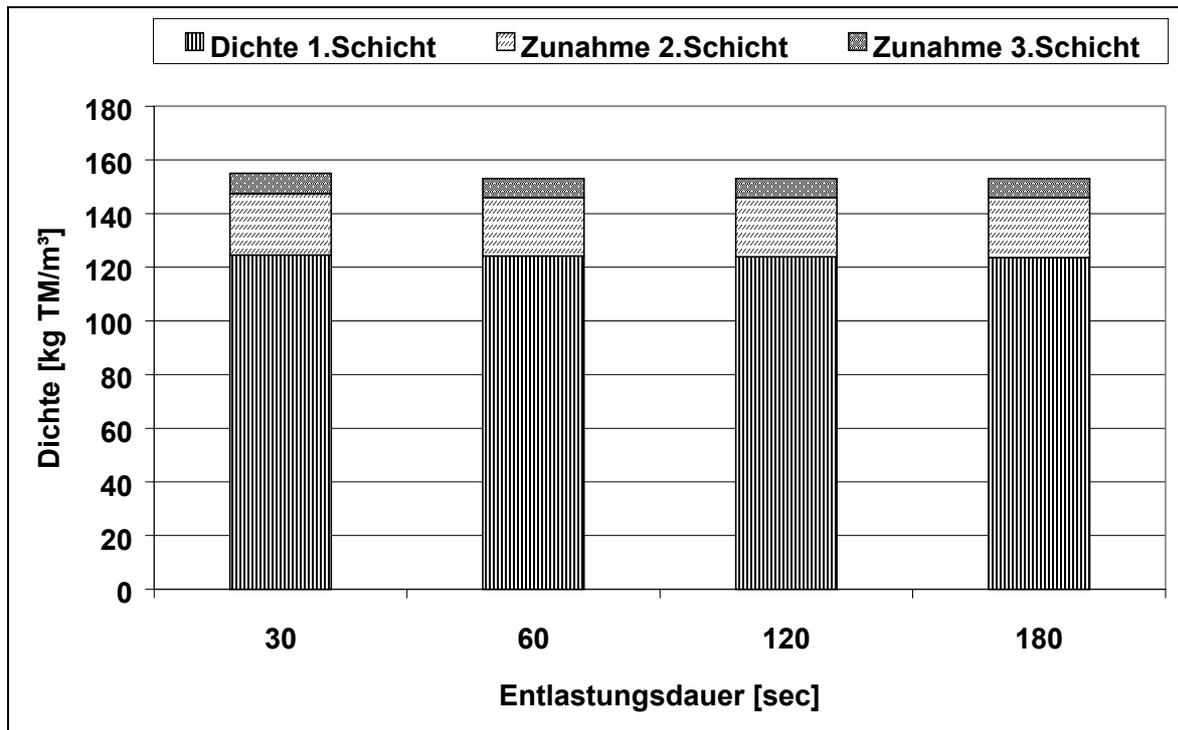


Abb. 18: Dichte von Maishäckselgut in Abhängigkeit von der Dauer der Rückfederung

## 4.2 Ergebnisse im Erntejahr 2003

### 4.2.1 Beschreibung des Ausgangsmaterials für das Erntejahr 2003

#### 4.2.1.1 Trockenmasseschnellbestimmung (Mikrowelle)

Die Ergebnisse der TM-Schnellbestimmung (Mikrowelle) sind in Tabelle 11 dargestellt. Die TM-Gehalte bewegen sich mit Werten von 347 bis 480 g/kg auf hohem Niveau. Das Ausgangsmaterial der Sorte A für die Verdichtungs- und Silierversuche, das mit der Spaltweite 1,0 gehäckselt wurde (*A SW 1,0*), zeigt bei den 5,5 (*A HL 5,5 SW 1,0*) und 14,0 mm-Varianten (*A HL 14,0 SW 1,0*) geringe Unterschiede im TM-Gehalt. Auffällig ist die deutliche Abweichung der 21,0 mm-Variante (*A HL 21,0 SW 1,0*).

Tab. 11: Trockenmassegehalte der Varianten (Mikrowellentrocknung) im Erntejahr 2003 ( $\bar{x}$ )

Verwendungszweck	Variante	TM-Gehalt [g/kg]
Verdichtungs- und Silierversuche	A HL 5,5 SW 1,0	367
	A HL 14,0 SW 1,0	364
	A HL 21,0 SW 1,0	408
	A HL 5,5 SW 2,0	457
	A HL 14,0 SW 2,0	465
	A HL 21,0 SW 2,0	480
Flachsilos	A HL 5,5 SW 1,0	430
	A HL 21,0 SW 2,0	391
Verdichtungs- und Silierversuche	B HL 5,5 SW 1,0	363
	B HL 14,0 SW 1,0	359
	B HL 21,0 SW 2,0	347

Bei den Varianten der Sorte A, die mit einer Spaltweite von 2,0 mm gehäckselt wurden, ist die Spannweite mit einem TM-Gehalt von 457 bis 480 g/kg deutlich geringer. Bei dem Ausgangsmaterial der Flachsilos ergeben sich mit Werten von 391 (*A HL 21,0 SW 2,0*) und 430 g/kg (*A HL 5,5 SW 1,0*) wieder deutlich größere Unterschiede. Die Varianten der Sorte B unterscheiden sich bezüglich ihrer TM-Gehalte nur geringfügig.

#### **4.2.1.2 Analyse von Rohnährstoffen, Nitrat, Pufferkapazität und Milchsäurebakterien (VDLUFA) im Erntejahr 2003**

##### ***Verdichtungs- und Silierversuche***

Das Material für die Verdichtungs- und Silierversuche wurde für die Untersuchungen in Siliergläsern, 220 l-Behältern, Materialprüfmaschine und für die Siebanalyse verwendet. Da bezüglich der Inhaltsstoffe kein Einfluss der Spaltweiten zu erwarten ist, wurde lediglich eine Variante je Sorte und Häcksellänge in einfacher Wiederholung analysiert. Das Ausgangsmaterial wurde für die verschiedenen Häcksellängen analysiert, da die räumliche Distanz zwischen den Anbauflächen mögliche Unterschiede erwarten ließ. Die vollständigen Analyseergebnisse der Sorten A und B sind in Tab. A 1 (Anhang) dargestellt.

Während die Varianten *A HL 5,5* und *A HL 14,0* nur sehr geringe Unterschiede bezüglich des TM-Gehaltes zeigen, liegt die Variante *A HL 21,0* mit 421 g/kg auch bei der Analyse durch den VDLUFA deutlich höher. Aus Rohfasergehalten von maximal 170 g/kg TM und Stärkegehalten von über 300 g/kg TM ergeben sich Energiegehalte von 6,9 bis 7,2 MJ NEL/kg TM. Die Pufferkapazitäten liegen zwischen 11 und 18 g MS/kg TM. Die Besätze mit Milchsäurebakterien unterscheiden sich in geringem Maße.

Für die Sorte B (Tab. A 1) ergeben sich geringere TM-Gehalte, die sich bezüglich ihrer Höhe kaum unterscheiden. Während die Rohfasergehalte tendenziell über denen der Sorte A liegen, sind die Stärkegehalten mit 286 bis 307 g/kg TM tendenziell geringer. In Folge dessen liegen auch die Energiegehalte unter den Werten der Sorte A. Die Pufferkapazitäten der Sorte B übersteigen die der Sorte A, die Konzentration der Milchsäurebakterien liegt in etwa im selben Bereich.

##### ***Schlauchsilos***

Die Trockenmassegehalte der Sorte A (Tab. A 2) liegen bei der 5,5- und 14,0 mm-Variante sehr nah an den Werten des Ausgangsmaterials für die Verdichtungs- und Silierversuche. Die Ausnahme stellt die 21,0 mm-Variante dar, die auch hier einen höheren TM-Gehalt aufweist. Allerdings sind die Unterschiede deutlich geringer. Bezüglich der Rohfasergehalte zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den beiden länger gehäckselten Varianten (*A HL 14,0 SW 1,0* und *A HL 21,0 SW 2,0*). Bei den Stärkegehalten ergibt sich ein geringerer Wert für die Variante *A HL 21,0 SW 2,0*.

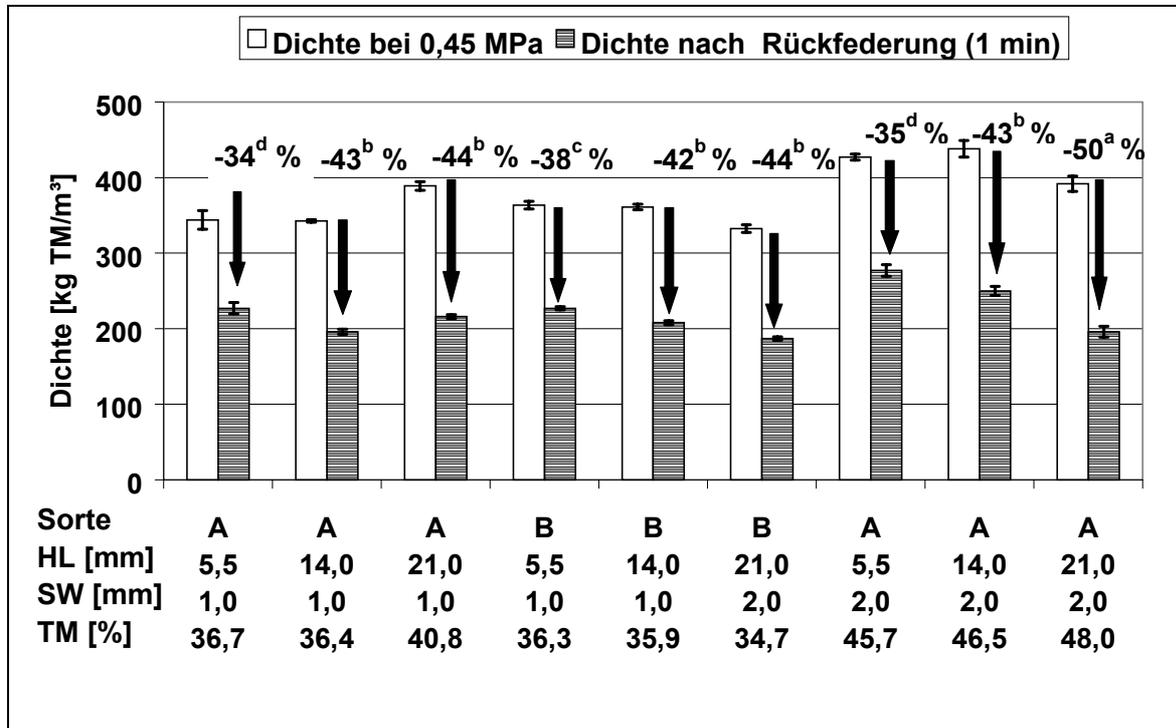
Das Ausgangsmaterial der Sorte B in den Schlauchsilos (Tab. A 2) erweist sich als vergleichsweise homogen. Für die Variante *B HL 21,0 SW 2,0* ergibt sich im Vergleich zu den anderen Varianten ein geringfügig höherer Stärkegehalt. Auffällig ist die deutlich erhöhte Pufferkapazität und der erhöhte Nitratgehalt bei der Variante *B HL 5,5 SW 1,0* im Vergleich zu den restlichen Varianten der Sorte B.

### ***Flachsilos***

Bei den Trockenmassegehalten des Ausgangsmaterials für die Flachsilos (Tab. A 3) ergibt sich dieselbe Rangierung wie bei der Trockenmassebestimmung in der Mikrowelle. Die Variante *A HL 5,5 SW 1,0* zeigt einen deutlich erhöhten Rohfaser- und einen verringerten Rohstärkegehalt. Aus diesen Werten resultiert ein reduzierter Energiegehalt im Vergleich zur 21,0 mm-Variante. Die Nitratgehalte sind in auffälligem Maße erhöht, bezüglich der Pufferkapazität bestehen keine, bezüglich des Besatzes mit Milchsäurebakterien bestehen marginale Unterschiede zwischen den Varianten. Im Vergleich zu den restlichen Analysedaten finden sich im Ausgangsmaterial für das Flachsilo sowohl die höchsten Rohfaser- und Nitratgehalte als auch die geringsten Gehalte an Energie.

## 4.2.2 Untersuchungen zur Verdichtbarkeit im Erntejahr 2003

### 4.2.2.1 Untersuchungen zur Verdichtbarkeit mit der Materialprüfmaschine im Erntejahr 2003



Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden ( $P < 0,05$ )

Abb. 19: Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,45 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2003

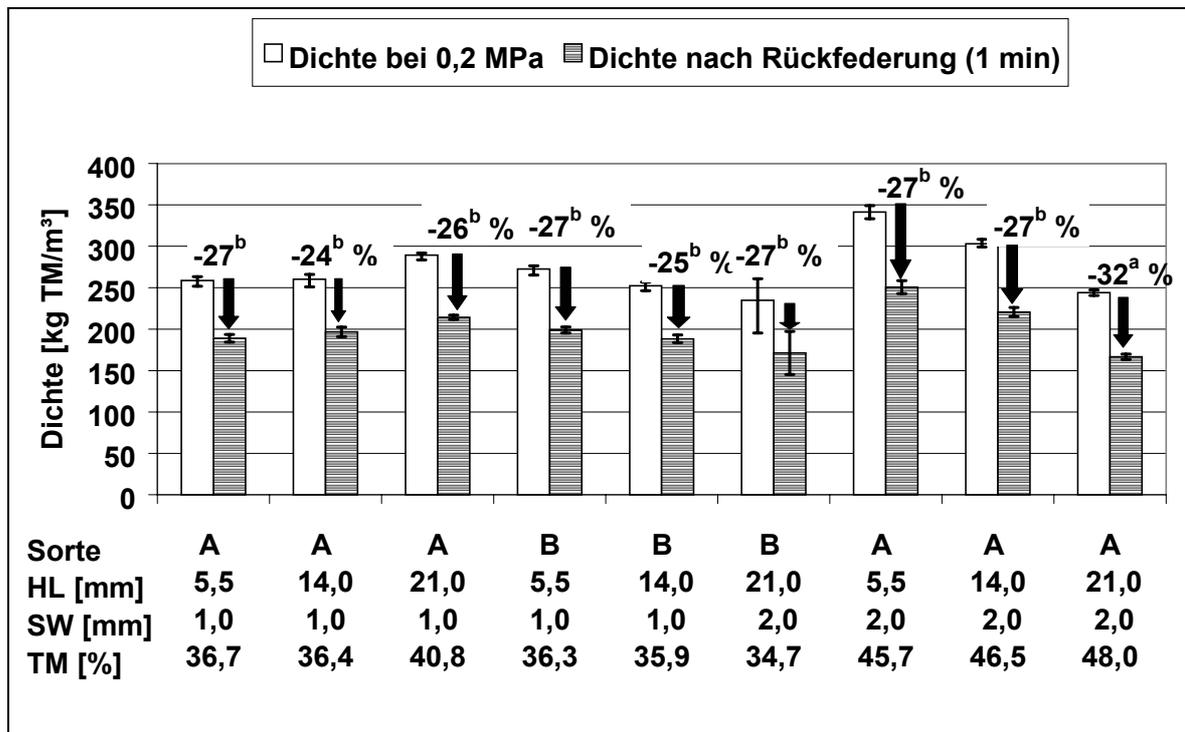
In Abbildung 19 sind die Trockenmassedichten des Häckselgutes nach Verdichtung mit der Materialprüfmaschine dargestellt. Aus der TM-Dichte bei einem Druck von 0,45 MPa lässt sich kein klarer Einfluss der Häcksellänge auf die TM-Dichte ableiten. Die TM-Dichten liegen bei Belastung mit einem Druck von 0,45 MPa zwischen 332 und 427 kg TM/m<sup>3</sup>. Für die TM-Dichten nach Rückfederung ergeben sich Werte von 187 bis 277 kg TM/m<sup>3</sup>. Bei der Rückfederung zeigen sich deutlichere Unterschiede zwischen den Häcksellängen. Mit Ausnahme der Variante *A HL 14,0 SW 1,0*, die eine etwas höhere Rückfederung aufweist als *A HL 21,0 SW 1,0*, steigt die Rückfederung bei gleicher Sorte und gleichem Aufbereitungsgrad mit steigender Häcksellänge an. Dieser Zusammenhang ließ sich teilweise statistisch absichern, teilweise kann nur von Tendenzen gesprochen werden. Dementsprechend ändert sich auch die Rangierung der Lagerdichten nach einer

Minute Rückfederung. Mit steigender Häcksellänge verringern sich die Lagerdichten nach Rückfederung. Die oben beschriebene Rangierung trifft nicht auf die Variante *A HL 14,0 SW 1,0* zu.

Ein Effekt von Trockenmassegehalt bzw. Aufbereiter ist ausschließlich bei der Variante *A HL 21,0 SW 2,0* erkennbar. Die Lagerdichte dieser Variante liegt deutlich unter den Dichten der Variante *A HL 21,0 SW 1,0* und *B HL 21 SW 2,0*. Die Einzelwerte sowie die vollständige statistische Auswertung sind in Tab. A 10 dargestellt.

#### 4.2.2.2 Untersuchungen zur Verdichtbarkeit in 220 l-Behältern (Kleinsilos) im Erntejahr 2003

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zur schichtweisen Verdichtung in den 220 l-Behältern dargestellt. Die Graphik zeigt sowohl die Dichten bei einem Druck von 0,2 MPa als auch nach einer Minute Rückfederung.



Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P<0,05)

Abb. 20: Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,2 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (220 l-Behälter) im Erntejahr 2003

Die TM-Dichten bei einem Druck von 0,2 MPa liegen zwischen 259 und 341 kg TM/m<sup>3</sup>. Bei der Sorte B sowie bei den Varianten der Sorte A, die mit einer Spaltweite von 2,0 mm gehäckselt wurden, sinkt die TM-Dichte mit steigender Häcksellänge um 38 bzw. 97 kg TM/m<sup>3</sup>. Dies trifft auch auf die TM-Dichten nach Rückfederung zu. Hier werden die Unterschiede zwischen den Häcksellängen allerdings tendenziell geringer. Die Ausnahme stellt die Sorte A (Spaltweite 2,0 mm) dar. Hier sinkt die TM-Dichte mit steigender Häcksellänge deutlich. Die statistischen Auswertungen sind in Tab. A 14 und A 15 dargestellt.

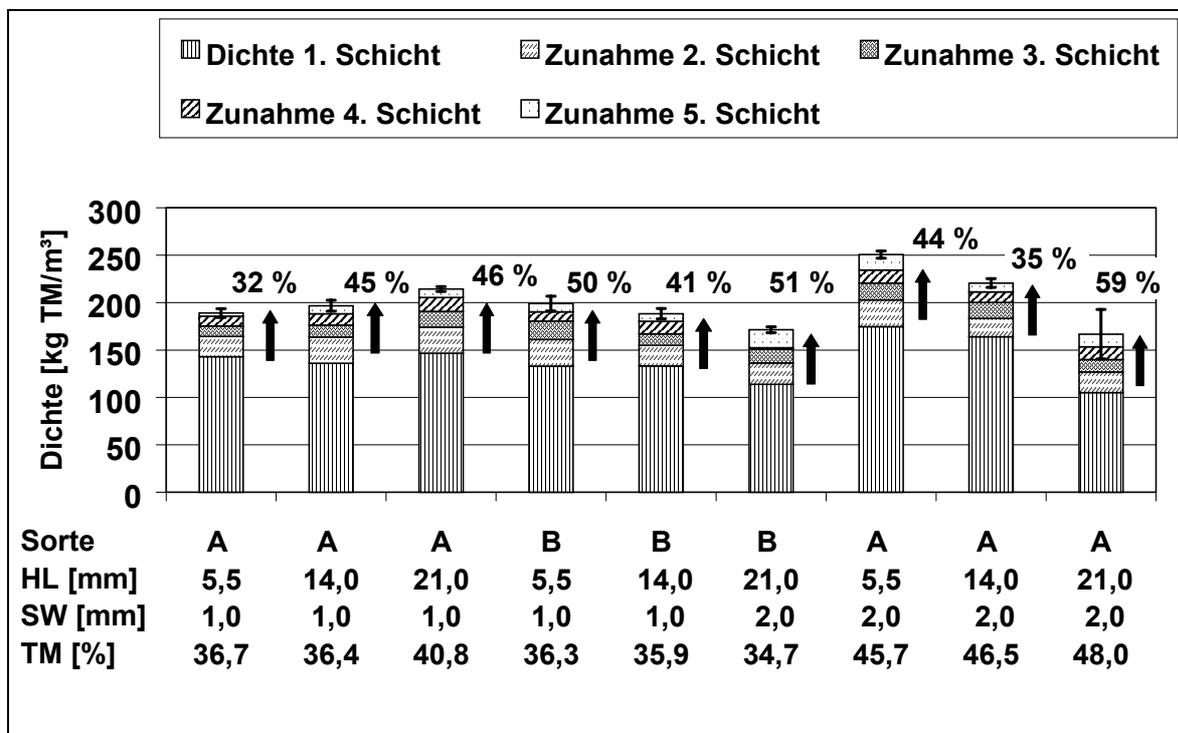


Abb. 21: Steigerung der Dichte von Maishäckselsgut nach einer Minute Rückfederung durch Fünfschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) im Erntejahr 2003

Die Verdichtung in den 220 l-Behältern wurde schichtweise durchgeführt. Abb. 21 zeigt die Dichtesteigerung durch Aufbringen und Verdichten der Einzelschichten nach einer Minute Rückfederung. Das Aufbringen und Verdichten der fünf Schichten führt grundsätzlich zu einer Dichtesteigerung. Dieser Zuwachs beträgt in Abhängigkeit von der Variante zwischen 32 und 59 % im Vergleich zur Dichte bei der ersten Schicht. Die höchsten Dichtezuwächse durch Mehrfachsichtung und -verdichtung erreichten

innerhalb der Sorten bzw. Aufbereitervarianten jeweils die 21,0 mm-Varianten. Dieser Effekt war jedoch statistisch nicht abzusichern. Bei den 5,5 mm-Varianten hatte das Aufbringen und Verdichten mehrerer Schichten einen deutlich geringeren Effekt, führte jedoch auch hier bis zur letzten Schicht noch zu einer Dichtesteigerung.

#### 4.2.2.3 Dichtekalkulation an den Schlauchsilos im Erntejahr 2003

Die Lagerdichten der Schlauchsilos (Abb. 22) wurden über die Silogeometrie und die Masse des einsilierten Häckselgutes errechnet. Für die sechs Varianten in den Schläuchen ergeben sich TM-Dichten zwischen 201 und 248 kg TM/m<sup>3</sup>. Während sich für die Sorte B eine klare Rangierung ergibt (sinkende TM-Dichte mit steigender Häcksellänge), liegt bei der Sorte A die Lagerdichte der 5,5 mm-Variante zwar über den Varianten *A HL 5,5 SW 1,0* und *A HL 14,0 SW 2,0*, zwischen letzteren bestehen jedoch nur marginale Unterschiede.

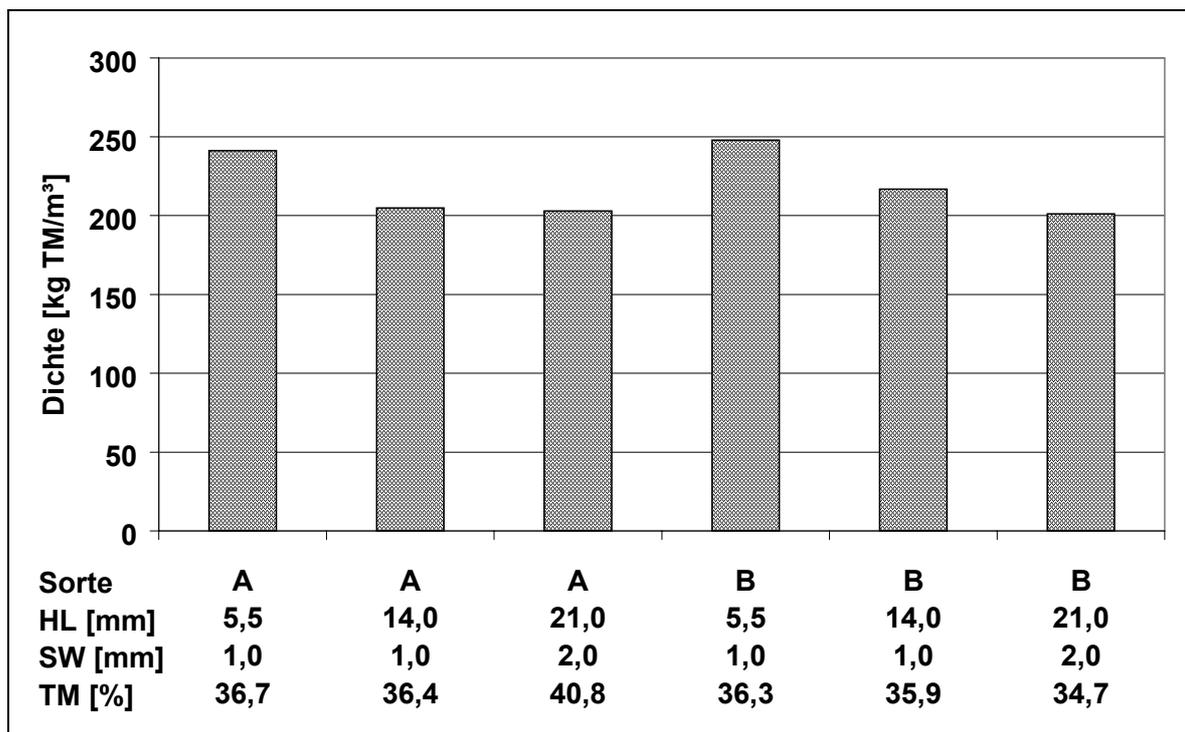


Abb. 22: Dichte von Maishäckselgut (Schlauchsilos) im Erntejahr 2003

#### 4.2.2.4 Dichtemessungen an den Flachsilos im Erntejahr 2003

Die Ergebnisse der Dichtemessungen nach zwei verschiedenen Methoden (Schlagzylinder „Siloboy“; Siloblockschneider) sind in Tab. 12 dargestellt. Während die Ergebnisse für die Variante *A HL 5,5 SW 1,0* mit Messwerten von 80 und 219 kg TM/m<sup>3</sup> sehr stark voneinander abweichen, zeigt sich bei der Variante *A HL 21,0 SW 2,0* mit 188 und 185 kg TM/m<sup>3</sup> kaum ein Unterschied zwischen den beiden Methoden.

Tab. 12: Lagerungsdichte von Maishäckselsgut (Flachsilos) im Erntejahr 2003

Parameter	Einheit	Messmethode	Variante	
			A HL 5,5 SW 1,0	A HL 21,0 SW 2,0
Lagerungsdichte	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	Blockschneider	219	188
		Schlagzylinder	81	185

### 4.2.3 Temperaturverlauf in den verschiedenen Siloformen im Erntejahr 2003

#### 4.2.3.1 Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos im Erntejahr 2003

Die Schlauchsilos wurden am 8.04.04 geöffnet. Die Außentemperaturen lagen während des Entnahmezeitraumes zwischen 10 und 23°C.

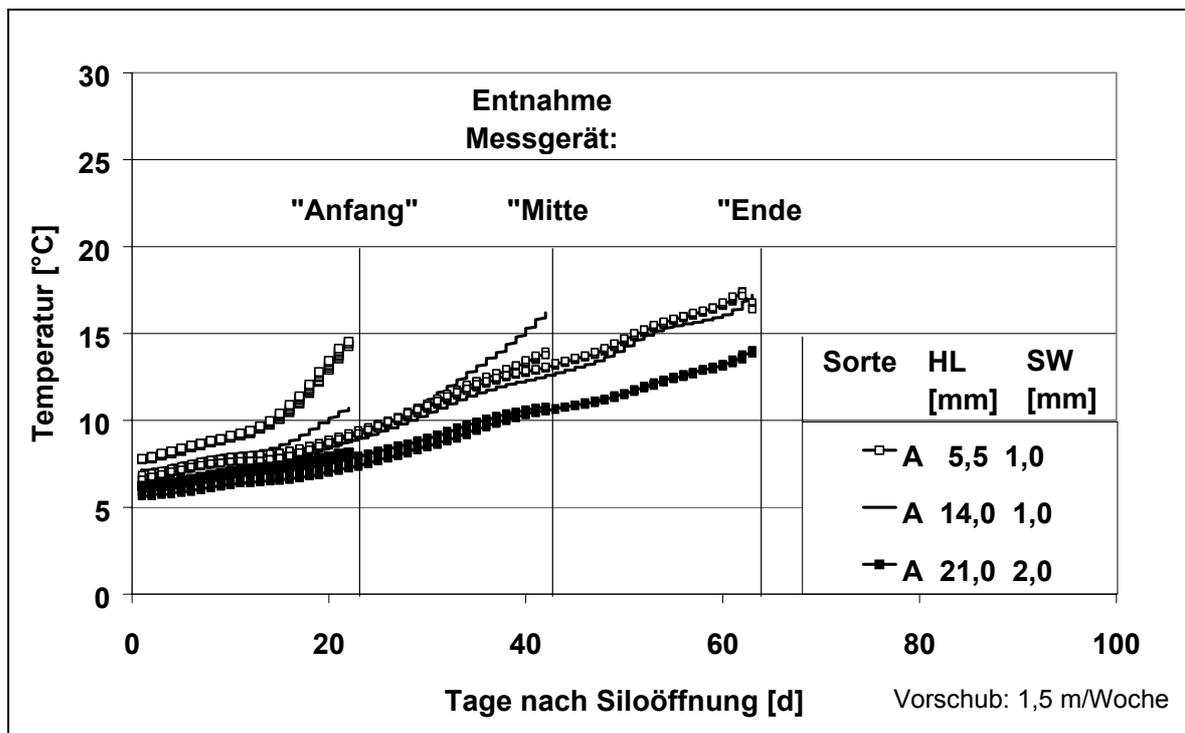


Abb. 23: Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte A) nach Siloöffnung am 8.04.04 (Erntejahr 2003)

Die Temperaturmessungen im Kern der Schlauchsilos ergeben für alle Varianten der Sorte A (Abb. 23) einen Temperaturanstieg mit Annäherung der Anschnittfläche an das Messgerät. Zum Zeitpunkt der Entnahme der ersten Messgeräte (Anfang) liegt die Temperatur bei der Variante *A HL 5,5 SW 1,0* mit 15°C über den Werten der 14,0 mm-Variante (11°C) und der 21,0 mm-Variante (8°C). Bei Entnahme des zweiten Messgerätes (Mitte) liegt die Temperatur der 14,0 mm-Variante mit 16°C über dem Endwert der 5,5 mm-Variante (14°C). Der geringste Wert ergibt sich erneut für die 21 mm-Variante. Hier steigt die Temperatur auf 11°C an. Am letzten Messpunkt (Ende) sind geringe Unterschiede zwischen der 5,5 und der 14,0 mm-Variante sichtbar. Mit 16 und 17°C unterscheiden sich die Extremwerte um 1 K. Für die 21,0 mm-Variante ergeben sich 15°C.

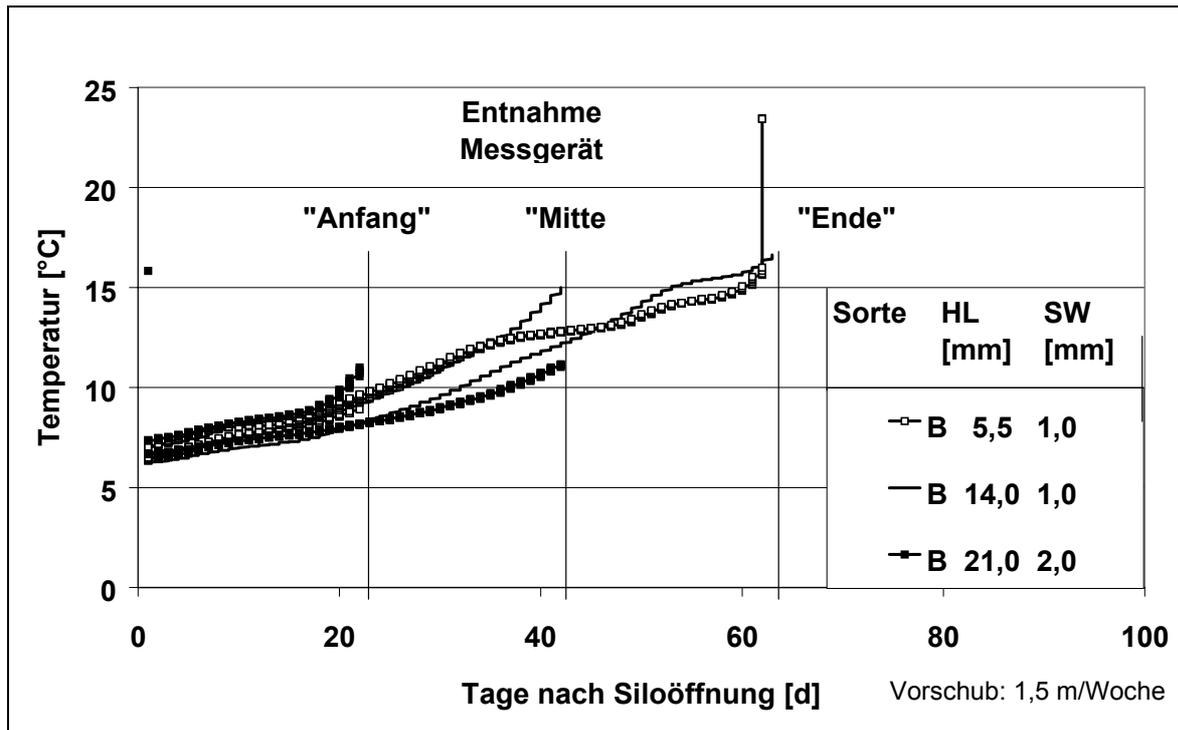


Abb. 24: Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte B) nach Siloöffnung am 08.04.04 (Erntejahr 2003)

Bei Öffnung des Schlauchsilos der Sorte B (Abb. 24) liegen die Kerntemperaturen auf ähnlichem Niveau wie bei der Sorte A. Bei Entnahme der ersten Temperaturmessgeräte (Anfang) ergibt sich mit 9°C der höchste Wert für die 21,0 mm-Variante. Am zweiten Messpunkt (Mitte) erwärmt sich die 14,0 mm-Variante am stärksten und überschreitet knapp einen Wert von 15°C. Die 21,0 mm-Variante hat an diesem Messpunkt mit 11°C den geringsten Wert. Am letzten Messpunkt (Ende) besteht zwischen den Werten der 14,0- und 21,0 mm-Variante mit 17 bzw. 16°C ein geringfügiger Unterschied. Die 5,5 mm-Variante erwärmt sich hingegen bis zu diesem Punkt auf 24°C.

#### 4.2.3.2 Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos im Erntejahr 2003

Neben den Messungen im Kern der Flachs silos wurden die Temperaturen an den Anschnittflächen gemessen.

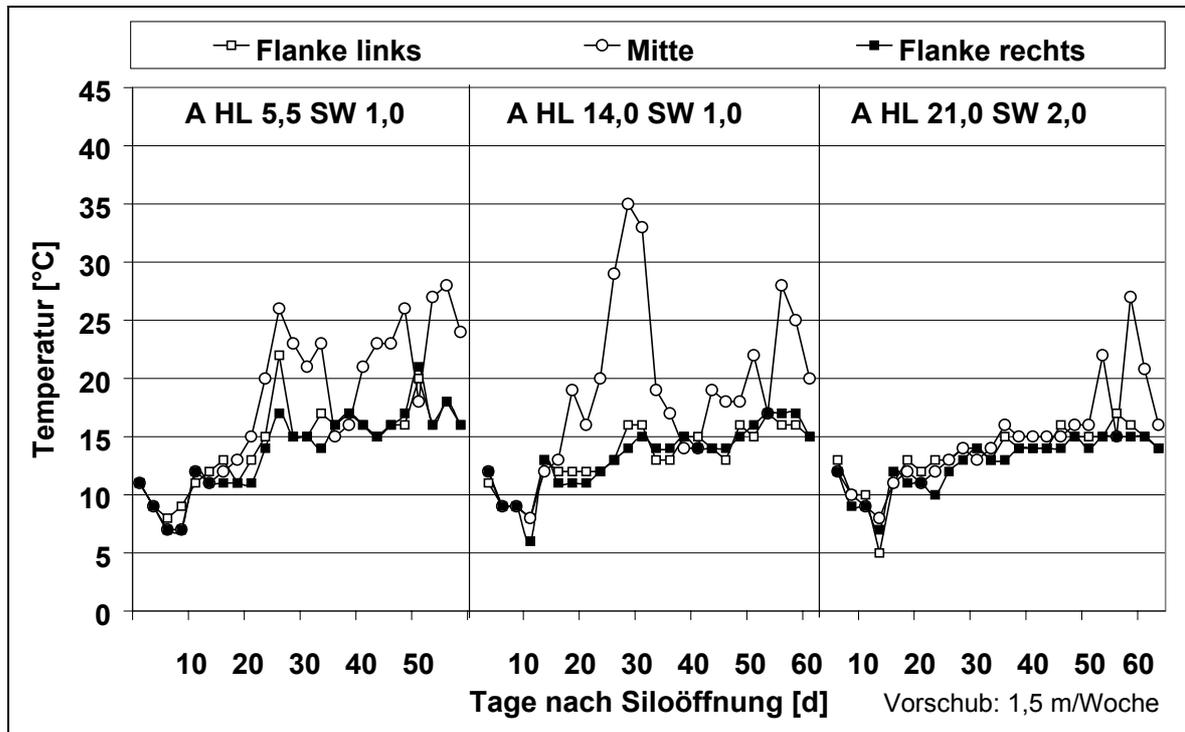


Abb. 25: Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte A) nach Siloöffnung am 08.04.04 (Erntejahr 2003)

Abb. 25 zeigt die Temperaturverläufe an den Anschnittflächen der Varianten der Sorte A bei einem Vorschub von etwa 1,5 m/Woche. Die Temperaturen an den Anschnittflächen übersteigen im Laufe der Entnahme tendenziell die Temperaturen im Kern (Abb. 23). Analog zu den Kerntemperaturen bleiben die Temperaturen bei der 21,0 mm-Variante unter denen der 5,5- und 14,0 mm-Variante. Zum Zeitpunkt des Öffnens ergeben sich für die Temperaturen an den Anschnittflächen der Schlauchsilos der Sorte A unabhängig von Messpunkt (Flanke links, Mitte, Flanke rechts) und Häcksellänge mit 11 bis 13°C ähnliche Werte (Abb. 25). Bei der Variante *A HL 5,5 SW 1,0* beginnt die Temperatur am 20. Tag nach der Öffnung anzusteigen. Bis zum 27. Tag steigt die Temperatur an allen drei Messpunkten kontinuierlich an. Der Messpunkt „Mitte“ ist von diesem Temperaturanstieg am stärksten betroffen. Während die Temperatur vom 20. bis zum 27. Tag an der linken

Flanke von 13 auf 22°C und an der rechten Flanke von 11 auf 17°C ansteigen, steigt die Temperatur in der Mitte von 15 (20.Tag) auf 26°C (27.Tag) an. Bis zum 36. Tag sinken die Temperaturen an den drei Messpunkten stetig bis auf Werte von 15 bis 16°C ab. Von diesem Zeitpunkt an bleiben die Temperaturen in den Flanken vergleichsweise konstant, lediglich am 50. Tag ist ein leichter Temperaturanstieg auf 20 bzw. 21 °C zu verzeichnen. Im Kern hingegen zeigen sich bis zum Ende der Entnahmephase noch zwei deutliche Temperaturanstiege auf bis zu 26 (48.Tag) bzw. 28°C (55. Tag).

Bei der 14,0 mm-Variante sind in der Mitte tendenziell stärkere Temperaturanstiege sichtbar. Bezüglich des Temperaturverlaufes zeigen sich jedoch Parallelen zur 5,5 mm-Variante. Am 27. Tag erreicht die Kerntemperatur auch hier ein erstes Maximum. Die Temperaturen steigen auf 35°C an. Die Flanken erwärmen sich nur unwesentlich auf 16 bzw. 14°C. Ebenso sinken die Temperaturen bis zum 36. Tag deutlich ab. Bis zu diesem Zeitpunkt sinkt die Kerntemperatur um über 20°C auf 14°C ab. Der letzte Peak zeichnet sich, ähnlich wie bei der 5,5 mm-Variante, am 54. Tag mit einem Temperaturwert von 28°C ab.

Die Temperaturmessungen an der 21,0 mm-Variante ergeben sowohl im Kern als auch an den Flanken deutlich geringere Werte. Nach dem Öffnen bei einem Temperaturniveau von 12 bis 13°C sinken die Temperaturen bis zum 8. Entnahmetag auf Werte zwischen 8 (Mitte) und 5°C (Flanke links) ab. Bis zum 48. Tag bewegen sich die Temperaturen im Folgenden zwischen 11 und 16°C. Am 48. Tag zeichnet sich ein erster Temperaturanstieg auf 22°C ab, am 54. Tag wird mit 27°C das Maximum erreicht.

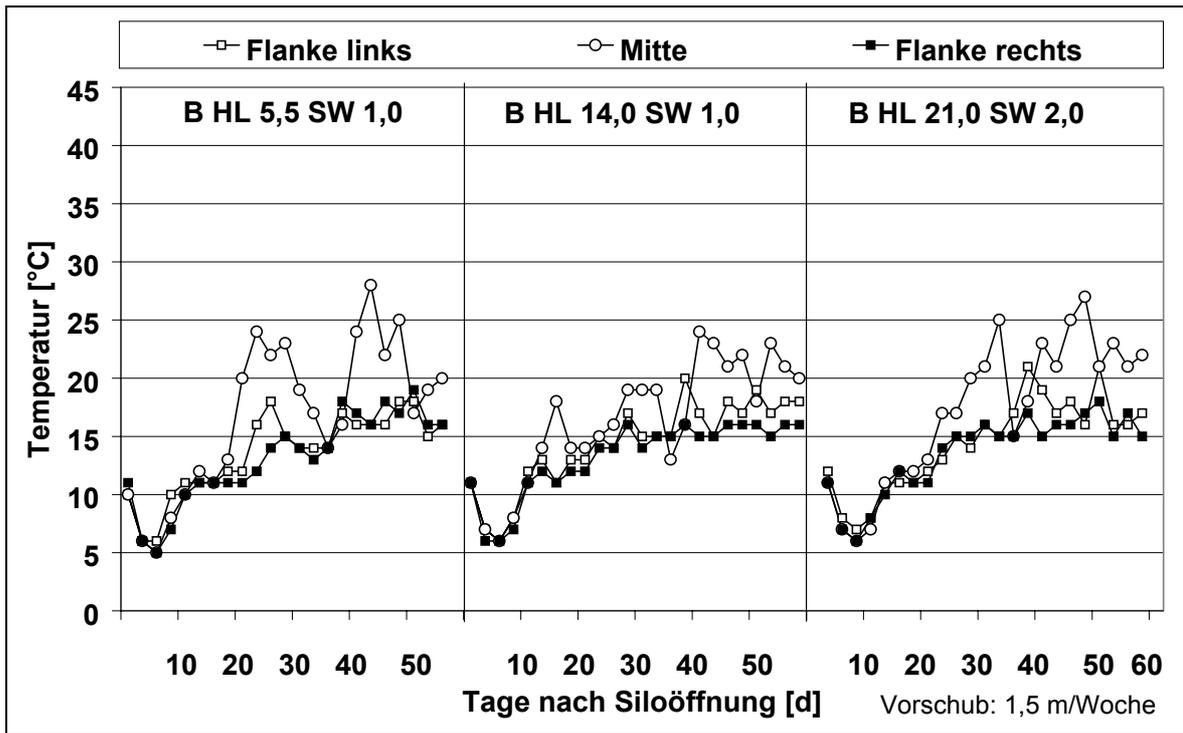


Abb. 26: Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte B) nach Siloöffnung am 08.04.04 (Erntejahr 2003)

Bei der Sorte B ergeben sich ebenfalls im Messpunkt „Mitte“ die höchsten Temperaturen (Abb. 26). Die Unterschiede zwischen den Varianten sind hier vergleichsweise gering. Die Varianten liegen bei Öffnung der Schläuche in einem Temperaturbereich zwischen 10 und 12°C. Bis zum 6. Tag der Entnahme sinken die Temperaturen auf 5 bis 8°C ab. Bis zum 18. Tag liegen die Varianten in einem ähnlichen Bereich bei Werten unter 13°C. Erst ab diesem Zeitpunkt werden geringfügige Unterschiede zwischen den Varianten sichtbar. Am 20. Tag erwärmt sich der Messpunkt „Mitte“ der 5,5 mm-Variante mit einem Wert von 20°C am deutlichsten. Während die Messung der Temperatur in der Mitte der 21,0 mm-Variante einen Temperaturanstieg auf 17°C ergibt, bleibt die Temperatur der 14,0 mm-Variante unauffällig. Ab dem 41. Tag bleiben die Kerntemperaturen der Varianten mit Ausnahme von Einzelwerten über 20°C. Die höchsten Werte ergeben sich hierbei für die 5,5- (28°C) und die 21,0 mm-Variante (27°C). Die Temperaturen bei der 14,0 mm-Variante blieben tendenziell unter denen der restlichen Varianten. Die Temperaturen in den Flanken liegen mit Ausnahme von drei Einzelwerten deutlich unter 20°C.

#### 4.2.3.3 Temperaturverlauf im Kern der Flachsilos im Erntejahr 2003

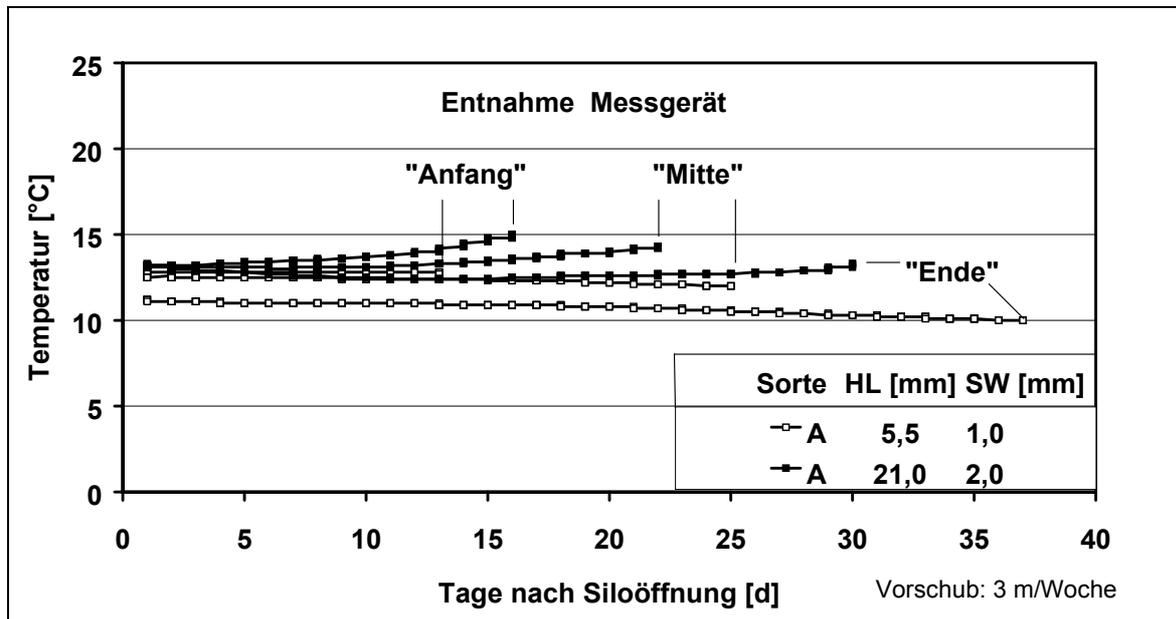


Abb. 27: Temperaturverlauf im Kern der Flachsilos (Sorte A) nach Siloöffnung am 13.02.04 (Erntejahr 2003)

Die Flachsilos wurden am 13.02.04 geöffnet. Im Entnahmezeitraum lagen die Außentemperaturen zwischen -2 und 13°C.

Beim Öffnen der Flachsilos liegen die Temperaturen bei der 5,5 mm-Variante tendenziell unter denen der 21,0 mm-Variante (Abb. 27). Diese Tendenz setzt sich im Laufe der Entnahme fort. Zum Zeitpunkt der Entnahme des ersten Temperaturmessgerätes (Anfang) übersteigt die Temperatur der 5,5 mm-Variante (13°C) die der 21 mm-Variante (15°C). Dieser Effekt kehrt sich bis zum zweiten Messpunkt (Mitte) um, die Varianten *A HL 5,5 SW 1,0* und *A HL 21,0 SW 2,0* unterscheiden sich mit 14 bzw. 13°C nur geringfügig. Der Kern der 5,5 mm-Variante kühlt sich bis zur Entnahme des dritten Messgerätes (Ende) auf 10°C ab, während sich bei der 21,0 mm-Variante erneut ein Wert von 13°C ergibt.

#### 4.2.3.4 Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Flachsilos im Erntejahr 2003

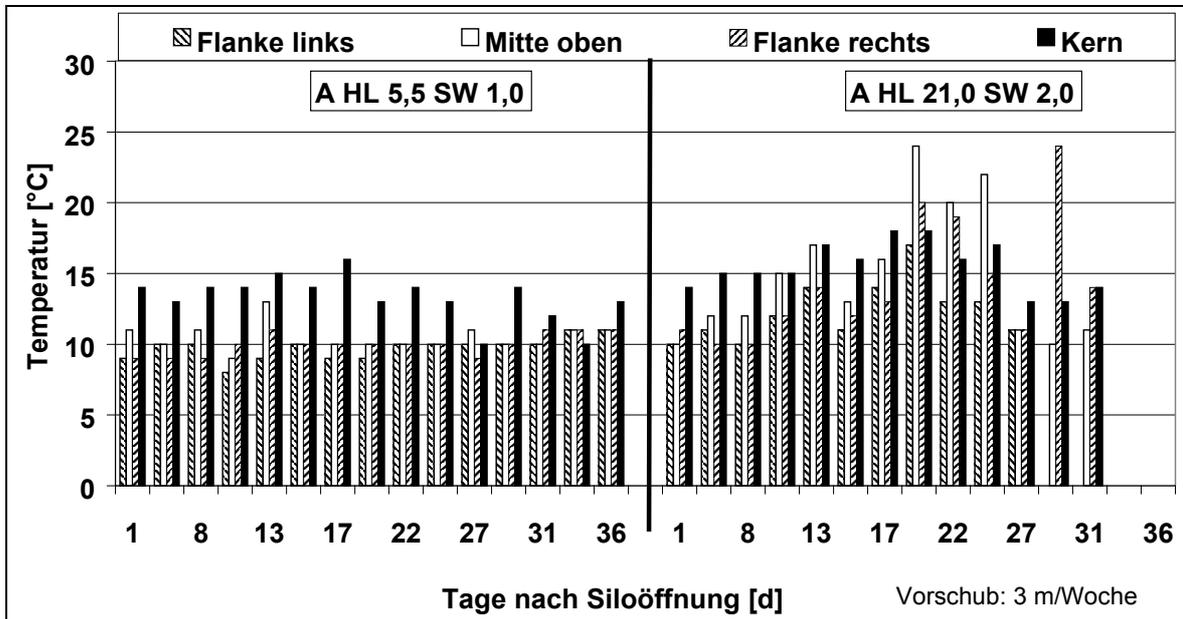


Abb. 28: Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Flachsilos (Sorte A) nach Siloöffnung am 13.02.04 (Erntejahr 2003)

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen an den Anschnittflächen der Flachsilos sind in Abb. 28 dargestellt. Bei der 5,5 mm-Variante ergibt sich im Laufe des Vorschubs nur eine geringe Temperaturveränderung. Die Kerntemperaturen übersteigen die Temperaturen in den Flanken. Die Temperaturen im Kern variieren innerhalb der 36 Messtage zwischen 10 und 16°C. Die Kerntemperatur der 21,0 mm-Variante erreicht am 17. Tag der Entnahme ihr Maximum von 18°C. Von diesem Zeitpunkt an übersteigt die Temperatur des Messpunktes „oben Mitte“ die des Kerns. Diese erreicht bis zum 21. Tag eine Temperatur von 24°C. Bis zum 27. Tag sinken alle Temperaturen unter 15°C. Die Ausnahme stellt der Messpunkt „Flanke rechts“ dar, der sich auf 24°C erwärmt.

#### 4.2.4 Rohnährstoffe, Gärsäuremuster und geschätzter Futterwert in den Maissilagen im Erntejahr 2003

In Tabelle 13 sind Energiegehalte und DLG-Punktebewertung für die unterschiedlichen Sorten und Siloformen aufgeführt. Die ausführlichen Analyseergebnisse sowie die statistische Auswertung der Siliergläser sind den Anhangstabellen A 19 bis A 22 zu entnehmen.

Tab. 13: Vergleich von Energiegehalten und DLG-Punkteverteilung der Maissilagen in den verschiedenen Siloformen im Erntejahr 2003

Parameter	Siloform	Variante					
		A			B		
Sorte							
Häcksellänge		5,5	14	21	5,5	14	21
Energie [MJ NEL/kg TM]	Siliergläser	6,8 <sup>ab</sup>	6,8 <sup>ab</sup>	7,1 <sup>a</sup>	6,7 <sup>b</sup>	6,7 <sup>b</sup>	6,7 <sup>b</sup>
	220 l -Behälter	6,8	7,1	7,5	6,8	6,8	6,7
	Schlauchsilo	6,6	6,6	6,5	6,6	6,6	6,5
	Flachsilo	6,6	–	6,7	–	–	–
DLG-Punkte	Siliergläser	84 <sup>b</sup>	85 <sup>b</sup>	83 <sup>b</sup>	88 <sup>b</sup>	82 <sup>b</sup>	100 <sup>a</sup>
	220 l -Behälter	89	97	89	91	89	93
	Schlauchsilo	91	89	79	93	78	81
	Flachsilo	89	–	93	–	–	–

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

#### *Siliergläser*

Die Analyseergebnisse zu den Rohnährstoffen und Gärsäuremustern der Silagen der Sorte A aus den Siliergläsern sind Anhangstabelle A 19 zu entnehmen. Die Zielwerte für die Inhaltsstoffe von Maissilage (modifiziert nach HERTWIG, 2004) sind in Tab. A 18 dargestellt.

Die Trockensubstanzgehalte liegen mit 364 bis 389 g/kg oberhalb der Zielwerte von 280 bis 350 g/kg. Die Rohfasergehalte liegen im Bereich der Zielwerte (<200 g/kg TM), die Variante *A HL 21,0 SW 2,0* weist besonders geringe Rohfasergehalte auf. In Verbindung mit sehr hohen Stärkegehalten ergibt sich eine entsprechende Energiekonzentration von 7,1 MJ NEL/kg TM. Die beiden kürzer gehäckselten Varianten liegen mit

6,8 MJ NEL/kg TM deutlich unter diesem Wert. Beim Gärsäuremuster erreichen die Milchsäuregehalte nicht in allen Fällen den Zielwert von 35 g/kg TM. Bei der Variante *A HL 21,0 SW 2,0* beträgt der Milchsäuregehalt lediglich 30 g/kg TM. Buttersäure ist in keiner der Silagen nachweisbar, die Essigsäuregehalte liegen deutlich unterhalb des Zielwertes von 20 bis 35 g/kg TM. Die Silagen werden mit 83 bis 85 DLG-Gesamtpunkten bewertet. Dies entspricht der Note „gut“.

Die Silagen der Sorte B (Tab. A 19) weisen weniger hohe Trockenmassegehalte auf. Aus höheren Rohfasergehalten und geringeren Stärkegehalten im Vergleich zur Sorte A ergeben sich mit 6,7 MJ NEL/kg TM tendenziell geringere Energiegehalte. Zwischen den Varianten der Sorte B bestehen bezüglich des Energiegehaltes keine Unterschiede. Die Milchsäuregehalte übersteigen tendenziell die der Sorte A und liegen in allen Fällen im Bereich der Zielwerte. Auch in diesen Silagen bildete sich keine Buttersäure. Die Essigsäuregehalte sind auch hier, gemessen an den Zielwerten zu gering. Die Ausnahme stellt die Variante *B HL 21,0 SW 2,0* dar. Hier liegt der Essigsäuregehalt mit 25 g/kg TM im unteren Bereich der Zielwerte. Infolgedessen wird diese Variante mit 100 DLG-Gesamtpunkten und der Note „sehr gut“ bewertet, während die verbleibenden Varianten ein „gut“ erhalten.

### **220 l-Behälter (Kleinsilos)**

Die Inhaltsstoffe und das Gärsäuremuster der Silage der Sorten A und B aus den 220 l-Behältern sind in Anhangstabelle A 20 dargestellt.

Auffällig ist der sehr hohe Trockenmassegehalt von über 400 g/kg der Variante *A HL 21,0 SW 2,0*. Diese Variante fällt ebenfalls durch einen geringen Rohfasergehalt auf, aus dem sich, in Verbindung mit einem vergleichsweise hohen Stärkegehalt, ein sehr hoher Energiewert von 7,5 MJ NEL/kg TM ergibt. Ein ähnlicher Effekt, wenn auch weniger stark ausgeprägt, zeigt sich bei der Variante *A HL 14,0 SW 1,0*. Für die 14,0 mm-Variante und die 21,0 mm-Variante ergeben sich im Vergleich zur 5,5 mm-Variante geringere pH-Werte. Die Gehalte an Milchsäurebakterien liegen unterhalb, die Essigsäuregehalte oberhalb der Zielwerte. Dennoch werden alle Silagen der Sorte A mit „gut“ bzw. „sehr gut“ (*A HL 14,0 SW 1,0*) bewertet.

Die Silagen der Sorte B (Tab. A 20) sind bezüglich der Inhaltsstoffe als homogen zu bezeichnen. Mit Ausnahme der Trockenmassegehalte, die mit 351 bis 357 g/kg wiederum

als hoch einzustufen sind, erfüllen die Silagen die Anforderungen der Zielwerte (Tab. A 18). Die Ausnahme stellen wiederum die Milchsäuregehalte dar, diese bleiben unterhalb der Zielwerte. Die Silagen der Sorte B erhalten die Note „gut“.

### ***Schlauchsilos***

Bei den Analyseergebnissen der Silagen der Sorte A aus den Schlauchsilos (Tab. A 21) übersteigt der Trockenmassegehalt der Variante *A HL 21,0 SW 2,0* mit 430 g/kg deutlich die Trockenmassegehalte der restlichen Varianten (368 bis 380 g/kg). Im Vergleich zu den anderen Siloformen ergeben sich hohe Rohfasergehalte, im Falle der 21,0 mm-Variante wird der Zielwert von <200 g/kg TM überschritten. Die Stärkegehalte bewegen sich noch oberhalb des Zielwertes von 300 g/kg TM, im Vergleich zu den Stärkegehalten der Sorte A in den Siliergläsern und 220 l-Behältern ergeben sich für die Schlauchsilos jedoch die geringsten Werte. Folglich sind die Energiegehalte mit 6,5 bis 6,6 MJ NEL/kg TM geringer. Die Milchsäuregehalte liegen deutlich unterhalb, die Essigsäuregehalte deutlich oberhalb der Zielwerte. Die Silagen werden mit der Note „gut“ bewertet.

Für die Sorte B ergeben sich in den Schlauchsilos (Tab. A 21) ebenfalls relativ hohe Rohfasergehalte, die 21,0 mm-Variante übersteigt knapp den Zielwert von <200 g/kg TM. Mit Ausnahme der 14,0 mm-Variante liegen die Stärkegehalte unterhalb der Zielwerte, so dass sich für die Sorte B bei den Schlauchsilos ebenfalls die geringsten Energiegehalte ergeben. Bezüglich des Gärsäuremusters und der Bewertung nach dem DLG-Punkteschema entsprechen die Schlauchsilagen qualitativ denen der Sorte A.

### ***Flachsilos***

Bei den Flachsilos (Tab. A 22) übersteigt der Trockensubstanzgehalt der Variante *A HL 5,5 SW 1,0* den der Variante *A HL 21,0 SW 2,0*. Gemessen an den bisherigen Analyseergebnissen fallen, analog zu den Ergebnissen der Schlauchsilos, die hohen Rohfasergehalte beider Varianten auf. Zusätzlich liegen die Stärkegehalte knapp unterhalb des Zielwertes von 300 g/kg TM. Ein weiterer Unterschied besteht im Gärsäuremuster: Während in den restliche Silagen der Sorte A geringe Milch- und hohe Essigsäuregehalte nachweisbar sind, kehrt sich dieser Zusammenhang im Fall der Flachsilos um. Die Milchsäuregehalte liegen mit 54 bis 64 g/kg TM deutlich über den Zielwerten, während die Essigsäuregehalte deutlich unter dem Zielwert von 20 bis 35 g/kg TM liegen.

#### 4.2.5 Gärparameter im Erntejahr 2003

Tab. 14: Gärparameter (Siliergläser) im Erntejahr 2003

Parameter	Einheit	Variante					
		A HL 5,5 SW 1.0	A HL 14,0 SW 1.0	A HL 21,0 SW 2.0	B HL 5,5 SW 1.0	B HL 14,0 SW 1.0	B HL 21,0 SW 2.0
<b>TM-Verluste</b>	<b>[%]</b>	3,7 <sup>c</sup>	5,0 <sup>bc</sup>	6,9 <sup>abc</sup>	8,0 <sup>ab</sup>	8,3 <sup>ab</sup>	8,8 <sup>a</sup>
<b>Aerobe Stabilität</b>	<b>[d]</b>	2,0 <sup>ab</sup>	2,5 <sup>a</sup>	1,9 <sup>abc</sup>	0,6 <sup>bc</sup>	0,8 <sup>bcd</sup>	2,4 <sup>a</sup>

Die TM-Verluste (Tab. 14) der Sorte B übersteigen tendenziell die TM-Verluste der Sorte A. Die aerobe Stabilität liegt bei der Sorte A mit 1,9 bis 2,5 Tagen tendenziell über der aeroben Stabilität der Sorte B (0,6 bis 2,4 Tage). Die Häcksellängen zeigen keinen gerichteten Einfluss auf Gärqualität oder aerobe Stabilität.

### 4.3 Ergebnisse im Erntejahr 2004

#### 4.3.1 Beschreibung des Ausgangsmaterials im Erntejahr 2004

##### 4.3.1.1 Trockenmasseschnellbestimmung (Mikrowelle) im Erntejahr 2004

Im Erntejahr 2004 liegen die Trockenmassegehalte mit 354 bis 437 g/kg unter den Werten des extrem trockenen Erntejahres 2003. Gemessen an den Zielwerten von 280 bis 350 g/kg sind diese Werte dennoch als hoch einzustufen.

Tab. 15: Trockenmassegehalte der Varianten (Mikrowellentrocknung) im Erntejahr 2004

Verwendungszweck	Variante	TM-Gehalt [g/kg]
Verdichtungs- und Silierversuche	B HL 5,0	403
	B HL 5,0 HS	420
	C HL 5,0	363
	C HL 21,0	354
	D HL 5,0	437
	D HL 21,0	427

##### 4.3.1.2 Analyse von Rohnährstoffen, Nitrat, Pufferkapazität und Milchsäurebakterien (VDLUFA) im Erntejahr 2004

###### *Verdichtungs- und Silierversuche*

Die Trockensubstanzgehalte des Materials für die Verdichtungs- und Silierversuche der Sorte B (Tab. A 4) liegen mit 407 bis 413 g/kg auf hohem Niveau. Die Hochschnittvariante der Sorte B (*B HL 5,0 HS*) unterscheidet sich von der in konventioneller Höhe gehäckselten Variante (*B HL 5,0*) erwartungsgemäß durch einen niedrigeren Rohfasergehalt und eine höhere Energiekonzentration.

Die Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials der Sorte C für die Verdichtungs- und Silierversuche zeichnen sich zum einen durch geringere Trockenmassegehalte (354 bis 363 g/kg), geringere Rohfasergehalte (140 bis 166 g/kg TM) und höhere Energiegehalte (6,9 bis 7,2 MJ NEL/kg TM) aus. Bedingt durch einen sehr geringen Rohfasergehalt von 140 g/kg TM erreicht die Variante *C HL 21,0* mit 7,2 MJ NEL/kg TM den höchsten Energiegehalt (Tab. A 4).

Bei der Sorte D liegen die Trockenmassegehalte zwischen 390 und 432 g/kg TM (Tab. A 4). Auch hier wurden geringe Rohfaser- und vergleichsweise hohe Energiegehalte nachgewiesen. Auffällig ist der erhöhte Nitratgehalt bei der Variante *D HL 21,0*. Im Vergleich zu den Sorten B und C sind die Pufferkapazitäten erhöht, der Gehalt an wasserlöslichen Kohlenhydraten ist geringer.

### ***Schlauchsilos***

Die Trockensubstanzgehalte des Ausgangsmaterials der Sorte B für die Schlauchsilos (Tab. A 5) liegen mit 406 bis 438 g/kg ebenfalls auf hohem Niveau. Aus geringen Rohfaser- und hohen Stärkegehalten resultieren Energiegehalte von 6,9 MJ NEL/kg TM. Die Pufferkapazitäten sind mit 9 bis 13 g MS/kg TM als gering einzustufen.

Bei der Sorte C (Tab. A 5) liegen die Trockensubstanzgehalte mit 354 bis 377 g/kg unter den Werten der Sorte B. Im Variantenvergleich liegt die Variante *C HL 5,0* bezüglich des Stärke- und Energiegehaltes deutlich über der Variante *C HL 21,0*, für den Rohfasergehalt ergibt sich ein geringerer Wert.

Im Probenmaterial der Schlauchsilos der Sorte D liegen die Trockensubstanzgehalte mit 419 bis 451 g/kg in einem sehr hohen Bereich. Die Stärkegehalte liegen mit 427 bis 437 g/kg TM ebenfalls sehr hoch. In Verbindung mit sehr geringen Rohfasergehalten von 150 g/kg TM ergeben sich für beide Varianten Energiegehalte von 7,1 MJ NEL/kg TM. Unterschiede zeigen sich in den Pufferkapazitäten mit 10 (*D HL 5,0*) und 26 (*D HL 21,0*) g MS/kg TM sind jedoch beide als gering zu bezeichnen. Die wasserlöslichen Kohlenhydrate liegen mit 8,4 bzw. 7,9 % in TM ebenfalls etwas höher.

### 4.3.1.3 Partikellängenfraktionierung im Erntejahr 2004

#### Schüttelbox

Die Ergebnisse der Siebung des ungetrockneten Materials mit Hilfe der Schüttelbox sind in Abbildung 29 dargestellt.

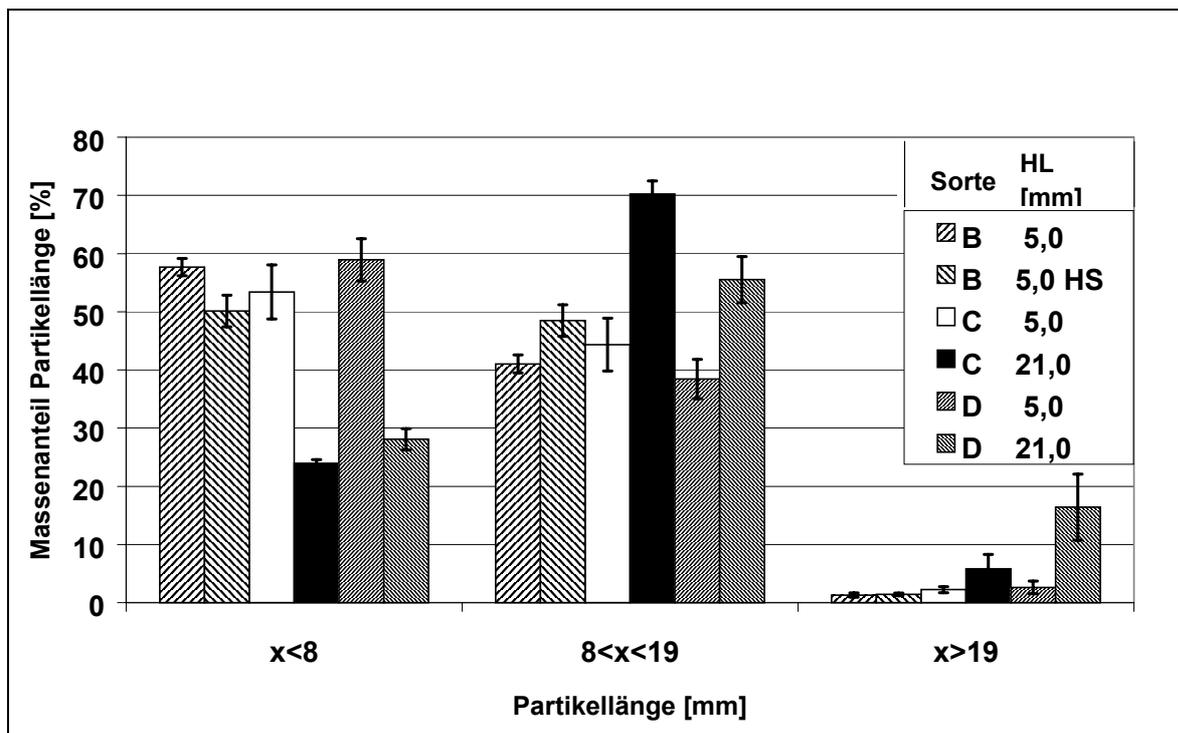


Abb. 29: Größenklassenverteilung von erntefeuchtem Häckselgut (Schüttelbox) im Erntejahr 2004

In der Fraktion  $x < 8$  mm zeigt sich ein tendenzieller Unterschied zwischen der Hochschnittvariante der Sorte B (*B HL 5 HS*), bei der knapp 58 % auf diese Größenklasse entfallen, und der Variante der Sorte B, die in konventioneller Schnitthöhe gehäckselt wurde (*B HL 5,0*). 50 % des Massenanteils der Variante *B HL 5,0* entfallen auf die Größenklasse  $x < 8$ . Generell liegen die 5,0 mm-Varianten in der Größenklasse  $x < 8$  anteilmäßig über den 21,0 mm-Varianten. In den folgenden Größenklassen kehren sich die Verhältnisse um, die 21,0 mm-Varianten haben die höchsten Massenanteile. In der oberen Größenklasse ( $x > 19$  mm) hat die Variante *D HL 21,0* mit 16 % den höchsten Massenanteil. Die Einzelwerte und die statistische Auswertung sind in Tab. A 8 dargestellt.

### Siebturm

Die Partikellängenfraktionierung von getrocknetem Häckselgut ist in Abb. 30 dargestellt.

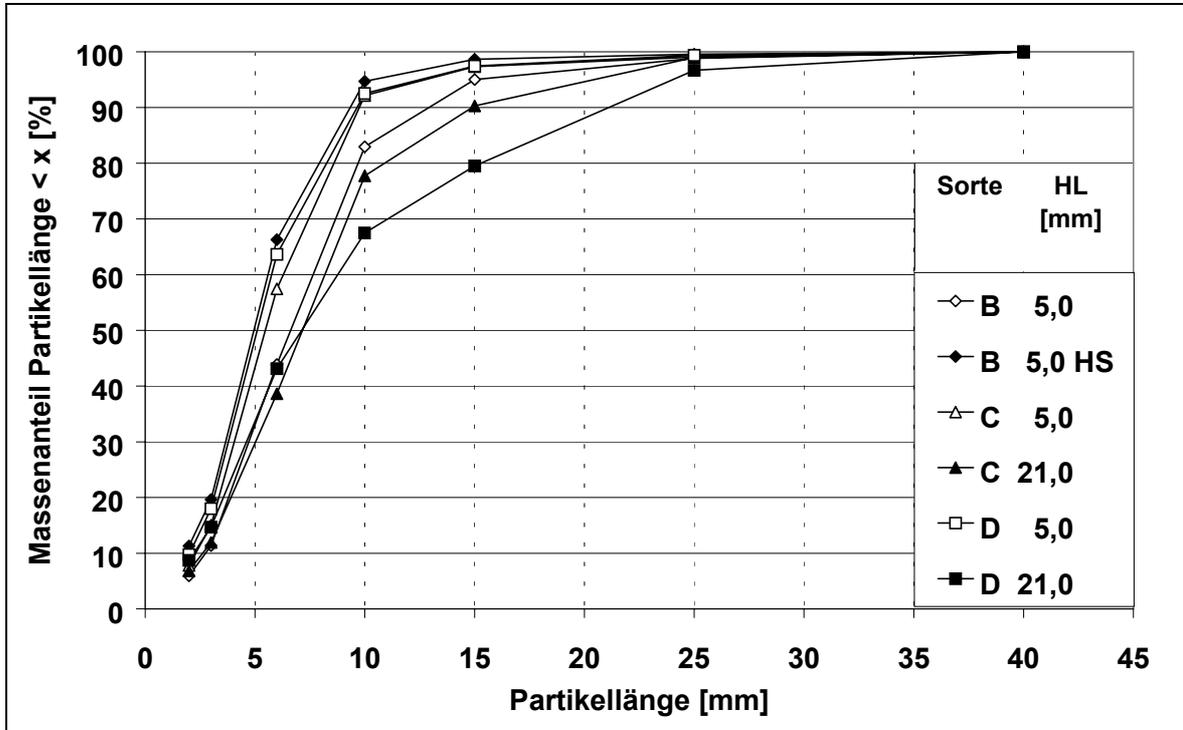


Abb. 30: Größenklassenverteilung von getrocknetem Häckselgut (Siebturm) im Erntejahr 2004

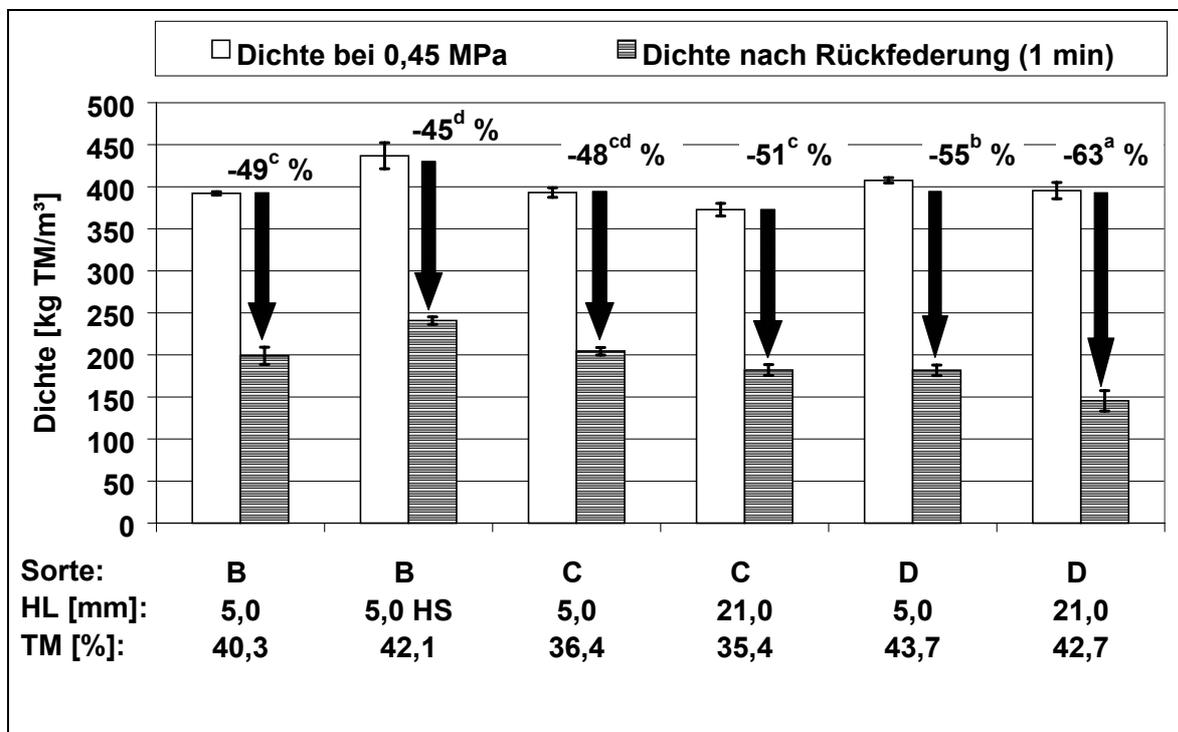
In der Fraktion  $x < 6$  mm ergeben sich für die 5,0 mm-Varianten erwartungsgemäß die höchsten Massenanteile. Die Hochschnittvariante der Sorte B übersteigt mit 66 % die verbleibenden 5,0 mm-Varianten. In dieser Klasse  $x < 10$  mm liegen die Massenanteile der 21 mm-Varianten mit 68 bis 78 % ebenfalls unter den 5,0 mm-Varianten. Für die Variante *D HL 21,0* ergibt sich in der Klasse  $x < 15$  mm ein Massenanteil von 80 %. Damit unterschreitet diese sehr trockene Variante die verbleibenden Varianten (90 bis 99 %) deutlich. Die Mittelwerte und die statistische Auswertung sind in Tab. A 9 dargestellt.

Generell werden die Tendenzen bei der Partikellängenverteilung der Schüttelbox durch die Untersuchungsergebnisse am Siebturm bestätigt.

### 4.3.2 Untersuchungen zur Verdichtbarkeit im Erntejahr 2004

#### 4.3.2.1 Untersuchungen zur Verdichtbarkeit mit der Materialprüfmaschine im Erntejahr 2004

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Verdichtbarkeit an der Materialprüfmaschine bei einer kontinuierlichen Drucksteigerung auf bis zu 0,45 MPa sind in Abb. 31 dargestellt. Des Weiteren sind die Dichten nach Reduktion des Druckes auf 0 MPa und einer Minute Rückfederung sowie die prozentuale Dichtereduktion abgebildet. Die Mittelwerte und die statistische Auswertung sind in Tab. A 11 dargestellt.



Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden ( $P < 0,05$ )

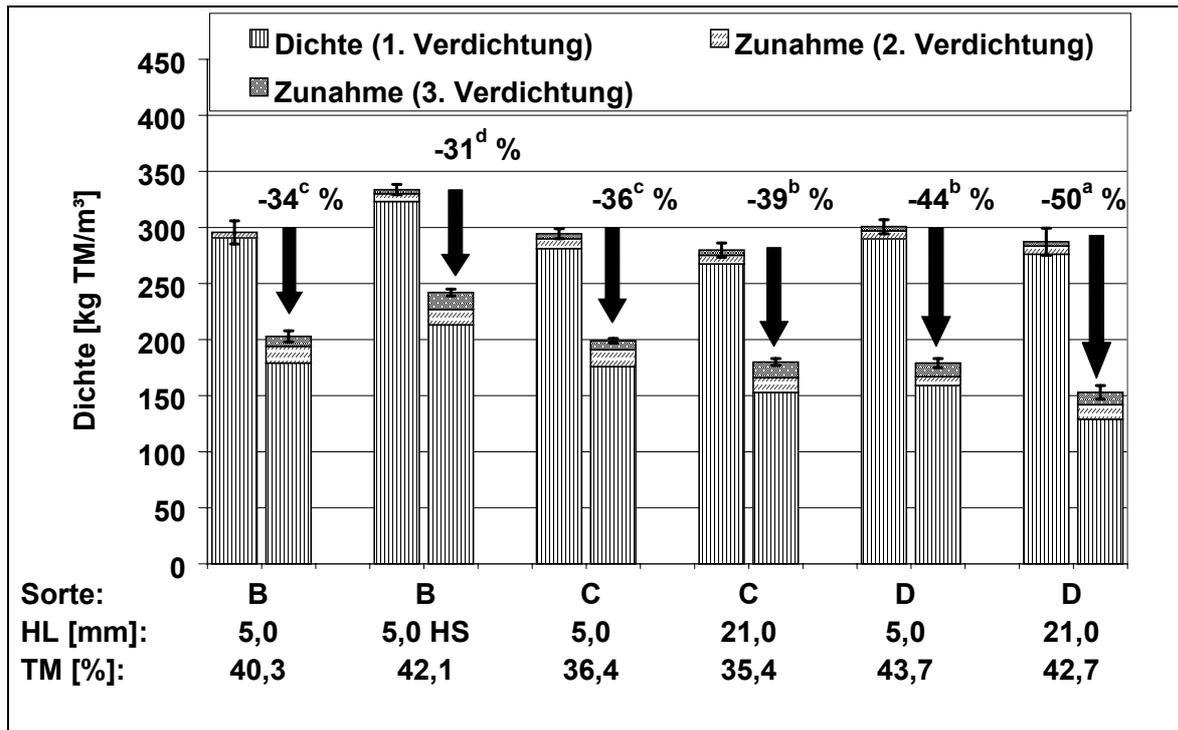
Abb. 31: Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,45 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2004

Bei allen Varianten führt eine Drucksteigerung auf 0,45 MPa zu Dichten von über 350 kg TM/m<sup>3</sup>. Die höchste Dichte wird bei der Variante *B HL 5,0 HS* mit 437 kg TM/m<sup>3</sup> erreicht. Die in konventioneller Schnitthöhe gehäckselte Variante (*B HL 5,0*) ließ sich dagegen auf 392 kg TM/m<sup>3</sup> komprimieren. Generell werden mit kürzerer theoretischer

Häcksellänge innerhalb der Sorten tendenziell höhere Dichten erreicht. Werden Sorten und Trockenmassegehalte nicht berücksichtigt, bestätigt sich dieser Trend jedoch nicht. So liegen beispielsweise die Varianten *B HL 5,0* (392 kg TM/m<sup>3</sup>) und *D HL 21,0* (395 kg TM/m<sup>3</sup>) auf gleichem Niveau. Ähnliche Relationen sind bei der Rückfederung zu beobachten. Im Variantenvergleich einer Sorte übersteigt die Rückfederung der langen Häcksellänge (21,0 mm) die der kurzen Häcksellänge (5,0 mm). Ein Beispiel für diesen Effekt wird bei der Sorte D deutlich. Die 5,0 mm-Variante federt um 55 % zurück, bei der 21,0 mm-Variante verringert sich die Dichte um 63 %.

Die Dichte nach Rückfederung unterschreitet die Dichte bei 0,45 MPa in nahezu allen Fällen um mindestens die Hälfte. Ausnahme ist die Variante *B HL 5,0 HS*. Hier ist die Rückfederung mit 45 % geringer. Dementsprechend unterschreiten die Dichten nach Rückfederung die Dichten bei 0,45 MPa erheblich. Analog zu den Dichten bei maximalem Druck und der Reduktion durch die Rückfederung ergibt sich für die Variante *B HL 5,0 HS* mit 241 kg TM/m<sup>3</sup> die höchste Dichte nach Rückfederung. *B HL 5,0* bleibt mit 199 kg TM/m<sup>3</sup> erheblich unter diesem Wert. Für die verbleibenden Varianten gilt erneut das sorteninterne Dichtegefälle mit steigender Häcksellänge. Die geringste Dichte wird bei der sehr trockenen Variante *D HL 21,0* erreicht (145 kg TM/m<sup>3</sup>).

Die Ergebnisse der Dreifachverdichtung mit 0,2 MPa sind in Abb. 32 dargestellt.



Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden ( $P < 0,05$ )

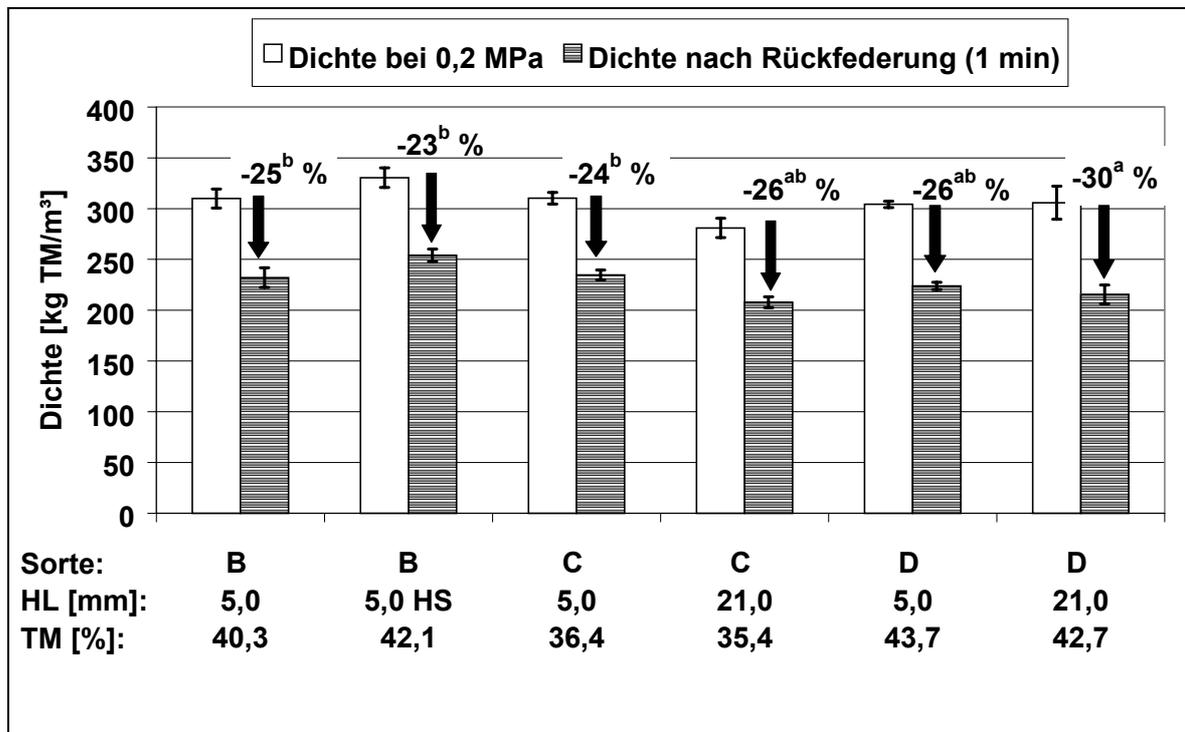
Abb. 32: Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei Dreifachverdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2004

Bei maximaler Verdichtung mit 0,2 MPa zeigen sich bezüglich der Rangierung der Varianten ähnliche Tendenzen wie bei einer Verdichtung mit 0,45 MPa. Allerdings liegen die Dichten generell auf einem niedrigeren Niveau. Mit 323 kg TM/m<sup>3</sup> ergibt sich für die Hochschnittvariante der Sorte B ein über 100 kg TM/m<sup>3</sup> geringerer Wert als bei einer Verdichtung mit 0,45 MPa (Abb. 31). In dieser Größenordnung liegen auch die Differenzen bei den Dichten der verbleibenden Varianten. Der Effekt der Dreifachverdichtung ist gering. Die Dichtesteigerung durch die Dreifachverdichtung liegt bei 1 bis 5 %. Die absoluten Werte und die statistische Auswertung sind in Tabelle A 12 und A 13 dargestellt.

Die Rückfederung hingegen liegt mit 31 bis 50 % deutlich unter der Rückfederung nach einer Verdichtung mit 0,45 MPa. Die Differenz liegt zwischen 11 und 15 %-Punkten. Die Dichte nach Rückfederung unterscheidet sich infolgedessen nicht wesentlich von den erreichten Werten nach einer Einfachverdichtung mit 0,45 MPa (Abb. 31).

#### 4.3.2.2 Untersuchungen zur Verdichtbarkeit in den 220 l-Behältern im Erntejahr 2004

Abb. 33 zeigt die Ergebnisse der Verdichtbarkeit der Varianten in den 220 l-Behältern. Die absoluten Werte und die statistische Auswertung sind Tabelle A 16 und A 17 zu entnehmen. In der Graphik sind die Dichten nach Aufbringen und Verdichten von fünf Schichten dargestellt. Die Dichten bei einem Druck von 0,2 MPa übersteigen die erreichten Werte bei Dreifachverdichtung mit 0,2 MPa an der Materialprüfmaschine (Abb. 32) geringfügig und liegen unterhalb der erreichten Dichten bei einem Druck von 0,45 MPa (Abb. 31). Die Rangierung entspricht generell denen der vorangegangenen Verdichtungsversuche, allerdings sind die Unterschiede weniger stark ausgeprägt. So zeigt sich beispielsweise bei den Varianten der Sorte D lediglich ein marginaler Unterschied. Die Rückfederung unterschreitet mit 23 bis 30 % die Rückfederung nach Einfachverdichtung mit 0,45 MPa (Abb. 31) und der Dreifachverdichtung bei 0,2 MPa (Abb. 32) erheblich.



Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden ( $P < 0,05$ )

Abb. 33: Vergleich der Dichte von Maishäckselgut bei Fünffschichtung und Verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa mit der Dichte nach einer Minute Rückfederung (220 l-Behälter) im Erntejahr 2004

Aus dieser geringen Rückfederung resultieren entsprechend hohe Dichten nach Rückfederung. Mit 208 bis 254 kg TM/m<sup>3</sup> werden mit dieser Verdichtungsmethode die höchsten Dichten innerhalb der Untersuchung im Jahr 2004 erreicht. Die Rangierung der Varianten entspricht dem beobachteten Trend bei den bereits erläuterten Verdichtungsversuchen.

Abb. 34 verdeutlicht durch die Darstellung der Dichten nach Rückfederung die Dichtezunahme durch die mehrfachen Verdichtungsvorgänge. Nach dem ersten Verdichtungs Vorgang liegen die Dichten zwischen 157 und 199 kg TM/m<sup>3</sup>. Jede zusätzliche Verdichtung führt zu einer geringfügigen Steigerung der Dichte nach Rückfederung, die jedoch mit steigender Anzahl von Verdichtungs vorgängen tendenziell geringer wird. Insgesamt steigt die Dichte unabhängig von der Häcksellänge um 23 bis 43 % an (Tab. A 17).

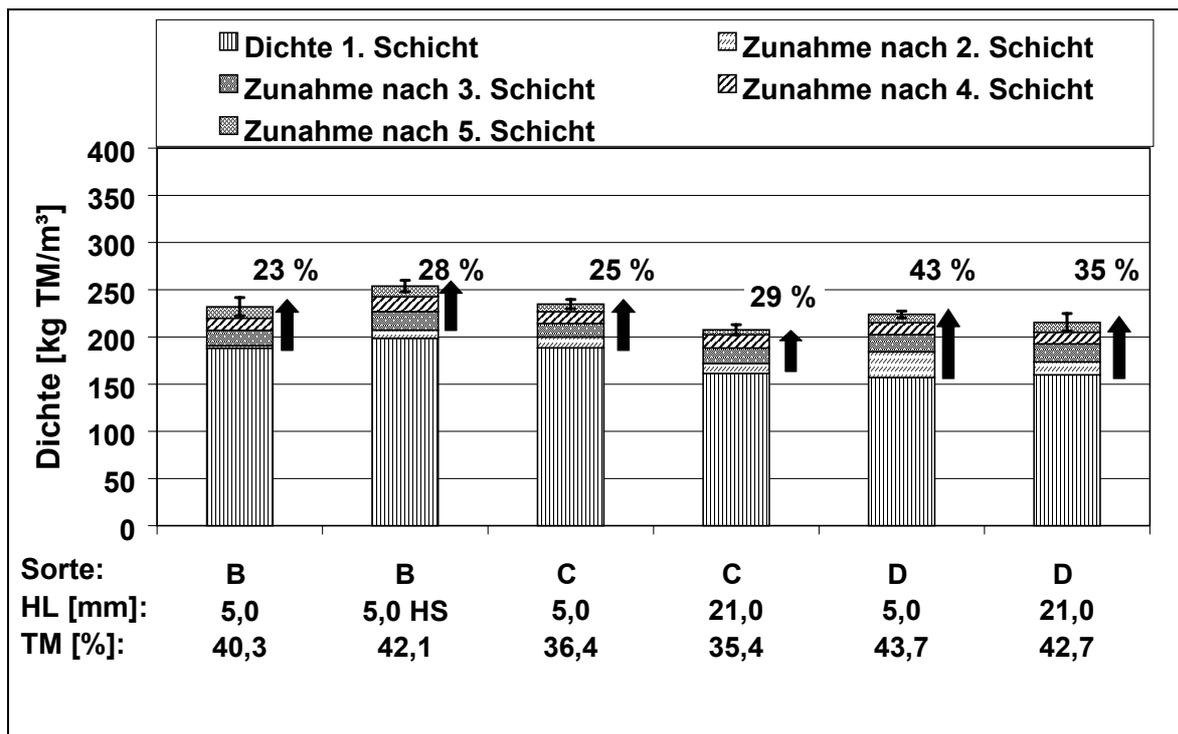


Abb. 34: Steigerung der Dichte nach Rückfederung von Maishäckselgut bei Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) im Erntejahr 2004

#### 4.3.2.3 Dichtemessungen an den Schlauchsilos (Erntejahr 2004)

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der Dichtemessungen mit dem Bohrstock an verschiedenen Punkten der Anschnittflächen der Schlauchsilos. Aus den Dichtemessungen ergibt sich eine ähnliche Rangierung wie bei den Dichtemessungen an der Materialprüfmaschine und in den 220 l-Behältern. Die Unterschiede zwischen den Varianten sind anhand der Ergebnisse am Messpunkt „Kern“ am besten zu verdeutlichen. Hier werden bei allen Varianten mit Werten zwischen 163 und 228 kg TM/m<sup>3</sup> die höchsten Lagerdichten erreicht. Die Lagerdichten an den restlichen Messpunkten zeigen dieselbe Tendenz. Die Ausnahme stellt hier die Sorte B dar. Für die Messpunkte „Flanke links“ und „Mitte oben“ ergeben sich jeweils die gleichen Werte, während an den Messpunkten „Kern“ und „Flanke rechts“ die Lagerdichten der Variante *B HL 5,0 HS* die Dichten der Variante *B HL 5,0* übersteigen.

Tab. 16: Dichteprofil von Maishäckselgut in den Schlauchsilos (Bohrstockmessung) im Erntejahr 2004

Variante	Dichte am Messpunkt [kg TM/m <sup>3</sup> ]			
	Flanke links	Mitte oben	Kern	Flanke rechts
<b>B HL 5,0</b>	192	181	215	186
<b>B HL 5,0 HS</b>	192	181	228	204
<b>C HL 5,0</b>	188	162	215	186
<b>C HL 21,0</b>	153	137	183	153
<b>D HL 5,0</b>	173	168	203	168
<b>D HL 21,0</b>	142	142	163	149

In Tabelle 17 werden die gemittelten Werte der Bohrstockmessungen den Ergebnissen von Blockschneidermessung und Dichtekalkulation aus der Geometrie der Schlauchsilos gegenübergestellt.

Tab. 17: Dichte von Maishäckselgut in den Schlauchsilos in Abhängigkeit von der Messmethode im Erntejahr 2004

Variante	Dichte [kg TM/m <sup>3</sup> ]		
	Bohrstock- messung (Mittelwert)	Block- schneider- messung	Kalkulation aus Geometrie
<b>B HL 5,0</b>	193	keine Messung	189
<b>B HL 5,0 HS</b>	201	keine Messung	190
<b>C HL 5,0</b>	188	197	195
<b>C HL 21,0</b>	157	170	154
<b>D HL 5,0</b>	178	keine Messung	178
<b>D HL 21,0</b>	149	keine Messung	158

Generell sind die Unterschiede zwischen den Lagerdichten im Methodenvergleich gering. Bei der Sorte C weicht das Ergebnis der Dichtemessung mit dem Blockschneider um 13 bis 16 kg TM/m<sup>3</sup> von den anderen Werten ab. Eine höhere Abweichung ist im Methodenvergleich nicht feststellbar.

### 4.3.3 Temperaturverlauf in den verschiedenen Siloformen im Erntejahr 2004

#### 4.3.3.1 Temperaturverlauf im Schlauchinneren im Erntejahr 2004

Im Erntejahr 2004 wurden die Temperaturdatenlogger im Unterschied zum Erntejahr 2003 nicht nur in den Kern (Messpunkt „Kern“) der Schlauchsilos, sondern auch in den oberen Randbereich (Messpunkt „Mitte oben“) eingebracht. Die Ergebnisse der Messungen an insgesamt 4 Messpunkten des Schlauches sind in Abb. 35 dargestellt. Die Schlauchsilos wurden am 4.02.05 geöffnet. Die Außentemperaturen lagen im Entnahmezeitraum zwischen -5 und 8°C.

Der Temperaturverlauf (Temperaturdatenlogger) im Inneren des Schlauchsilos der Variante *B HL 5,0* (Abb. 35) zeigt bis zum 14. Tag nur einen geringfügigen Temperaturanstieg auf etwa 9°C. Die Temperaturen an den Messpunkten „Kern 1“ und „Kern 2“ zeigen bis zu diesem Zeitpunkt einen nahezu identischen Verlauf. Auch die Temperaturen an den Messpunkten „Mitte oben 1“ und „Mitte oben 2“ unterscheiden sich bis zu diesem Zeitpunkt nicht. Am Tag der Entnahme der Temperaturmessgeräte an den Positionen „Kern 1“ und „Mitte oben 1“ steigt die Temperatur auf Werte von bis zu 19°C.

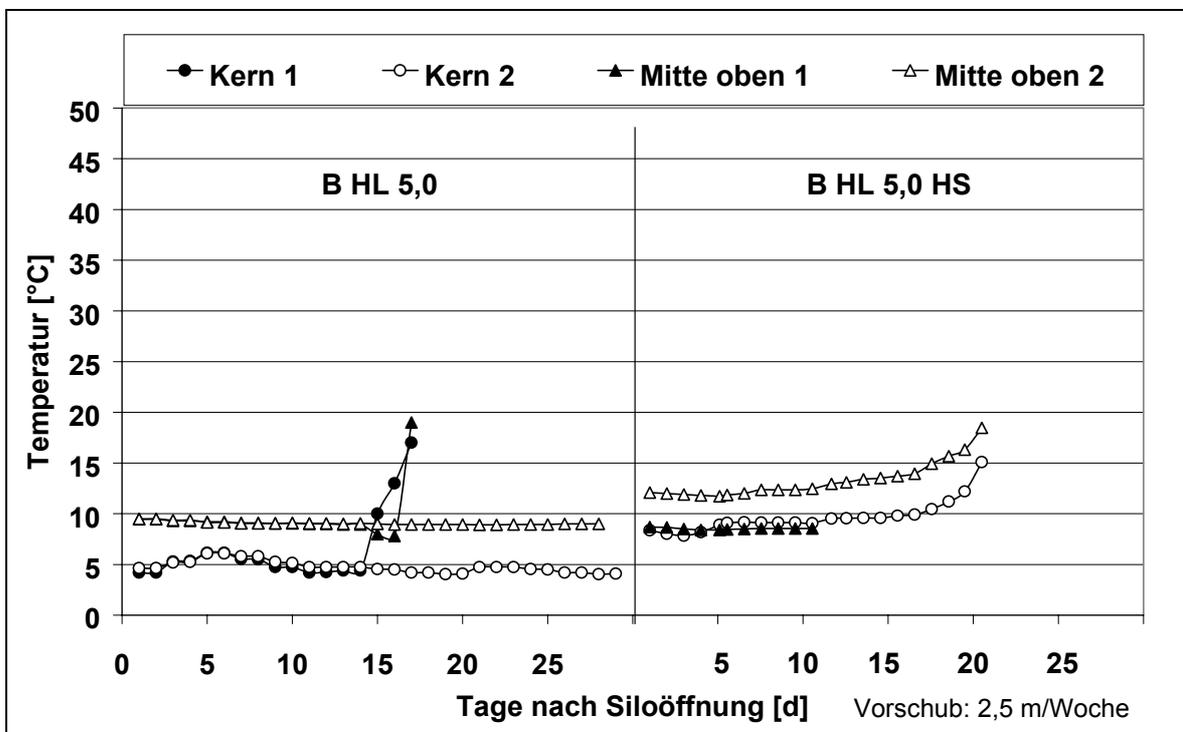


Abb. 35: Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte B) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)

Die restlichen Messungen ergeben Temperaturen von 4 bis 9°C. Im Gegensatz dazu wird bei der Variante *B HL 5,0 HS* erst im hinteren Teil des Schlauches ein kontinuierlicher Temperaturanstieg sichtbar. Der Anstieg beginnt am 19. Tag. Im Kern steigen die Temperaturen bis zum Ende der Entnahme von 10 auf 17°C. Am Messpunkt „Mitte oben 2“ ist ein Temperaturanstieg von 13 auf 19°C sichtbar.

Bei der Sorte C (Abb. 36) ist die 5,0 mm-Variante mit Werten von weniger als 11°C unproblematisch. Deutlich höhere Temperaturanstiege zeichnen sich hingegen bei der Variante *C HL 21,0* ab. Bereits am 12. Entnahmetag wird im hinteren Bereich des Silos (Messpunkt „Kern 2“) ein Wert von 42°C gemessen. Auch der Messpunkt „Mitte oben 2“ erwärmt sich deutlich auf bis zu 33 °C (15. Tag). Im vorderen Bereich des Silos zeigen sich kaum Temperaturveränderungen mit dem Vorschub. Die Temperatur bleibt kontinuierlich bei Werten unter 10°C.

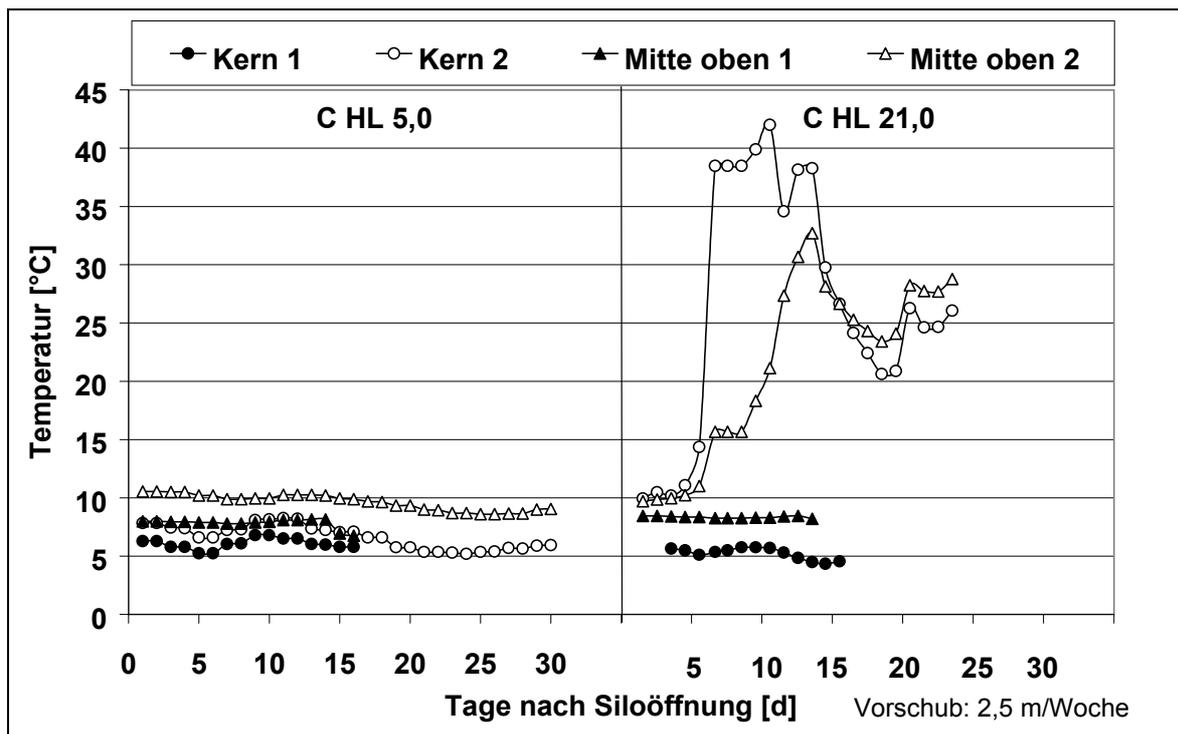


Abb. 36: Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte C) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)

Während die Temperaturen im vorderen Teil des Schlauches der Variante *D HL 5,0* („Kern 1“, „Mitte oben 1“) keinen Anstieg im Laufe des Vorschubs zeigen und auf einem Niveau von 5 bis 8°C bleiben, steigen die Temperaturen im hinteren Bereich des Schlauchsilos („Kern 1“, „Mitte oben 1“) kontinuierlich an. Ausgehend von Werten von 10 bzw. 13°C steigen die Werte im Laufe der Entnahme auf bis zu 16 bzw. 17°C an.

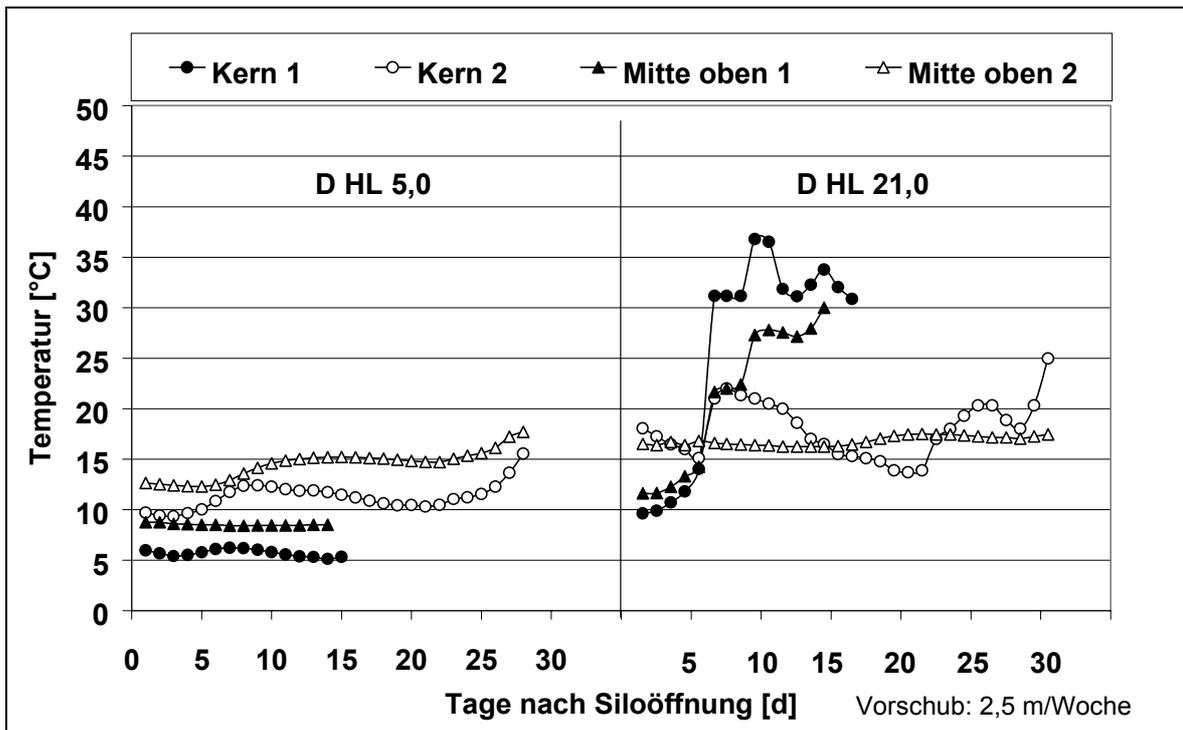


Abb. 37: Temperaturverlauf im Kern der Schlauchsilos (Sorte D) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)

Für die Temperaturentwicklung im Schlauch der Variante *D HL 21,0* ergibt sich ein umgekehrter Effekt. Die Temperaturen im Anfangsbereich des Schlauches („Kern 1“, „Mitte oben 1“) steigen ab dem 9. Entnahmetag deutlich an und liegen ab dem 12. Tag dauerhaft über 27°C. Zwischenzeitlich werden am Messpunkt „Kern 1“ Werte von über 35°C erreicht. Die Messpunkte im hinteren Teil des Schlauches erwärmen sich weniger stark. Erst kurz vor der Entnahme erhöht sich die Temperatur am Messpunkt „Kern 2“ sprunghaft auf 25°C.

### 4.3.3.2 Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos im Erntejahr 2004

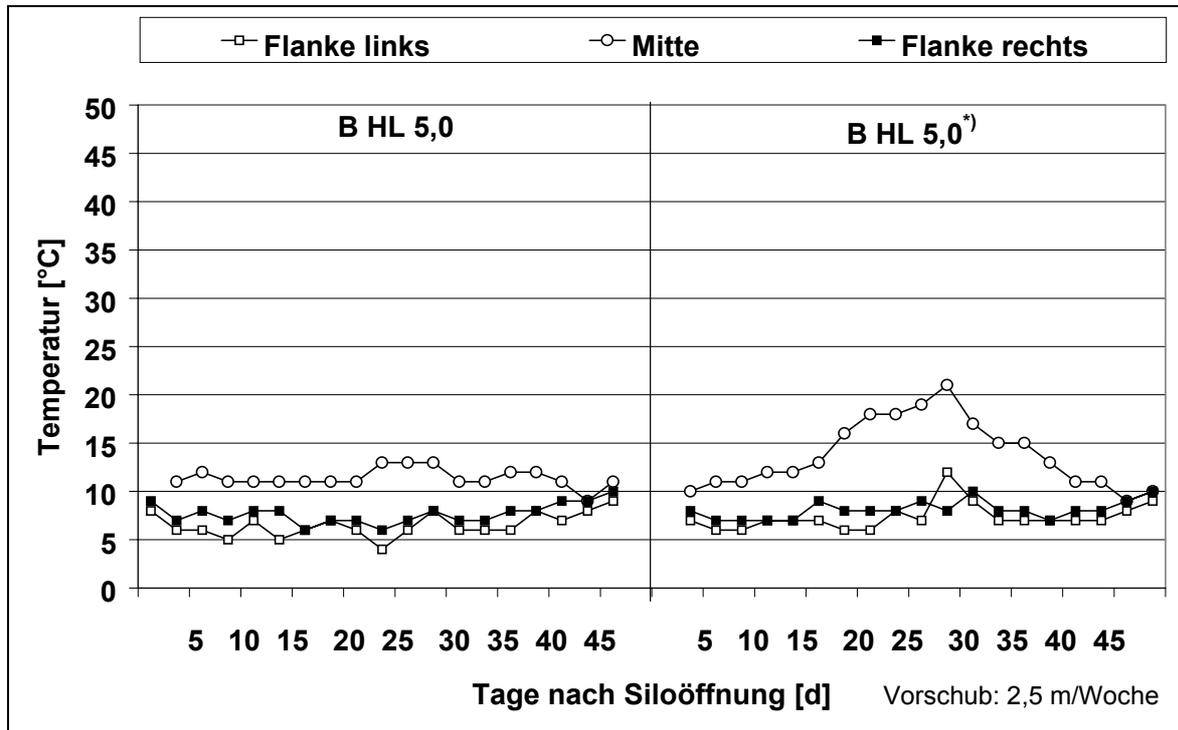


Abb. 38: Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte B) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)

Abb. 38 zeigt die Ergebnisse der Temperaturmessungen an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte B). Auch hier erwärmt sich der Kern am deutlichsten. Für die Variante *B HL 5,0* ergeben sich nur geringfügige Temperaturanstiege im Laufe des Vorschubs. Die Werte liegen zwischen 5 und 14°C. Bei der Hochschnittvariante steigen die Temperaturen ab dem Zeitpunkt des Siloöffnens auf ein Maximum von 21°C an. Dieses Maximum wird am 28. Tag des Vorschubs erreicht. Von diesem Zeitpunkt an sinken die Temperaturen kontinuierlich bis auf einen Wert von 10°C ab.

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse der Temperaturmessungen an den Anschnittflächen der Sorte C dargestellt. Die 5,0 mm-Variante (*C HL 5,0*) erwärmt sich deutlicher als die 5,0 mm-Variante der Sorte B (*B HL 5,0*). Die Temperaturen erreichen maximal 17°C (20. bis 23. Tag). Auf dieses Maximum folgt ebenfalls ein Temperaturrückgang auf einen Wert von 8 bis 9°C zum Ende der Entnahme. Die Variante *C HL 21,0* erreicht am 27. Tag kurzzeitig einen Wert von 26°C, das Maximum zeigt sich jedoch zum Ende der Entnahme mit einer Temperatur von 30°C.

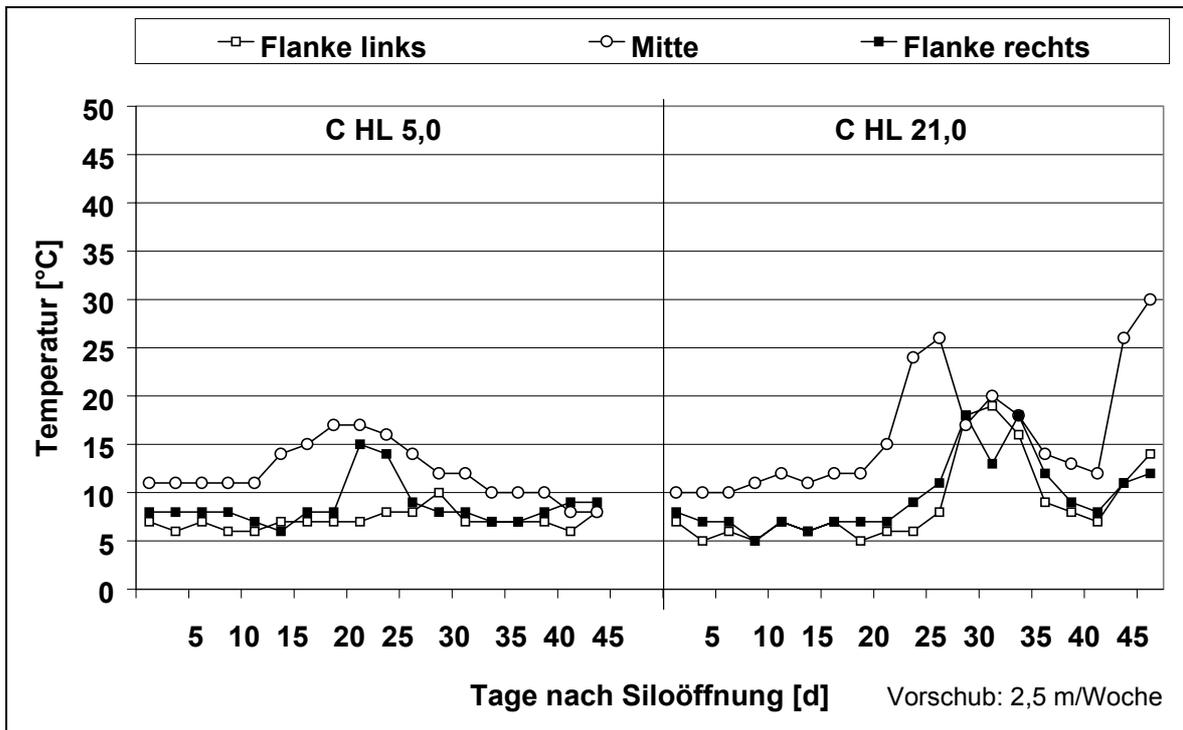


Abb. 39: Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte C) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)

Die Temperaturverläufe der Sorte D (Abb. 40) liegen generell auf höherem Niveau. Im Gegensatz zu den anderen Varianten werden hier die höchsten Werte in den Flanken erreicht. Die Temperaturen im Schlauchsilos der Variante *D HL 5,0* erreichen im Laufe der Entnahme zweimal Werte von nahezu 35°C. Die Variante *D HL 21,0* erwärmt sich bis zum 16. Tag in der Flanke auf einen Wert von über 30°C. Dieser Wert wird bis zum Ende der Entnahme nahezu ununterbrochen beibehalten. Der höchste Wert wird am 43. Tag mit 46°C erreicht.

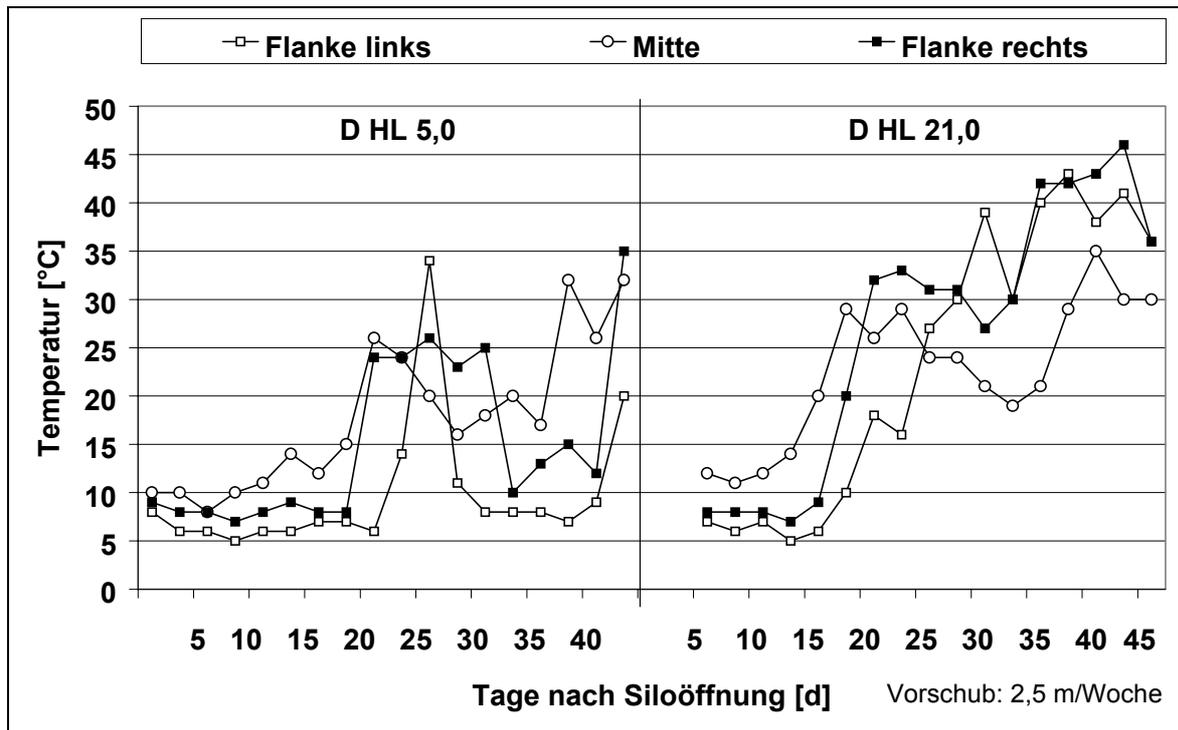


Abb. 40: Temperaturverlauf an den Anschnittflächen der Schlauchsilos (Sorte D) nach Siloöffnung am 4.02.05 (Erntejahr 2004)

#### 4.3.4 Rohnährstoffe, Gärsäuremuster und geschätzter Futterwert in den Maissilagen im Erntejahr 2004

In Tabelle 18 sind Energiegehalte und DLG-Punktebewertungen für die unterschiedlichen Sorten und Siloformen aufgeführt. Die ausführlichen Analyseergebnisse sind den Anhangstabellen A 23 bis A 29 zu entnehmen.

Tab. 18: Vergleich von Energiegehalten und DLG-Punkteverteilung der Maissilagen in verschiedenen Siloformen im Erntejahr 2004

Parameter	Siloform	Variante					
		B		C		D	
Sorte		5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
Häcksellänge		5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
Energie [MJ NEL/kg TM]	Siliergläser	6,7 <sup>b</sup>	7,0 <sup>a</sup>	6,7 <sup>b</sup>	6,9 <sup>ab</sup>	6,8 <sup>ab</sup>	7,0 <sup>a</sup>
	Schlauchsilos	6,7	6,6	6,7	6,5	6,7	6,6
DLG-Punkte*	Siliergläser	81 <sup>ab</sup>	79 <sup>b</sup>	83 <sup>a</sup>	82 <sup>ab</sup>	83 <sup>ab</sup>	84 <sup>a</sup>
	Schlauchsilos	84	78	80	69	80	82

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

\* 91-100=sehr gut; 71-90=gut; 51-70=mittelmäßig

##### *Siliergläser*

Die Analyse von Inhaltsstoffen und Gärsäuremuster der Sorte B (Tab. A 23) ergibt für beide Varianten vergleichsweise hohe Trockensubstanzgehalte, wobei die Variante *B HL 5,0 HS* mit 404 g/kg einen höheren Trockensubstanzgehalt aufweist als die Variante *B HL 5,0* (382 g/kg). Aus geringeren Rohfaser- und höheren Stärkegehalten ergibt sich bei der Hochschnittvariante (*B HL 5,0 HS*) ein höherer Energiegehalt. Bezüglich des Gärsäuremusters unterscheiden sich die Varianten geringfügig. Die Milchsäuregehalte bleiben unterhalb der Zielwerte von 35 g/kg TM, Buttersäure konnte in keiner der Silagen nachgewiesen werden. Auch der Essigsäuregehalt ist mit 7 bis 8 g/kg TM als gering einzustufen. Die Silagen werden mit der Note „gut“ bewertet.

Bei der Sorte C (Tab. A 23) ergeben sich ähnliche Tendenzen. Die Trockenmassegehalte liegen sowohl für die 5,0 mm - als auch für die 21 mm-Variante bei 343 bis 347 g/kg TM. Die Variante *C HL 21,0* weist mit 160 g/kg TM geringere Rohfasergehalte im Vergleich zu Variante *C HL 5,0* (183 g/kg TM) auf. In Verbindung mit geringfügig höheren Stärkegehalten ergibt sich für die 21,0 mm-Variante ein Energiegehalt von

6,9 MJ NEL/kg TM, während der Energiegehalt der 5,0 mm-Variante mit 6,7 MJ NEL/kg TM darunter liegt. PH-Wert, Gär säuremuster und die Bewertung durch das DLG-Schema ergeben keine wesentlichen Unterschiede im Vergleich zur Sorte B.

Diese Aussage trifft ebenfalls auf die Analysen für die Sorte D (Tab. A 22) zu. Auffällig ist lediglich der mit 444 g/kg TM sehr hohe Stärkegehalt der Variante *D HL 21,0*.

### ***Schlauchsilos***

Die Tabellen A 24 und A 25 zeigen die Analyseergebnisse der Inhaltsstoffe und das Gär säuremuster der Silagen in den Bilanznetzen der Sorte B, die den Schlauchsilos entnommen wurden. Für die Sorte B ergeben sich durchweg hohe Trockenmassegehalte. Auffällig ist der Trockenmassegehalt der Silage der Variante *B HL 5,0 HS* (Position „Mitte oben“) mit 466 g/kg. Die Rohfasergehalte liegen im Bereich der Zielwerte (<200 g/kg TM), die Stärkegehalte sind als sehr hoch einzustufen. Die Energiegehalte liegen mit 6,6 bis 6,7 MJ NEL/kg TM im akzeptablen Bereich. Die Milchsäuregehalte erreichen in nicht allen Fällen die Zielwerte. Die Essigsäuregehalte liegen deutlich unterhalb der Zielwerte.

Die Trockenmassegehalte der Sorte C (Tab. A 26 und A 27) liegen mit 349 bis 381 g/kg deutlich unter den Werten der Sorte B. Die Rohfasergehalte übersteigen bei der Variante *C HL 21,0* (Tab. A 26) an den Positionen „Kern 2“ und „Mitte oben 2“ geringfügig die Zielwerte. Hier liegen auch die ansonsten hohen Stärkegehalte geringfügig unter den anderen Werten. Resultierend aus sehr hohen Stärkegehalten übersteigen die Energiegehalte der Variante *C HL 5,0* mit 6,6 bis 6,8 MJ NEL/kg TM tendenziell die Energiegehalte der 21,0 mm-Variante (6,2 bis 6,7 MJ NEL/kg TM). Milch- und Essigsäuregehalte liegen mit einer Ausnahme unterhalb der Zielwerte.

Bei den Analyseergebnissen für die 5,0 mm-Variante der Sorte D (Tab. A 28) fallen die Positionen „Kern 2“ und „Mitte oben 2“ durch sehr hohe Trockenmasse- und Stärkegehalte in Verbindung mit geringen Rohfasergehalten auf. Aus diesen Werten ergeben sich mit 6,9 MJ NEL/kg TM im Vergleich zu den Positionen „Kern 1“ und „Mitte oben 1“ höhere Energiegehalte. Im Gegensatz zu den Essigsäuregehalten werden bei den Milchsäuregehalten akzeptable Werte erreicht.

Die Trockensubstanzgehalte bei der Variante *D HL 21,0* (Tab. A 29) sind als hoch einzustufen. Die Energiegehalte an den Positionen „Kern 2 und „Mitte oben 2“ übersteigen

die Energiegehalte im vorderen Bereich des Schlauches. Die Milchsäuregehalte liegen teilweise unter 30 g/kg TM, die Essigsäuregehalte sind zu gering.

#### 4.3.5 Messung der aeroben Stabilität und der Gärverluste im Erntejahr 2004

In Tabelle 19 sind die pH-Werte, die aerobe Stabilität und die Gärverluste der Varianten dargestellt, wie sie in den Siliergläsern ermittelt wurden. Die pH-Werte erreichen bis zum zweiten Tag in keinem Fall den angestrebten Wert von 4,0. Die aeroben Stabilitäten sind mit 0,5 bis 0,75 Tagen bei allen Varianten sehr gering. Die Gärverluste liegen zwischen 3,4 und 5,2 %.

Tab. 19: PH-Wert, aerobe Stabilität und Gärverluste (Siliergläser) im Erntejahr 2004

Variante	Parameter		
	pH-Wert (2. Tag)	aerobe Stabilität [d]	Gärverluste [%]
<b>B HL 5,0</b>	4,4 <sup>d</sup>	0,5 <sup>b</sup>	4,2 <sup>ab</sup>
<b>B HL 5,0 HS</b>	4,4 <sup>c</sup>	0,5 <sup>b</sup>	4,2 <sup>ab</sup>
<b>C HL 5,0</b>	4,2 <sup>e</sup>	0,75 <sup>a</sup>	5,2 <sup>a</sup>
<b>C HL 21,0</b>	4,2 <sup>f</sup>	0,75 <sup>a</sup>	4,5 <sup>ab</sup>
<b>D HL 5,0</b>	4,5 <sup>b</sup>	0,5 <sup>b</sup>	3,9 <sup>b</sup>
<b>D HL 21,0</b>	4,6 <sup>a</sup>	0,75 <sup>a</sup>	3,4 <sup>b</sup>

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Die Gärverluste der Silagen in den Schlauchsilos sind in Tabelle 20 dargestellt. Die Gärverluste übersteigen die Werte, die in den Siliergläsern ermittelt wurden, und sind generell als hoch einzustufen. Es ergibt sich keine klare Rangierung der Werte in Abhängigkeit von Messpunkt oder Variante. Allerdings zeigen sich bei den 21,0 mm-Varianten jeweils an den Messpunkten „Kern 2“ (*C HL 21,0*) bzw. „Kern 2“ und „Mitte oben 2“ (*D HL 21,0*) jeweils extrem hohe Gärverluste.

Tab. 20: Gärverluste (Schlauchsilos) im Erntejahr 2004

Variante	Gärverluste [%]			
	Messpunkt			
	Kern 1	Mitte oben 2	Kern 2	Mitte oben 2
<b>B HL 5,0</b>	7,1	6,9	9,9	8,6
<b>B HL 5,0 HS</b>	8,4	7,1	9,3	8,4
<b>C HL 5,0</b>	8,3	9,3	8,4	9,5
<b>C HL 21,0</b>	7,9	8,0	12,9	10,5
<b>D HL 5,0</b>	8,5	7,4	7,7	7,7
<b>D HL 21,0</b>	8,3	7,5	10,6	6,9

*Deutliche Schimmelbildung*

An der Position „Kern 2“ ist bei nahezu allen Varianten Schimmel feststellbar. Bei der Variante *C HL 21,0* tritt auch an der Position „Mitte oben 2“ Schimmel auf.

## 5 Diskussion

### 5.1 Bewertung der Vorversuche

Die Separation der Körner (Tab. 10) ist für die Beschreibung des Ausgangsmaterials von besonderer Bedeutung. Der Massenanteil der Körner ist eine entscheidende Größe für die Verdichtbarkeit der Varianten, da die Körner im Vergleich zur gehäckselten Restpflanze eine höhere Schüttdichte haben (KROMER, 1993). Die Ergebnisse der Körnerseparation für das Häckselgut des Versuchsjahres 2003 sind nur teilweise schlüssig. Während des Sedimentationsvorganges bleiben insbesondere Körner, die nur angeschlagen und nicht zerteilt oder vollständig zerstört sind, an der Wasseroberfläche, da diese nicht ausreichend Wasser aufnehmen um abzusinken. In dem sedimentierten Material finden sich des Weiteren neben Körnern auch Spindelstücke. Es kann demnach nicht von einer fehlerfreien Trennung ausgegangen werden. Die Ergebnisse der Körnerseparation werden durch die Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials nicht bestätigt. Für die Variante *B HL 14,0 SW 1,0* ergibt sich mit 34 % Trockenmassenanteil (Tab. 10) ein deutlich geringerer Körneranteil als für die Variante *A HL 14,0 SW 1,0*. Folge eines höheren Körneranteils sind unter anderem höhere Stärkegehalte. Werden diese Werte jedoch mit den Analyseergebnissen verglichen, so ergeben sich für beide Varianten mit 302 (Tab. A 1) bzw. 307 g/kg TM (Tab. A 1) nahezu gleiche Stärkegehalte. Die durch Körnersedimentation ermittelten Werte sind somit zweifelhaft.

Nach der Methode von KROMER und SCHMITTMANN (1999) wird das Häckselgut vor der Partikellängenfraktionierung auf 90 % TM getrocknet. Mögliche Konsequenz ist das Schrumpfen der Partikel. Zur Vermeidung dieses Prozesses wurde der Versuch durchgeführt, das Material in erntefeuchtem Zustand zu fraktionieren (Abb. 15). Bei dieser Untersuchung ergibt sich ein geringer Einfluss der theoretischen Häcksellänge auf die Partikellängenfraktionierung mit vergleichsweise hohen Standardabweichungen von bis zu 7 %. Bereits beim Siebvorgang wird die Fehlerquelle deutlich: Wenn das nicht getrocknete Häckselgut in den Siebturm gegeben wird, kommt es zum Anhaften von Partikeln in den Sieben, unabhängig von der Partikelgröße. Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass sich erhebliche Anteile der fraktionierten Partikel in der falschen Größenklasse befinden. Generell muss von einer Überschätzung der Partikelgrößen ausgegangen werden, da die Partikel vermehrt in den oberen Sieben anhaften.

Infolgedessen wurde diese Untersuchungsmethode verworfen und die ursprüngliche Methode (Trocknung des Materials), beschrieben in KROMER und SCHMITTMANN (1999), beibehalten.

Die Vorversuche an den 220 l-Behältern sollen Aufschluss über die Belastungs- und Entladungsdauer bis zum Erreichen einer weitestgehenden Dichtekonstanz geben. Aus den Ergebnissen kann eine erforderliche Belastungsdauer von 15 Sekunden (Abb. 17) und eine Entladungsdauer von 60 Sekunden (Abb. 18) abgeleitet werden. Es ist davon auszugehen, dass die Dichteänderung nach Ablauf dieser Zeitspannen zu vernachlässigen ist.

## 5.2 Bewertung des Ausgangsmaterials

### 5.2.1 Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials

Die klimatischen Bedingungen im Versuchsjahr 2003 mit sehr hohen Durchschnittstemperaturen in Verbindung mit geringen Niederschlägen führten zu sehr hohen Trockenmassegehalten im Häckselgut. Mit Werten von bis zu 48 % TM (Schnellbestimmung, Mikrowelle) wurden die Zielwerte von 28 bis 35 % (SPIEKERS, 2004) bei Weitem überschritten. Bei der Trockensubstanzbestimmung mit Hilfe der Mikrowelle ergeben sich in der Regel geringfügig höhere Werte als bei der Methode des VDLUFA. Allerdings erfolgt die Schnellbestimmung unmittelbar nach dem Häckseln der Varianten, so dass die Effekte bei den weiteren Untersuchungen auf diesen Trockenmassewert bezogen werden sollen. Die Spannweite der Werte innerhalb der Sorten, ermittelt nach den Methoden des VDLUFA, ist in Tabelle 21 dargestellt.

Tab. 21: Spannweiten verdichtungsrelevanter Parameter im Erntejahr 2003

Parameter	Einheit	Sorte	
		A	B
Trockenmasse	[g/kg]	374 - 446	334 - 367
Rohfaser	[g/kg TM]	148 - 211	167 - 184
Rohstärke	[g/kg TM]	244 - 351	275 - 310

Unter extremen klimatischen Bedingungen (Hitze und Trockenheit) wie im Erntejahr 2003 kann es zu einer schnelleren Abreife in Verbindung mit verminderter Kolbenbildung

kommen (PICKERT, 2001). In Abhängigkeit von der Wasserversorgung am Standort waren die Pflanzen innerhalb eines Bestandes in sehr unterschiedlichem Ausmaß von diesen Bedingungen betroffen. Die Sorte A zeigt eine erhebliche Streuung bei Trockenmasse-, Stärke- und Rohfasergehalt. Diese Werte geben Aufschluss über Kolben- bzw. Körnergehalte der Pflanzen. Mit steigendem Kolbenanteil steigt der Trockenmassegehalt der Pflanze, der Rohfasergehalt wird relativ zur Gesamtpflanze geringer. Der Stärkegehalt steigt an. Da diese Werte bei der Sorte A stark schwanken, besteht im Jahr 2003 die Möglichkeit einer unterschiedlich ausgeprägten Kolbenbildung aufgrund des Trockenstresses. Bei der Sorte B ist die Spannweite deutlich geringer. Dies steht im Zusammenhang mit dem stärker ausgeprägten „Greening-Effekt“ der Sorte B im Vergleich zur Sorte A. Es ist bekannt, dass Sorten mit einer verlangsamten Abreife tendenziell weniger stark auf Jahreseffekte reagieren als schnell abreifende Sorten (PICKERT, 2001).

Eine weitere Einflussgröße stellen Pflanzenlänge und Kolbenanteil dar. Im Mittel ergeben sich für die qualitätsbetonte Sorte A (erhöhter Kolbenanteil, durchschnittliche Pflanzenhöhe) tendenziell höhere Trockenmasse und Stärkegehalte als für die restpflanzenbetonte Sorte B, mit einer gesteigerten Pflanzenhöhe (BUNDESSORTENAMT, 2004) und geringerem Kolbenanteil.

Es ist bekannt, dass hohe Trockenmassegehalte eine negative Auswirkung auf die plastische Verdichtbarkeit des Materials haben (DERNEDDE, 1983). Da die Schwankungen in den Inhaltsstoffen bei der Sorte A allerdings auf Unterschiede in den Kolbenbildung hinweisen, können erhöhte Trockenmassegehalte hier auch auf höhere Körneranteile zurückzuführen sein. Aufgrund der höheren Dichte von Körnern (KROMER, 1993) wäre in diesem Fall der Effekt der Trockenmasse auf die erzielten Verdichtungserfolge umgekehrt. Mit steigender Trockenmasse würde die Trockenmassedichte ansteigen.

Erhöhte Rohfasergehalte erschweren die Verdichtung (DERNEDDE, 1983). Die Rohfasergehalte überschreiten in nur einem Fall die Obergrenze von 200 g/kg TM (HERTWIG, 2004).

Im Versuchsjahr 2004 waren die Wetterverhältnisse im Vergleich zum Vorjahr feucht und kühl. Aufgrund der anhaltenden Niederschläge konnte die Ernte erst zu einem späten Zeitpunkt stattfinden, so dass die Trockenmassegehalte wiederum bei bis zu 44 % liegen.

Die Spannweiten von Trockenmasse-, Rohfaser- und Stärkegehalten unterschreiten die Spannweiten im Jahr 2003. Somit ist der Bestand homogener als im Erntejahr 2003.

Bei der Sorte B wären Unterschiede zwischen der Variante *B HL 5,0*, die in konventioneller Schnitthöhe von 30 cm gehäckselt wurde, und der Hochschnittvariante *B HL 5,0 HS* mit 70 cm Schnitthöhe zu erwarten gewesen. Aufgrund des geringeren Restpflanzenanteils beim Hochschnitt müssten höhere Kolbenanteile zu höheren Energiegehalten führen (NUSSBAUM, 2005). Dies war allerdings nur bei der Probennahme für die Verdichtungs- und Silierversuche (Tab. A 4) der Fall. Fraglich ist, ob die unterschiedlichen Ergebnisse auf eine Entmischung des Materials beim Transport vom Schlag zum Betrieb zurückzuführen ist. Diese sollte durch den Einsatz von Dosierwalzen beim Entladen des Materials kompensiert werden. Möglicherweise war diese Maßnahme nicht ausreichend. In diesem Fall läge jedoch ein systematischer Fehler vor. Das heißt, dieser Effekt hätte auf alle Proben gleichermaßen zutreffen müssen. Dies war jedoch nicht der Fall.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle stellt die Probennahme dar (KROMER, 2004). Das Material für die Verdichtungs- und Silierversuche wurde von den Transportfahrzeugen auf einer Betonfläche abgekippt. Um eine möglichst repräsentative Probe zu erhalten, wurden die Proben jeweils aus dem Kern des Schüttgutes entnommen. Es wurde mit jeder Probe auf die gleiche Weise verfahren.

Bei den Schlauchsilos wurde das Material während des Abkippens in die Schlauchpresse entnommen. Falls ein systematischer Fehler vorläge, müssten alle Energiegehalte gleichgerichtet verändert sein. Da jedoch die Relationen zwischen den Energiegehalten der Proben für die Verdichtungs- und Silierversuchen und für die Schlauchsilos variieren, ist davon auszugehen, dass die Unterschiede nicht durch die Art der Probennahme erklärbar sind.

### **5.2.2 Einfluss des Ausgangsmaterials auf die statistische Auswertung**

Da bei der Versuchsplanung nicht mit den extremen Klimaverhältnissen im Erntejahr 2003 und 2004 zu rechnen war, wurde eine einfache Wiederholung der Analysen des Ausgangsmaterials als ausreichend angenommen. Aufgrund der Unterschiede in den Trockenmassegehalten werden Sorten- und Häcksellängeneffekte möglicherweise überdeckt, da auch die Trockenmassegehalte einen deutlichen Einfluss auf Zerkleinerungs- (KROMER und SCHMITTMANN, 1999) und Verdichtungseigenschaften (HONIG und

ROHR, 1985) haben. Somit können keine statistisch abgesicherten Aussagen über den Einfluss von Sorten, Häcksellängen und Aufbereitereinstellungen getroffen werden. Es können jedoch bei entsprechender Wiederholungszahl qualitative Aussagen mit Hilfe einfacher Mittelwertvergleiche getroffen werden, ohne diese direkt auf einen Einflussfaktor zu beziehen. Des Weiteren können Tendenzen im Rahmen einer beschreibenden Statistik abgeleitet werden.

### 5.3 Partikellängenfraktionierung und Bewertung der Überlängenfraktion

Die Partikellängenfraktionierung für das Erntejahr 2003 (Abb. 16) ergibt neben dem klaren Einfluss der theoretischen Häcksellänge ebenfalls einen Einfluss der Spaltweite auf die Größenklassenverteilung. Für die Verdichtbarkeit der Varianten ist insbesondere die Überlängenfraktion von Interesse, da Überlängen hauptsächlich aus zähen Lieschen bestehen, die sich nur schwer verdichten lassen (WENNER, 1986; GERSGRAPPERHAUS, 1992). ZIMMER und HONIG (1979) bezeichnen Partikel >25 mm als Überlängen und fordern einen maximalen prozentualen Überlängenanteil von 5 %. Tabelle 22 zeigt den Überlängenanteil in Abhängigkeit von Sorte, Trockenmassegehalt, Spaltweite und Häcksellänge im Versuchsjahr 2003.

Tab. 22: Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf den Massenanteil von Partikeln > 25 mm (Erntejahr 2003)

Parameter	Einheit	Sorte					
		A		B		A	
Spaltweite	[mm]	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0
Häcksellänge	[mm]	5,5	21,0	5,5	21,0	5,5	21,0
TM-Gehalt	[%]	36,7	40,8	36,3	34,7	45,7	48,0
Partikel > 25 mm	[%]	0.8 <sup>c</sup>	2.1 <sup>bc</sup>	0.5 <sup>c</sup>	4.3 <sup>ab</sup>	0.6 <sup>c</sup>	7.0 <sup>a</sup>

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Die 21 mm-Varianten, die mit einer Spaltweite von 2,0 mm gehäckselt wurden, liegen in den Fraktionen  $x > 25$  mm über der Variante *A HL 21,0 SW 1,0*. Es muss angenommen werden, dass das Häckselgut beim Passieren eines Corn Crackers mit 1,0 mm Spaltweite nachzerkleinert wird. Somit hätte der Corn Cracker nicht nur einen Einfluss auf den Aufbereitungsgrad der Körner, sondern auch auf die Partikelgröße des gesamten

Häckselgutes. Ähnliche Ergebnisse erzielten HONIG und ROHR (1982b) und SCHWARZ et al. (1997).

Der Massenanteil der sehr trockenen 21,0 mm-Variante der Sorte A (48 % TM) übersteigt den der 21,0 mm-Variante der Sorte B im Bereich  $x > 25$  mm erheblich. Möglicherweise erschwert der höhere Trockenmassegehalt der Sorte A die Zerkleinerung des Materials. Der Einfluss des Trockenmassegehaltes auf die Zerkleinerung von Mais ist bekannt (KROMER und SCHMITTMANN, 1999) und zeigt sich auch bei der Partikellängenfraktionierung im Erntejahr 2004 (Tab. 23).

Tab. 23: Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf den Massenanteil von Partikeln  $> 25$  mm (Erntejahr 2004)

Parameter	Einheit	Sorte					
		B		C		D	
Häcksellänge	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
TM-Gehalt	[%]	40,3	42,1	36,4	35,4	43,7	42,7
Partikel $> 25$ mm	[%]	1,2 <sup>b</sup>	0,4 <sup>b</sup>	0,9 <sup>b</sup>	1,1 <sup>b</sup>	0,6 <sup>b</sup>	3,3 <sup>a</sup>

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden ( $P < 0,05$ )

Der höhere Trockenmassegehalt der Variante *D HL 21,0* (43 % TM) im Vergleich zu Variante *C HL 21,0* (35 % TM) führt zu einer schlechteren Zerkleinerbarkeit der trockeneren Variante und damit zu einem signifikant höheren Massenanteil von Partikeln  $> 25$  mm Länge. Die in der Literatur bekannten Zusammenhänge können weitgehend bestätigt werden.

Die Größenklassenfraktionierung wird beeinflusst von der theoretischen Häcksellänge, dem Trockenmassegehalt und in den Größenklassen  $x > 25$  mm auch von der Spaltweite des Corn Crackers. Die Hochschnittvariante (Sorte B) verringert den Überlängenanteil. Ein Sorteneinfluss ist nicht erkennbar, möglicherweise wird dieser jedoch von anderen Einflussgrößen überdeckt.

ZIMMER und HONIG (1979) fordern einen Überlängenanteil (Partikel  $> 25$  mm) von maximal 5 %. Dieser Überlängenanteil wird bei der Variante *A HL 21,0 SW 2,0* überschritten. Hier liegt neben der gesteigerten Häcksellänge und der erhöhten Spaltweite ein hoher Trockenmassegehalt (48 %) vor, der die Zerkleinerung zusätzlich erschwert. Bei den verbleibenden Varianten lag der Überlängenanteil unter der Obergrenze von 5 %.

Für einen Häckslervergleich können Varianten mit gleicher Häcksellänge und ähnlichem TM-Gehalt aus beiden Erntejahren verglichen werden. Im ersten Erntejahr (2003) wurde der „Claas Jaguar 890“ eingesetzt. Im zweiten Erntejahr (2004) wurde mit einem „John Deere 7500“ gehäckselt. Die Überlängenanteile bei den 5,5 mm-Varianten liegen im ersten Erntejahr trotz höherer Trockenmassegehalte tendenziell unter den Überlängenanteilen der 5,0 mm-Varianten im Erntejahr 2004. Bei den 21,0 mm-Varianten sind die unterschiedlichen Spaltweiten zu berücksichtigen. Bei einem Vergleich der 21,0 mm-Varianten, die mit einer Spaltweite von 1,0 gehäckselt wurden, kann keine deutliche Rangierung festgestellt werden. Die TM-Unterschiede überdecken möglicherweise einen Häckslereinfluss.

## 5.4 Bewertung der Verdichtbarkeitsuntersuchungen

### 5.4.1 Materialprüfmaschine und 220 l-Behälter

Bedingt durch die hohen Trockenmassegehalte der Varianten (35 bis 48 %) ergeben sich in Anlehnung an die Aussagen von SPIEKERS und SCHIBORRA (2002) hohe Zielgrößen bezüglich der erforderlichen Lagerungsdichte von 290 bis 420 kg TM/m<sup>3</sup>. Die Zielwerte werden in allen Fällen um mindestens 70 kg TM/m<sup>3</sup> unterschritten. Weder mit der Fünffachschichtung und –verdichtung in den 220 l-Behältern bei 0,2 MPa, noch mit einer Einfachverdichtung bei 0,45 MPa sind die Zielwerte erreichbar (Tab. 24).

Tab. 24: Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf die erzielten Dichten in Kleinsilos und im Labormaßstab (Erntejahr 2003)

Parameter	Einheit	Sorte					
		A		B		A	
Spaltweite	[mm]	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0
Häcksellänge	[mm]	5,5	21,0	5,5	21,0	5,5	21,0
TM-Gehalt	[%]	36,7	40,8	36,3	34,7	45,7	48,0
Partikel > 25 mm	[%]	0,8 <sup>c</sup>	2,1 <sup>bc</sup>	0,5 <sup>c</sup>	4,3 <sup>ab</sup>	0,6 <sup>c</sup>	7,0 <sup>a</sup>
Dichte (220 l-Behälter)	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	189 <sup>cde</sup>	214 <sup>bc</sup>	199 <sup>bcd</sup>	171 <sup>de</sup>	251 <sup>a</sup>	167 <sup>e</sup>
Dichte (Materialprüfmaschine)	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	227 <sup>c</sup>	216 <sup>d</sup>	227 <sup>c</sup>	187 <sup>e</sup>	277 <sup>a</sup>	196 <sup>e</sup>

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Mit steigendem Trockenmassegehalt steigt auch die Differenz zwischen Zielwert und realisiertem Wert. Da in der Praxis in der Regel mit einem deutlich geringeren Druck (0,2 MPa) verdichtet wird, ist fraglich, ob die Zielwerte in der Praxis bei Material mit Trockenmassegehalten über 33 % realisierbar sind.

Die Ergebnisse der Verdichtungsversuche im Versuchsjahr 2003 bestätigten nur teilweise die aus der Literatur bekannten Zusammenhänge. Sowohl die Untersuchungen an der Materialprüfmaschine als auch die Versuche in den 220 l-Behältern ergaben bei einem Druck von 0,45 bzw. 0,2 MPa mit einer Ausnahme, die möglicherweise auf die Inhomogenität des Materials zurückzuführen ist, einen gerichteten Einfluss der Häcksellänge auf die erreichten Trockenmassedichten nach Rückfederung. Dies entspricht den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen (DERNEDDE, 1983; JOHNSON et al., 2002a). Allerdings kann der reduzierende Einfluss eines erhöhten Trockenmassegehaltes auf die Verdichtbarkeit (HONIG und ROHR, 1985) ebenso wenig bestätigt werden wie ein reduzierender Einfluss einer größeren Spaltweite. In aktuelleren Untersuchungen (MUCK und HOLMES, 2005) an Schlauchsilos konnten jedoch die Tendenzen der eigenen Untersuchung bestätigt werden. Mit steigenden Trockenmassegehalten wurden steigende Trockenmassedichten festgestellt. Diese Trockenmasseeinflüsse scheinen besonders im Versuchsjahr 2003 (Tab. 24) die Einflüsse der Häcksellänge zu überdecken. Die Variante *A HL 5,5 SW 2,0*, die mit einer Spaltweite von 2,0 mm gehäckselt wurde, erreichte mit einem Wert von 277 kg TM/m<sup>3</sup> die höchste TM-Dichte im Erntejahr 2003. Somit trifft der von MUCK und HOLMES (2005) festgestellte steigernde Effekt einer erhöhten Trockenmasse auf die TM-Dichte zu. Des Weiteren stellten MUCK und HOLMES (2005) eine Verringerung der TM-Dichte durch Aufbereitung der Körner fest. Auch diese Aussage ist für die eigene Untersuchung zutreffend. Für die 21,0 mm-Varianten, die mit einer Spaltweite von 2,0 mm gehäckselt wurden, trifft dies nicht zu. Möglicherweise übersteigt der Effekt der gesteigerten Häcksellänge die aus den Arbeiten von MUCK und HOLMES (2005) bekannten Effekte. Es besteht allerdings neben den bisher genannten Parametern die Möglichkeit der Einflussnahme weiterer Faktoren. DERNEDDE (1985) stellte eine Erhöhung der Sperrigkeit durch gesteigerte Rohfaseranteile fest. KROMER (1993) wies auf eine höhere Schüttdichte der Körner im Vergleich zur zerkleinerten Restpflanze hin. Für die Variante *A HL 5,5 SW 1,0* ergibt sich beispielsweise teilweise eine geringere Verdichtbarkeit als für die Variante *A HL 21,0 SW 1,0*. Eine mögliche Begründung liegt darin, dass sich weniger Körner in dieser Probe befanden. Somit ergäbe sich für die

21,0 mm-Varianten allein aufgrund des höheren spezifischen Gewichtes der Körner (KROMER, 1993) bereits eine höhere Dichte.

Der mögliche Zusammenhang zwischen Inhomogenität der Trockenmassegehalte, möglicher verminderter Kolbenbildung und daraus resultierenden Schwankungen in der Verdichtbarkeit wurde in Kapitel 5.2.1 erläutert.

Die Zielwerte (SPIEKERS und SCHIBORRA, 2002) werden im Versuchsjahr 2004 bei keiner Verdichtungsmethode erreicht (Tab. 25). Die beste Annäherung wird bei den Varianten mit den geringsten Trockenmassegehalten erzielt. In Praxiserhebungen (KLEINMANS et al., 2005) konnten die Anforderungen an die Lagerdichte bei TM-Gehalten bis zu 45 % nur in Einzelfällen (Hochschnittvarianten) erfüllt werden. In einer aktuellen Untersuchung zur Häcksellänge (THAYSEN, 2004b) wurde Häckselgut mit einer Häcksellänge von 22 mm mit Hilfe von zwei Walzschleppern (Gesamtgewicht 23 t) verdichtet. Die erzielte Lagerdichte bei diesem hohen Verdichtungsaufwand lag bei 190 kg TM/m<sup>3</sup> und somit ebenfalls deutlich unter den Zielwerten.

In neueren Empfehlungen zur Verdichtung (THAYSEN, 2004a) werden zur Sicherung des Siliererfolges in Flachsilos Werte von mindestens 250 kg TM/m<sup>3</sup> gefordert. Auch diese Größe wurde in den eigenen Verdichtungsversuchen der Erntejahre 2003 und 2004 nur in Einzelfällen erreicht. Folglich ist zu klären, durch welche Maßnahmen die Dichten gesteigert werden können. Die Verdichtungsversuche in den 220 l-Behältern zeigen, dass eine einmalige Verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa pro aufgebrauchte Schicht von 30 cm nicht ausreichend ist. Die Einfachverdichtung lässt sich durch das Aufbringen und Verdichten mehrerer Folgeschichten nur teilweise kompensieren. Die Zielwerte sind auf diese Art nicht zu erreichen. Möglicherweise führt ein gesteigerter Druck oder eine Mehrfachverdichtung zu einer Lagerdichte, die zumindest einem Zielwert von 250 kg TM/m<sup>3</sup> (THAYSEN, 2004a) entspricht. Die Auswirkungen der Mehrfachverdichtung derselben Schicht und einer Drucksteigerung sind in Tabelle 24 dargestellt.

Tab. 25: Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf die erzielten Dichten im Labormaßstab (Erntejahr 2004)

Sorte	Einheit	Sorte					
		B		C		D	
Häcksellänge	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
TM-Gehalt	[%]	40,3	42,1	36,4	35,4	43,7	42,7
Partikel > 25 mm	[%]	1,2 <sup>b</sup>	0,4 <sup>b</sup>	0,9 <sup>b</sup>	1,1 <sup>b</sup>	0,6 <sup>b</sup>	3,3 <sup>a</sup>
0,2 MPa (Einfache Verdichtung)	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	179 <sup>b</sup>	213 <sup>a</sup>	177 <sup>b</sup>	153 <sup>c</sup>	159 <sup>c</sup>	129 <sup>d</sup>
0,2 MPa (Dreifache Verdichtung)	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	203 <sup>b</sup>	242 <sup>a</sup>	199 <sup>b</sup>	180 <sup>c</sup>	179 <sup>c</sup>	153 <sup>d</sup>
0,45 MPa (Einfache Verdichtung)	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	199 <sup>b</sup>	241 <sup>a</sup>	204 <sup>b</sup>	182 <sup>c</sup>	182 <sup>c</sup>	145 <sup>d</sup>

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden ( $P < 0,05$ )

Bei allen Varianten wird durch einfache Verdichtung mit 0,2 MPa mit 129 bis 213 kg TM/m<sup>3</sup> erwartungsgemäß die geringste Lagerdichte erreicht. Die dreifache Verdichtung mit 0,2 MPa führt zu einer Dichtesteigerung von 6 bis 12 %. Der Zielwert für die Lagerdichte von Mais liegt bei 250 kg TM/m<sup>3</sup>. Gemessen an diesem Zielwert führt auch eine dreifache Verdichtung mit 0,2 MPa nicht zu einer ausreichenden Lagerdichte. Eine Steigerung des Verdichtungsdruckes auf 0,45 MPa bei einmaliger Verdichtung führt im Vergleich zu einer einmaligen Verdichtung mit 0,2 MPa zu einer Dichtesteigerung von 11 bis 19 %. Auch diese Lagerdichten liegen mit 145 bis 241 kg TM/m<sup>3</sup> unterhalb der Zielwerte.

Resümierend kann also festgehalten werden: Eine Steigerung der Zahl der Verdichtungs Vorgänge mit geringem Druck führt zwar zu einer deutlichen Dichtesteigerung, diese ist jedoch nicht ausreichend, um die Zielwerte zu erreichen. Ebenso kann eine Drucksteigerung eine zu geringe Anzahl von Verdichtungs Vorgängen nicht kompensieren. Es ist also eine Kombination von Drucksteigerung und einer mehrfachen Wiederholung von Verdichtungs Vorgängen zu empfehlen. Diese Schlussfolgerung wird durch Empfehlungen für die Verdichtung in der Praxis (THAYSEN, 2004a) bestätigt. Es wird eine Verdichtung mit Walzschleppern mit einer Masse von über 10 t oder mit Radladern empfohlen. Der Druck sollte mit Zusatzgewichten erhöht werden. Die Erntegeschwindigkeit sollte von der Walzleistung abhängig gemacht werden, so dass eine ausreichende Zahl von Verdichtungs Vorgängen möglich ist. In einer Untersuchung an Flachsilos (THAYSEN, 2004b) gelang es, eine 7 mm- und 22 mm-Variante auf dasselbe Niveau (etwa 190 kg TM/m<sup>3</sup>) zu verdichten, indem bei der längeren

Variante zwei Walzschlepper mit einem Gesamtgewicht von 23 t eingesetzt wurden. Bei der 5 mm-Variante wurde ein Radlader mit einem Gewicht von 11 t eingesetzt. Eine Steigerung von Druck und Anzahl der Überfahrten kann also zu einer höheren Lagerdichte führen bzw. den Effekt einer gesteigerten Häcksellänge ausgleichen.

Es werden kurze Häcksellängen (4 bis 6 mm) empfohlen (THAYSEN, 2004a). Diese führen in der eigenen Untersuchung zu Dichtesteigerungen von maximal 25 % im Vergleich zu Häcksellängen von 21,0 mm. Auch der Hochschnitt wirkt sich positiv auf die erzielten Lagerdichten aus. Die Lagerdichten der Hochschnittvariante überstiegen die Varianten, die in konventioneller Höhe gehäckselt wurden, um bis zu 21 %. Diese Effekte können jedoch möglicherweise durch erhöhte Körner- und/oder reduzierte Rohfasergehalte überdeckt werden. Der Einfluss der Spaltweite und des Trockenmassegehaltes auf die Verdichtbarkeit ist ungerichtet. Aussagen über den Sorteneinfluss auf die Verdichtbarkeit waren mit dem gewählten Versuchsansatz nicht möglich.

#### **5.4.2 Schlauch- und Flachsilos**

Eine Dichtemessung an den Schlauchsilos im Versuchsjahr 2003 war aufgrund der Messmethodik des Schlagzylinders („Siloboy“) nicht möglich. Der Schlagzylinder wird von oben vertikal in das Silo eingeschlagen (BALLHEIMER, 2004). Bei den Schlauchsilos hätte dies zu zahlreichen Beschädigungen der Folie sowie zu Luftkanälen weit hinter der Anschnittfläche geführt. Daher wurde auf eine direkte Dichtemessung verzichtet. Die Dichte wurde aus der Silogeometrie kalkuliert (Abb. 22). Dabei fand jedoch die Formveränderung der Schlauchsilos nach dem Pressen keine Berücksichtigung.

Im Erntejahr 2004 wurde die Silogeometrie vor dem Öffnen der Schlauchsilos durch Umfangsmessungen exakter bestimmt als im Erntejahr 2003. Die Kalkulation der Lagerdichten aus der Silogeometrie ergab eine vergleichsweise hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen der zusätzlich durchgeführten Dichtemessungen (Tab. 17). Wird auf die Schläuche, die im Jahr 2004 gepresst wurden, die gleiche Berechnungsmethode angewandt wie im Jahr 2003, ergibt sich eine annähernde Verzweifachung der Werte. Folglich ist davon auszugehen, dass die Lagerdichten in den Schläuchen im Versuchsjahr 2003 erheblich überschätzt wurden. Zwar können Vergleiche zwischen den Schlauchsilos dieses Versuchsjahres angestellt werden, da dieser Effekt alle Varianten gleichermaßen betrifft, jedoch können die absoluten Werte nicht zu einem Vergleich mit anderen Ergebnissen herangezogen werden.

Als problematisch erwies sich auch der Einsatz des Schlagzylinders („Siloboy“) an den Flachsilos (Tab. 12). Bei der 5,0 mm-Variante ergibt sich eine Differenz von annähernd 140 kg TM/m<sup>3</sup> zwischen der Beprobung mit dem Schlagzylinder (81 kg TM/m<sup>3</sup>) und der Messung mit dem Siloblockschneider (219 kg TM/m<sup>3</sup>). Bei der Dichtemessung mit dem Schlagzylinder besteht die Möglichkeit, dass nicht ein kreisrunder Kanal aus dem Silostock geschnitten wird, sondern das Material nach den Seiten hin weggedrückt wird. Infolgedessen befindet sich weniger Silage im Inneren des Schlagzylinders und die Lagerdichte wird unterschätzt. Eine Messung mit dem Siloblockschneider stellt in der Regel eine Referenzmethode dar (KLEINMANS et al., 2005). Es wird eine wesentlich größere Probe aus dem Silostock entnommen, so dass Randeffekte und mögliche Bröckelverluste in geringerem Maße ins Gewicht fallen. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Dichtemessungen mit dem Siloblockschneider für die Diskussion herangezogen werden. Die Lagerdichte der 21,0 mm-Variante liegt im Flachsilo mit 188 kg TM/m<sup>3</sup> deutlich unter der Lagerdichte der 5,0 mm-Variante (219 kg TM/m<sup>3</sup>). Beide Lagerdichten sind als zu gering einzustufen.

Die beiden Flachsilos wurden jeweils mit dem gleichen Aufwand (Radlader, 15 t) verdichtet. Die Dichtemessungen an verschiedenen Punkten der Anschnittfläche der Schlauchsilos im Erntejahr 2004 ergeben mit 163 bis 203 kg TM/m<sup>3</sup> die höchsten Lagerdichten im Kern der Schlauchsilos (Tab. 16). Die Begründung liegt darin, dass dieser Messpunkt der tiefste an der Anschnittfläche ist. Wenn sich die Schlauchsilos nach Abschluss des Siliervorganges „setzen“, d.h. im unteren Bereich an Breite zunehmen, führt die Eigenmasse zu einer Nachverdichtung im unteren Bereich des Schlauches. Ähnliche Tendenzen können an den Flachsilos beobachtet werden. Auch hier nimmt die Dichte nach unten hin zu.

Resümierend lässt sich auch für die Flach- und Schlauchsilos feststellen, dass die Dichte mit steigender Häcksellänge verringert wird und generell nicht ausreichend ist. Somit besteht für die Verdichtungstechnik sowohl bei Flachsilos als auch bei Schlauchsilos ein großer Entwicklungsbedarf.

### **5.4.3 Übertragbarkeit der Dichten der verschiedenen Verdichtungsmethoden**

Für das Versuchsjahr 2003 können Aussagen über die Übertragbarkeit der Ergebnisse in den verschiedenen Siloformen nur schwerlich getroffen werden. Für die Schläuche liegen lediglich Ergebnisse vor, die eine Rangierung der Varianten ermöglichen (Abb. 22). Die

absoluten Werte sind jedoch nicht für einen Vergleich von Ergebnissen verwendbar, die mit unterschiedlichen Methoden ermittelt wurden.

Bei den Flachsilos wird ein Vergleich durch die sehr unterschiedlichen Trockenmassegehalte der Variante *A HL 5,5 SW 1,0* bei der Probennahme für die Verdichtungs- und Silierversuche (37 % TM) und die Flachsilos (43 % TM) erschwert (Tab. 11). Auch für die Variante *A HL 21,0 SW 2,0* ergaben sich deutliche Unterschiede im Trockenmassegehalt der Proben für die Flachsilos (39 % TM) und der Proben für die Verdichtungs- und Silierversuche (48 %).

Die erreichten Lagerdichten in den Flachsilos kommen den Dichten nach Rückfederung an der Materialprüfmaschine (0,45 MPa) am nächsten. Hier werden Werte von 227 kg TM/m<sup>3</sup> (*A HL 5,5 SW 2,0*) und 196 kg TM/m<sup>3</sup> (*A HL 21,0 SW 2,0*) erreicht (Tab. 26).

Tab. 26: Übertragbarkeit der Verdichtung im Labormaßstab (Materialprüfmaschine) auf die Dichten im Flachsilo (Erntejahr 2003)

Parameter	Einheit	Sorte					
		A		B		A	
Spaltweite	[mm]	1,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0
Häcksellänge	[mm]	5,5	21,0	5,5	21,0	5,5	21,0
TM-Gehalt	[%]	36,7	40,8	36,3	34,7	45,7	48,0
Partikel > 25 mm	[%]	0,8 <sup>c</sup>	2,1 <sup>bc</sup>	0,5 <sup>c</sup>	4,3 <sup>ab</sup>	0,6 <sup>c</sup>	7,0 <sup>a</sup>
Dichte (Materialprüfmaschine)	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	227 <sup>c</sup>	216 <sup>d</sup>	227 <sup>c</sup>	187 <sup>e</sup>	277 <sup>a</sup>	196 <sup>e</sup>
Lagerdichte (Flachsilo)	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	219	–	–	–	–	188

Buchstaben mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Die Dichtemessungen bzw. -kalkulationen nach verschiedenen Methoden (Bohrstock Fa. Pioneer, Blockschnidermessung, Dichtekalkulation aus Geometrie) im Versuchsjahr 2004 ergaben eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse (Tab. 17). Die Tendenzen entsprechen ebenfalls den Messergebnissen der Materialprüfmaschine.

### 5.5 Bewertung der Temperaturverläufe in den verschiedenen Siloformen

Wie in Kapitel 5.4.2 erläutert, ist davon auszugehen, dass die Lagerdichten an den Schlauchsilos im Erntejahr 2003 erheblich überschätzt wurden. Es ist von einem geringen Verdichtungserfolg auszugehen. Diese Annahme wird durch die Temperaturverläufe an

den Anschnittflächen bestätigt. An allen Anschnittflächen wurden im Laufe des Vorschubes zeitweise Temperaturen von mindestens 24°C im Kern gemessen. Nach SPIEKERS et al., 2004) ist bei einer Temperaturerhöhung von über 20°C im Kern sicher von Nacherwärmung auszugehen. Somit traten bei allen Schlauchsilos Nacherwärmungen auf. Ein gerichteter Einfluss der Häcksellänge ist nicht erkennbar.

Die Temperaturen im Inneren der Flachsilos (Abb. 27) sowie an der Anschnittfläche des Flachsilos (Abb. 28) der Variante *A HL 5,5 SW 1,0* zeigen keinen wesentlichen Temperaturanstieg. Im Gegensatz dazu steigt die Temperatur an der Anschnittfläche der 21,0 mm-Variante deutlich auf bis zu 24°C an. Dieser Temperaturanstieg ist möglicherweise auf die geringere Lagerdichte dieses Silos im Vergleich zur 5,5 mm-Variante (Tab. 12) und den daraus resultierenden Lufteintritt in den Silostock zurückzuführen.

Anhand der Ergebnisse im Versuchsjahr 2004 soll der Zusammenhang von theoretischer Häcksellänge, Trockensubstanz, Partikellänge, Lagerdichten und Temperaturverlauf erläutert werden (Tab. 27).

Tab. 27: Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf die erzielten Dichten in den Schlauchsilos und die Maximaltemperaturen an der Anschnittfläche (Erntejahr 2004)

Parameter	Einheit	Sorte					
		B		C		D	
Häcksellänge	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
TM-Gehalt	[%]	40,3	42,1	36,4	35,4	43,7	42,7
Partikel > 25 mm	[%]	1,2 <sup>b</sup>	0,4 <sup>b</sup>	0,9 <sup>b</sup>	1,1 <sup>b</sup>	0,6 <sup>b</sup>	3,3 <sup>a</sup>
Dichte Schlauchsilos	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	193	201	188	157	178	149
Maximale Temperatur an der Anschnittfläche ("Mitte")	[°C]	14	21	17	30	32	35

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Die Varianten der Sorte B zeigen leichte Temperaturanstiege an den Anschnittflächen der Schlauchsilos. Dabei übersteigen die Temperaturen der Hochschnittvariante *B HL 5,0 HS*, trotz geringeren Überlängenanteils (Partikel >25 mm) und daraus resultierender höherer Lagerdichte die Temperatur der konventionell gehäckselten Variante. Eine mögliche Begründung ist der höhere Trockenmassegehalt der Hochschnittvariante.

Bei den Sorten C und D übersteigen die Temperaturen der 21,0 mm-Varianten die Temperaturen an den Anschnittflächen der 5,0 mm-Varianten. Es ist davon auszugehen, dass die Begründung wiederum in dem stärkeren und tieferen Lufteintritt in den Silostock aufgrund der gröberen Struktur und der schlechteren Verdichtung liegt. Die Unterschiede bei der Sorte D sind gering. Die hohen Trockenmassegehalte und der geringe Verdichtungserfolg bei beiden Varianten überdecken möglicherweise die Effekte der Häcksellänge.

Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass im Erntejahr 2004 sowohl die Trockenmassegehalte als auch die Häcksellänge einen Einfluss auf die Temperaturen an den Anschnittflächen zeigen. Diese Abweichung von den Temperaturrelationen am Flachsilo erklärt sich möglicherweise durch die unterschiedliche Form und die größere Oberfläche der Schlauchsilos. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass noch eine Reihe weiterer Einflussfaktoren auf die Schlauchsilos einwirken (z.B. Umgebungstemperatur, Sonneneinstrahlung und Position der Schlauchsilos, Unregelmäßigkeiten im Vorschub etc.).

Die in Kapitel 5.6 beschriebenen Silagequalitäten schließen keine Analysen von Gärschädlingen, wie Hefen, Schimmelpilzen oder Bakterien ein. Insbesondere Hefen als auch Bakterien (in Gegenwart von Ethanol) können die Nacherwärmung steigern (WYSS, 1994). Über diese Einflüsse können durch die eigenen Messungen keine Aussagen gemacht werden.

## **5.6 Bewertung der Silagequalität**

Im Gegensatz zu den Analysen des Ausgangsmaterials wurden die Analysen der Silage in dreifacher Wiederholung durchgeführt. Infolgedessen soll diesen Ergebnissen statistisch mehr Bedeutung beigemessen werden.

Die Analyseergebnisse für das silierte Material aus den Siliergläsern ermöglichen eine Beurteilung der Siliereigenschaften unter Ausschluss der Verdichtungseigenschaften des Materials, da in jedes Glas in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt des Häckselgutes eine definierte Masse eingewogen wird. Aufgrund der weitestgehenden Standardisierung sind die Siliergläser unbeeinflusst von externen Einflussfaktoren, wie z.B. veränderlichen Klimaverhältnissen.

Die Analyseergebnisse im Ausgangsmaterial zeichnen sich im Erntejahr 2003 insbesondere durch sehr hohe Stärkegehalte aus (Tab. A 1–3). In Verbindung mit geringen Gehalten an wasserlöslichen Kohlenhydraten ist von einer starken Ausreife des Kornes auszugehen (SPIEKERS und MUES, 2001). Auffällig sind die sehr geringen Pufferkapazitäten, die in Verbindung mit hohen Besätzen an Milchsäurebakterien auf eine gute Silierbarkeit schließen lassen. Für die Sorte B ergeben sich im silierten Material für die 21,0 mm-Varianten die geringsten Energieverluste, möglicherweise bedingt durch geringste Pufferkapazitäten. Allerdings sind die Unterschiede im Vergleich zu den verbleibenden Pufferkapazitäten marginal. Die geringen Essigsäuregehalte lassen bei allen Varianten eine hohe Tendenz zur Nacherwärmung vermuten (SPIEKERS und MUES, 2001).

Im Erntejahr 2004 erreichen die Milchsäuregehalte mit 26 bis 33 g/kg TM (Tab. A 24-27) nicht die Zielwerte, die niedrigen Essigsäuregehalte weisen auch hier auf ein erhöhtes Nacherwärmungsrisiko hin.

Im Vergleich zu den Siliergläsern ermöglichen die 220 l-Behälter zusätzliche Aussagen über den Einfluss der Lagerdichte auf die Siliereigenschaften. Allerdings gehört Mais zu den leicht vergärbaren Futterpflanzen (JEROCH et al., 1999), so dass bei Öffnung der 220 l-Behälter und darauf folgender Probennahme ohnehin kaum mit Qualitätseinbußen zu rechnen ist. Daher ergeben sich im Erntejahr 2003 aus siliertechnischer Sicht keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Analyseergebnissen für die 220 l-Behälter (Tab. A 20) und den Ergebnissen in den Siliergläsern (Tab. A 19), mit Ausnahme erheblich höherer Essigsäuregehalte und geringerer Milchsäuregehalte. Folglich besteht bei den 220 l-Behältern ein geringeres Nacherwärmungsrisiko als bei den Gläsern. Ein Zusammenhang mit den erzielten Lagerdichten ist erwartungsgemäß nicht erkennbar. Analysen von Inhaltsstoffen und Gärsäuremuster erfolgten bei den Kleinsilos aufgrund der hohen Übereinstimmung mit den Analyseergebnissen für die Siliergläser im Erntejahr 2004 nicht mehr.

Im Unterschied zu den Probennahmen an den Siliergläsern und den 220 l-Behältern wurden die Proben aus den Flachsilos mit dem Vorschub entnommen. Die Analyseergebnisse von Rohnährstoffen und Gärsäuremuster sind also bereits von einer möglichen Nacherwärmung beeinflusst. Zusätzlich wirken auf diese Werte Umwelteinflüsse, wie z.B. die Außentemperatur ein (HATTORI et al., 1997).

Die Ergebnisse am Flachsilo lassen keinen direkten Vergleich von Ausgangsmaterial und siliertem Material zu, da im silierten Material (Tab. A 22) teilweise höhere Energiegehalte nachgewiesen wurden als im Ausgangsmaterial (Tab. A 3). Daher sollen nur die Ergebnisse des silierten Materials hinsichtlich der Lagerdichten und des Temperaturverlaufs bewertet werden.

An der Anschnittfläche zeigt die 21,0 mm-Variante mit Werten von bis zu 25°C eine deutliche Nacherwärmung. Nacherwärmung ist häufig die Folge eines zu geringen Vorschubes. Zur Vermeidung von Nacherwärmung wird ein Vorschub von 1,5 m/Woche im Winter und 2,5 m/Woche im Sommer empfohlen (GERIGHAUSEN, 2004). Der Vorschub von bis zu 3 m/Woche, der an den Flachsilos realisiert wurde, ist somit als extrem hoch einzustufen. Die Tatsache, dass es trotz dieses hohen Vorschubs zu einer Nacherwärmung kam, zeigt die geringe Langzeitstabilität der Silage im Flachsilo der 21,0 mm-Variante.

Die Essigsäuregehalte bleiben in beiden Fällen unterhalb der Zielwerte. Geringe Essigsäuregehalte steigern das Nacherwärmungsrisiko (SPIEKERS und MUES, 2001). Folglich wäre das Nacherwärmungsrisiko für beide Varianten in etwa gleich hoch. Auch hohe Trockenmassegehalte steigern das Nacherwärmungsrisiko (SPIEKERS et al., 2004). Die Trockenmassegehalte sind für die 5,5 mm-Variante geringfügig höher, so dass aus den Analysen tendenziell für die 5,5 mm-Variante ein höheres Nacherwärmungsrisiko abzuleiten wäre. Allerdings wurde im Flachsilo der 21,0 mm-Variante eine geringere Lagerdichte erreicht. Diese ist eine bedeutende Ursache für Nacherwärmung (SPIEKERS et al., 2004). Daher muss die geringere Lagerdichte des Flachsilos der 21,0 mm-Variante der entscheidende Faktor für Lufteintritt und die stärkere Nacherwärmung bei den 21,0 mm-Varianten gewesen sein.

Aufgrund der unterschiedlichen Siloform ist ein Vergleich der Ergebnisse aus den Schlauchsilos mit den Ergebnissen aus den Flachsilos nur bedingt möglich. Zusätzlich wird die Interpretation der Ergebnisse für die Schlauchsilos durch die geringe Anzahl von Untersuchungen an dieser Siloform erschwert (MUCK und HOLMES, 2005).

Im Erntejahr 2003 ergeben sich mit 6,5 bis 6,6 MJ NEL/kg TM für alle Varianten geringere Energiegehalte als im Ausgangsmaterial. Für die 5,5 und 14,0 mm-Varianten ergeben sich mit 6,6 MJ NEL/kg TM bei beiden Sorten geringfügig höhere Energiegehalte als bei den 21,0 mm-Varianten (6,5 MJ NEL/kg TM). Wie in Kapitel 5.4.2 erläutert, ist davon auszugehen, dass die Lagerdichten der Schlauchsilos deutlich überschätzt wurden.

Aufgrund des durchweg sehr geringen Dichteniveaus sind die Unterschiede in Trockenmassegehalt, Häcksellänge und daraus resultierende Dichteunterschiede möglicherweise von untergeordneter Bedeutung für die Energiegehalte. Im Erntejahr 2003 wurden die 5,5 mm-Varianten in den Schlauchsilos mit 91 (Sorte A) und 93 (Sorte B) Punkten bewertet. Dies entspricht der Note „sehr gut“. Die restlichen Varianten erhielten die Note „gut“. Die Tatsache, dass alle Silagen trotz deutlicher Nacherwärmung in Verbindung mit Energieverlusten die Note „gut“ oder „sehr gut“ erhielten, folgt aus dem Bewertungssystem (DLG, 2000). Die Größen Buttersäuregehalt, Essigsäuregehalt, pH-Wert, Ammoniakgehalt und Schimmelbefall gehen in die Bewertung ein. Das Vorhandensein von weiteren unerwünschten Mikroorganismen, wie beispielsweise Hefen, wird nicht berücksichtigt. Falls also weder Schimmel noch Buttersäure auftritt, kann eine Silage, die deutliche Nacherwärmung zeigt, dennoch mit der Note „sehr gut“ bewertet werden.

Im Erntejahr 2004 wurden die Proben aus dem direkten Umfeld der Datenlogger (Bilanznetz) entnommen. Dies ermöglicht einen direkten Rückschluss von der Temperaturentwicklung auf Rohnährstoffe und Gärverluste. Im Folgenden sollen statt der DLG-Punkte die Gärverluste betrachtet werden, um die Folgen der Nacherwärmung besser bewerten zu können. Die Analysedaten des Ausgangsmaterials sollen aufgrund der Inhomogenität nur bedingt mit einbezogen werden.

Tabelle 28 stellt die Energiegehalte und die Gärverluste in den Silagen aus den Schlauchsilos im Versuchsjahr 2004 dar. Ergänzend sind die untersuchten Einflussgrößen aufgeführt.

Tab. 28: Einfluss verdichtungsrelevanter Parameter auf die erzielten Dichten in den Schlauchsilos und die Maximaltemperaturen an der Anschnittfläche (Erntejahr 2004)

Parameter	Einheit	Sorte					
		B		C		D	
Häcksellänge	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
TM-Gehalt	[%]	40,3	42,1	36,4	35,4	43,7	42,7
Partikel > 25 mm	[%]	1,2 <sup>b</sup>	0,4 <sup>b</sup>	0,9 <sup>b</sup>	1,1 <sup>b</sup>	0,6 <sup>b</sup>	3,3 <sup>a</sup>
Dichte Schlauchsilos	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	193	201	188	157	178	149
Maximale Temperatur an der Anschnittfläche ("Mitte")	[°C]	14	21	17	30	32	35
Energiegehalt	[MJ NEL/kg TM]	6,7	6,6	6,7	6,5	6,7	6,6
Gärverluste	[%]	8,1	8,3	8,9	9,8	7,8	8,3

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Die höhere Temperatur der Variante *B HL 5,0 HS* im Vergleich zur Variante *B HL 5,0* sowohl an der Anschnittfläche (Abb. 38) als auch im Kern (Abb. 35) führt zu einem geringfügigen Unterschied der Energiegehalte. In der Silage der Variante *B HL 5,0 HS* wird ein Energiegehalt von 6,6 MJ NEL/kg TM nachgewiesen, während sich für die Variante *B HL 5,0* 6,7 MJ NEL/kg TM ergeben. Bei der 5,0 mm-Variante der Sorte D resultiert der höhere Energiegehalt aus einem späteren Temperaturanstieg und damit geringeren Energieverlusten. Mit Ausnahme der Variante D HL 5,0 führt ein höherer Temperaturanstieg zu tendenziell geringeren Energiegehalten.

Die Aktivität von unerwünschten Mikroorganismen führte somit neben der Erwärmung des Silostockes zu Energieverlusten (SPIEKERS et al., 2003). Es kann also zusammengefasst werden, dass eine gesteigerte Häcksellänge und daraus resultierende Temperaturanstiege zu verringerten Energiegehalten in der Silage führen können.

Die Gärverluste sind mit 7,8 bis 9,8 % als hoch einzustufen. Innerhalb der gleichen Sorte ist ein Zusammenhang zwischen der Temperaturentwicklung und den Gärverlusten erkennbar. Ein Temperaturanstieg führt tendenziell zu erhöhten Gärverlusten.

Dieser Zusammenhang kristallisiert sich lediglich im Erntejahr 2004 klar heraus.

## **5.7 Bewertung von aerober Stabilität und Gärverlusten**

Die aeroben Stabilitäten sind in beiden Versuchsjahren als gering einzustufen. Es ist davon auszugehen, dass die Begründung für die geringen aeroben Stabilitäten in den geringen Essigsäuregehalten liegt. Diese liegen in beiden Erntejahren mit einer Ausnahme weit unter den Zielwerten. Es muss allerdings auch eingeräumt werden, dass der Mikroorganismenbesatz (z.B. Hefen) nicht vollständig untersucht wurde und somit auch nicht vollständig in die Argumentation miteinbezogen werden kann.

Die Unterschiede zwischen den aeroben Stabilitäten zeigen keinen Einfluss von Sorte, Trockenmassegehalt oder Häcksellänge.

Die Gärverluste in den Siliergläsern liegen in beiden Erntejahren bei 3 bis 5 %. Tendenzielle Sortenunterschiede lassen sich weder anhand der Rohnährstoffe noch anhand des Gärsäuremusters begründen.

Die Gärverluste in den Schlauchsilos übersteigen die Werte in den Gläsern aufgrund des längeren Sauerstoffeintrittes erwartungsgemäß erheblich. Mit mittleren Werten von bis zu 10 % sind die Verluste als hoch einzustufen. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Temperaturentwicklung in den Schlauchsilos und der Höhe der Gärverluste lässt sich nur vereinzelt herstellen. Ein Zusammenhang zwischen Gärverlusten und Energiegehalten in den Silagen ist ebenfalls nur teilweise erkennbar.

## **5.8 Verbesserungsmöglichkeiten in zukünftigen Versuchen**

### **5.8.1 Statistische Auswertung**

Im eigenen Projekt wurden bei einer Vielzahl von Untersuchungen drei bis sechs Wiederholungen angesetzt. Dies ermöglichte Mittelwertvergleiche und den Vergleich von Werten bezüglich ihrer Größenordnung. Vor dem Hintergrund der extremen Klimaverhältnisse in den beiden Erntejahren sollte zukünftig eine dreifache Wiederholung der Rohnährstoffanalysen im Ausgangsmaterial diskutiert werden. Dadurch wäre eine Betrachtungsweise, die sich nur auf einen Faktor bezieht, möglich. Die Effekte könnten klar der Häcksellänge oder dem Trockenmassegehalt zugeschrieben werden.

Die unterschiedlichen Methoden zur Dichtemessung waren in diesem Projekt sinnvoll, um einen Vergleich unterschiedlicher Methoden zu ermöglichen. In nachfolgenden Projekten könnte man sich aufgrund der so gewonnenen Erfahrungswerte auf eine der

Verdichtungsmethoden beschränken und diese in vielfacher Wiederholung anwenden. Somit wäre auch bei der Größe Dichte eine aussagekräftige Statistik möglich.

### **5.8.2 Homogenität des Materials**

Im Jahr 2003 führte der „Jahrhundertsommer“ mit einem trockenen, heißen Klima zu extrem hohen TM-Gehalten. Im Jahr 2004 führte der relativ späte Erntetermin, der aus organisatorischen Gründen nicht früher stattfinden konnte, erneut zu hohen TM-Gehalten. Sortenunterschiede kamen so weniger zum Ausdruck. Eine Möglichkeit, Effekte eines inhomogenen Bestandes zumindest teilweise auszuschließen, stellt der Einsatz von zwei Feldhäckslern dar. In einem vergleichbaren Projekt führte der Einsatz von zwei Feldhäckslern zu einem vergleichsweise homogenen Probenmaterial (THAYSEN, 2004b). Es muss davon ausgegangen werden, dass diese Methode eine wesentliche Verbesserung zum Häckseln zweier unterschiedlicher Abschnitte eines Schlages, im Extremfall zweier unterschiedlicher Schläge, darstellt.

Bei der Probennahme erwies sich der Einsatz von Dosierwalzen als nicht ausreichend für eine homogene Probe. In zurückliegenden Untersuchungen wurden Proben direkt aus dem Auswurfkrümmer des Häckslers entnommen oder durch Ausbreiten des Materials auf Tischen und eine definierte Probennahme an bestimmten Abschnitten bestmöglich standardisiert (KROMER, 2004).

### **5.8.3 Reduktion der Variantenzahl**

Eine entscheidende Verbesserungsmöglichkeit für die Interpretation der Ergebnisse wäre eine Reduktion der Variantenzahl. Aufgrund der unterschiedlichen Interessen der Beteiligten war es in diesem Projekt unvermeidbar, mehrere Einflussfaktoren (Sorte, Häcksellänge, Spaltweite des Corn Crackers) zu variieren. Dies gilt vor allem für das erste Versuchsjahr. Der Wegfall der Einflussgröße „Spaltweite des Corn Crackers“ vereinfachte die Auswertung der Ergebnisse im zweiten Versuchsjahr bereits erheblich. Ideal wäre ein einfaktorielles Design, z.B. Variation des Faktors „Trockenmassegehalt“.

#### **5.8.4 Partikellängenfraktionierung**

Die Vielzahl verschiedener Methoden der Partikellängenfraktionierung weist auf den Entwicklungsbedarf in diesem Bereich hin. Viele Siebverfahren weisen systematische Fehler auf (GUTH, 1995). Dies trifft auch auf den Siebturm zu, der im eigenen Projekt verwendet wurde.

Nach dem Siebvorgang wird das Material, das auf die einzelnen Größenklassen entfällt, zurückgewogen. Es handelt sich also um eine gewichtsmäßige Erfassung. Der problematische Überlängenanteil besteht größtenteils aus Lieschen, die ein geringes spezifisches Gewicht besitzen. Volumetrisch kommt den Lieschen ein erheblicher Anteil zu, dieser ist jedoch mit Hilfe des Siebturms nicht zu quantifizieren (KROMER, 2004). Diese Problematik ist bekannt. Eine Möglichkeit der Vermeidung besteht in der Anwendung bildanalytischer Methoden (GUTH et al., 1993). Diese Methodik ist technisch allerdings noch nicht so weit ausgereift, als dass sie zuverlässige Ergebnisse liefern könnte.

Die angewandte Siebmethode setzt, wie die Vorversuche erneut bewiesen haben, eine Trocknung des Häckselgutes voraus. Das Material wird auf 90 % TM getrocknet. Mit dieser Trocknung geht eine Schrumpfung des Materials einher. Es handelt sich somit um einen systematischen Fehler. Durch einen Vergleich der Massenanteile in den Größenklassen nach Siebung und nach einer Referenzmethode, wie z.B. Vermessen per Hand, könnte diese Schrumpfung möglicherweise quantifiziert werden. Aus den Daten könnte ein Korrekturfaktor errechnet werden, der Aussagen über die Größenklassenverteilung von ungetrocknetem Material ermöglicht und die Übertragbarkeit auf andere Untersuchungen ermöglicht.

Eine Siebung von erntefrischem (ungetrockneten) Häckselgut stellt keine Alternative dar. Hier tritt durch das Anhaften von Partikeln in den oberen Sieben ein zufälliger Fehler auf, der nicht quantifizierbar ist.

#### **5.8.5 Vorschub**

Für die Praxis wird ein Vorschub von 1,5 m/Woche im Winter und 2,5 m/Woche im Sommer empfohlen (GERIGHAUSEN, 2004). Folglich ist der Vorschub an den Flachsilos mit 3 m/Woche als hoch zu bezeichnen. Dies geschah insbesondere aufgrund der 21 mm-Variante im Versuchsjahr 2003, die aufgrund ihres hohen TM-Gehaltes in Verbindung mit einer langen Häcksellänge besonders anfällig für Nacherwärmung war. Zwar wäre

hinsichtlich der Nacherwärmung ein geringerer Vorschub interessanter gewesen, aber der monetäre Wert der Futterkonserve erforderte zunächst eine vorsichtige Herangehensweise, um einen Verderb des ganzen Futterstocks zu vermeiden.

Nachdem an den Flachsilos kein starker Verderb festgestellt werden konnte, erfolgte die Entnahme an den Schlauchsilos mit einem deutlich geringeren Vorschub von 1,5 m/Woche. Hier führte sich die wöchentliche Entnahme zu zyklischen Temperaturschwankungen an der Anschnittfläche.

Problematisch bei Versuchen dieser Größenordnung ist zum einen das hohe finanzielle Risiko, da hohe Energieverluste bis hin zum Verderb mehrerer Tonnen Grundfutter drohen, zum anderen der hohe Bedarf an Arbeitskräften. Letzteres führt dazu, dass es gerade in Arbeitsspitzen teilweise nicht möglich ist, Arbeiten, wie die Entnahme an den Schlauchsilos, plangemäß durchzuführen. Solche Unregelmäßigkeiten in der Entnahme sind im Nachhinein nur noch schwerlich nachvollziehbar. Zur Lösung dieses Problems könnten kleinere Versuchseinheiten sinnvoll sein. Die 220 l-Behälter stellen eine gute Alternative dar.

#### **5.8.6 Forschungs- und Entwicklungsbedarf**

Ziel der vorliegenden Untersuchung war die Untersuchung der gesamten Verfahrenskette der Maisernte. Dies beinhaltet die Variation bzw. die Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Aufgrund verschiedener Wechselwirkungen zwischen den Faktoren konnten Effekte teilweise nicht eindeutig zugeordnet werden.

Für weitere Versuche wäre daher die Untersuchung einzelner Faktoren vorstellbar. In kleineren Versuchseinheiten könnten die Faktoren einzeln variiert werden. Dies würde eine exakte Zuordnung der Effekte zulassen. Möglicherweise ließen sich diese Effekte bezüglich des Faktoreinsatzes quantifizieren. Auf diese Weise könnte beispielsweise die Auswirkung einer Trockenmassesteigerung von 1 % oder einer Häcksellängensteigerung von 1 mm auf die Verdichtungseigenschaften ermittelt werden.

Wie Praxiserhebungen und diese Untersuchung gezeigt haben, besteht erheblicher Entwicklungsbedarf bei der Verdichtung. Weder am Flachsilo noch an den Schlauchsilos konnten ausreichende Lagerdichten erreicht werden. Besonders gering war die Verdichtung in den Schlauchsilos. Hier bestehen insbesondere Probleme durch die starke Dehnung der Folie und der daraus resultierenden Dichtereduktion des einsilierten

Materials. Eine Möglichkeit, die Lagerdichte zu erhöhen, stellt eine Reduktion der Rückfederung dar. Durch Stabilisierung des Siloschlauches durch weniger elastische Folie oder zusätzliche Ummantelung mit Netzen könnte die Formveränderung des Schlauches verringert werden. Die Entnahme von Silage aus dem Schlauchsilos gestaltet sich schwierig. Aufgrund des Durchmessers von 2,40 bis 2,70 m ist der Einsatz von Siloblockschnidern oder Entnahmefräsen sehr begrenzt. Wird mit dem Frontlader entnommen, besteht die Gefahr einer Auflockerung der Anschnittfläche.

Ähnlich wie die Schlauchsilierung weist das Silierverfahren im Flachsilo Defizite hinsichtlich des Verdichtungserfolges auf (SPIEKERS et al., 2004). Die Empfehlungen zur Steigerung der Lagerdichte beziehen sich größtenteils auf eine Steigerung der Anzahl von Überfahrten und Einsatz von Radladern oder Schleppern mit hohem Eigengewicht in Kombination mit Zusatzgewichten (THAYSEN, 2003). Es wird jedoch eingeräumt, dass die eingesetzte Technik nicht mehr zeitgemäß ist (THAYSEN, 2004a). Betriebsgrößen von 500 ha sind in den neuen Bundesländern weit verbreitet. Vor dem Hintergrund wachsender Betriebsgrößen und zunehmender Durchsatzleistungen von Feldhäckslern müssen alternative Techniken zukünftig stärker in die Überlegung mit einbezogen werden. Der Einsatz von Rüttelwalzen oder Rüttelplatten stellt eine zu prüfende Technik dar.

## 6 Zusammenfassung

Eine Steigerung der Häcksellänge von Maissilage kann zu pansenphysiologischen Vorteilen führen und eine Steigerung der Maissilageanteile in Verbindung mit höheren Energiegehalten in der Ration ermöglichen. Gesteigerte Häcksellängen führen möglicherweise zu einer schlechteren Verdichtung. Folge einer geringen Dichte ist die Aktivität unerwünschter Mikroorganismen nach Öffnung des Silos, die zu einem deutlichen Temperaturanstieg („Nacherwärmung“), Energieverlusten, Mykotoxinbildung und verringerter Schmackhaftigkeit des Futters führt.

In der vorliegenden Untersuchung sollte in zwei Versuchsjahren der Einfluss der theoretischen Häcksellänge auf Partikelgröße, Verdichtungseigenschaften, Temperaturentwicklung und Futterqualität untersucht werden. Es wurden vier Sorten (A, B, C, D) mit unterschiedlich stark ausgeprägtem „greening-effect“ angebaut.

Diese wurden in drei theoretische Häcksellängen (5,0 bzw. 5,5; 14,0 und 21,0 mm) und mit zwei verschiedenen Aufbereiterereinstellungen (1,0 und 2,0 mm) gehäckselt. Im zweiten Erntejahr wurde zusätzlich eine Hochschnittvariante (70 cm Schnitthöhe) gehäckselt. Die Siliereigenschaften der Varianten wurden in unterschiedlichen Siloformen und im Labormaßstab untersucht.

Eine Steigerung von theoretischer Häcksellänge und Spaltweite führte zu einer Steigerung des Überlängenanteils ( $> 25$  mm). Der Trockenmassegehalt, der aufgrund des extremen Klimas besonders im ersten Versuchsjahr eine hohe Spannweite aufwies, stellte eine weitere Einflussgröße dar. Ein hoher Trockenmassegehalt steigerte den Überlängenanteil. Die Obergrenze des Überlängenanteils von 5 % wurde ausschließlich bei einer Kombination von gesteigerter Häcksellänge, erhöhter Spaltweite und sehr hohem Trockenmassegehalt überschritten.

Die kurzen Häcksellängen (5,0 bzw. 5,5 mm) führten zu Dichtesteigerungen von bis zu 25 % im Vergleich zu Häcksellängen von 21,0 mm. Eine Steigerung der Schnitthöhe führte nochmals zu einer um 21 % höheren Dichte. Bezüglich der Dichten zeigte sich eine gute Übertragbarkeit von Praxis- und Labormaßstab.

Der Einfluss der Spaltweite und des Trockenmassegehaltes auf die Verdichtbarkeit war ungerichtet. Aussagen über den Sorteneinfluss auf die Verdichtbarkeit wurden durch die hohen Trockenmasseunterschiede erschwert.

Der Zielwert der Lagerungsdichte von 250 kg TM/m<sup>3</sup> wurde ausschließlich in Einzelfällen erreicht. Die Dichten in Flach- und Schlauchsilos waren durchweg zu gering.

Aus den geringen Dichten resultierte deutliche Nacherwärmung an den Anschnittflächen nahezu aller Schlauchsilos. Eine Häcksellängensteigerung führte zu einem zusätzlichen Temperaturanstieg.

An den Flachsilos lag das Temperaturniveau, möglicherweise bedingt durch den höheren Vorschub, deutlich unter dem der Schlauchsilos. Hier trat ausschließlich bei der langen Häcksellänge Nacherwärmung auf.

Die gesteigerten Häcksellängen führten überwiegend zu geringeren Energiegehalten und in den Schlauchsilos zu tendenziell höheren Gärverlusten. Die Gärverluste in den Schläuchen waren als hoch einzustufen.

In dieser Untersuchung bestätigten sich die Ergebnisse aus Praxiserhebungen. Aus technischer Sicht besteht bei der Verdichtung des Flachsilos, insbesondere jedoch im Schlauchsilos, erheblicher Entwicklungsbedarf.

Gesteigerte Häcksellängen gefährden den Verdichtungserfolg und damit die Futterkonserven zusätzlich. Dies trifft insbesondere bei späten Ernteterminen und hohen Trockenmassegehalten zu. Folglich sollte der optimale Erntetermin, in Abhängigkeit von Sorte und Standort, nach Möglichkeit eingehalten werden. Bei hohen Trockenmassegehalten ist aus siliertechnischer Sicht von gesteigerten Häcksellängen abzuraten. Die Verdichtungstechnik ist grundsätzlich durch das Erzeugen eines hohen Verdichtungsdruckes (Einzelreifen, hohes Gesamtgewicht des Verdichtungsfahrzeuges, alternative Techniken) und eine hohe Zahl an Überfahrten zu verbessern.

## 7 Literaturverzeichnis

- ADLER, A. (2002): Qualität von Futtermitteln und mikrobielle Kontamination, 8. Alpenländisches Expertenforum, 9./10. April 2002, Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, S. 17-26
- AHMELS, H.-P.; E. ISENSEE (1994): Zur Verdichtung von Anwelkgras in Fahrtilos, Landtechnik, 3/94, 49. Jahrgang, S. 146-147
- ANONYM (1994): „Welches Gerät passt für Ihren Betrieb“, DLZ-Systemvergleich, Deutsche Landwirtschaftszeitung, 11, S. 70-79
- AUERBACH, H.; E. OLDENBURG; G. PAHLOW; F. WEISSBACH (1998): Zur Methodik der Ermittlung der Gärverluste bei der Silierung, Jahresbericht der FAL Braunschweig 1998, S. 26
- BAADER, W. (1970): Die Beurteilung der Funktion von Halmgut-Zerkleinerungsmaschinen, Zerkleinern von Halmfutter, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 8, S. 5-7
- BALLHEIMER, A.E. (2004): Dichte messen in sechs Schritten, Top Agrar, 2/2004, Spezialprogramm Rindviehhaltung, S. R 14-R 15
- BARGEL, H.-J.; G. SCHULZE (Hrsg., 2005): Werkstoffkunde, Springer Verlag, Berlin
- BARRINGTON, G.P.; N.A. JORGENSEN (1976): Corn silage length of cut-effects on digestibility, ASAE-Paper No.76-1009, St. Joseph, Michigan, ASAE 1976
- BATEL, W. (1971): Einführung in die Korngrößenmesstechnik, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg
- BUCK, G.R.; W.G. MERRILL; C.E. COPPOCK; S.T. SLACK (1969): Effect of recutting and plant maturity on kernel passage and feeding value of corn silage, Journal of Dairy Science 52, p. 1617-1623
- BUNDESSORTENAMT (2004): Sortenübersicht für: Mais Silonutzung (M), Anbau- und Ertragseigenschaften, <http://www.bundessortenamt.de/isapi/drvisapi.dll>
- COOKE, K.M.; J.K. BERNARD, (2005): Effect of Length of Cut and Kernel Processing on Use of Corn Silage by Lactating Dairy Cows, Journal of Dairy Science 88, p. 310-316
- DE BOEVER, J.L.; D.L. DE BRABANDER; A.M. DE SMET; J.M. VANACKER ;C.V. BOUCQUE (1993): Evaluation of Physical Structure. 2. Maize Silage, Journal of Dairy Science; 76; 1993, p. 1624-1634
- DE BRABANDER, D.L.; J.L. DE BOEVER; J.M. VANACKER; GH.V. BOUCQUE; S.M. BOTTERMAN (1999): Evaluation of Physical Structure in Dairy Cattle, Recent Advances in Animal Nutrition, 1999, p. 111-114

- DERNEDDE, W.; H. HONIG (1977): Auswirkungen der Häcksellänge auf das Silomaisverfahren, Landbauforschung Völkenrode, 27. Jahrgang (1977), Heft 1, S. 60-66
- DERNEDDE, W. (1983): Der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Verdichtung von Gras in Lagerbehältern bei statischer Belastung, Landbauforschung Völkenrode, 33. Jahrgang, 4, S. 259-263
- DLG – DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT (2000): DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezechen-Fähigkeit, DLG-Verlag, Frankfurt am Main
- DLG – DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT (2005): Auch die Besten haben Reserven, DLG-Mitteilungen, Milchmagazin, September 2005, S. 2-7
- EGGENMÜLLER, A. (2003): Mündliche Mitteilung
- ENGELHARDT, W.V.; G. BREEVES (Hrsg., 2000): Physiologie der Haustiere, Enke im Hippokrates Verlag GmbH, Stuttgart 2000
- FLACHOWSKY, G.; W. PEYKER; A. SCHNEIDER; K. HENKEL (1993): Fibre analyses and in sacco degradability of plant fractions of two varieties harvested at various times, Animal Feed Science and Technology, 43, p. 41-50
- FLACHOWSKY, G. (1994): Einsatz von maisstärkehaltigen Futtermitteln, Kraftfutter, 6, S. 224-232
- GERIGHAUSEN, G. (2004): Silos nach Größe und Bauweise optimieren, dlq-test.de, 2/2004, [www.dlg.org/de/landwirtschaft/landtechnik/netmag/html](http://www.dlg.org/de/landwirtschaft/landtechnik/netmag/html)
- GERS-GRAPPERHAUS, C. (1992): Die Einstellung des Häckslers immer im Auge haben, Landwirtschaftsblatt Weser-Ems, Nr. 36, S. 14-16
- GUTH, N.; F.-J. BOCKISCH (1992): „Bewertung der Häckselstruktur“, Landtechnik, 47, 5/92, S. 223-226
- GUTH, N.; H. GEORG; F.-J. BOCKISCH; G. LUDWIG; P. BOTKA (1993): Automatisierte bildanalytische Messungen, Landtechnik, 48, 8/9-93, S. 435-438
- GUTH, N. (1995): Unterschiedlichen Häckselgutstruktur von Halmfutter: Einfluss auf Futteraufnahme, Leistung und Kauverhalten von Rindern, Silagequalität und Häckselleistungsbedarf sowie bildanalytische Vermessung der Futterstruktur, Diss, Universität Gießen, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI 277, Rosa-Fischer-Löw-Verlag, Gießen
- HAFFERT, A. (2003): Der Schnittvorgang in einem selbstfahrenden Feldhäcksler, Diss. TU Braunschweig, Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und Fluidtechnik, Shaker Verlag

- HARTMANN, A.; H.H. GEIGER (2001): Siloreife - Restpflanze nicht vergessen! – Auswirkungen unterschiedlicher Restpflanzenabreife auf Energiedichte und Verdaulichkeit, Mais, 29. Jg. (2), S. 76-79
- HATTORI, I.; S. KUMAI; R. FUKUMI (1997): Effect of temperature on aerobic deterioration of corn silage after opening silos, Bulletin of the Experimental College of Agriculture-Ehime University (Japan), No. 18, p. 27-32
- HEIMBECK, W.K.; F.J. SCHWARZ; M. KIRCHGESSNER (1988): Auswirkungen unterschiedlicher Häcksellänge und dem nachfolgenden Quetschen der Mais-Ganzpflanze auf die Nährstoffverdaulichkeit . 1. Mitteilung zum Einfluss unterschiedlicher Aufbereitung von Maissilage auf die Nährstoffverdaulichkeit bei Kalbinnen und Hammeln, Das wirtschaftseigene Futter, 34, S. 15-26
- HERTWIG, F. (2004): Siliermittel: Welche Mittel für welchen Zweck?, Tagung Landtechnik für Profis, VDI-Berichte 1814, Magdeburg 28.01.2004
- HOFFMANN, M. (2005): Die strukturwirksame Rohfaser als Rationskriterium für Wiederkäuer, Symposium Strukturbewertung der Futtermittel beim Rind; Bonn, 27.04.05
- HOFFMANN, M. (1983): Tierfütterung, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, DDR-Berlin
- HÖNER, K., P. LEBZIEN, G. FLACHOWSKY UND F.J. SCHWARZ (2002): The influence of silages prepared from different corn hybrids on the metabolism in the digestive tract of ruminants (Einfluss von Silagen unterschiedlicher Maishybriden auf die Umsetzung im Verdauungstrakt von Kühen), Proceedings of the Society of Nutrition Physiology, Band 11, 2002
- HONIG, H. (1974): Umsetzung und Verluste bei der Nachgärung, Das wirtschaftseigene Futter, 21, S. 25-32
- HONIG, H. (1980): Siliertechnik bei Mais-Eine gute Silierbarkeit darf nicht zu Nachlässigkeit führen, DLG-Mitteilungen, Schwerpunkt: Mais-Ernte und Konservierung, 15/1980, S. 840-841
- HONIG, H.; K. ROHR (1982a): Der Einfluss der Häcksellänge auf den Siliervorgang, Mais, 4/82, S. 8-10
- HONIG, H.; K. ROHR (1982b): Zur Bedeutung des Zerkleinerungsgrades bei Silomais. 1. Mitteilung: Einfluss des Zerkleinerungsgrades auf die Verluste durch unverdaut ausgeschiedene Körner und Kornbruchstücke, Das wirtschaftseigene Futter, 28 (3), S. 182-192
- HONIG, H. und K. ROHR (1985): Maissilage richtig häckseln, Tierzüchter, 1985, 35(8), S. 352-353
- JEROCH, H.; W. DROCHNER; O. SIMON (1999): Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere, Ulmer Verlag, Stuttgart

- JOHNSON, L.M.; J.H. HARRISON; D. DAVIDSON; J.L. ROBUTTI; M. SWIFT; W.C. MAHANNA; K. SHINNERS (2002a): Corn Silage Management I: Effects of Hybrid, Maturity, and Mechanical Processing on Chemical and Physical Characteristics, *Journal of Dairy Science*, 85, p. 833-853
- JOHNSON, L.M.; J.H. HARRISON; D. DAVIDSON; W.C. MAHANNA; K. SHINNERS; D. LINDER (2002b): Effects of Maturity, Inoculation, and Mechanical Processing on Pack Density and Aerobic Stability, *Journal of Dairy Science*, 85, p. 434-444
- JORGENSEN, N.A. (1978): Effect of forage particle size on animal performance, ASAE-Paper No. 78-1048, St. Joseph, Michigan, ASAE 1978
- JUNCK, B.; M. TAJAJ; Q. ZEBELI; W. DROCHNER (2005): Die Struktureigenschaften der Maissilage in einer TMR bei Variation der Partikellänge und deren Auswirkungen auf Futteraufnahme und Milchleistung bei Hochleistungskühen, *Tagungsband Futterkonservierung und Fütterung des Deutschen Maiskomitees*, Oldenburg, 02./03. März 2005
- KLEINMANS, J.; B. RUSER; G. OETJEN; J. THAYSEN (2005): Eine neue Methode zur Bestimmung der Verdichtung in Praxissilos, *Mais*, in Druck
- KONONOFF, P.J. (2002): The Effect of Ration Particle Size on Dairy Cows in Early Lactation, *Diss. Pennsylvania State University*
- KONONOFF, P.J.; A.J. HEINRICHS; D.R. BUCKMASTER (2003): Modification of the Penn State Forage and total Mixed Ration Particle Separator and the Effects of Moisture Content on its Measurements, *Journal of Dairy Science*, 86, p. 1858-1863
- KRAUSE, K.M.; D.K. COMBS; K.A. BEAUCHEMIN (2002): Effects of Forage Particle Size and Grain Fermentability in Midlactation Cows. I. Milk Production and Diet Digestibility, *Journal of Dairy Science*, 85, p. 1936-1946
- KRAUSE, K.M.; D.K. COMBS (2003): Effects of Forage Particle Size, Forage Source, and Grain Fermentability on Performance and Ruminant pH in Midlactation Cows, *Journal of Dairy Science* 86, p. 1382-1397
- KROMER, K.-H. (1979): Tendenzen im Exaktfeldhäckselbau in den USA und in Deutschland, *Landtechnik* 26, S. 110-114
- KROMER, K.-H. (1993): Zerkleinerung von Mais in Trommelschneidwerken, *Habilitationsschrift Bonn, VDI-Fortschrittberichte, Reihe 14: Landtechnik/Lebensmitteltechnik, Nr. 60, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf*
- KROMER, K.-H.; O. SCHMITTMANN (1999): Die Maishäckselqualität optimieren, *Land und Forst.* 38/99, S. 22-23
- KROMER, K.-H. (2004): Mündliche Mitteilung
- KUTZBACH, H.-D.; M. KUSTERMANN; R. SCHERER, (1985): Elastizitätsmodul, Kompressibilität und weitere mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten, *Grundlagen der Landtechnik*, 35, Nr. 6, S. 189-195

- LAMMERS, B.P., D.R. BUCKMASTER; A.J. HEINRICHS (1996): A Simple Method for the Analysis of Particle Sizes of Forage and Total Mixed Rations, *Journal of Dairy Science*, 79, p. 922-928
- LANGENHOFF, M. (2002): Futtermittelkundliche Bewertung von 2 Silomaishybriden bei Wiederkäuern, Diss. Tierärztliche Hochschule Hannover
- LANGENHOFF, M.; P. LEBZIEN; R. DAENICKE; G. FLACHOWSKY (2002): Nutritional assesment of silages from two different maize hybrids (Ernährungsphysiologische Bewertung von Maissilagen zweier Hybriden), *Proceedings of the Society of Nutrition Physiology*, Band 11, 2002
- MATTHÉ, A. (2001): Nährstoffumsetzungen im Verdauungstrakt des Rindes nach Einsatz unterschiedlicher Mengen an Mais- und Weizenstärke, Dissertation, J.L. Universität Gießen
- MAHLKOW-NERGE, K.; J. THAYSEN; J. THOMSEN (2005): Auswirkungen unterschiedlicher Häcksellängen beim Silomais auf die Strukturversorgung der Milchkuh, *Forum „Angewandte Forschung in der Rinder und Schweinefütterung“*, 06./07.04.2005, Fulda, S. 70-74
- MERTENS, D.R. (2000): Physically effective NDF and its use in dairy rations explored, *Feedstuffs*, 10.04.2000, p. 11-14
- MESSER, H.J.M.; J.C. HAWKINS (1977): The influence of moisture content and chop length of forage maize on silage bulk density and the pressure on bunker silo walls, *Journal of Agricultural Engineering Research* 22, p. 175-182
- MEWES, E. (1959): Verdichtungsgesetzmäßigkeiten nach Preßtopfversuchen, *Landtechnische Forschung* 9, Heft 3, S. 68-76
- MILLER, C.N.; E. POLAN; R.A. SANDY; J.T. HUBER (1969): Effect of altering the physical form of corn silage on utilization by dairy cattle, *Journal of Dairy Science*, 52, p. 1955-1960
- MOHENSIN, N.; J. ZASKE, (1976): Stress Relaxation and Energy Requirements in Compaction of Unconsolidated Materials, *Journal of agricultural Engineering Research*, 21, p. 193 – 205
- MUCK, R.E.; B.J. HOLMES (2000): Factors affecting bunker silo densities, *Appl. Engr. Agric.* 15(6), p. 613-619
- MUCK, R.E.; B.J. HOLMES (2004): Bag Silo Densities and Losses; ASAE-Paper Number 041141, 2004 ASAE/CSAE Annual Meeting, Fairmont Chateau Laurier, The Westin, Government Centre Ottawa, Ontario, Canada, 1.-4. August 2004
- MUCK, R.E.; B.J. HOLMES (2005): Factors affecting bag silo densities and losses, *Silage Produktion and utilisation*, *Proceedings of the XIVth International Silage Conference*, a satellite workshop of the XXth International Grassland Congress, July 2005, Belfast, Northern Ireland, p. 245

- NUSSBAUM, H. (2005): Sechs Regeln gegen die Nacherwärmung, Top Agrar, 9/2005, R 12-14
- ORTH, H.W.; H. PETERS (1975): Ein Verfahren zur Bestimmung der Halmlänge mit Hilfe eines Schwingsiebtes, Grundlagen der Landtechnik, Band 25, Nr. 6, S. 187-188
- OWENS, F.N.; R.A. ZINN; Y.K. KIM (1986): Limits to starch digestion in the ruminant small intestine, Journal of Animal Science, 63, p. 1634-1648
- PAHLOW, G. (2000): Siliermittel zur Verhinderung der Nacherwärmung bei Maissilage, Tagungsband zum Futterwert von Mais, Sonderheft 217, Landbauforschung Völkenrode, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, S. 145-154
- PEIJS, T.; S. GARKHAIL; R. HEIJENRATH; M. VAN DEN OEVER; H. BOS (1998): Thermoplastic composites based on flax fibres and polypropylene: Influence of fibre length and fibre volume fraction on mechanical properties, Journal: Macromol Symposium, Vol. 127, p. 193-203
- PHIPPS, R.H. (1996): A crop from over there that's doing rather well over here: Forage maize in the diet of the lactating cow, Journal of the Royal Agriculture Society of England, 57, p. 103-115
- PICKERT, J. (2001): Was die Reifezahl aussagt, und was sie verschweigt, NL-Sonderheft 2001, Mais, S. 30-34
- RICHARDS, E. (2005): Milcherzeuger unter Anpassungsdruck, Agrarwoche, 15/2005, S. 7
- ROHR, K.; H. HONIG; R. DAENICKE (1983): Zur Bedeutung des Zerkleinerungsgrades von Silomais. 2. Mitteilung: Einfluss des Zerkleinerungsgrades auf Wiederkauaktivität, Pansenfermentation und Verdaulichkeit der Rohnährstoffe, Das wirtschaftseigene Futter, 29, S. 73-86
- ROUEL, M.; U.WYSS (1994): Aerobe Stabilität von Maissilagen, Agrarforschung (Switzerland), v. 1(9); S. 393-396
- RUSER, B.; G. PAHLOW (2003): Warum Silagen warm werden, ([http://www.pioneer.com/germany/asft\\_warum\\_silagen\\_warm\\_werden.htm](http://www.pioneer.com/germany/asft_warum_silagen_warm_werden.htm), 14.08.2003
- RUSER, B.; J. KLEINMANS; J. ROTHERT (2003): Gesundes Grundfutter für eine leistungsgerechte Fütterung, ([http://www.pioneer.com/germany/asft\\_warum\\_silagen\\_warm\\_werden.htm](http://www.pioneer.com/germany/asft_warum_silagen_warm_werden.htm), 14.08.2003
- SCHLAGHECK, A.; N. ENTRUP; M. FREITAG (2000): Auswirkungen des Abreifeverhaltens („Stay green“/“Dry Down“) auf die in vitro Verdaulichkeit von Maisgenotypen unter Berücksichtigung verschiedener Pflanzenfraktionen, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 217, S. 94-101

- SCHEUFLER, B.; W. MEHRKENS (1981): Stoffgesetze für die Verdichtung von Laub, Grundlagen der Landtechnik, Band 31, Nr. 6, S. 234-237
- SCHÖN, H. (Hrsg.,1998): Landtechnik Bauwesen, Band 3, 9. Auflage, BLV Verlagsgesellschaft, München, ISBN 3-405-14349-7
- SCHURIG, M. (1985): Neuere Zusatzeinrichtungen im Feldhäcksler zur Ernte von Gerste und Weizen (GPS), Landtechnik 40, S. 176-181
- SCHURIG, M.; G. RÖDEL; K. WILD (1996): Schnittlängenqualität - ein neues Verfahren zur Beurteilung von Maishäckselsgut, Landtechnik, 51, 3/96, S. 146-147
- SCHWARZ, F.J.; M. KIRCHGESSNER, (1982) : Häcksellänge von Maissilage und ihr Einfluß auf Futteraufnahme und Milchleistung, Das wirtschaftseigene Futter, 28, p. 97-106
- SCHWARZ, F.J.; M. KIRCHGESSNER; W.K. HEIMBECK (1985): Zum Einfluss von Häcksellänge und Aufbereitung von Maissilage auf Mast- und Schlachtleistung von Jungbullen, Das wirtschaftseigene Futter, 31, S. 5-19
- SCHWARZ, F.J.; K HEIMBECK; M. KIRCHGESSNER (1988): Auswirkung eines Quetschens von Mais-Ganzpflanzen auf die Nährstoffverdaulichkeit. 2. Mitteilung zum Einfluss unterschiedlicher Aufbereitung von Maissilage auf die Nährstoffverdaulichkeit bei Kalbinnen und Hammeln, Das wirtschaftseigene Futter, 34, S. 27-37
- SCHWARZ, F.J.; W. PREISSINGER; M. KIRCHGESSNER (1997): Verdaulichkeit und Energiegehalt von unterschiedlich zerkleinerter Maissilage bei Rindern und Schafen, Agribiological Research, 50, 3, 1997, p. 225-236
- SKALWEIT, H. (1938): Kräfte und Beanspruchungen in Strohpressen. 4. Konstrukteur-Kursus, RKTL-Schrift 88, Berlin
- SPIEKERS, H. (1998): Nacherwärmung der Maissilage-Dichte ist die halbe Miete, Milchpraxis, 36. Jahrgang, Nr. 3, S. 145-147
- SPIEKERS, H.; N. MUES (2001): Futterwert und Siliereignung von Maissilage in Abhängigkeit vom Sortentyp, Riswicker Ergebnisse 2/2001, LWK NRW
- SPIEKERS, H (2002): Maßnahmen zur Vermeidung von Nacherwärmungen, Futterkonservierung - Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien-, Hrsg. Nordwestdeutsche Landwirtschaftskammern, 6. Auflage, S.12-16
- SPIEKERS, H.; A. SCHIBORRA. (2002): Der sichere Weg zur Qualitätssilage, Rheinische Landwirtschaftliche Zeitung, Nr. 38, S. 25-27
- SPIEKERS, H.; R. MILTNER; W. BEEKER (2003): Nacherwärmung gefährdet besten Silomais. Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen Lippe 33, S. 18-19

- SPIEKERS, H. (2004): Tierphysiologische Anforderungen an die Silagequalität, Tagung Landtechnik für Profis, VDI-Berichte 1814, S. 1-9
- SPIEKERS, H.; R. MILTNER; W. BEEKER (2004): „Aktion Nacherwärmung“ deckt Schwachpunkte auf. Top agrar, Heft 2, S. R10-R13.
- SPOELSTRA, S.F. (1985): Nitrate in silage. A review, Grass Forage Science 40, p. 1-11
- SPOELSTRA, S.F. (1992): Influences of air on silage preservation and aerobic stability, Grassland and Society, p. 566-577
- STEINHÖFEL, O. (2001): Silierung im Folienschlauch - wo passt sie hin?, Top Agrar Spezial, 9/2001, S. 19-22
- STEINHÖFEL, O.; WEBER, U. (2004): Mit Thermobildern Nacherwärmung auf der Spur, DLZ, Heft 3, S. 108-112
- THAYSEN, J. (2003): Wer bezahlt, der bestimmt, Lohnunternehmen, 9/2003, S. 16-20
- THAYSEN, J. (2004a): Schlagkraft ist nicht alles - Silotechnik und Logistik an Häckslerleistung optimieren, Mais, 3/2004, 32. Jahrgang, S. 84 – 86
- THAYSEN, J. (2004b): Prüfung von zwei Silomaishäcksellängen auf Verdichtung und Silagequalität, Landpost, 11. September 2004
- VDLUFA (1993): Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln III, VDLUFA-Verlag: Darmstadt
- WEISS, D. (2003): Energiequellen aus Glucose , Bauernzeitung, 49. Woche (2003), S. 42-44
- WENNER, H.L. (1986): Landtechnik-Bauwesen, 8. Auflage, BLV-Verlag, München
- WESSEL, J. (1968): Verfahren des Siebens und Windsichtens, Grundlagen der Landtechnik, 18, S. 151-157
- WILHELM, H. (1993): Voraussetzungen für die Gewinnung einer optimalen Silagequalität gegebenenfalls unter Einsatz von Silierzusätzen, BAL-Bericht über die „Österreichweite Silagetagung“ am 13. und 14. Januar 1993, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft Wien (Hrsg.), Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding, S.61-64
- WILHELM, H.; K. Wurm (1999): Futterkonservierung und –qualität, Stocker-Verlag, Graz (Au)
- WOBSER, T. (1993): Silieren im Folienschlauch-eine Alternative zum Flachsilo ?, Bauernzeitung. Landwirtschaftliches Wochenblatt; 34 (40), S. 34-35

WOLF-REGETT, K.-P. (1988): Verdichtung und Expansion von Halmgut, Grundlagen der Landtechnik, 38, Nr. 2, S. 58-65

ZIMMER, E.; H. HONIG (1979): Die richtige Häcksellänge bei Silomais; Mais, 4/79, S. 8-10

**Anhang**

Tab. A 1: Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Verdichtungs- und Siliverversuche (Erntejahr 2003)

Parameter	Einheit	Variante					
		A			B		
Sorte							
Häcksellänge	[mm]	5,5	14	21	5,5	14	21
Trockenmasse	[g/kg]	384	377	421	367	355	346
Rohasche	[g/kg TM]	33	32	28	31	28	33
Rohprotein	[g/kg TM]	73	73	69	69	67	64
Rohfett	[g/kg TM]	29	30	31	29	29	28
Rohfaser	[g/kg TM]	155	170	148	176	169	184
Rohstärke	[g/kg TM]	351	302	348	297	307	286
Energie	[MJ NEL/kg TM]	7,1	6,9	7,2	6,8	6,9	6,7
Nitrat	[mg/kg TM]	142	132	33	20	29	53
Pufferkapazität	[g MS/kg TM]	18	14	11	12	11	9
Milchsäurebakterien	[log KBE/g]	8,3	8,1	8,6	8,4	8,0	7,7
Laktatabbauende Hefen	[log KBE/g]	-	-	-	-	-	-

Tab. A 2: Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Schlauchsilos (Erntejahr 2003)

Parameter	Einheit	Variante					
			A			B	
Sorte							
Häcksellänge	[mm]	5,5	14	21	5,5	14	21
Trockenmasse	[g/kg]	374	374	406	344	357	334
Rohasche	[g/kg TM]	36	33	33	29	31	34
Rohprotein	[g/kg TM]	74	74	76	75	71	70
Rohfett	[g/kg TM]	28	27	27	29	27	26
Rohfaser	[g/kg TM]	162	184	185	176	179	167
Rohstärke	[g/kg TM]	335	350	294	275	287	310
Energie	[MJ NEL/kg TM]	7,0	6,7	6,7	6,8	6,8	6,9
Nitrat	[mg/kg TM]	144	229	59	258	11	16
Pufferkapazität	[g MS/kg TM]	39	44	47	198	7	14
Milchsäurebakterien	[log KBE/g]	7,3	7,5	7,4	7,2	7,9	7,1
Laktatabbauende Hefen	[log KBE/g]	-	-	-	-	-	-

Tab. A 3: Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Flachsilos (Erntejahr 2003)

Parameter	Einheit	Variante	
Sorte		A	
Häcksellänge	[mm]	5,5	21
Trockenmasse	[g/kg]	446	403
Rohasche	[g/kg TM]	41	41
Rohprotein	[g/kg TM]	77	77
Rohfett	[g/kg TM]	26	28
Rohfaser	[g/kg TM]	211	180
Rohstärke	[g/kg TM]	244	300
Energie	[MJ NEL/kg TM]	6,4	6,7
Nitrat	[mg/kg TM]	3470	1550
Pufferkapazität	[g MS/kg TM]	30	30
Milchsäurebakterie	[log KBE/g]	8,2	8,3
Laktatabbauende Hefen	[log KBE/g]	6,5	6,6

Tab. A 4: Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Verdichtungs- und Siliversuche (Erntejahr 2004)

Parameter	Einheit	Variante					
Sorte		B		C		D	
Häcksellänge	[mm]	5	5 <sup>*)</sup>	5	21	5	21
Trockenmasse	[g/kg]	407	413	363	354	432	390
Rohasche	[g/kg TM]	35	34	33	32	32	36
Rohprotein	[g/kg TM]	64	74	66	69	71	71
Rohfett	[g/kg TM]	25	26	23	25	28	26
Rohfaser	[g/kg TM]	182	161	166	140	159	174
Energie	[MJ NEL/kg TM]	6,7	7,0	6,9	7,2	7,0	6,8
Wasserlösliche Kohlenhydrate	[g/kg TM]	165	153	187	195	127	121
Nitrat	[mg/kg TM]	77	66	<50	574	375	1201
Pufferkapazität	[g MS/kg TM]	15	16	14	14	19	26
Milchsäurebakterien	[log KBE/g]	4,0	4,6	4,6	4,5	4,3	4,1
Vergärbarkeitskoeffizient		76	73	75	75	66	53

Tab. A 5: Analyseergebnisse des Ausgangsmaterials für die Schlauchsilos  
(Erntejahr 2004)

Parameter	Einheit	Variante					
		B		C		D	
Sorte							
Häcksellänge	[mm]	5	5 <sup>1)</sup>	5	21	5	21
Trockenmasse	[g/kg]	406	438	377	354	451	419
Rohasche	[g/kg TM]	34	31	341	39	31	31
Rohprotein	[g/kg TM]	67	64	68	63	69	79
Rohfett	[g/kg TM]	25	23	25	29	28	27
Rohfaser	[g/kg TM]	172	172	154	195	150	150
Rohstärke	[g/kg TM]	407	373	396	318	427	437
Energie	[MJ NEL/kg TM]	6,9	6,9	7,1	6,6	7,1	7,1
Wasserlösliche Kohlenhydrate	g/kg TM	190	174	212	243	186	189
Nitrat	[mg/kg TM]	108	65	96	204	123	738
Pufferkapazität	[g MS/kg TM]	9	13	12	26	10	26
Vergärbarkeitskoeffizient		46	52	43	38	49	42

Tab. A 6: Massenanteile von erntefrischem Häckselgut in den verschiedenen Größenklassen des Siebturms (Erntejahr 2003) ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante								
		A			B			A		
Sorte										
HL	[mm]	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0
SW	[mm]	1,0			1,0	1,0	2,0	2,0		
Größenklasse	[mm]									
$x < 2$	[%]	2,2 <sup>ab</sup> ± 0,3	1,6 <sup>abc</sup> ± 0,6	2,4 <sup>a</sup> ± 0,4	2,1 <sup>ab</sup> ± 1,7	0,8 <sup>abc</sup> ± 0,2	0,5 <sup>c</sup> ± 0,2	1,1 <sup>abc</sup> ± 0,3	1,0 <sup>abc</sup> ± 0,1	0,9 <sup>abc</sup> ± 0,5
$2 \leq x < 3$	[%]	1,5 ± 0,8	0,6 ± 0,6	0,9 ± 0,3	1,2 ± 0,8	0,7 ± 0,2	0,6 ± 0,4	1,0 ± 0,7	0,8 ± 0,6	0,5 ± 0,3
$3 \leq x < 6$	[%]	18,9 <sup>ab</sup> ± 3,2	16,9 <sup>ab</sup> ± 4,8	16,3 <sup>ab</sup> ± 3,5	13,7 <sup>b</sup> ± 5,2	13,1 <sup>b</sup> ± 1,9	11,3 <sup>b</sup> ± 5,7	26,0 <sup>a</sup> ± 6,4	21,3 <sup>ab</sup> ± 6,1	19,3 <sup>ab</sup> ± 3,2
$6 \leq x < 10$	[%]	31,6 ± 15,3	29,7 ± 2,6	29,7 ± 6,2	35,3 ± 7,3	33,0 ± 6,0	32,9 ± 4,5	31,3 ± 7,7	31,7 ± 5,4	29,4 ± 7,9
$10 \leq x < 15$	[%]	20,2 ± 7,2	21,6 ± 3,2	20,7 ± 5,6	24,9 ± 6,7	28,8 ± 4,5	28,0 ± 4,5	26,6 ± 13,0	28,0 ± 4,7	25,8 ± 7,2
$15 \leq x < 25$	[%]	12,7 ± 3,6	13,4 ± 4,0	15,4 ± 2,3	12,2 ± 8,7	14,6 ± 7,6	15,5 ± 7,3	8,2 ± 3,1	11,2 ± 5,1	14,7 ± 4,6
$25 \leq x < 40$	[%]	6,1 ± 3,2	8,2 ± 5,6	6,9 ± 4,0	6,3 ± 2,4	6,8 ± 2,8	6,0 ± 6,1	4,7 ± 1,8	5,2 ± 0,7	5,6 ± 5,0
$x \geq 40$	[%]	6,8 ± 2,4	8,1 ± 5,5	7,6 ± 6,3	4,4 ± 1,6	2,1 ± 1,9	5,2 ± 3,4	1,2 ± 1,3	0,9 ± 1,0	3,7 ± 2,5

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden ( $P < 0,05$ )

Tab. A 7: Massenanteile von getrocknetem Häckselgut in den verschiedenen Größenklassen des Siebturms (Erntejahr 2003) ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante								
Sorte		A			B			A		
HL	[mm]	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0
SW	[mm]	1,0			1,0	1,0	2,0	2,0		
Größenklasse	[mm]									
x<2	[%]	8,0 <sup>bc</sup> ± 0,4	5,9 <sup>c</sup> ± 0,5	8,9 <sup>abc</sup> ± 0,9	10,9 <sup>ab</sup> ± 2,2	8,4 <sup>abc</sup> ± 0,3	7,2 <sup>c</sup> ± 2,2	11,3 <sup>a</sup> ± 1,1	8,4 <sup>abc</sup> ± 0,4	6,0 <sup>c</sup> ± 1,6
2 ≤ x < 3	[%]	7,8 <sup>abc</sup> ± 0,3	5,4 <sup>cd</sup> ± 0,4	6,8 <sup>abc</sup> ± 0,6	8,3 <sup>ab</sup> ± 1,1	7,4 <sup>abc</sup> ± 0,5	6,3 <sup>bcd</sup> ± 2,2	9,2 <sup>a</sup> ± 1,4	6,3 <sup>bcd</sup> ± 0,1	4,5 <sup>d</sup> ± 0,5
3 ≤ x < 6	[%]	40,2 <sup>ab</sup> ± 1,3	32,5 <sup>bcd</sup> ± 1,5	30,5 <sup>cd</sup> ± 1,4	37,0 <sup>abc</sup> ± 5,1	29,1 <sup>cd</sup> ± 2,7	25,6 <sup>d</sup> ± 6,3	42,1 <sup>a</sup> ± 4,3	32,1 <sup>bcd</sup> ± 1,9	30,7 <sup>cd</sup> ± 3,8
6 ≤ x < 10	[%]	34,1 <sup>ab</sup> ± 2,3	39,1 <sup>ab</sup> ± 2,5	32,2 <sup>ab</sup> ± 1,4	36,3 <sup>ab</sup> ± 6,9	41,2 <sup>a</sup> ± 2,9	27,1 <sup>ab</sup> ± 14,4	30,0 <sup>ab</sup> ± 5,8	38,3 <sup>ab</sup> ± 1,5	25,3 <sup>b</sup> ± 2,2
10 ≤ x < 15	[%]	7,5 <sup>d</sup> ± 1,6	12,1 <sup>bc</sup> ± 0,9	13,5 <sup>b</sup> ± 0,4	5,9 <sup>d</sup> ± 1,0	10,4 <sup>c</sup> ± 0,4	18,1 <sup>a</sup> ± 1,8	5,3 <sup>d</sup> ± 1,2	11,3 <sup>bc</sup> ± 1,7	12,0 <sup>bc</sup> ± 0,5
15 ≤ x < 25	[%]	1,6 <sup>de</sup> ± 0,2	3,8 <sup>cd</sup> ± 0,5	6,0 <sup>c</sup> ± 1,3	1,1 <sup>e</sup> ± 0,2	2,9 <sup>de</sup> ± 0,5	11,3 <sup>b</sup> ± 1,7	1,6 <sup>de</sup> ± 0,2	3,0 <sup>de</sup> ± 0,3	14,6 <sup>a</sup> ± 2,5
25 ≤ x < 40	[%]	0,6 <sup>c</sup> ± 0,3	1,2 <sup>c</sup> ± 0,8	1,9 <sup>bcd</sup> ± 0,8	0,4 <sup>c</sup> ± 0,2	0,5 <sup>c</sup> ± 0,6	4,3 <sup>ab</sup> ± 1,4	0,6 <sup>c</sup> ± 0,3	0,6 <sup>c</sup> ± 0,2	6,4 <sup>a</sup> ± 2,7
x ≥ 40	[%]	0,1 <sup>b</sup> ± 0,2	0,0 <sup>b</sup> ± 0,0	0,2 <sup>ab</sup> ± 0,2	0,0 <sup>b</sup> ± 0,1	0,1 <sup>b</sup> ± 0,1	0,0 <sup>b</sup> ± 0,0	0,0 <sup>b</sup> ± 0,1	0,0 <sup>b</sup> ± 0,0	0,6 <sup>a</sup> ± 0,4

Tab. A 8: Massenanteile von erntefrischem Häckselgut in den verschiedenen Größenklassen der Schüttelbox (Erntejahr 2004) ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante					
Sorte		B		C		D	
HL	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
Größenklasse	[mm]						
x < 8	[%]	57,7 <sup>a</sup> ± 1,5	50,1 <sup>b</sup> ± 2,7	53,4 <sup>ab</sup> ± 4,7	23,9 <sup>c</sup> ± 0,6	26,5 <sup>a</sup> ± 3,6	28,1 <sup>c</sup> ± 1,8
8 ≤ x < 19	[%]	41,0 <sup>d</sup> ± 1,6	48,5 <sup>bc</sup> ± 2,7	44,3 <sup>cd</sup> ± 4,6	70,2 <sup>a</sup> ± 2,2	38,4 <sup>d</sup> ± 3,4	55,5 <sup>b</sup> ± 4,0
x ≥ 19	[%]	1,3 <sup>b</sup> ± 0,4	1,4 <sup>b</sup> ± 0,2	2,2 <sup>b</sup> ± 0,5	5,8 <sup>b</sup> ± 2,5	2,6 <sup>b</sup> ± 1,1	16,4 <sup>a</sup> ± 5,7

Tab. A 9: Massenanteile von getrocknetem Häckselgut in den verschiedenen Größenklassen des Siebturms (Erntejahr 2004) ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante					
		B		C		D	
Sorte							
HL	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
Größenklasse	[mm]						
x<2	[%]	11,2 ± 1,7	11,3 ± 0,7	7,8 ± 1,2	6,9 ± 2,8	9,7 ± 1,1	8,7 ± 4,4
2 ≤ x<3	[%]	9,0 <sup>a</sup> ± 0,7	8,3 <sup>a</sup> ± 0,5	7,2 <sup>abc</sup> ± 2,0	5,1 <sup>c</sup> ± 1,1	8,2 <sup>ab</sup> ± 0,8	6,0 <sup>bc</sup> ± 1,9
3 ≤ x<6	[%]	47,8 <sup>a</sup> ± 3,5	46,7 <sup>a</sup> ± 1,8	42,4 <sup>a</sup> ± 3,8	26,7 <sup>b</sup> ± 3,8	45,7 <sup>a</sup> ± 2,1	28,5 <sup>b</sup> ± 4,6
6 ≤ x<10	[%]	27,4 <sup>bc</sup> ± 4,5	28,4 <sup>bc</sup> ± 2,4	34,7 <sup>ab</sup> ± 5,6	39,1 <sup>a</sup> ± 1,7	28,9 <sup>bc</sup> ± 2,7	24,4 <sup>c</sup> ± 3,2
10 ≤ x<15	[%]	3,9 <sup>b</sup> ± 1,2	3,9 <sup>b</sup> ± 0,4	5,2 <sup>b</sup> ± 1,1	12,5 <sup>a</sup> ± 1,0	4,9 <sup>b</sup> ± 0,2	12,0 <sup>a</sup> ± 2,5
15 ≤ x<25	[%]	0,5 <sup>c</sup> ± 0,1	1,0 <sup>c</sup> ± 0,4	1,7 <sup>c</sup> ± 0,3	8,7 <sup>b</sup> ± 1,2	1,9 <sup>c</sup> ± 0,5	17,2 <sup>a</sup> ± 7,0
25 ≤ x<40	[%]	0,2 <sup>b</sup> ± 0,1	0,4 <sup>b</sup> ± 0,3	0,8 <sup>b</sup> ± 0,7	0,9 <sup>b</sup> ± 0,2	0,6 <sup>b</sup> ± 0,4	3,0 <sup>a</sup> ± 1,5
x ≥ 40	[%]	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,1	0,1 ± 0,2	0,2 ± 0,3	0,0 ± 0,0	0,4 ± 0,2

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 10: Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,45 MPa und nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2003 ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante								
		A			B			A		
Sorte										
HL	[mm]	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0
SW	[mm]	1,0			1,0	1,0	2,0	2,0		
Dichte	[kg TM/m³]									
0,45 MPa	[kg TM/m³]	344 <sup>d</sup> ± 12	343 <sup>d</sup> ± 2	389 <sup>b</sup> ± 6	364 <sup>c</sup> ± 5	361 <sup>c</sup> ± 4	332 <sup>d</sup> ± 5	427 <sup>a</sup> ± 4	439 <sup>a</sup> ± 11	392 <sup>b</sup> ± 10
Nach 1 min Rückfederung	[kg TM/m³]	227 <sup>c</sup> ± 7	196 <sup>e</sup> ± 3	216 <sup>d</sup> ± 3	227 <sup>c</sup> ± 2	208 <sup>d</sup> ± 3	187 <sup>e</sup> ± 2	277 <sup>a</sup> ± 8	250 <sup>b</sup> ± 6	196 <sup>e</sup> ± 7

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 11: Dichte von Maishäckselgut bei einem Druck von 0,45 MPa und nach einer Minute Rückfederung (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante					
Sorte		B		C		D	
HL	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
Dichte	[kg TM/m <sup>3</sup> ]						
0,45 MPa	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	392 <sup>c</sup> ± 2	437 <sup>a</sup> ± 15	393 <sup>bc</sup> ± 6	373 <sup>d</sup> ± 8	408 <sup>b</sup> ± 3	395 <sup>bc</sup> ± 10
Nach 1 min Rückfederung	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	199 <sup>b</sup> ± 10	241 <sup>a</sup> ± 5	204 <sup>b</sup> ± 4	182 <sup>c</sup> ± 6	182 <sup>c</sup> ± 6	145 <sup>d</sup> ± 12

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 12: Dichte von Maishäckselgut bei einer Dreifachverdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (Materialprüfmaschine) im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante					
Sorte		B		C		D	
HL	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
Dichte	[kg TM/m <sup>3</sup> ]						
1. Verdichtung	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	291 <sup>b</sup> ± 9	310 <sup>a</sup> ± 4	281 <sup>bc</sup> ± 3	275 <sup>c</sup> ± 8	290 <sup>b</sup> ± 1	283 <sup>bc</sup> ± 1
1.+ 2. Verdichtung	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	296 <sup>b</sup> ± 13	317 <sup>a</sup> ± 4	290 <sup>bc</sup> ± 2	283 <sup>c</sup> ± 8	297 <sup>b</sup> ± 1	290 <sup>bc</sup> ± 1
1.- 3. Verdichtung	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	302 <sup>b</sup> ± 8	320 <sup>a</sup> ± 4	294 <sup>bc</sup> ± 2	288 <sup>c</sup> ± 7	301 <sup>b</sup> ± 1	294 <sup>bc</sup> ± 2

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 13: Dichte von Maishäckselgut nach einer Dreifachverdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (Materialprüfmaschine) und 1 min Rückfederung im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante					
		B		C		D	
Sorte							
HL	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
Dichte	[kg TM/m <sup>3</sup> ]						
1. Verdichtung	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	179 <sup>b</sup> ± 3	213 <sup>a</sup> ± 5	177 <sup>b</sup> ± 2	153 <sup>c</sup> ± 5	159 <sup>c</sup> ± 5	129 <sup>d</sup> ± 3
1.+ 2. Verdichtung	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	194 <sup>b</sup> ± 4	227 <sup>a</sup> ± 10	191 <sup>b</sup> ± 1	166 <sup>c</sup> ± 5	167 <sup>c</sup> ± 6	142 <sup>d</sup> ± 4
1.- 3. Verdichtung	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	203 <sup>b</sup> ± 0	242 <sup>a</sup> ± 3	199 <sup>b</sup> ± 4	180 <sup>c</sup> ± 5	179 <sup>c</sup> ± 7	153 <sup>d</sup> ± 5

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 14: Dichte von Maishäckselgut nach Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) im Erntejahr 2003 ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante								
		A			B			A		
Sorte										
HL	[mm]	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0
SW	[mm]	1,0			1,0	1,0	2,0	2,0		
Dichte	[kg TM/m <sup>3</sup> ]									
1. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	235 <sup>ab</sup> ± 42	191 <sup>ab</sup> ± 15	219 <sup>ab</sup> ± 17	216 <sup>ab</sup> ± 41	203 <sup>ab</sup> ± 27	186 <sup>ab</sup> ± 21	244 <sup>a</sup> ± 12	257 <sup>a</sup> ± 13	169 <sup>b</sup> ± 12
1.+ 2. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	246 <sup>bcd</sup> ± 16	252 <sup>bc</sup> ± 20	261 <sup>abc</sup> ± 3	245 <sup>bcd</sup> ± 24	233 <sup>bcd</sup> ± 11	213 <sup>cd</sup> ± 11	307 <sup>a</sup> ± 14	275 <sup>ab</sup> ± 9	201 <sup>d</sup> ± 31
1.- 3. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	254 <sup>bcd</sup> ± 19	249 <sup>bcd</sup> ± 4	279 <sup>ab</sup> ± 5	262 <sup>abc</sup> ± 16	236 <sup>bcd</sup> ± 9	220 <sup>cd</sup> ± 10	311 <sup>a</sup> ± 15	288 <sup>ab</sup> ± 1	205 <sup>d</sup> ± 49
1.- 4. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	258 <sup>bc</sup> ± 12	254 <sup>bcd</sup> ± 3	283 <sup>abc</sup> ± 3	266 <sup>abc</sup> ± 17	247 <sup>cde</sup> ± 4	206 <sup>de</sup> ± 38	317 <sup>a</sup> ± 10	299 <sup>ab</sup> ± 5	202 <sup>e</sup> ± 30
1.- 5. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	259 <sup>cd</sup> ± 7	260 <sup>cd</sup> ± 9	289 <sup>bc</sup> ± 6	273 <sup>bcd</sup> ± 8	252 <sup>cd</sup> ± 4	235 <sup>d</sup> ± 4	341 <sup>a</sup> ± 8	303 <sup>ab</sup> ± 6	244 <sup>d</sup> ± 40

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 15: Dichte von Maishäckselgut nach Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) und einer min Rückfederung im Erntejahr 2003 ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante								
		A			B			A		
Sorte										
HL	[mm]	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0	5,5	14,0	21,0
SW	[mm]	1,0			1,0	1,0	2,0	2,0		
Dichte	[kg TM/m³]									
1. Schicht	[kg TM/m³]	143 <sup>abc</sup> ± 2	136 <sup>bcd</sup> ± 6	147 <sup>abc</sup> ± 4	133 <sup>bcd</sup> ± 27	133 <sup>bcd</sup> ± 9	114 <sup>cd</sup> ± 8	175 <sup>a</sup> ± 14	164 <sup>ab</sup> ± 10	105 <sup>d</sup> ± 6
1.+ 2. Schicht	[kg TM/m³]	164 <sup>bc</sup> ± 6	164 <sup>bc</sup> ± 7	174 <sup>ab</sup> ± 3	161 <sup>bc</sup> ± 13	155 <sup>bcd</sup> ± 8	136 <sup>cd</sup> ± 7	203 <sup>a</sup> ± 13	183 <sup>ab</sup> ± 5	127 <sup>d</sup> ± 21
1.- 3. Schicht	[kg TM/m³]	175 <sup>cd</sup> ± 3	176 <sup>bc</sup> ± 2	191 <sup>bc</sup> ± 1	181 <sup>bc</sup> ± 11	167 <sup>cd</sup> ± 5	151 <sup>de</sup> ± 4	221 <sup>a</sup> ± 7	200 <sup>ab</sup> ± 2	140 <sup>e</sup> ± 21
1.- 4. Schicht	[kg TM/m³]	186 <sup>bc</sup> ± 5	188 <sup>bc</sup> ± 5	205 <sup>bc</sup> ± 4	190 <sup>bc</sup> ± 8	180 <sup>c</sup> ± 4	152 <sup>d</sup> ± 13	234 <sup>a</sup> ± 8	211 <sup>ab</sup> ± 5	153 <sup>d</sup> ± 21
1.- 5. Schicht	[kg TM/m³]	189 <sup>cde</sup> ± 5	197 <sup>bcd</sup> ± 6	214 <sup>bc</sup> ± 3	199 <sup>bcd</sup> ± 8	188 <sup>cde</sup> ± 6	171 <sup>de</sup> ± 3	251 <sup>a</sup> ± 4	221 <sup>b</sup> ± 5	167 <sup>e</sup> ± 26

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 16: Dichte von Maishäckselgut nach Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante					
		B		C		D	
Sorte							
HL	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
Dichte	[kg TM/m³]						
1. Schicht	[kg TM/m³]	299 <sup>a</sup> ± 19	308 <sup>ab</sup> ± 7	287 <sup>ab</sup> ± 22	260 <sup>ab</sup> ± 27	240 <sup>b</sup> ± 19	289 <sup>ab</sup> ± 39
1.+ 2. Schicht	[kg TM/m³]	279 <sup>ab</sup> ± 18	305 <sup>a</sup> ± 14	287 <sup>ab</sup> ± 3	251 <sup>b</sup> ± 4	274 <sup>ab</sup> ± 3	263 <sup>ab</sup> ± 26
1.- 3. Schicht	[kg TM/m³]	287 <sup>ab</sup> ± 14	304 <sup>a</sup> ± 13	298 <sup>a</sup> ± 12	266 <sup>b</sup> ± 5	284 <sup>ab</sup> ± 4	290 <sup>ab</sup> ± 17
1.- 4. Schicht	[kg TM/m³]	297 <sup>ab</sup> ± 10	315 <sup>a</sup> ± 11	304 <sup>ab</sup> ± 1	277 <sup>b</sup> ± 11	296 <sup>ab</sup> ± 5	299 <sup>ab</sup> ± 18
1.- 5. Schicht	[kg TM/m³]	310 <sup>a</sup> ± 9	331 <sup>a</sup> ± 10	311 <sup>a</sup> ± 6	281 <sup>b</sup> ± 9	305 <sup>ab</sup> ± 3	306 <sup>ab</sup> ± 16

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 17: Dichte von Maishäckselgut nach Fünffachschichtung und -verdichtung mit einem Druck von 0,2 MPa (220 l-Behälter) und einer min Rückfederung im Erntejahr 2004 ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante					
		B		C		D	
Sorte							
HL	[mm]	5,0	5,0 HS	5,0	21,0	5,0	21,0
Dichte	[kg TM/m <sup>3</sup> ]						
1. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	187 <sup>ab</sup> ± 14	200 <sup>a</sup> ± 9	189 <sup>ab</sup> ± 17	162 <sup>ab</sup> ± 5	158 <sup>b</sup> ± 7	161 <sup>ab</sup> ± 24
1.+ 2. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	193 <sup>ab</sup> ± 8	210 <sup>a</sup> ± 10	201 <sup>a</sup> ± 2	172 <sup>b</sup> ± 2	185 <sup>ab</sup> ± 4	174 <sup>b</sup> ± 16
1.- 3. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	207 <sup>abc</sup> ± 14	227 <sup>a</sup> ± 6	215 <sup>ab</sup> ± 4	189 <sup>c</sup> ± 2	203 <sup>bc</sup> ± 4	193 <sup>bc</sup> ± 11
1.- 4. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	220 <sup>bc</sup> ± 11	243 <sup>a</sup> ± 5	227 <sup>ab</sup> ± 3	203 <sup>c</sup> ± 4	215 <sup>bc</sup> ± 1	205 <sup>c</sup> ± 9
1.- 5. Schicht	[kg TM/m <sup>3</sup> ]	232 <sup>bc</sup> ± 10	254 <sup>a</sup> ± 6	235 <sup>b</sup> ± 5	208 <sup>d</sup> ± 5	224 <sup>bcd</sup> ± 4	216 <sup>cd</sup> ± 9

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 18: Zielwerte für die Inhaltsstoffe von Maissilage (modifiziert nach HERTWIG, 2004)

Parameter	Einheit	Zielwert
Trockensubstanz	[g/kg]	280 - 350
Rohasche	[g/kg T]	< 50
Rohprotein	[g/kg T]	< 90
Rohfaser	[g/kg T]	< 200
Stärke	[g/kg T]	> 300
Energie	[MJ NEL/kg T]	> 6,5
Milchsäure	[g/kg T]	> 35
Essigsäure	[g/kg T]	20 - 35
Buttersäure	[g/kg T]	0 - 3
NH <sub>3</sub> -N	[%]	< 10

Tab. A 19: Analyseergebnisse von siliertem Material aus den Siliergläsern  
(Erntejahr 2003) ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante					
		A			B		
Sorte							
Häcksellänge	[mm]	5,5	14	21	5,5	14	21
Trockensubstanz	[g/kg]	373 <sup>b</sup> ± 5	364 <sup>bc</sup> ± 6	389 <sup>a</sup> ± 7	348 <sup>d</sup> ± 3	331 <sup>e</sup> ± 5	352 <sup>d</sup> ± 6
Rohfaser	[g/kg T]	177 <sup>a</sup> ± 5	173 <sup>ab</sup> ± 5	147 <sup>b</sup> ± 22	195 <sup>a</sup> ± 5	188 <sup>a</sup> ± 7	188 <sup>a</sup> ± 8
Rohasche	[g/kg T]	31 <sup>ab</sup> ± 3	35 <sup>a</sup> ± 2	30 <sup>ab</sup> ± 3	28 <sup>ab</sup> ± 2	32 <sup>ab</sup> ± 3	28 <sup>b</sup> ± 2
Rohprotein	[g/kg T]	77 <sup>a</sup> ± 2	77 <sup>a</sup> ± 1	69 <sup>c</sup> ± 3	72 <sup>bc</sup> ± 2	73 <sup>abc</sup> ± 1	74 <sup>ab</sup> ± 2
Stärke	[g/kg T]	354 <sup>b</sup> ± 21	357 <sup>b</sup> ± 29	439 <sup>a</sup> ± 54	306 <sup>b</sup> ± 11	332 <sup>b</sup> ± 4	329 <sup>b</sup> ± 27
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,8 <sup>ab</sup> ± 0,1	6,8 <sup>ab</sup> ± 0	7,1 <sup>a</sup> ± 0,2	6,7 <sup>b</sup> ± 0	6,7 <sup>b</sup> ± 0,1	6,7 <sup>b</sup> ± 0,1
pH-Wert		3,9 <sup>a</sup> ± 0,1	3,8 <sup>bc</sup> ± 0,1	3,8 <sup>abc</sup> ± 0	3,8 <sup>abc</sup> ± 0,1	3,7 <sup>c</sup> ± 0	3,8 <sup>ab</sup> ± 0,1
Milchsäure	[g/kg T]	35 <sup>c</sup> ± 16	59 <sup>ab</sup> ± 4	30 <sup>c</sup> ± 8	35 <sup>bc</sup> ± 9	26 <sup>c</sup> ± 2	72 <sup>a</sup> ± 4
Essigsäure	[g/kg T]	6 <sup>b</sup> ± 4	7 <sup>b</sup> ± 1	6 <sup>b</sup> ± 2	10 <sup>b</sup> ± 2	5 <sup>b</sup> ± 1	25 <sup>a</sup> ± 2
Buttersäure	[g/kg T]	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
DLG-Punkte		84 <sup>b</sup> ± 4	85 <sup>b</sup> ± 1	83 <sup>b</sup> ± 2	88 <sup>b</sup> ± 2	82 <sup>b</sup> ± 1	100 <sup>a</sup> ± 0

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 20: Analyseergebnisse von siliertem Material aus den 220 l-Behältern (Erntejahr 2003)

Parameter	Einheit	Variante					
		A			B		
Sorte							
Häcksellänge	[mm]	5,5	14	21	5,5	14	21
Trockensubstanz	[g/kg]	382	366	402	357	357	351
Rohfaser	[g/kg T]	33	36	34	30	31	33
Rohasche	[g/kg T]	78	72	66	63	72	71
Rohprotein	[g/kg T]	178	153	110	180	183	187
Stärke	[g/kg T]	389	357	388	327	329	328
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,8	7,1	7,5	6,8	6,8	6,7
pH-Wert		4,1	3,9	3,9	3,9	4,0	4,0
Milchsäure	[g/kg T]	44	60	49	54	45	60
Essigsäure	[g/kg T]	11	20	11	17	11	15
Buttersäure	[g/kg T]	0	0	0	0	0	0
DLG-Punkte		89	97	89	91	89	93

Tab. A 21: Analyseergebnisse von siliertem Material aus den Schlauchsilos (Erntejahr 2003)

Parameter	Einheit	Variante					
		A			B		
Sorte							
Häcksellänge	[mm]	5,5	14	21	5,5	14	21
Trockenmasse	[g/kg]	380	368	430	343	351	345
Rohasche	[g/kg T]	35	37	33	38	32	36
Rohprotein	[g/kg T]	78	80	84	72	75	72
Rohfaser	[g/kg T]	196	192	206	195	199	201
Stärke	[g/kg T]	310	322	301	296	329	287
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,6	6,6	6,5	6,6	6,6	6,5
pH-Wert		3,8	3,9	4,1	3,7	3,8	3,8
Milchsäuregehalt	[g/kg T]	66	71	53	68	69	62
Essigsäuregehalt	[g/kg T]	13	12	10	15	11	14
Buttersäuregehalt	[g/kg T]	0	0	0	0	0	0
DLG-Punkte		91	89	79	93	78	81

Tab. A 22: Analyseergebnisse von siliertem Material aus den Flachsilos (Erntejahr 2003)

<b>Parameter</b>	<b>Einheit</b>	<b>Variante</b>	
<b>Sorte</b>		<b>A</b>	
<b>Häcksellänge</b>	<b>[mm]</b>	<b>5,5</b>	<b>21,0</b>
<b>Trockensubstanz</b>	<b>[g/kg]</b>	406	385
<b>Rohasche</b>	<b>[g/kg T]</b>	41	39
<b>Rohprotein</b>	<b>[g/kg T]</b>	81	82
<b>Rohfaser</b>	<b>[g/kg T]</b>	193	186
<b>Stärke</b>	<b>[g/kg T]</b>	282	299
<b>Energie</b>	<b>[MJ NEL/kg T]</b>	6,6	6,7
<b>pH-Wert</b>		4,0	3,9
<b>Milchsäure</b>	<b>[g/kg T]</b>	54	65
<b>Essigsäure</b>	<b>[g/kg T]</b>	12	15
<b>Buttersäure</b>	<b>[g/kg T]</b>	0	0
<b>DLG-Punkte</b>		89	93

Tab. A 23: Analyseergebnisse von siliertem Material aus den Siliergläsern (Erntejahr 2004) ( $\bar{x} \pm s$ )

Parameter	Einheit	Variante					
		B		C		D	
Sorte							
Häcksellänge	[mm]	5,0	5,0*)	5,0	21,0	5,0	21,0
Trockensubstanz	[g/kg]	382 <sup>b</sup> ± 1	404 <sup>a</sup> ± 5	343 <sup>c</sup> ± 5	347 <sup>c</sup> ± 2	414 <sup>a</sup> ± 4	411 <sup>a</sup> ± 7
Rohasche	[g/kg T]	42 ± 2	44 ± 4	45 ± 2	44 ± 2	44 ± 4	47 ± 3
Rohprotein	[g/kg T]	63 <sup>c</sup> ± 1	70 <sup>a</sup> ± 1	66 <sup>bc</sup> ± 1	67 <sup>abc</sup> ± 2	67 <sup>abc</sup> ± 2	69 <sup>ab</sup> ± 2
Rohfaser	[g/kg T]	183 <sup>a</sup> ± 10	149 <sup>c</sup> ± 11	181 <sup>a</sup> ± 11	160 <sup>abc</sup> ± 8	176 <sup>ab</sup> ± 7	150 <sup>bc</sup> ± 13
Stärke	[g/kg T]	400 <sup>bc</sup> ± 10	431 <sup>ab</sup> ± 26	393 <sup>bc</sup> ± 15	405 <sup>abc</sup> ± 12	379 <sup>c</sup> ± 4	444 <sup>a</sup> ± 18
NDF	[g/kg T]	398 ± 24	422 ± 51	418 ± 77	383 ± 40	419 ± 21	347 ± 40
ADF	[g/kg T]	150 ± 12	210 ± 37	170 ± 50	168 ± 19	162 ± 6	160 ± 17
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,7 <sup>b</sup> ± 0,1	7,0 <sup>a</sup> ± 0,1	6,7 <sup>b</sup> ± 0,1	6,9 <sup>ab</sup> ± 0,1	6,8 <sup>ab</sup> ± 0,1	7,0 <sup>a</sup> ± 0,2
pH-Wert		3,9 <sup>a</sup> ± 0	3,9 <sup>bc</sup> ± 0	3,8 <sup>abc</sup> ± 0	3,8 <sup>abc</sup> ± 0	3,9 <sup>c</sup> ± 0	3,9 <sup>ab</sup> ± 0
Milchsäure	[g/kg T]	33 <sup>c</sup> ± 1	26 <sup>ab</sup> ± 2	26 <sup>c</sup> ± 3	31 <sup>bc</sup> ± 2	29 <sup>c</sup> ± 1	27 <sup>a</sup> ± 2
Essigsäure	[g/kg T]	6 <sup>b</sup> ± 0	7 <sup>b</sup> ± 1	6 <sup>b</sup> ± 1	10 <sup>b</sup> ± 0	5 <sup>b</sup> ± 0	25 <sup>a</sup> ± 1
Propionsäure	[g/kg T]	1 ± 0	1 ± 0	0 ± 0	1 ± 0	1 ± 0	1 ± 0
Buttersäure	[g/kg T]	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 0	0 ± 1
Ammoniak-N-Anteil	[%]	4 ± 0	5 ± 0	3 ± 0	4 ± 1	4 ± 1	4 ± 0
Ethanol	[g/kg T]	0 ± 0	0 ± 0	1 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
DLG-Punkte		81 <sup>ab</sup> ± 0	79 <sup>b</sup> ± 1	83 <sup>a</sup> ± 1	82 <sup>ab</sup> ± 2	83 <sup>ab</sup> ± 2	84 <sup>a</sup> ± 2
DLG-Note		2 ± 0	2 ± 0	2 ± 0	2 ± 0	2 ± 0	2 ± 0

Zahlen mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden (P < 0,05)

Tab. A 24: Analyseergebnisse von siliertem Material aus dem Schlauchsilo der Variante B HL 5,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )

Parameter	Einheit	Variante			
Sorte		B			
Häcksellänge	[mm]	5,0			
Messpunkt		Kern 1	Mitte oben 1	Kern 2	Mitte oben 2
Trockensubstanz	[g/kg]	428	422	430	437
Rohasche	[g/kg T]	35	39	41	42
Rohprotein	[g/kg T]	62	62	68	68
Rohfaser	[g/kg T]	184	178	184	190
Stärke	[g/kg T]	395	410	381	373
NDF	[g/kg T]	420	402	438	433
ADF	[g/kg T]	167	160	176	184
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,7	6,8	6,7	6,6
pH-Wert		4,0	4,0	4,0	4,0
Milchsäure	[g/kg T]	29	33	47	49
Essigsäure	[g/kg T]	8	8	9	10
Propionsäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Buttersäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ammoniak-N-Anteil	[%]	3	3	3	5
Ethanol	[g/kg T]	5	5	3	3
DLG-Punkte		80	80	85	90

Tab. A 25: Analyseergebnisse von siliertem Material aus dem Schlauchsilos der Variante B HL 5,0 HS (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )

Parameter	Einheit	Variante			
Sorte		B			
Häcksellänge	[mm]	5,0 HS			
Messpunkt		Kern 1	Mitte oben 1	Kern 2	Mitte oben 2
Trockensubstanz	[g/kg]	435	426	419	466
Rohasche	[g/kg T]	41	43	44	46
Rohprotein	[g/kg T]	66	66	72	69
Rohfaser	[g/kg T]	197	199	191	190
Stärke	[g/kg T]	343	348	377	386
NDF	[% T]	472	473	451	426
ADF	[% T]	199	198	205	167
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,6	6,5	6,6	6,6
pH-Wert		4,0	4,0	4,6	4,0
Milchsäure	[g/kg T]	35	37	24	45
Essigsäure	[g/kg T]	21	10	2	8
Propionsäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Buttersäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ammoniak-N-Anteil	[%]	3	3	5	5
Ethanol	[g/kg T]	5	9	1	5
DLG-Punkte		93	90	45	85

Tab. A 26: Analyseergebnisse von siliertem Material aus dem Schlauchsilos der Variante C HL 5,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )

Parameter	Einheit	Variante			
Sorte		C			
Häcksellänge	[mm]	5,0			
Messpunkt		Kern 1	Mitte oben 1	Kern 2	Mitte oben 2
Trockensubstanz	[g/kg]	378	380	381	394
Rohasche	[g/kg T]	40	43	47	45
Rohprotein	[g/kg T]	67	66	71	66
Rohfaser	[g/kg T]	172	176	193	174
Stärke	[g/kg T]	404	399	380	403
NDF	[g/kg T]	386	382	474	416
ADF	[g/kg T]	159	162	188	166
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,8	6,8	6,6	6,8
pH-Wert		3,9	3,9	4,3	4,0
Milchsäure	[g/kg T]	30	32	23	43
Essigsäure	[g/kg T]	10	10	4	12
Propionsäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Buttersäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ammoniak-N-Anteil	[%]	3	4	1	3
Ethanol	[g/kg T]	10	11	2	2
DLG-Punkte		90	90	50	90

Tab. A 27: Analyseergebnisse von silierten Material aus dem Schlauchsilos der Variante C HL 21,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )

Parameter	Einheit	Variante			
Sorte		C			
Häcksellänge	[mm]	21,0			
Messpunkt		Kern 1	Mitte oben 1	Kern 2	Mitte oben 2
Trockensubstanz	[g/kg]	350	348	391	374
Rohasche	[g/kg T]	38	37	60	61
Rohprotein	[g/kg T]	68	67	90	82
Rohfaser	[g/kg T]	185	202	218	204
Stärke	[g/kg T]	377	335	297	344
NDF	[g/kg T]	403	442	564	512
ADF	[g/kg T]	169	190	222	176
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,7	6,5	6,2	6,4
pH-Wert		4,0	4,0	4,3	4,5
Milchsäure	[g/kg T]	34	38	8	25
Essigsäure	[g/kg T]	9	11	1	3
Propionsäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Buttersäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ammoniak-N-Anteil	[%]	3	3	4	3
Ethanol	[g/kg T]	9	8	0	1
DLG-Punkte		85	90	50	50

Tab. A 28: Analyseergebnisse von silierten Material aus dem Schlauchsilos der Variante D HL 5,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )

Parameter	Einheit	Variante			
Sorte		D			
Häcksellänge	[mm]	5,0			
Messpunkt		Kern 1	Mitte oben 1	Kern 2	Mitte oben 2
Trockensubstanz	[g/kg]	432	422	485	473
Rohasche	[g/kg T]	47	45	53	46
Rohprotein	[g/kg T]	70	70	71	71
Rohfaser	[g/kg T]	197	197	162	166
Stärke	[g/kg T]	313	318	442	436
NDF	[g/kg T]	494	482	409	387
ADF	[g/kg T]	217	210	161	146
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,5	6,5	6,9	6,9
pH-Wert		4,0	4,0	4,1	4,0
Milchsäure	[g/kg T]	41	41	38	46
Essigsäure	[g/kg T]	12	11	8	10
Propionsäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Buttersäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ammoniak-N-Anteil	[%]	3	3	3	4
Ethanol	[g/kg T]	5	5	2	4
DLG-Punkte		90	90	55	85

Tab. A 29: Analyseergebnisse von siliertem Material aus dem Schlauchsilos der Variante D HL 21,0 (Erntejahr 2004) ( $\bar{x}$ )

Parameter	Einheit	Variante			
Sorte		D			
Häcksellänge	[mm]	21,0			
Messpunkt		Kern 1	Mitte oben 1	Kern 2	Mitte oben 2
Trockensubstanz	[g/kg]	382	420	437	424
Rohasche	[g/kg T]	46	46	39	47
Rohprotein	[g/kg T]	69	70	81	71
Rohfaser	[g/kg T]	204	198	178	191
Stärke	[g/kg T]	328	341	376	353
NDF	[g/kg T]	496	488	463	463
ADF	[g/kg T]	208	204	211	185
Energie	[MJ NEL/kg T]	6,5	6,5	6,8	6,6
pH-Wert		4,2	4,1	4,5	4,1
Milchsäure	[g/kg T]	38	40	30	43
Essigsäure	[g/kg T]	17	9	13	9
Propionsäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Buttersäure	[g/kg T]	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ammoniak-N-Anteil	[%]	4	3	4	4
Ethanol	[g/kg T]	9	3	2	4
DLG-Punkte		93	88	60	85

