

Institut für Landtechnik

**Experimentelle Untersuchungen zur
Feuchtgetreidekonservierung im Folienschlauch**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften

(Dr. agr.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 20. Dezember 2007

von

M.Sc. Momme Matthiesen

aus Ebüll, Kreis Nordfriesland

Referent: Prof. Dr. W. Büscher
Korreferent: Prof. Dr. K.-H. Südekum
Tag der mündlichen Prüfung: 29. Februar 2008

Copyright 2008

Im Selbstverlag: Momme Matthiesen
Institut für Landtechnik
Verfahrenstechnik in der tierischen Erzeugung
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik der Rheinischen-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn entstanden.

Ich bedanke mich bei allen, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Wolfgang Büscher für die Überlassung des Themas und die konstruktive, wissenschaftliche Betreuung.

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

Herrn Prof. Dr. Dehne für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Frau Dr. Andrea Wagner für die vorbereitende Organisation des Projektes und die konstruktive Kritik während der Durchführung.

Den Firmen BAG Budissa Agro Service, Addcon Agrar GmbH und der RKW AG für die finanzielle Unterstützung des Projektes und insbesondere Dr. Udo Weber und Dr. Horst Auerbach für die Diskussionsbereitschaft sowie tatkräftige Unterstützung.

Den Mitarbeitern des Instituts für Landtechnik für das angenehme Betriebsklima und die Hilfsbereitschaft, insbesondere Dr. Oliver Schmittmann und Dr. Christoph Nannen für zahlreiche konstruktive Diskussionen.

Den Mitarbeitern der Lehr- und Forschungsstation Frankenforst und den Mitarbeitern des Instituts für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Christian-Albrechts-Universität Kiel für die Ermöglichung der Versuchdurchführung, sowie personelle und materielle Unterstützung.

Meiner Familie und insbesondere Gerhild Kruse für die vielfältige, intensive und beharrliche Unterstützung.

Meinen Eltern

Kurzfassung

Experimentelle Untersuchungen zur Feuchtgetreidekonservierung im Folienschlauch

Das Verfahren der Einlagerung von gequetschtem Futtergetreide in Folienschläuchen mit einer Schlauchpresse mit integrierter Walzenquetsche (Crimper-Bagger) stellt eine technische Alternative zu konventionellen Techniken dar, weil erntefrisches Getreide mit hohen Feuchtegehalten in einem Arbeitsgang gequetscht, mit Konservierungszusätzen behandelt, verdichtet und luftdicht eingelagert werden kann. Eine Analyse und Beschreibung substratbedingter und verfahrenstechnischer Einflüsse auf die Futterqualität bei der Einlagerung von Feuchtgetreide im Folienschlauch mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen an feucht und zerkleinert eingelagerter Gerste und Weizen unter Anwendung eines chemischen Konservierungszusatzes war Ziel der eigenen Untersuchungen.

Die Basis der Untersuchungen lag in der Zerkleinerung von Gerste und Weizen zweier Feuchtestufen mit anschließender Einlagerung in Folienschläuchen mit einem Crimper-Bagger. Die Feuchtegehalte von etwa 20 und 30 % wurden sowohl durch vorgezogene Ernte als auch durch nachträgliches Anfeuchten erreicht. Die Futterqualität und aerobe Stabilität im Folienschlauch wurde während der anaeroben Lagerung und der aeroben Auslagerungsphase untersucht. Zur Bestimmung grundsätzlicher Einflüsse auf Gärqualität und aerobe Stabilität sowie der Wirkung verschiedener Aufwandmengen eines chemischen Konservierungszusatzes wurden standardisierte Versuche in Siliergläsern angelegt. Die biochemische und technische Charakterisierung der Substrate erfolgte sowohl durch Analyse der Inhaltsstoffe und des Besatzes an verderbverursachenden Mikroorganismen als auch durch Bestimmung von Aufbereitungsgrad und Verdichtbarkeit.

Es konnte aufgezeigt werden, dass eine verlustarme Konservierung aller untersuchten Feuchtgetreidevarianten unabhängig vom Feuchtegehalt unter Luftabschluss im Folienschlauch möglich ist. Unter Lufteinfluss traten deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Getreidevarianten auf. Als Ursache hierfür sind Unterschiede im Aufbau der Getreidekörner und in physikalischen sowie biochemischen Eigenschaften bei variierenden Feuchtegehalten zu nennen. Die Effizienz eines chemischen Konservierungszusatzes konnte unabhängig von Getreideart und -feuchte aufgezeigt werden, so dass dessen Einsatz zur Senkung des Verderbrisikos grundsätzlich zu empfehlen ist.

Die vorliegenden Ergebnisse leisten einen Beitrag zur sachgerechten Bewertung und sicheren Anwendung des Crimper-Bagger-Verfahrens. Optimierungsansätze werden aufgezeigt.

Abstract

Experimental Research on High-Moisture Grain Preserved in Plastic Tubes

The new crimper-bagger technology is a viable alternative to conventional storage systems for feed grain. Freshly harvested grain with a high moisture content is crimped, optionally sprayed with a silage additive and pressed into an airtight plastic tube all in one operation.

The subject of the investigations carried out for this dissertation was to examine and describe the influence of different substrates and procedures on the feed quality achievable by storing crimped high-moisture grain in plastic tubes. The investigations were carried out with barley and wheat of two different moisture contents and treated with different amounts of an acid-based silage additive. Moisture contents of 20 and 30% were achieved by reconstitution and early harvesting respectively.

The feed quality and the aerobic stability of grain stored in plastic tubes were examined during anaerobic storage and during the aerobic feed out phase. In addition, standardized trials in glass vessels were carried out to identify basic influences on the fermentation quality and aerobic stability of moist grain and to analyse the effects of different application rates of an acid-based silage additive. The biochemical and technical properties of the substrates were analysed in terms of the material composition of the substrates themselves, in terms of the observable microorganisms causing spoilage, and in terms of particle size and compressibility.

Stable storage with low losses was achieved with all variants of high-moisture-grain under airtight conditions regardless of moisture content. Aerobic conditions caused significant differences between the variants, which were due to the different structures of the grain types as well as their different physical and biochemical properties at varying moisture contents. The acid-based additive used in the investigations proved effective regardless of grain type or moisture content. The use of chemical silage additives can basically be recommended as a means of reducing the risk of spoilage.

The results presented in this dissertation are a contribution to the proper assessment and adequate use of the crimper-bagger system. Areas for the improvement of this technology are also identified.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	1
2	Literaturanalyse	3
2.1	Abreifebedingte Eigenschaften von Getreide.....	3
2.2	Hintergründe zur Ernte von Feuchtgetreide	6
2.3	Trocknung von Getreide.....	8
2.4	Konservierungsverfahren ohne Wasserentzug	10
2.4.1	Silierung	12
2.4.2	Lagerungssysteme für Feuchtgetreide	19
2.4.3	Einsatz von Konservierungsmitteln.....	21
2.5	Qualitätsbeeinflussende Prozesse	24
2.5.1	Verderbanzeigende Mikroorganismen	25
2.5.2	Aerobe Stabilität.....	30
2.6	Aufbereitungsverfahren für Körnerfrüchte.....	30
2.6.1	Hammermühle	31
2.6.2	Walzenmühlen und Walzenquetschen.....	32
2.7	Untersuchungsmethoden zur Verdichtung	34
2.8	Anforderungen an Feuchtgetreide und -mais aus Aspekten der Tierernährung...35	
2.8.1	Verwendung von Feuchtgetreide in der Rinderfütterung.....	36
2.8.2	Verwendung von Feuchtgetreide in der Schweinefütterung	37
2.9	Futterkonservierung in Folienschläuchen.....	38

3	Material und Methoden	42
3.1	Variantenübersicht und Versuchsstruktur	43
3.2	Funktionsweise des ‚Crimper-Bagger‘	45
3.3	Praxisversuche Folienschlauchverfahren	49
3.3.1	Versuchsaufbau 2005	49
3.3.2	Versuchsaufbau 2006	51
3.3.3	Bilanznetzversuche.....	53
3.3.4	Bestimmung der aeroben Stabilität im Folienschlauch.....	55
3.3.5	Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Lagerungsdichte.....	57
3.4	Versuche im kleintechnischen Maßstab	60
3.4.1	Silieglassversuche.....	61
3.4.2	Analytik.....	64
3.4.3	Partikelgrößenfraktionierung	65
3.4.4	Bestimmung der Verdichtbarkeit	66
3.5	Statistische Auswertung	67
4	Ergebnisse	68
4.1	Untersuchungsergebnisse zum Leistungsbedarf bei der Feuchtgetreideernte.....	68
4.2	Ausgangsmaterial	70
4.2.1	Trockenmassen.....	70
4.2.2	Rohnährstoffanalyse und Keimgehalte	71
4.3	Untersuchungsergebnisse zur Fermentation.....	73
4.3.1	Ansäuerungsgeschwindigkeit.....	73
4.3.2	Gärqualität.....	75
4.3.3	Gärverluste	82
4.4	Keimgehalte	82

4.4.1	Erstes Versuchsjahr (2005).....	82
4.4.2	Zweites Versuchsjahr (2006).....	86
4.5	Temperaturverlauf im Schlauch in der anaeroben Lagerungsphase.....	91
4.6	Aerobe Stabilität	95
4.6.1	Folienschläuche	95
4.6.2	Silierglasversuche zur aeroben Stabilität.....	101
4.7	Partikelgrößenverteilung	106
4.8	Untersuchungen zur Lagerungsdichte und Verdichtbarkeit	107
4.8.1	Lagerungsdichte im Folienschlauch	107
4.8.2	Untersuchungen mit einer Materialprüfmaschine	113
4.9	Ergebnisse einer Praxiserhebung.....	115
5	Diskussion	118
5.1	Bewertung der ausgewählten Messmethoden.....	118
5.1.1	Bilanznetzmethode	118
5.1.2	Silierglasversuche.....	118
5.1.3	Partikelgrößenbestimmung.....	120
5.1.4	Untersuchungen zur Lagerungsdichte	121
5.2	Ernte und Rückanfeuchtung von Feuchtgetreide.....	122
5.3	Futterqualität bei Lagerung unter Luftabschluss	124
5.3.1	Charakteristische Eigenschaften des Ausgangsmaterial und Gärqualität... 124	
5.3.2	Vergleich des Gärverhaltens von Getreide mit und ohne Anfeuchtung.....	126
5.3.3	Keimgehalte bei anaerober Lagerung.....	128
5.3.4	Gärverluste.....	129
5.4	Futterqualität unter aeroben Bedingungen	130
5.4.1	Einflussfaktoren auf Keimgehalte und Aerobe Stabilität.....	131
5.4.2	Konservierungsmiteinsatz	134

5.5	Entnahme von Feuchtgetreide aus dem Folienschlauch	137
5.6	Optimierungsansätze zum Folienschlauchverfahren.....	138
5.6.1	Optimierungsvorschläge aufgrund von Praxiserfahrungen.....	138
5.6.2	Maßnahmen zur Aufrechterhaltung anaerober Lagerungsbedingungen	140
5.7	Einsatzpotentiale der Feuchtgetreidekonservierung im Folienschlauch	143
5.8	Schlussfolgerungen	145
5.9	Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen	146
6	Zusammenfassung	148
7	Literaturverzeichnis	150
8	Anhang	158

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verfahrenskette im Crimper-Bagger-Verfahren	2
Abbildung 2:	Verlauf der Stärkegehalte in Weizen im Zeitraum von Blüte bis Ernte (nach MATTHÄUS et al., 2004)	4
Abbildung 3:	Zusammenhang von Feuchtegehalt und Kornvolumen bzw. Kornoberfläche von Hartweizen (mod. nach AL-MAHASNEH UND RABABAH, 2007)	5
Abbildung 4:	Zusammenhang von Feuchtegehalt und Einzelkorndichte bzw. Lagerungsdichte von Hartweizen (mod. nach Al-Mahasneh und Rababah, 2007).	5
Abbildung 5:	Beitrag von Säurebildung, CO ₂ -Atmosphäre und Wassermangel zur Konservierung (Zimmer, 1985)	11
Abbildung 6:	Temperaturverlauf von erntefeuchtem Weizenkörnern (28%) bei der Lagerung mit und ohne Propionsäure-Applikation (MATTHIAS UND PRIES, 2006)	23
Abbildung 7:	Verlauf der Mykotoxingehalte (Deoxynivalenol, Zearalenon) in Weizen nach Inokkulation mit <i>fusarium culmorum</i> zur Zeit der Blüte (nach MATTHÄUS et al., 2004).	27
Abbildung 8:	Entwicklung der Keimgehalte in Feuchtgerste bei anaerober Lagerung in Hochsilos (nach Kaspersson et al. (1988).	28
Abbildung 9:	Arbeitswerkzeuge und Funktionsweise einer Hammermühle (mod. nach AEL 1996).	31
Abbildung 10:	Arbeitsweise der Walzenmühle (mod. nach AEL 1996)	32
Abbildung 11:	Mahlwiderstand verschiedener Weizenvarianten in Abhängigkeit von Sorte und Feuchtegehalt (nach EDWARDS et al. 2007).	33
Abbildung 12:	Partikelgrößenverteilung von Hartweizen mit und ohne Anfeuchtung Zerkleinerung durch eine Walzenmühle (Mahlspalt 0,67 mm). mod. nach EDWARDS et al. (2007).	34
Abbildung 13:	Schematische Darstellung des 'Crimper Bagger'	45

Abbildung 14: Positionierung der Bilanznetze im Folienschlauch. Links: Skizze der Einlagepositionen der Bilanznetze. Rechts: Foto von geöffneter Presstunnelklappe in Kernposition.	46
Abbildung 15: Abdichtung und Schutzmaßnahmen am Folienschlauch	48
Abbildung 16: Versuchsaufbau des Folienschlauchversuches 2005 mit Weizen und Sensorpositionierung in der Draufsicht.	50
Abbildung 17: Versuchsaufbau des Folienschlauchversuches 2006 mit Gerste und Weizen.	51
Abbildung 18: Mähdrusch von Gerste (31 %) mit einem Axialmähdresscher (JD CTS 9780).	53
Abbildung 19: Entnahme von Feuchtgetreide aus dem Folienschlauch mit Siloblockschneider (links), manuell (mitte) und mit einem Hoflader (rechts).	55
Abbildung 20: Messungen der Temperatur an der Anschnittfläche mit Stabthermometer (links) und Thermografiekamera (rechts).	57
Abbildung 21: Untersuchungen zur Lagerungsdichte mit einem Penetrometer in vertikaler Einstichrichtung in Feuchtgetreide und –mais.	59
Abbildung 22: Ermittlung der Lagerungsdichte in Folienschläuchen mit Feuchtgetreide durch einen Stechzylinder.	60
Abbildung 23: Standardisierte Untersuchungen im kleintechnischen Maßstab.	63
Abbildung 24: Siebfraktionierung mittels Siebturm (Aufbau links) in 6 Stufen (rechts).	66
Abbildung 25: Untersuchung der Verdichtbarkeit von Feuchtgetreide in der Materialprüfmaschine. Links: vor Verdichtung von gequetschtem Feuchtmais, rechts: nach einmaliger Verdichtung.	67
Abbildung 26: Kraftstoffverbrauch- und Leistungsbedarf am Häcksler beim Mähdrusch von Gerste und Weizen mit unterschiedlichen Feuchtegehalten.	69

Abbildung 27: pH-Wert in Feuchtgetreide nach 3 Tagen Lagerung im Silierglas (+=angefeuchtet; n=3)	73
Abbildung 28: pH-Werte verschiedener Weizenvarianten nach drei Tagen Lagerung im Silierglas.	74
Abbildung 29: Gärproduktgehalte und pH-Werte verschiedener Feuchtgetreidevarianten in Abhängigkeit von Getreideart, Feuchtegehalt, Konservierungsmittelleinsatz und Lagerdauer im Silierglas (2006; n=3).	81
Abbildung 30: Keimgehalte und pH-Werte von Weizen nach 50 Tagen Lagerung im Folienschlauch (2005; n=1).	83
Abbildung 31: Keimgehalte und pH-Werte von Gerste nach 49 Tagen Lagerung im Silierglas mit 24 Stunden Luftstress nach 28 und 42 Tagen (Ernte 2005; +=angefeuchtet; n=3)	85
Abbildung 32: Keimgehalte und pH-Werte von Weizen nach 49 Tagen Lagerung im Silierglas mit 24 Stunden Luftstress nach 28 und 42 Tagen (Ernte 2005; +=angefeuchtet; n=3)	85
Abbildung 33: Keimgehalte [log KBE/g FM] und pH-Werte von Feuchtgetreide in Abhängigkeit von der Entnahmeposition 4 Tage nach Schlauchöffnung	88
Abbildung 34: Keimgehalte [log KBE/g FM] und pH-Werte von Feuchtgetreide in Abhängigkeit der Lagerdauer nach Schlauchöffnung und der Entnahmeposition.	90
Abbildung 35: Messung des Temperaturanstiegs im Feuchtgetreide im Mündungsbereich der Förderschnecke des Crimper-Bagger	92
Abbildung 36: Temperaturverläufe in Rand- und Kernposition im Folienschlauch während der anaeroben Lagerungsphase verschiedener Gerstevarianten (2006).	93
Abbildung 37: Temperaturverläufe in Rand- und Kernposition im Folienschlauch während der anaeroben Lagerungsphase verschiedener Weizenvarianten (2006), *=Schlauchöffnung.	94

-
- Abbildung 38: Temperaturverlauf in der Anschnittfläche von unbehandeltem, gequetschtem Weizen in zwei Feuchtestufen im Folienschlauch nach Schlauchöffnung (2005; += angefeuchtet; n=3). 95
- Abbildung 39: Temperaturverlauf in Folienschläuchen mit Gerste verschiedener Feuchtestufen mit und ohne Zusatz nach Öffnung (2006) 97
- Abbildung 40: Temperaturverlauf in Folienschläuchen mit Gerste verschiedener Feuchtestufen mit und ohne Zusatz nach Öffnung (2006) 98
- Abbildung 41: Temperatur in der Anschnittfläche verschiedener Feuchtgetreidevarianten im Folienschlauch nach deren Öffnung (2006; n=3). 100
- Abbildung 42: Nacherwärmung von Gerste (Feuchte 31%) im Folienschlauch am 19. Tag nach Öffnung. Aufnahmen einer Thermografiekamera, links unbehandelt, rechts mit chemischem Zusatz. 101
- Abbildung 43: Partikelgrößenverteilung von gequetschtem Feuchtgetreidevarianten aus Folienschläuchen 106
- Abbildung 44: Lagerungsdichte von Feuchtmais im Folienschlauch an verschiedenen Positionen der Anschnittfläche (kg TM/m^3 , n=1; MAACK, 2006). 108
- Abbildung 45: Lagerungsdichte verschiedener Getreidevarianten in Abhängigkeit der Entnahmeposition an der Anschnittfläche von Folienschläuchen (n=5). 109
- Abbildung 46: Vertikaler Eindringwiderstand in Folienschläuchen mit verschiedenen Getreidevarianten (n \geq 10). 113
- Abbildung 47: Druck-Dichte-Diagramm gequetschter Gerste- und Weizenvarianten mit unterschiedlichem Abreifungsgrad (2006) 114
- Abbildung 48: Verdichtbarkeit und Relaxation verschiedener Feuchtgetreidevarianten im Presszylinder (n=6). 115
- Abbildung 49: Temperaturverlauf der Weizenvarianten W-18-0,3 und W-30-0,3+ nach 90 Tagen anaerober Lagerung im Glas und anschließender aerober Lagerung bei 25,9°C (n=3). 120

Abbildung 50: Zusammenhang von Lagerungsdichte und Eindringwiderstand in Abhängigkeit von Getreideart und Einlagerungsfeuchte.	122
Abbildung 51: pH-Wert ausgewählter Feuchtgetreidevarianten nach 3 Tagen Lagerung im Glas (n=3)	127
Abbildung 52: Vergleich der Gehalte an Hefen und Schimmelpilzen in Erntegut von Feuchtgetreide und nach Lagerung im Folienschlauch ohne Konservierungszusatz	128
Abbildung 53: Aerobe Stabilität von gequetschtem Weizen zweier Feuchtestufen in Abhängigkeit des eingesetzten Konservierungszusatzes nach 90 Tagen Lagerung im Silierglas und anschließendem Luftstress bei 25°C (nach AUERBACH, 2007, unveröffentlicht)	136
Abbildung 54: Risikobereiche für Beschädigung und Verderb im Folienschlauch	141
Abbildung 55: Optimierungsansatz für verbesserten Schutz des Folienschlauches gegen Beschädigung und für Senkung des Verderbrisikos im Folienrandbereich.	142
Abbildung 56: Optimierungsansatz für verbesserten Schutz des Folienschlauches gegen Beschädigung und für Senkung des Verderbrisikos im Folienrandbereich (Rückansicht).	143

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anbaufläche und Erntemengen von Getreide in Deutschland 2006 (nach ZMP, 2007)	6
Tabelle 2:	Vor und Nachteile einer vorgezogenen Ernte am Beispiel von Gerste (nach KARREN, 1996)	7
Tabelle 3:	Notwendiger Wasserentzug, erforderliche Wärmemenge und Brennstoffkosten bei der Trocknung von Getreide mit unterschiedlichem Feuchtegehalt (mod. nach SCHÖN et al., 1998).	9
Tabelle 4:	Orientierungswerte für die Gärqualität von Grünfuttersilagen (nach DLG, 2006)	13
Tabelle 5:	Vergärbarkeitskenndaten verschiedener Futterpflanzen (JEROCH et al., 1999)	15
Tabelle 6:	Inhaltsstoffe verschiedener Getreidearten (nach Jeroch et al., 1993)	15
Tabelle 7:	Ansprüche und Stoffwechselaktivität der wichtigsten Mikroorganismen für die Silierung (Jeroch et al., 1999).	25
Tabelle 8:	Einfluss der Wasseraktivität auf das Wachstum von für die Silierung relevanten Mikroorganismen (in Hoedtke, 2007,nach Lindgren, 1991)	26
Tabelle 9:	Anforderungen an die Partikelgrößen von Körnermais in Abhängigkeit der Feuchte für den Einsatz in der Milchviehfütterung (nach KALAYCI, 2003)	37
Tabelle 10:	Einlagerungsmengen verschiedener Futtermittel in Folienschläuche in Abhängigkeit der Schlauchmaße (Jäkel, 2006)	39
Tabelle 11:	Anforderungen an die Folienqualität von Fahrsilofolien und Folienschläuchen (nach MEISE et al., 2006).	41
Tabelle 12:	Variantenübersicht	43
Tabelle 13:	Versuchsstruktur	44

Tabelle 14:	Erfassung von Mähdruschkennwerten in verschiedenen Getreidevarianten.	53
Tabelle 15:	Übersicht Bilanznetzversuche	54
Tabelle 16:	Übersicht Silierglasversuche (+=angefeuchtet).	62
Tabelle 17:	Rohnährstoffgehalte und Keimbesatz des Erntegutes verschiedener Feuchtgetreidevarianten.	71
Tabelle 18:	Rohnährstoffgehalte von Erntegut und Konservat verschiedener Feuchtgetreide-varianten im Folienschlauch in 2006 (n=1)	72
Tabelle 19:	pH-Werte und Gärproduktgehalte verschiedener Gerstevarianten nach 90 Tagen Lagerdauer im Silierglas.	75
Tabelle 20:	pH-Werte und Gärqualität verschiedener Weizenvarianten nach 50 Tagen Lagerung im Folienschlauch.	77
Tabelle 21:	Gärqualität von Feuchtgetreide im Folienschlauch mit und ohne chemischen Konservierungszusatz.	78
Tabelle 22:	Aerobe Stabilität verschiedener Gerste- und Weizenvarianten nach 49 Tagen Lagerung im Glas bei Luftstress am 28. Tag und 42.	102
Tabelle 23:	Aerobe Stabilität verschiedener Gerstevarianten in Abhängigkeit von Einlagerungsfeuchte und Lagerdauer im Silierglas	104
Tabelle 24:	Aerobe Stabilität verschiedener Weizenvarianten in Abhängigkeit von Einlagerungsfeuchte und Lagerdauer im Silierglas	105
Tabelle 25:	Übersicht der Anschnittflächen und Folienschlauchmaße (2006).	111
Tabelle 26:	Ergebnisübersicht der untersuchten Varianten	130
Tabelle 27:	Auftretende Probleme und Optimierungsvorschläge von Nutzern des Folienschlauchverfahrens zur Konservierung von Feuchtgetreide	138
Tabelle 28:	Vergleich von Trocknungskosten für Feuchtgetreide und Verfahrenskosten des Crimper-Bagger-Verfahrens (nach *ANONYMUS, 2007, **WEBER, 2007)	144

Abkürzungsverzeichnis

ASTA	Aerobe Stabilität
cv	Variationskoeffizient
EW	Eindringwiderstand
FM	Frischmasse
g	Gramm
GV	Gärverluste
h	Stunde
K	Kelvin
KBE	kolonienbildende Einheiten
kg	Kilogramm
l	Liter
lfd	laufend
lg	dekadischer Logarithmus
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
MD	Massedifferenz
MPa	Megapascal
n	Anzahl der Wiederholungen
N	Newton
pH	pH-Wert
s	Standardabweichung
Std.	Stunden
t	Tonne
TM	Trockenmasse
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
ø	arithmetisches Mittel

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

In Deutschland wird regelmäßig 50 bis 85 % des Getreides in nicht lagerfähigem Zustand mit Feuchten über 14 % gedroschen (ALB, 2001). Dabei wird in der Praxis überwiegend das Verfahren der Warmlufttrocknung bis zu einem lagerstabilen Feuchtegehalt des Getreides von weniger als 14 Prozent eingesetzt. Die stetig steigenden Primärenergiekosten stellen dieses Konservierungsverfahren jedoch bei höheren Feuchtegehalten des Erntematerials für Futtergetreide in Frage.

Eine Einlagerung von Futtergetreide mit einem Feuchtegehalt $>14\%$ birgt ein hohes Risiko für mikrobiellen Verderb und erfordert daher bei unverdichteter Lagerung einen hohen Aufwand an Konservierungszusätzen, um diesen Verderb zu verhindern. FÜLL et al. (1997) empfehlen daher eine gasdichte Lagerung als kostengünstige Alternative, wobei dies bisher hauptsächlich durch Einlagerung und Verdichtung im Fahrsilo geschieht.

Die Einlagerung von gequetschtem Futtergetreide in Folienschläuchen mit einer Schlauchpresse mit integrierter Walzenmühle (Crimper-Bagger) stellt eine technische Alternative zu konventionellen Verfahren dar, weil erntefrisches Getreide mit hohen Feuchtegehalten in einem Arbeitsgang gequetscht, mit Konservierungszusätzen behandelt, verdichtet und luftdicht eingelagert werden kann. Bisher liegen zu diesem neuen Konservierungsverfahren keine wissenschaftlichen Untersuchungen vor.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit soll auf Basis experimenteller Untersuchungen neue Erkenntnisse zum Verfahren der Feuchtgetreidekonservierung im Folienschlauch erzielen. Dazu sollen Einflüsse von Feuchte- und Aufbereitungsgrad verschiedener Feuchtgetreidevarianten auf den Verdichtungsprozess, die Gärqualität und die aerobe Stabilität im Folienschlauch untersucht werden. Weiterhin sollen die Wirksamkeit und die erforderliche Aufwandmenge eines ausgewählten Konservierungszusatzes zur Verbesserung der aeroben Stabilität bestimmt werden.

Die Experimente werden im großtechnischen Maßstab an Folienschläuchen durchgeführt, in die mit einer technischen Einheit aus Walzenquetsche und Schlauchpresse (Crimper-Bagger) Feuchtgetreide eingelagert wird.

Im Vordergrund stehen neben einer Untersuchung der anaeroben Lagerungsphase von zerkleinerter Gerste und zerkleinertem Weizen insbesondere die Einflüsse auf den Erhalt der Futterqualität während der Entnahmephase. Durch standardisierte Untersuchungsmethoden im kleintechnischen Maßstab sollen Praxisversuche unterstützt werden.



Abbildung 1: Verfahrenskette im Crimper-Bagger-Verfahren

Eine abschließende Gesamtbewertung des Verfahrens soll neben der Ableitung von Praxisempfehlungen auch Optimierungspotentiale aufzeigen.

2 Literaturanalyse

Das Interesse an der Einlagerung von Feuchtgetreide begann bereits in den frühen 60er Jahren aufgrund von steigenden Energiekosten und dem Aufkommen geeigneter Lagerungsverfahren (BUCHANAN-SMITH et al., 2003). Eine Vielzahl von Untersuchungen verschiedenster Zielsetzungen sind seither dokumentiert. Im Folgenden soll daher ein Überblick von Ergebnissen, die diese Thematik betreffen, gegeben werden, um das Verfahren der Feuchtgetreidekonservierung im Folienschlauch einordnen zu können.

2.1 Abreifebedingte Eigenschaften von Getreide

Die Frucht der Getreidearten wird als Karyopse (Nüsschen) bezeichnet. Den größten Massenanteil davon (80-84 % bei Weizen, Roggen, Triticale und Hafer bzw. etwa 75 % bei Mais) nimmt das Endosperm ein. Der Embryo hat einen Anteil von etwa 5 % bzw. 8-10 %. Die Fruchtschale (Perikarp) nimmt weniger als 4-9 % bzw. 15 % bei Mais ein. Diese besteht aus mehreren Schichten. Unter der Fruchtschale befindet sich die Samenschale (Testa), die mit der hyalinen Membran eine Zellschicht gegen das Eindringen von Wasser enthält.

Bei der Gerste sind die Spelzen mit der Fruchtschale verwachsen. Die Rücken- und Deckspelze ist kräftig ausgebildet, während die Bauchspelze in ihrer Struktur feiner angelegt ist. Die Spelzen bedingen den für Gerstenkörner höheren Zelluloseanteil (GEISLER, 1983).

Die Zusammensetzung des Endosperms bestimmt mit seinen Inhaltsstoffen wesentlich die des Getreidekorns. Dessen äußere Zellen enthalten mehr Eiweiß als die inneren. Beim Weizen ist hier das ‚Kleber‘-Eiweiß zu finden. Als Reservestoffe finden sich im Endosperm Stärke (78-84 %) und Eiweiß (8-15 %).

Bereits etwa 2-3 Wochen nach der Befruchtung beginnt die Volumenausbildung der Endospermzellen und die Einlagerung von Stärke und Protein. Die Trockenmassebildung in der Karyopse steht während dieser Phase in einer nahezu linearen Beziehung zur Zeit. Das maximale Volumen der Karyopse ist in der Milchreife zeitlich deutlich vor dem maximalen Trockengewicht zu ermitteln. Die Milchreife wird etwa in der sechsten Woche nach der Blüte erreicht (Abbildung 2). Der Embryo ist bereits voll entwickelt und der Wassergehalt beträgt etwa 60 %. Die Karyopse ist noch grün. Ab diesem Zeitpunkt nimmt der Wassergehalt deutlich ab, während das Trockengewicht der Karyopse nahezu konstant

bleibt (GEISLER, 1983). Mit der Milchreife wird somit auch der maximale Stärkegehalt von etwa 70-75 % erreicht, der bis zur Ernte, die meist etwa 3-4 Wochen später erfolgt, keinen nennenswerten Veränderungen unterliegt.

Eine Inokkulierung der Ähren mit *Fusarium* zum Zeitpunkt der Blüte hat auf die Inhaltstoffe nur geringe Einflüsse (MATTHÄUS et al., 2004, Abbildung 2). Auf die Milchreife folgt die Gelb- oder Teigreife, in der sich der Inhalt verfestigt, aber noch eine plastische Masse darstellt. In diesem Reifestadium wird die physiologische Reife (Keimfähigkeit) erreicht. Der Wassergehalt liegt zu Beginn bei 40 % und erreicht während dieser Phase Werte um 25 %. In der anschließenden Vollreife geht dieser auf etwa 16 % zurück, bei dem die Karyopse hart, aber noch von Hand brechbar ist. In der Totreife sinkt der Wassergehalt noch weiter und das Korn kann manuell kaum noch gebrochen werden (GEISLER, 1983).

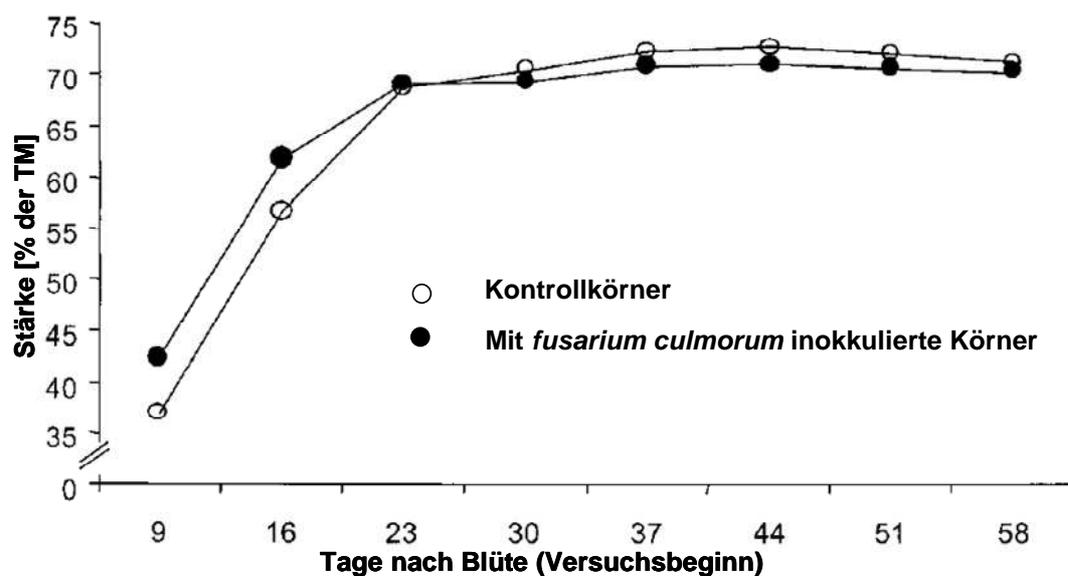


Abbildung 2: Verlauf der Stärkegehalte in Weizen im Zeitraum von Blüte bis Ernte (nach MATTHÄUS et al., 2004)

AL-MAHASNEH UND RABABAH (2007) beschreiben am Beispiel von Hartweizen die physikalischen Eigenschaften von Getreidekörnern bei Feuchtegehalten zwischen 41,5 und 9,3 % und fanden einen positiv linearen Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und Korngröße sowie Tausendkorngewicht, wobei die Kornbreite und -dicke mit etwa 15 % etwa doppelt so stark abnimmt wie die Kornlänge mit etwa 7 %. Das Kornvolumen nimmt in diesem Feuchtebereich um 44 %, die Kornoberfläche um 29 % ab, wobei ab einer

Feuchte von etwa 30 % eine deutlich geringere Abnahme zu erkennen ist als im darüberliegenden Feuchtebereich (Abbildung 3).

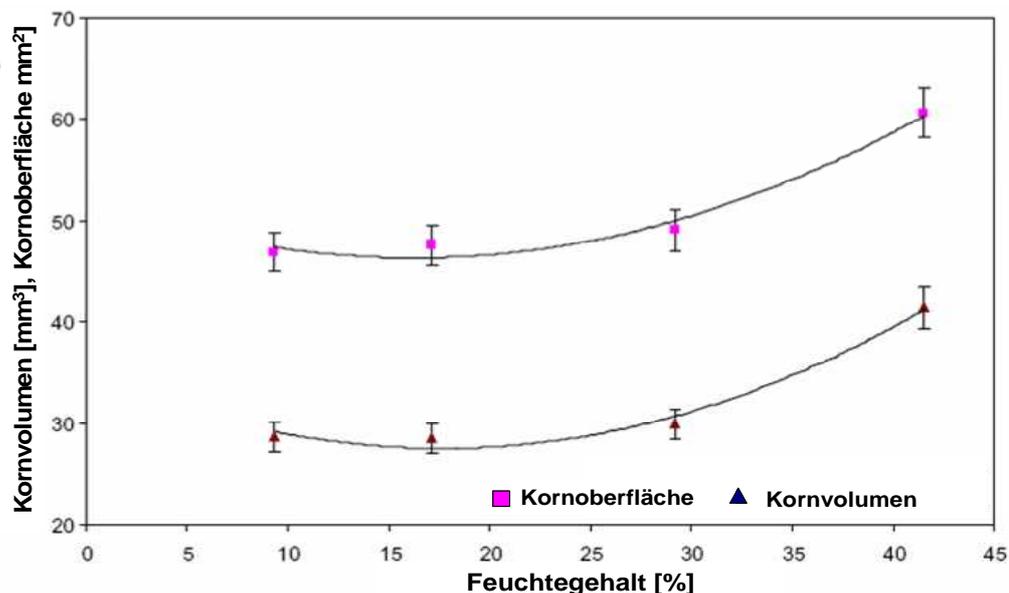


Abbildung 3: Zusammenhang von Feuchtegehalt und Kornvolumen bzw. Kornoberfläche von Hartweizen (mod. nach AL-MAHASNEH UND RABABAH, 2007)

Für Feuchtegehalt und Einzelkorn- sowie Lagerungsdichte wird ein negativ linearer Zusammenhang beschrieben, wobei eine Abnahme des Feuchtegehaltes von 41,5 auf 9,3 % zu einem Anstieg der Lagerungsdichte um 5 % auf 710 kg/m^3 führt (Abbildung 4).

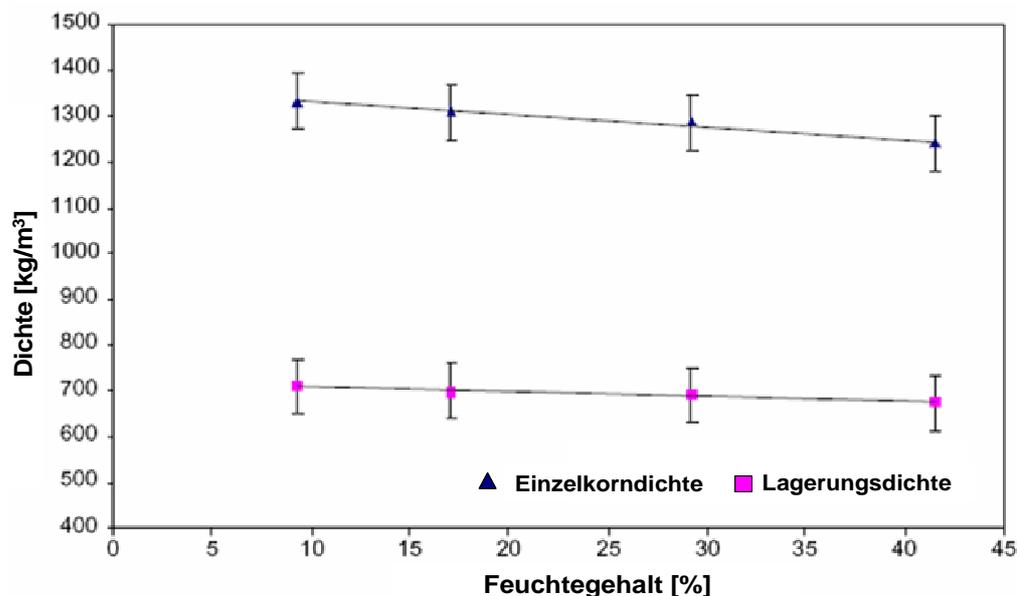


Abbildung 4: Zusammenhang von Feuchtegehalt und Einzelkorndichte bzw. Lagerungsdichte von Hartweizen (mod. nach Al-Mahasneh und Rababah, 2007).

2.2 Hintergründe zur Ernte von Feuchtgetreide

In Deutschland wurden laut ZMP (2007) in 2006 auf etwa 6,6 Mio Hektar Getreide und Körnermais angebaut. Der Anteil der Futter- und Industriegetreidefläche betrug dabei inklusive der Anbaufläche für Körnermais etwa 45 %. Die Erntemenge nahm mit 18,3 Millionen Tonnen etwa 40 % der gesamten Getreideproduktion ein (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anbaufläche und Erntemengen von Getreide in Deutschland 2006 (nach ZMP, 2007)

Erntejahr 2006	Anbaufläche (1000 ha)	Erntemenge (1000 t)
Brotgetreide	3.663	25.119
Futter- und Industriegetreide	2.638	15.136
Körnermais inklusive CCM	401	3.220

Während die Ernte von Körnermais grundsätzlich weitergehende Konservierungsmaßnahmen erfordert, werden diese für Getreidearten wie Gerste und Weizen in Deutschland in der Regel erst bei Feuchtegehalten notwendig, die aufgrund ungünstiger Witterungsbedingungen entstehen. Nach FEIFFER et al. (2004) sind von zehn Erntejahren vier als ungünstig bis sehr ungünstig einzustufen. Im Mittel der Jahre wurden für Deutschland etwa 200 Druschstunden ermittelt, in denen sich mit einem Mähdröschler der mittleren Leistungsklasse (7 t/h) zwischen 750 und 1300 t qualitätsgerecht, d.h. bei Feuchtegehalten unter 20 % ernten lassen. Aufgrund ungünstiger Witterung kann die Erntespanne jedoch deutlich verkürzt (<25 Tage) und die Ernteleistung je Maschine um bis zu 75 % auf etwa 200-360 t reduziert sein. HOFFMANN UND FÜRLI (2000) beschreiben die betriebswirtschaftliche Vorzüglichkeit einer höchstmöglichen Mähdröscherauslastung gegenüber den Konservierungskosten auch bei Feuchtegehalten über 20 %.

In zahlreichen Ländern ist eine Ernte bei Feuchtegehalten über 20 % die Regel. So berichten PETERSSON et al. (1999), dass in Schweden Getreide üblicherweise mit Feuchtegehalten von 20-22 % geerntet wird.

Für die Verwendung als Futtergetreide fordern BUCHANAN-SMITH et al. (2003) einen Wassergehalt zwischen 25 und 30 %, weil darunter liegende Werte zu keiner ausreichenden Silierung führen und darüberliegende den Futterwert herabsetzen können.

Die Ernte von Feuchtgetreide ist jedoch nicht nur unter klimatisch ungünstigen Bedingungen von Bedeutung. AL-MAHASNEH UND RABABAH (2007) beschreiben das hohe Interesse an einer Rationalisierung der Ernte von Grünweizen, der vorwiegend im Nahen Osten bei Feuchtegehalten über 40 % geerntet und anschließend für Nahrungszwecke geräuchert wird.

GENTA et al. (2006) untersuchten technische Parameter bei der Ernte von Weizen mit Feuchtegehalten von 18 bis 47 % in Japan, sowie die Qualitätseigenschaften des Erntegutes. Ein Mähdrusch von Weizen bis 45 % Feuchte ist demnach ohne technische Probleme auch mit konventionellen Mähreschern zu realisieren. In den beschriebenen Untersuchungen waren die Verluste bei allen Feuchtegehalten geringer als 3 %. Es wird jedoch eine Ernte bei Körnerfeuchten unter 40 % empfohlen, da der Anteil beschädigter Körner von 1 % auf etwa 5 % bei einer Feuchte über 45 % anstieg. Negative Einflüsse auf die Mehlqualität wurden nach Trocknung und Mahlen der Körner nicht festgestellt. HARA et al. (2002) berichten, dass eine vorgezogene Ernte von Weizen bei 35 % Feuchte die Gefahr von Auswüchsen vermindert und eine anschließende Trocknung keinerlei Qualitätseinbußen in Bezug auf eine Verwendung als Brotgetreide gegenüber der Ernte bei niedrigeren Feuchtegehalten verursacht.

Auch für Gerste erfolgt in einigen Regionen eine vorgezogene Ernte. Nach KARREN (1996) ist eine Ernte zwischen 25 und 30 % Feuchte ideal und wird beispielsweise in Alberta (Kanada) bei ungünstigen Witterungsbedingungen und nicht voll abreifenden Spätsaaten empfohlen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über Vor- und Nachteile am Beispiel von Gerste.

Tabelle 2: Vor und Nachteile einer vorgezogenen Ernte am Beispiel von Gerste (nach KARREN, 1996)

Vorgezogene Ernte von Gerste	
Vorteile	Nachteile
Ernte bis zu 14 Tage früher und unter ungünstigen Abreifebedingungen möglich	Verminderte Ernteleistung
Bessere Maschinenauslastung/-verfügbarkeit	Notwendigkeit spezieller Lagerungssysteme für Feuchtgetreide
Verminderung von Ernteverlusten (weniger Bruchkorn)	Erhöhtes Verderb- und Verlustrisiko
Erhöhte Trockenmasseerträge	Vermindertes Vermarktungspotential
Vermeidung von Staub im Futter	

Neben einer vorgezogenen Feldräumung, die auch phytosanitäre Vorteile ergeben kann, wird eine bessere Maschinenauslastung bzw. Verfügbarkeit von Erntemaschinen als Vorteil genannt. Weiterhin werden durch eine Ernte vor Abknicken der Ähren ein höherer Schnitt und 7-10 % höhere Trockenmasseerträge genannt, da weniger Schmach- und Bruchkorn bei der Ernte verloren gehen. Die Ernteleistung ist bei höherer Feuchte jedoch reduziert. Für die Lagerung von Feuchtgetreide sind spezielle Systeme notwendig, wenn auf eine Trocknung verzichtet werden soll. Diese wurden bereits in den frühen 60er Jahren aufgrund von steigenden Energiekosten entwickelt, verursachen jedoch zum Teil hohe Investitionskosten und Lagerverluste (BUCHANAN-SMITH et al., 2003). Das Getreide kann dann ausschließlich als Futtergetreide verwendet werden, da für Marktfrüchte eine Trocknung auf lagerstabile Feuchtegehalte zwingend notwendig ist.

Eine absichtliche Ernte von Futtergetreide bei hohen Feuchtegehalten tritt in Deutschland bisher selten auf, da das Getreide in der Regel bei ausreichend niedrigen Feuchtegehalten von deutlich unter 20 % geerntet werden kann. Die Gründe hierfür liegen primär in der Vermeidung erhöhter Trocknungskosten, aber auch in der Skepsis an der technischen Umsetzbarkeit der Ernte bei erhöhten Feuchtegehalten.

2.3 Trocknung von Getreide

Körnerfrüchte sind frisch geerntet ohne Konservierungsmaßnahmen nur begrenzt lagerfähig. Für Getreide und Körnermais liegt der maximale Feuchtegehalt unter 15 % (SCHÖN et al., 1998, JEROCH et al., 1993). Obwohl für die Verwertung des Getreides als Futtermittel auch alternative Konservierungsmaßnahmen verfügbar sind, wird auch Futtergetreide und -mais zurzeit noch vielfach getrocknet. Die Konservierung des Erntegutes wird dabei ausschließlich durch Wasserentzug erreicht, was einen hohen Energieeinsatz für die Verdampfung des im Erntegut gebundenen Wassers notwendig macht. Bei der Lagerung von Körnerfrüchten kommt es zur Einstellung eines Feuchtegleichgewichtes zwischen den Körnern und der Umgebungsluft im Stapel. Je höher die Kornfeuchte ist, desto höher ist auch die relative Feuchte der umgebenden Luft. Um einen Verderb sicher ausschließen zu können, muss das Erntegut eine Gleichgewichtsfeuchte unter 65 % bei 20°C erreichen. Dies ist bei Weizen und Mais bei ca. 14 % Kornfeuchte der Fall. Um dem Erntegut Wasser zu entziehen, ist Luft mit einer relativen Luftfeuchte unterhalb der Gleichgewichtsfeuchte für die Belüftung notwendig. Je größer die Differenz zwischen der Gleichgewichtsfeuchte und der relativen Luftfeuchte der Belüftungsluft ist, desto größer ist die Trocknungsfähigkeit pro Lufteinheit. Eine

Erwärmung der Trocknungsluft senkt deren relative Feuchte und erhöht somit ihre Trocknungsfähigkeit. Die maximal mögliche Wasseraufnahme der Luft bei Erreichen einer gleichen relativen Luftfeuchte steigt mit zunehmender Temperatur. Die Erwärmung der für die Trocknung eingesetzten Luft erfordert eine Energiezufuhr zur Trocknungsluft, die in den meisten Anlagen durch das Verbrennen eines fossilen Energieträgers bereitgestellt wird (SCHÖN et al., 1998). Nach PICK et al. (1989) kann der Anteil des Kraftstoffbedarfs für die Trocknung bis zu 60 % des im Anbau von Getreide benötigten gesamten Kraftstoffbedarfs betragen.

Der spezifische Wärmeaufwand kennzeichnet die Wärmemenge, die nötig ist, um dem Trockengut ein Kilogramm Wasser zu entziehen (3.000 bis 6.000 kJ/kg Wasser). Dieser sinkt je höher die Kornfeuchte und die Temperatur der Belüftungsluft ist. Für Futtergetreide ist letztere jedoch zur Vermeidung von Qualitätseinbußen beim Satzrockner auf maximal 65°C und bei Verwendung eines Durchlaufrockners auf 80°C begrenzt (SCHÖN et al., 1998). Die erforderliche Wärmemenge, der Wasserentzug sowie die Brennstoffkosten für die Trocknung von Getreide verschiedener Anfangsfeuchten sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Notwendiger Wasserentzug, erforderliche Wärmemenge und Brennstoffkosten bei der Trocknung von Getreide mit unterschiedlichem Feuchtegehalt (mod. nach SCHÖN et al., 1998).

Anfangsfeuchtegehalt [%]	Notwendiger Wasserentzug kg/dt Trockengut bei 14 % Endfeuchte	Notwendige Wärmemenge (5.000 kJ/kg Wasserverdampfung) kJ/dt Trockengut	Brennstoffkosten in € pro dt Trockengut (Heizölpreis von 0,65 €/kg)
18	4,9	24.500	0,39
20	7,5	37.500	0,61
25	14,6	73.000	1,19
30	22,8	114.000	1,84
35	32,3	162.000	2,62
40	43,3	217.000	3,49
45	56,2	281.000	4,55

Da die Bereitstellung der Wärmeenergie fast ausschließlich über den Einsatz von fossilen Brennstoffen erfolgt, sind die Beschaffungskosten für Trocknungsenergie stark von diesen fortschreitend ansteigenden Kosten abhängig. Zusätzlich sind die Investitionskosten für

eine Trocknungsanlage zu berücksichtigen, die in Abhängigkeit von deren Bauart und Leistungsfähigkeit stark variieren. BÖCKELMANN et al. (2007) fanden heraus, dass der theoretische Trocknungsenergiebedarf der reinen Wasserverdunstung im praktischen Betrieb um bis zu zweifach erhöht sein kann. Im Wesentlichen sind dafür die Bindungsform der Feuchtigkeit und ihre korninnere Verteilung verantwortlich. Aus der Betrachtung verschiedener Trocknungsanlagen wird geschlossen, dass zwischen leistungsmaximierter und energieeinsatzminimierter Trocknung ein Zielkonflikt besteht, der eine Ermittlung von Kenngrößen zur Anlagenoptimierung zwingend erforderlich macht, um eine wirtschaftliche Trocknung zu gewährleisten.

Die Kosten der Lohntrocknung werden zurzeit mit etwa 1,00 €/dt bei 16 % Feuchte, 2,50 €/dt bei 20 % Feuchte für Getreide und mit 3,00 €/dt – 4,20 €/dt für Körnermais bei 33 % Feuchte angegeben (LANDWIRTSCHAFTLICHES WOCHENBLATT 24/2006). Die Wirtschaftlichkeit dieses Konservierungsverfahrens ist somit insbesondere bei hohen Energiekosten und gleichzeitig niedrigen Erzeugerpreisen in Frage gestellt.

Als größte Vorteile der Korntrocknung gegenüber anderen Konservierungsverfahren sind die sichere Konservierung, die anschließend problemlose Handhabung des Trockengutes, die Option verschiedener Vermarktungsmöglichkeiten sowie dessen uneingeschränkte Transportfähigkeit anzusehen.

2.4 Konservierungsverfahren ohne Wasserentzug

Für die Verwertung von Getreide als Futtermittel sind neben der Trocknung eine Reihe alternativer Konservierungsmaßnahmen verfügbar und vielfach beschrieben (RIEMANN 1965, WEISSBACH UND BUDZIER, 1968, LOTZ UND VON OY, 1982, OH, 1985, ZIMMER, 1985, RATSCHOW, 1986, JUNGBLUTH, 1989, SCHNEIDER, 1994, HOFFMANN, 1998, BUCHANAN-SMITH et al., 2003, MATTHIAS UND PRIES, 2006).

Bei der Feuchtgetreidekonservierung wird auf einen energieaufwendigen Wasserentzug verzichtet. Dafür können verschiedene Verfahren mit biochemischem Wirkprinzip genutzt werden. Ihren Ursprung haben die meisten Verfahren in der Konservierung ganzer Maiskörner in gasdichten Hochsilos. Für Getreide ergaben sich daraus verschiedene Verfahren unter Wasserzusatz und auch eine Einlagerung im Fahrsilo (ZIMMER, 1985, JUNGBLUTH, 1989, BUCHANAN-SMITH et al., 2003).

Konservierungsverfahren mit biochemischem Wirkprinzip beruhen auf der Stoffwechselaktivität des Getreides und anhaftender Mikroorganismen, die bei

Getreidefeuchten bis ca. 25 % unter Sauerstoffanwesenheit in einem exothermen Prozess Zucker und Stärke zu CO_2 und Wasser, sowie geringen Mengen Alkohol, Milchsäure und Essigsäure umwandeln. Unter Luftabschluss bildet sich daher eine Kohlendioxidatmosphäre, die konservierend wirkt, da weitere Reaktionen nicht oder nur sehr begrenzt ablaufen können. Die Milchsäurekonzentration erreicht selten ein Prozent und ist am Konserviererfolg nicht beteiligt.

Der konservierende Effekt einer Fermentation mit Milchsäurebildung kann erst ab Feuchtegehalten von mehr als 30 % sichergestellt werden. Dann können Milchsäurekonzentrationen von 6-7 % erreicht werden, was zu einer pH-Absenkung auf Werte unter 4 führt. Die Anwendung dieses Wirkprinzips findet bisher vorwiegend bei der Lagerung von Getreide unter Wasserzusatz statt.

Bei Feuchtegehalten $< 30\%$ tragen Kohlendioxidatmosphäre und Säurebildung in unterschiedlichem Umfang zur Konservierung bei. Als kritischer Bereich gelten dabei Feuchten zwischen 20 und 30 %, bei denen die Bedingungen weder für Silierung noch für eine CO_2 -Bildung optimal sind (Abbildung 5, JUNGBLUTH et al., 2005, JUNGBLUTH, 1989, ZIMMER, 1985).

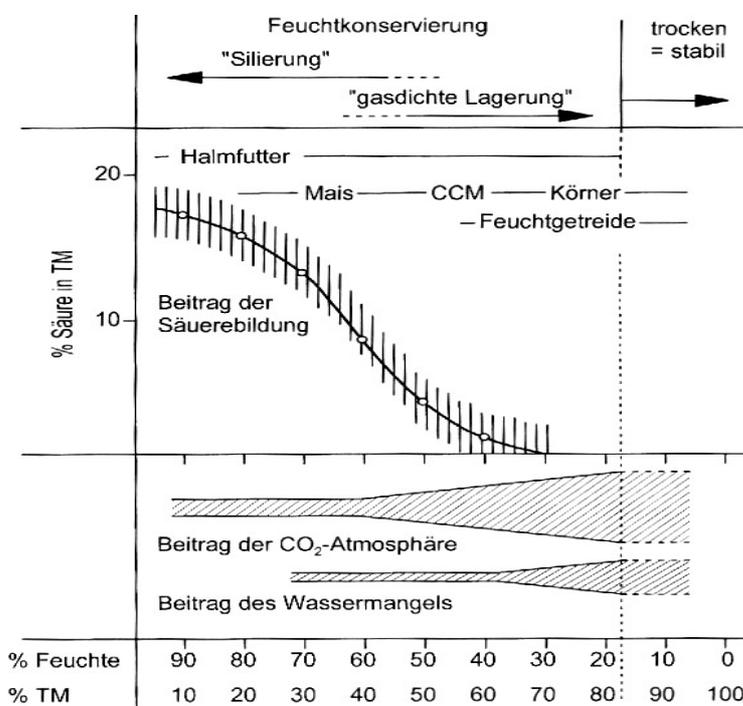


Abbildung 5: Beitrag von Säurebildung, CO_2 -Atmosphäre und Wassermangel zur Konservierung (Zimmer, 1985)

2.4.1 Silierung

Nach JEROCH et al. (1998) und PAHLOW (2006) soll die Bereitung von Silage den Nährwert des konservierten Futters weitestgehend erhalten. Dabei werden unter Luftabschluss pflanzliche Kohlenhydrate in organische Säuren umgewandelt. Der pH-Wert sinkt dadurch in einen Bereich, in dem konkurrierende Mikroorganismen und die meisten Enzyme inaktiviert werden. Voraussetzungen für diesen Prozess sind:

- ausreichender Feuchtigkeitsgehalt;
- genügend vergärbare Zucker (hoher Z/PK-Quotient);
- sauerstofffreie Umgebung;
- siliertaugliche Milchsäurebakterien (MSB).

In der ersten Phase der Silierung erfolgt ein aerober Nährstoffabbau von Zucker zu CO₂ durch aerobe Mikroorganismen und Enzyme, der zu einer Erwärmung des Silos führt. In Folge des abnehmenden Sauerstoffgehaltes kommt es zum Absterben der obligat aeroben Mikroorganismen und einer raschen Vermehrung von fakultativ anaeroben coliformen Keimen. Die Veratmung des Restsauerstoffs dauert im geschlossenen Silo nur wenige Stunden. Die coliformen Keime erzeugen vorwiegend Essigsäure und CO₂ als Stoffwechselprodukte. Im weiteren Verlauf werden diese von den wesentlich säuretolanteren Milchsäurebakterien überwachsen, die unter Sauerstoffausschluss vergärbare Kohlenhydrate fermentieren. Homofermentative Milchsäurebakterien fermentieren unter geringen Verlusten zu Milchsäure, während heterofermentative Milchsäurebakterien unter höheren Verlusten Glukose auch zu Essigsäure und Ethanol umwandeln (MCDONALD et al., 1991, PAHLOW 2006).

Der zunehmende Gehalt an organischen Säuren führt zu einer raschen Ansäuerung auf pH-Werte von 4 bis 5, was zur Inaktivierung der meisten Mikroorganismen und der pflanzlichen Enzyme führt. Es wird ein überwiegender Anteil Milchsäure gewünscht, da sie neben der pH-Wertabsenkung weitere positive Eigenschaften wie Geruchlosigkeit, gute Verträglichkeit für die Tiere sowie eine Hemmung auf buttersäurebildende Clostridien aufweist (PAHLOW 2006).

Die mit der Milchsäuregärung einhergehende Essigsäuregärung wird im begrenzten Umfang durchaus gewünscht, da die Essigsäure erheblich zur aeroben Stabilität nach der Siloöffnung beiträgt. Sie verursacht jedoch einen erheblich höheren Trockenmasseverlust

und Eiweißabbau sowie einen schlechteren Geruch und Geschmack der Silage. Es wird ein Verhältnis von Milch- zu Essigsäure von 4:1 angestrebt (WEISSBACH UND BUDZIER, 1968, DEDERER, 1988).

In Folge der pH-Absenkung und des Verbrauchs der Zucker nimmt die Zahl und die Aktivität der Milchsäurebakterien erheblich ab. Die Population der Milchsäurebakterien verringert sich bis auf 0,1% der Maximalpopulation. Die äußerst säuretoleranten Hefen vergären den anschließend verbliebenen Restzucker langsam zu Alkohol. Ihre Aktivität in der anaeroben Phase ist insgesamt stark vom Ausgangsbesatz abhängig. Die Absenkung des pH-Wertes wird als Parameter für die Bewertung des Siliererfolges und der anaeroben Stabilität der Silage verwendet (PAHLOW, 2006). Diese muss jedoch immer in Kombination mit dem Maß für frei verfügbares Wasser (Wasseraktivität) bewertet werden, da die erreichte Azidität umso höher sein muss, je höher die Wasseraktivität der Silage ist, um diese stabil zu halten (WEISSBACH UND BUDZIER, 1968, HOEDTKE, 2007). Bei einer gelungenen Silierung kann die Silage unter Luftabschluss für einen langen Zeitraum mit nur geringen Verlusten gelagert werden.

Nach Angaben der DLG (2006) zeigt Tabelle 4 wichtige Orientierungswerte für die Beurteilung der Gärqualität von Grünfuttersilagen.

Tabelle 4: Orientierungswerte für die Gärqualität von Grünfuttersilagen (nach DLG, 2006)

Zielgröße	Einheit	Orientierungswert
pH-Wert (bei 20-45 % TM)		4,0-5,0
Essig- und Propionsäuregehalt	g/kg TM	20-30
Buttersäuregehalt	g/kg TM	< 3
Ammoniak-N-Anteil	% des Gesamt-N	< 8
Aerobe Stabilität	Tage	> 3

Vergärbarkeit von Futtermitteln

GROSS UND RIEBE (1974) gehen für die Silierung von Grünfutter davon aus, dass prinzipiell jedes Substrat für eine Silierung geeignet ist, vorausgesetzt ein ausreichend hoher Trockenmassegehalt, genügend Gärsubstrat und ein epiphytischer Besatz an Milchsäurebakterien ist vorhanden. Nach JEROCH et al. (1998) und PAHLOW (2006) hängt

die Vergärbarkeit vorwiegend von der chemischen Zusammensetzung der Futtermittel ab. Diese ist hauptsächlich durch ihren Zuckergehalt und die Pufferkapazität (PK) definiert. Unter Zuckergehalt werden in diesem Zusammenhang die von Milchsäurebakterien nutzbaren Kohlenhydrate verstanden, während die Pufferkapazität vor allem vom Rohprotein- und alkalischen Aschegehalt des Futtermittels abhängt. Sie wird durch die erforderliche Milchsäuremenge in g/kg TM definiert, die zur Ansäuerung des Siliergutes auf pH 4,0 notwendig ist. Deshalb wird der Quotient aus Zuckergehalt und Pufferkapazität (Z/PK Quotient) als Maß für die mögliche Ansäuerung einer Silage betrachtet.

Des Weiteren ist der Trockenmassegehalt des Siliergutes bedeutsam für dessen Vergärbarkeit. Dieser wirkt sich zum einen auf die Zellsaftkonzentration und zum anderen auf die Wasseraktivität in der Silage aus. Höhere TM-Gehalte verringern die Wasseraktivität, woraus eine geringere Stoffwechselaktivität der Mikroben und aufgrund dessen eine verringerte Milchsäurebildung resultieren. Die Aktivität der hauptsächlich für Fehlgärungen verantwortlichen Clostridien sinkt jedoch ebenfalls bei verringerter Wasseraktivität, weshalb der zu erreichende Ziel-pH-Wert sich mit steigenden TM-Gehalten in Richtung des Neutralpunktes verschiebt. Das Verhältnis von vergärbaren Zuckern zur Pufferkapazität sowie die Wasseraktivität des Siliergutes wirken sich zusammen auf den möglichen Grad der Ansäuerung aus. In Tabelle 3 sind die für die Vergärbarkeit wesentlichen Kenngrößen verschiedener Futtermittel dargestellt (JEROCH et al., 1998, PAHLOW, 2006).

Tabelle 5: Vergärbarkeitskenndaten verschiedener Futterpflanzen (JEROCH et al., 1999)

Futterpflanze	TM [g/kg] je kg Originalsubstanz	Rohprotein [g/kg TM]	Zucker (Z) [g/kg TM]	Pufferkapazität (PK) g Milchsäure/kg TM	Z/PK-Quotient
Mais	280 (200-350)	75	230	35	6,6 (4,7-8,8)
Zuckerrübenblatt	145 (120-180)	135	285	52	5,5 (1,9-10,8)
Markstammkohl	155 (140-190)	150	290	66	4,4 (3,5-5,0)
Grünhafer	220 (145-265)	95	130	40	3,3 (2,7-4,7)
Felderbse	155 (130-165)	180	155	49	3,2 (2,4-3,6)
Ackerbohne	150 (110-165)	175	145	49	3,0 (1,6-3,2)
Süßlupine	150 (120-160)	180	115	46	2,5 (1,8-3,0)
Gräser	200 (140-270)	140	115	47	2,4 (0,8-4,6)
Grünroggen	160 (155-210)	155	135	56	2,4 (1,6-3,3)
Rotklee	200 (165-250)	165	115	69	1,7 (0,9-1,8)
Luzerne	200 (150-220)	190	65	74	0,9 (0,5-0,9)

Silierung von Feuchtgetreide

Nach JEROCH et al. (1993) bietet Getreide aufgrund seiner Zusammensetzung gute Voraussetzung für eine Silierung. Trotz geringer Gehalte an vergärbaren Zuckern begünstigen die ebenfalls geringen Gehalte an puffernder Inhaltstoffen wie Rohprotein und Rohasche eine Fermentation (Tabelle 6).

Tabelle 6: Inhaltsstoffe verschiedener Getreidearten (nach Jeroch et al., 1993)

Rohnährstofffraktion	[g/kg]	Getreideart	Stärke [g/kg]	Zucker [g/kg]
Rohprotein	90-175	Sommergerste	602	25
Rohfett	15-55	Wintergerste	600	26
Rohfaser	25-120	Roggen	646	63
Rohasche	15-60	Triticale	667	40
N-freie Extraktstoffe	670-820	Winterweizen	675	32
Stärke	445-735	Maiskorn	695	19
Zucker	10-65			

Nach JUNGBLUTH (1989) hat die Gutfeuchte einen deutlich höheren Einfluss auf die biochemischen Prozesse nach Luftabschluss als die Getreideart. Für die Getreidearten Weizen, Gerste, Roggen und Hafer wurde mittels verschiedener Untersuchungen im klein- und großtechnischen Maßstab bei einem Anstieg der Feuchte von etwa 17 auf 29 % eine überproportionale Steigerung der CO₂-Produktion verzeichnet. Bei einem Feuchtegehalt von 29 % ist diese bereits nach 3 Wochen abgeschlossen, bei 22 % kommt sie nach 7-8 Wochen und bei 17 % auch nach 8 Wochen nicht zum Abschluss. Weiterhin wird unter Berufung auf verschiedene Autoren beschrieben, dass in einem Feuchtebereich zwischen 17 und 37 % nur in wenigen Fällen eine Absenkung des pH unter 5 zu ermitteln war. Aufgrund der Dauer bis zum Erreichen dieser Werte wird von keinem stabilisierenden Effekt der Ansäuerung auf das Konservat ausgegangen. Die Untersuchungen wurden jedoch größtenteils an ganzen Getreidekörnern gemacht und die Resultate auf geschrotetes Getreide übertragen.

BUCHANAN-SMITH et al. (2003) gehen dagegen von einem stabilisierenden Effekt einer Silierung aus und fordern daher für die Ernte von Feuchtgetreide einen Wassergehalt zwischen 25 und 30 %. Darunter liegende Werte führen zu keiner ausreichenden Silierung, darüberliegende können den Futterwert herabsetzen. Weiterhin wird dort ein linear positives Verhältnis von Feuchtegehalt und Milchsäurebildung im Bereich von 22 bis 36 % Feuchte aufgezeigt und der Fermentationsverlauf durch eine schnelle Milchsäurebildung mit, im Vergleich zu anderen Silagen, geringen Gehalten von etwa 2 % in der TM beschrieben. Die Essigsäuregehalte betragen etwa die Hälfte, so dass tendenziell von einer heterofermentativen Gärung auszugehen ist. OH (1985) berichtet von einer zunehmenden heterofermentativen Gärung in grob vermahlener Gerste bei Feuchtegehalten ab 60 % und führt dies auf eine langsamere Zuckernachlieferung bei grober Vermahlung zurück. Das gewünschte Milchsäure-Essigsäureverhältnis von 4:1 wird nur selten und erst bei Feuchten über 40 % erreicht (WEISSBACH UND BUDZIER, 1968, DEDERER, 1988, JUNGBLUTH, 1989). Andere Gärssäuren können in der Regel nicht nachgewiesen werden. Aufgrund von Hefen sind Ethanolgehalte von etwa 0,5 bis 3,5 % der Trockenmasse zu erwarten (BUCHANAN-SMITH et al., 2003, McDonald et al., 1991).

Bereits WEISSBACH UND BUDZIER (1968) sowie JUNGBLUTH (1989) stellten fest, dass auch die Getreideart einen Einfluss auf die Gärssäurenbildung hat. Die Gärssäuregehalte von Nacktgetreidearten wie Weizen liegen demnach höher als die der bedecktsamigen Gerste. So führte die Einlagerung von Gerstekörnern mit verschiedenen Feuchten von 24, 31 und

37 % zu einem etwa gleich geringen Anstieg der Milch- und Essigsäuregehalte von 0,2 auf 0,3 % in der TM. Bei Roggenkörnern etwa gleicher Feuchtestufen nahm der Milchsäuregehalt von 0,3 % auf 0,9 %, der Essigsäuregehalt von 0,1 % auf 0,3 % zu. Die Unterschiede werden auf die etwa dreifach höheren Zuckergehalte im Roggen zurückgeführt.

LOTZ UND VON OY (1982) berichten, dass bei einer Anfeuchtung vermahlener Gerste und Weizen auf etwa 56 % bereits nach etwa einer Woche die Bildung von Milch- und Essigsäure abgeschlossen ist und pH-Werte unter 4 erreicht werden. Andere Autoren beschreiben eine zunächst tendenzielle Zunahme der Gär säuregehalte über die Lagerdauer von 60 Tagen sowie einen teilweisen späteren Rückgang der Konzentrationen, der durch mögliche Ab- und Umbauvorgänge erklärt wird, da Milchsäuregehalte teilweise zugunsten von Essigsäure abnahmen. JUNGBLUTH (1989) geht daher davon aus, dass bei niedrigeren Feuchtegehalten eine Fermentation nach 40, spätestens jedoch nach 60 Tagen weitestgehend abgeschlossen ist. Bis zur Lagerdauer von 200 Tagen konnte er kaum Veränderungen feststellen. Weiterhin wird dort beschrieben, dass der Feuchtegehalt einen deutlich höheren Einfluss auf eine pH-Absenkung hat als der Vermahlungsgrad, wobei dies erst ab Feuchten über 30 % deutlich wurde und zum Teil widersprüchliche Ergebnisse vorliegen.

Lagerungsverluste bei der Silierung

Gärverluste (GV) bei der Silierung von Futtermitteln sind aufgrund der biochemischen Umsetzungsprozesse generell nicht zu vermeiden. Die durch eine Silierung gebildeten Gärgase führen daher zu Trockenmassverlusten. Weitere Verluste entstehen während der Auslagerung durch aerobe Umsetzungen. Die Wahl der Siliertechnik und vor allem deren Anwendung hat jedoch entscheidenden Einfluss auf die Höhe des Silierverlustes, für dessen Bestimmung verschiedene Methoden Anwendung finden. Für den Konservierungsverlauf von Silage und damit auch für die Größe des Silierverlustes sind Feuchtegehalt, Vermahlungsgrad, Silobefülldauer, Verdichtung und Luftabschluss die wichtigsten Einflussgrößen (HONIG, 1987, DEDERER, 1988, WEIBACH, 1998, PAHLOW, 2006).

Die einfachste Methode für die Bestimmung des Gärverlustes ist der Vergleich der in einem Versuchssilo eingebrachten mit der später wieder ausgelagerten TM. Dieses Prinzip wird bei der Bilanznetzmethod e angewendet. Bei dieser werden mit Siliergut gefüllte

Netzbeutel im Siliergutstapel vergraben und bei der Entleerung des Silos wieder entnommen. Die Bilanzierung des Verlustes erfolgt durch das vor- und nachherige Bestimmen der Trockenmasseeinwaage. Nach WEIßBACH (1998) ist bei dieser Methode eine Korrektur des TM-Gehaltes der Silage auf flüchtige Stoffe und Atmungsverluste erforderlich.

Es wird allerdings davon ausgegangen, dass diese Methode auch bei Durchführung der Korrekturen aufgrund von zahlreichen möglichen Fehlerquellen, zu denen insbesondere die Probenahme zählt, ungenau ist. Genauere Messmethoden, zu denen die Bestimmung von Gärgasmengen zählt, sind jedoch nicht unter Praxisbedingungen und auch im Labor nur unter großem Aufwand zu realisieren. Daher findet die Bilanzmethode in den meisten Untersuchungen Verwendung.

Bei der Berechnung des Gärverlustes aus der Massendifferenz (MD) muss der noch im Silo verbliebene Teil des gebildeten CO₂ berücksichtigt werden. Die Frage, auf welche Weise das am zuverlässigsten geschehen kann, ist bisher noch nicht überzeugend beantwortet worden. Vielfach wird ein auf empirisch Werten basierender Faktor verwendet (BERG, 1971, GROß UND RIEBE, 1974, HONIG UND PAHLOW, 1986, WEIßBACH 1998).

Nach WEIßBACH (1998) erfolgt für Grundfuttersilagen die Bestimmung des Gärverlustes nach:

$$GV[\%] = 100 \cdot \frac{MD[g]}{TM \text{ Einwaage}[g]} + 2,5$$

Für Feuchtgetreide liegt ein Korrekturfaktor derzeit nicht vor.

Unter Berufung auf verschiedene Autoren sind bei JUNGBLUTH (1989) auftretende Trockenmasseverluste bei der Lagerung von verschiedenen Getreidevarianten aufgeführt. Demnach sind bei Feuchtegehalten um die 20 % auch bei einer Lagerdauer von mehr als zwei Monaten geringe Verluste von unter einem Prozent zu erwarten. Bei Feuchtegehalten ab Ende 20 % sind dagegen aufgrund der einsetzenden Fermentation bereits nach 2-3 Wochen leicht erhöhte TM-Verluste von über einem Prozent zu verzeichnen. Mit zunehmendem Feuchtegehalt ist eine Differenzierung der Getreidearten zu erkennen. So liegen die Verluste von Nacktgetreidearten (Weizen, Roggen) mit etwa 1 % unter denen bedecktsamiger Arten (Gerste, Hafer) mit etwa 2 %. Untersuchungen an angefeuchteter Gerste in Gläsern zeigten für 18, 25, 33 und 40 % Feuchte mit steigendem Feuchtegehalt

Trockensubstanzverluste von 0,2 bis 2,3 % auf, wobei ganze Körner die geringsten Verluste aufwiesen. Dies wird auf eine mögliche Schutzfunktion der Schale zurückgeführt.

Eine starke Anfeuchtung auf über 50 % führt nach OH (1985) zu einer weiteren Verstärkung der Unterschiede in den TM-Verlusten. Diese liegen bei Einlagerung geschroteter Gerste in 1-l-Glasbehälter über etwa 8 Monate mit etwa 5 % mehr als doppelt so hoch wie bei geschrotetem Weizen mit etwa 2 %. Dies wird auf eine schnellere Verzuckerung der Gerste und der damit verbundenen intensiveren Alkoholbildung zurückgeführt.

Für Feuchtmals stellte DEDERER (1988) bei CCM beim Vergleich der Verfahren gasdichtes Hochsilo, nicht gasdichtes Hochsilo und Flachsilo TM-Verluste von 3,1 %, 4,5 % und 5,1 % fest. REXILIUS (1985) fand unter optimalen Bedingungen im Labor deutlich geringere Trockensubstanzverluste von 0,5-3 %. In Versuchen von STEINHÖFEL UND WEBER (2006) wurden bei Silierung von Feuchtmals im Folienschlauch ohne Konservierungszusätze Gärverluste von 3,4 % festgestellt.

2.4.2 Lagerungssysteme für Feuchtgetreide

Für die Lagerung von Feuchtgetreide sind zahlreiche Lagerungsmethoden verfügbar und vielfach beschrieben (WEISSBACH UND BUDZIER, 1968, LOTZ UND VON OY, 1982, REXILIUS, 1984, OH, 1985, ZIMMER, 1985, RATSCHOW, 1986, DEDERER, 1988, JUNGBLUTH, 1989, SCHNEIDER, 1994, FÜRLI et al., 1997, HOFFMANN, 1998, BUCHANAN-SMITH et al., 2003, MATTHIAS UND PRIES, 2006).

Grundsätzlich ist zwischen der vollständig gasdichten und der nur in der Silierphase gasdicht abgeschlossenen Lagerung zu unterscheiden. Bei ersterer wird unter Verwendung entsprechender Silo- und Entnahmetechnik der Luftzutritt verhindert, sodass die Silage auch nach Entnahmebeginn unter einer Kohlendioxidatmosphäre steht. Bei der nicht gasdichten Lagerung ist das Silo nur bis zum Entnahmebeginn verschlossen, während die Entnahme unter Luftzutritt erfolgt.

Lagerung in Hochsilos

Vorteile des gasdichten Lagerungsverfahrens im Hochsilo liegen in der guten Futterqualität und den geringen Konservierungsverlusten. Als größter Nachteil werden jedoch die hohen Investitionskosten für dieses Verfahren aufgeführt. Die Kosten pro Tonne eingelagertes Erntegut für den Bau eines gasdichten Hochsilos hängen stark von der Gesamtgröße der

Anlage ab. Es wird von einer Lagerungsdichte von 900 kg FM/m³ und einer Raumausnutzung von 80 % des Silovolumens ausgegangen. Die Investitionskosten pro Tonne und Jahr betragen zwischen 10 und 15 €. Zusätzlich zu den Investitionskosten kommen die jährlichen Betriebskosten, die durch die Nutzung der Anlage verursacht werden, in Höhe von ca. 7 €/t. Insgesamt ergeben sich demnach Kosten von 17 bis 22 €/t.

Eine nichtgasdichte Lagerung im Hochsilo wird nach JUNGBLUTH (1989) unter Zusatz von Wasser hauptsächlich für CCM, aber teilweise auch für Ährengetreide verwendet. Hierzu wird das erntefeuchte Getreide zunächst vermahlen und in einer Anteigstation auf einen Feuchtegehalt von 50-55 % angefeuchtet. Dadurch ergibt sich eine intensive Fermentation. Aufgrund der hohen Umsetzungsintensität liegen die Verluste bei über 5 %. Die Anfeuchtung des gemahlten Getreides hat je nach Getreideart und Feuchtegehalt aufgrund von Quellung gegenüber ganzen Körnern einen erhöhten Lagerumbedarf zur Folge. Bezogen auf die Trockenmasse liegt dieser bei 7-23 %. Das spezifische Gewicht dieser Silagen liegt zwischen 1.100 bis 1.160 kg/m³ (OH, 1985). Die Kostenstruktur für das Lagerungsverfahren des nicht gasdichten Hochsilos ist ähnlich der des vollständig gasdichten Verfahrens. Die Investitionskosten sind jedoch bei gleichem Lagervolumen 20 bis 25 % geringer als beim gasdichten Silo. Für eine sichere Konservierung und Verhinderung von Nacherwärmung ist jedoch eventuell ein Mehraufwand für den Einsatz von Konservierungszusätzen hinzu zu rechnen. Die Gesamtkosten betragen 13 bis 17 €/t (SCHÖN et al., 1998, KTBL, 2006).

Lagerung im Flachsilo

Die Einlagerung von erntefrischem Getreide und Körnermais im Flachsilo ist eine Alternative zur Lagerung in Hochsilos. Das Erntegut wird geschrotet und anschließend mit einem Rad- oder Frontlader im Silo schichtweise verteilt und festgefahren. Für einen geringen Restsauerstoffgehalt im Flachsilo ist auf eine exakte und möglichst hohe Verdichtung zu achten. Nach RATSCHOW (1986) und FÜRLI (1997) sollten Lagerungsdichten um 1.000 kg/m³ erreicht werden. Dieses Verfahren wird allerdings aufgrund praktischer Erfahrungen nur bei Getreidefeuchten unter 20 und über 30 % empfohlen. Im dazwischenliegenden Feuchtebereich wird zur Sicherung des Konserviererfolges ein Propionsäurezusatz von 0,4 bis 0,7 % angeraten. Das Silo sollte mit Folie ausgekleidet sein, um einem möglichen Lufteintritt zu minimieren. Zur Verhinderung von größeren Atmungsverlusten und der daraus resultierenden Erwärmung des Erntegutes muss dieses rasch befüllt, das Siliergut verdichtet und mit einer UV-beständigen Folie

abgedeckt werden. Diese ist gleichmäßig zu beschweren und ein dauerhafter Luftabschluss während der Lagerungsphase zu gewährleisten. Die Silogeometrie sollte einen wöchentlichen Vorschub von 80 cm im Winter- bzw. 150 cm im Sommerhalbjahr ermöglichen. RATSCHOW (1986) und JUNGBLUTH (1989) weisen darauf hin, dass die Entnahme aufgrund der hohen Lagerungsdichte mit fräsenden Geräten vorgenommen werden sollte, da der Futterstock bei der Entnahme mit einem Frontlader aufgerissen wird und entnommene Brocken sich nur schwer zerkleinern lassen.

Die Konservierung im Flachsilos bedarf wesentlich geringerer Investitionskosten in Höhe von 3 bis 7 €/t Einlagerungsmasse, je nach Größe und Bauart. Die Einlagerung erfordert jährlich eine neue Auskleidung des Silos mit 0,2 mm starker Folie sowie eine Unterfolie und eine Abdeckfolie zum Verschließen des Silos, was Kosten in Höhe von 1 bis 2 €/t verursacht. Der Aufwand für Schrotten, Verteilen, Verdichten und den eventuellen Einsatz eines Konservierungszusatzes beläuft sich auf 5 bis 9 €/t Erntegut. Die Gesamtkosten liegen zwischen 9 und 17 €/t (SCHÖN et al., 1998, JUNGBLUTH et al., 2005, MATTHIAS UND PRIES, 2006, KTBL, 2006).

Unverdichtete Lagerung ohne Luftabschluss

Ein weiteres Verfahren zur Lagerung von Feuchtgetreide ist die unverdichtete Lagerung ganzer Körner unter Dach. Das erntefrische Getreide wird dabei wie bei der Lagerung mit lagerstabilem Feuchtegehalt lose aufgeschüttet. Der natürliche Böschungswinkel von Getreidekörnern beträgt für Weizen 30-35°, Mais 35° und Gerste 35-45°. Die Raumgewichte der Körner werden für Weizen mit 710-820 kg/m³, für Gerste mit 580-640 kg/m³ und für Mais mit 680-720 kg/m³ angegeben (ALB, 2001). Dieses Verfahren nutzt die natürliche anfängliche Schutzfunktion der Fruchtschalen gegen verderbauslösende Mikroorganismen. Der Zusatz von Konservierungsmitteln ist jedoch unbedingt erforderlich. Die notwendige Aufwandmenge steigt mit zunehmender Einlagerungsfeuchte und Lagerdauer (MATTHIAS UND PRIES, 2006).

2.4.3 Einsatz von Konservierungsmitteln

Für die genannten Lagerungssysteme wird unter Luftabschluss eine verlustarme Konservierung beschrieben. Bei Luftzutritt tritt jedoch abhängig von Getreideart und -feuchte in der Regel ein schneller Verderb des Futters durch Schimmelpilze und Hefen ein. Zur Minderung des Verderbs unter Lufteinfluss stehen zahlreiche Konservierungsmittel zur Verfügung. Zur Verbesserung der aeroben Stabilität können sowohl chemische

als auch biologische Konservierungszusätze eingesetzt werden. Zu den chemischen Zusätzen zählen Futterharnstoff und Natronlauge, organische Säuren wie Propion-, Benzoe- oder Sorbinsäure, sowie deren Salze als Wirksubstanzen. Als biologische Zusätze kommen homo- und heterofermentative Milchsäurebakterien zum Einsatz (DLG 2006).

Futterharnstoff und Natronlauge

Diese Verfahren werden meist zur Konservierung ganzer Körner genutzt. Die Konservierung durch Futterharnstoff beruht auf der Freisetzung von Ammoniak. Dazu ist eine Mindestfeuchte des Erntegutes von 18 % Voraussetzung. Deshalb ist bei darunter liegenden Kornfeuchten ein Zusatz von 0,5 Liter Wasser/dt notwendig. Die empfohlene Dosierung beträgt 2,25 kg/dt Erntegut und wird in Form von Prills dem Erntegut beigemischt. Um eine gleichmäßige Verteilung des Ammoniaks zu gewährleisten, sollte das Getreide 4 Wochen mit einer Folie abgedeckt bleiben und erst anschließend mit der Verfütterung begonnen werden.

Der Zusatz von Natronlauge zum Feuchtgetreide ist auch unter dem Namen Sodagrain bekannt. Neben der Konservierung wird auch ein Aufschluss der Getreideschale sowie eine Quellung der Stärke erreicht, wodurch die Verdaulichkeit ganzer Körner erheblich verbessert wird. Für einen ausreichenden Aufschluss sowie gleichzeitiger Konservierungswirkung sind 3 bis 4 % Natronlauge erforderlich. Die gleichmäßige und intensive Einmischung der Lauge ist, wie bei allen chemischen Mitteln, für den Konservierungserfolg besonders wichtig. Bei diesem Verfahren ist die eingeschränkte Lagerdauer von maximal 6 Monaten und die ausschließliche Verwendbarkeit in der Wiederkäuerfütterung zu beachten.

Säuren

Die antimikrobielle Wirkung von Säuren beruht auf einer pH-Absenkung infolge Wasserstoffionenabgabe sowie dem undissoziierten Teil der Säure. Stark korrosiv wirkende reine Säuren hingegen werden heute kaum noch appliziert, weil diese oft Schäden an den zur Beförderung eingesetzten Geräten verursachen. Für die Einlagerung von geschrotetem Feuchtgetreide mit einer Verdichtung von weniger als 1000 kg/m³ wird das Risiko des Futterm Verderbs durch eine Applikation von durchschnittlich sechs Liter Propionsäure je Tonne Frischmasse ausreichend reduziert (MATTHIAS UND PRIES, 2006).

Die Dosierung des Säurezusatzes muss jedoch an den Feuchtegehalt des zu konservierenden Erntegutes möglichst exakt angepasst werden. Je feuchter das Erntegut

und je länger die angestrebte Lagerungsdauer, desto höher ist der für die Stabilisierung des Erntegutes notwendige Säureaufwand (Abbildung 6). Bei der Bestimmung des Feuchtegehaltes muss beachtet werden, dass innerhalb einer Erntepartie vor allem bei Körnermais erhebliche Schwankungen im Feuchtegehalt auftreten können. Nach einer kurzen stabilen Lagerzeit verdirbt unzureichend mit Säure versetztes Erntegut in Folge der nachlassenden Säurewirkung, weshalb bei Erntegut, dessen Feuchte stark schwankt, die Säurezugabe im Zweifel besser um einen Sicherheitszuschlag erhöht werden sollte.

Bei der Einlagerung von geschrotetem Erntegut sollte die Applikation der Säure am Auswurf der verwendeten Mühle durch Düsen erfolgen. Wenn ganze Körner konserviert werden sollen, ist es sinnvoll, die Säure am Beginn einer Förderschnecke zuzusetzen. Aufgrund der größeren zu behandelnden Oberfläche von geschrotetem Erntegut im Vergleich zu der von ganzen Körnern ist die benötigte Säuremenge um ca. 30 % erhöht (MATTHIAS UND PRIES, 2006).

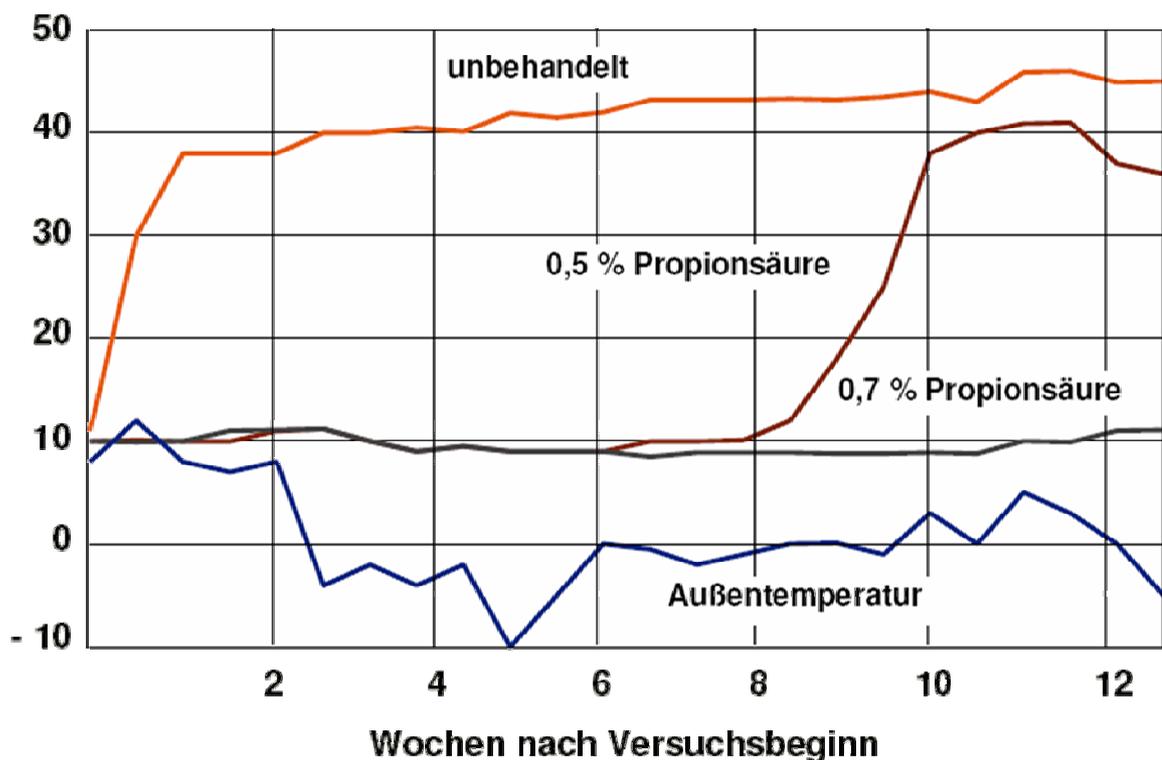


Abbildung 6: Temperaturverlauf von erntefeuchtem Weizenkörnern (28%) bei der Lagerung mit und ohne Propionsäure-Applikation (MATTHIAS UND PRIES, 2006)

Neben Propionsäure können weitere organische Säuren eingesetzt werden. MC DONALD et al. (1991) stellten fest, dass vor allem Valerian- und Capronsäure hemmend auf Hefen wirken. AUERBACH (1996) weist auf die gute antimykotische Wirkung von benzoensäurehaltigen Siliermitteln hin. ADESOGAN et al. (2003) wiesen dagegen nach, dass sowohl der Einsatz von heterofermentativen Bakterienstämmen, als auch eines chemischen Siliermittels auf Basis von Ammoniumformiat, Propionsäure und geringem Anteil von Benzoensäure keinen hemmenden Einfluss auf die Entwicklung von Hefen und Schimmelpilzen in gequetschtem Weizen mit einem Feuchtegehalt von etwa 44 % hatten. Das chemische Siliermittel konnte jedoch den einsetzenden Verderb am längsten hinauszögern.

Zusatz von Milchsäurebakterien

Aus der Gruppe der biologischen Siliermittel werden für die Verbesserung der aeroben Stabilität vor allem Produkte auf der Basis heterofermentativer Milchsäurebakterien empfohlen (DLG 2006). Die Impfung der Silage bewirkt eine vermehrte Bildung von Essigsäure, die bei tiefen pH-Werten eine ausgeprägt hemmende Wirkung auf verderbauslösende Mikroorganismen besitzt. Der Einsatz von heterofermentativen Milchsäurebakterien und die damit verbundene vermehrte Essigsäurebildung hat einen erhöhten Trockenmasseverlust zur Folge, da die Fermentation von Zucker zu Essigsäure mit einem höheren Energieverlust verbunden ist als die Umsetzung zu Milchsäure durch homofermentative Milchsäurebakterien (WEISSBACH, 1968, PAHLOW, 2006). Zudem weist HOEDTKE (2007) auf den Anspruch an frei verfügbarem Wasser für eine Aktivität von Milchsäurebakterien hin (Tabelle 8, S. 26). PIEPER (2005) geht dagegen davon aus, dass osmotolerante homofermentative Milchsäurebakterien (*Lactobacillus plantarum*) ab Feuchtegehalten von 25 % auch in Feuchtgetreide für eine Unterstützung der Silierung und eine nachhaltige Stabilisierung geeignet sind.

2.5 Qualitätsbeeinflussende Prozesse

Bei der Konservierung von Futtermitteln treten zahlreiche Keime auf. Ziel einer erfolgreichen Konservierung ist die Förderung von Mikroben, die eine verlustarme Lagerung unterstützen bei gleichzeitiger möglichst dauerhafter Unterdrückung verderbauslösender Keime. Tabelle 7 gibt einen Überblick der Mikroorganismen, die bei einer Silierung von Futtermitteln auftreten.

Tabelle 7: Ansprüche und Stoffwechselaktivität der wichtigsten Mikroorganismen für die Silierung (Jeroch et al., 1999).

Mikrobengruppe	Verhalten zu Luftsauerstoff	Aktivitätsgrenze bei pH	Kohlenhydrat- vergärung	Eiweiß- abbau
Milchsäurebakterien	Fakultativ bis obligat anaerob	3,0-3,6	Milchsäure, Alkohol, CO ₂ , H ₂ O, (Essigsäure)	Ohne
Coliaerogenes Gruppe (Coliforme Keime)	Fakultativ anaerob	4,3-4,5	Essigsäure, CO ₂ , H ₂ O (Ameisensäure)	Ohne oder schwach
Clostridien Saccharaolyten Protcolyten	Obligat anaerob	4,2-4,4	Buttersäure CO ₂ (Essigsäure) ohne	Ohne Stark zu Amin + CO ₂ , Carbon-säure+NH ₃
Fäulnisbakterien (Pseudomonas, Alcaligenes-Arten)	Aerob bis fakultativ anaerob	4,2-4,8	Stark zu CO ₂ , H ₂ O	Sehr stark
Hefen	Aerob bis fakultativ anaerob	1,3-2,2	Anaerob zu Alkohol, aerob zu CO ₂ , H ₂ O Acetaldehyd	Vorhanden
Schimmelpilze	Obligat aerob	2,5-3,0	CO ₂ , H ₂ O	Stark

2.5.1 Verderbanzeigende Mikroorganismen

2.5.1.1 Epiphytischer Besatz

In der Literatur sind für den natürlichen Keimbesatz auf Futterpflanzen vor der Einsilierung für Hefen Gehalte von 10^3 bis 10^5 kolonienbildende Einheiten je Gramm Frischmasse (KBE/g FM) und für Schimmelpilze Werte zwischen 10^3 bis 10^4 KBE/g FM angegeben (GEDEK, 1973, COENEN, 1987, THAYSEN, 2004). Die jeweiligen hohen Werte sind dabei als Richtwerte für eine Unbedenklichkeitsgrenze einzustufen, die im Futter nicht überschritten werden sollten (GEDEK, 1973, COENEN, 1987, JESENSKA, 1993, MLP, 2005, RICHTER, 2006). Darüber liegende Gehalte sollten nur noch zu einer Verwendung unter Vorbehalt führen, da gesundheitliche Schäden nicht auszuschließen sind.

Nach CEYNOWA (1986) ist für die Entwicklung von Keimen während der Lagerung eine Kontamination des Getreides mit einem primären Inokulum vor Einlagerung

Voraussetzung. Für die weitere Entwicklung der Mykoflora stehen Wasseraktivität und Atmosphäre im Lagerbehälter in Wechselwirkung. Dabei fördert die Getreidefeuchte einerseits das Pilzwachstum, andererseits jedoch auch die Kornatmung und damit die CO₂-Produktion, die wiederum das Pilzwachstum hemmt. Die Ansprüche an die Wasserverfügbarkeit der Verderb auslösenden Mikroorganismen sind verschieden (LINDGREN, 1991, HOEDTKE, 2007). Die Verfügbarkeit des Wassers wird durch die Wasseraktivität (Quotient aus Wasserdampfdruck eines Lagergutes und dem Dampfdruck des reinen Wassers) angegeben (JEROCH et al. 1999). Aus Tabelle 8 wird deutlich, dass sich Schimmelpilze mit wesentlich weniger verfügbarem Wasser entwickeln können als Bakterien und Hefen.

Tabelle 8: Einfluss der Wasseraktivität auf das Wachstum von für die Silierung relevanten Mikroorganismen (in Hoedtke, 2007, nach Lindgren, 1991)

Wachstumsgrenze		Mikroorganismen
a _w [-]	Osmolalität [osmol*kg ⁻¹]	
1,00 - 0,95	0 - 2,8	gram-negative Bakterien, <i>Bacillus spec.</i> , Clostridiensporen
0,95 - 0,91	2,8 - 5,2	Clostridien, Milchsäurebakterien
0,91 - 0,87	5,2 - 7,7	Hefen
0,87 - 0,80	7,7 - 12,4	Feld-Schimmelpilze, <i>Penicillium spec.</i>
0,80 - 0,75	12,4 - 16,0	<i>Aspergillus spec.</i>
0,75 - 0,70	16,0 - 19,8	Lagerpilze
* über a _w berechnet		

2.5.1.2 Fusarien

Fusarien zählen zu den Feldpilzen, deren Mykotoxine schon während des Wachstums auf dem Feld gebildet werden. Von großer Bedeutung sind dabei die Mykotoxine Deoxynivalenol (DON) und Zearalenon (ZON). MATTHÄUS ET AL. (20004) zeigen auf, dass die Belastung des Getreides mit DON nach einer Infektion während der Blüte den stärksten Anstieg bis zum Erreichen der Milchreife aufweist. Bis zur Ernte unterliegen die DON-Gehalte dann nur geringen Veränderungen (Abbildung 7). Die maximale Belastung mit DON wird zwar zum regulären Erntezeitpunkt erreicht, eine Reduzierung der DON-Gehalte durch eine vorzeitige Ernte ist allerdings nur in geringem Umfang möglich. LUDEWIG ET AL (2005) berichten von verschiedenen Faktoren, die die DON-Gehalte

beeinflussen. Zu Ihnen zählen neben der Getreidesorte vor allem die Fusarienspezies, die neben deutlichen Unterschieden in den verursachten Ertragsverlusten auch unterschiedliche DON-Gehalte bedingt.

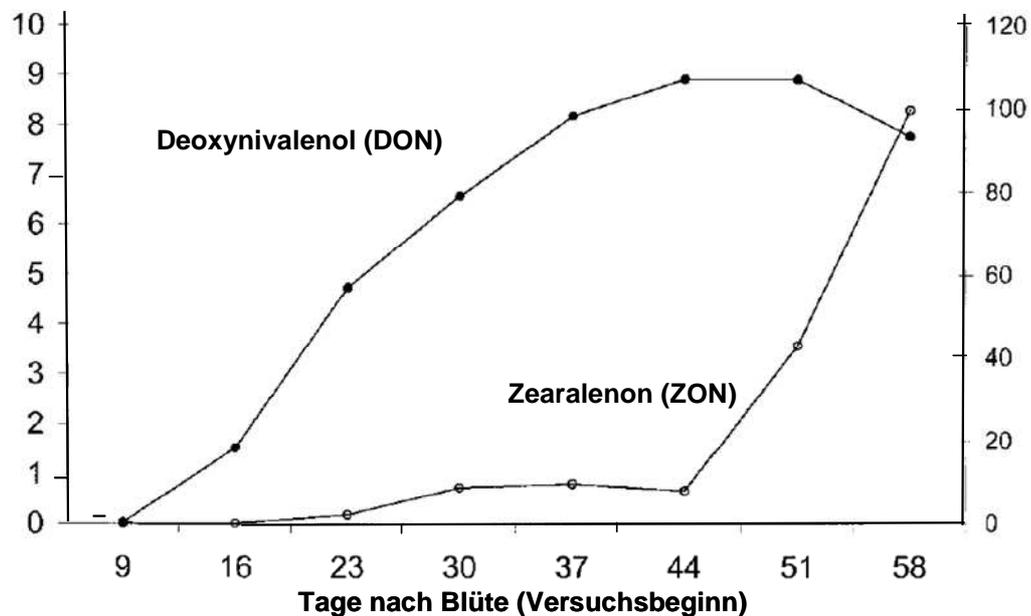


Abbildung 7: Verlauf der Mykotoxingehalte (Deoxynivalenol, Zearalenon) in Weizen nach Inokkulation mit *fusarium culmorum* zur Zeit der Blüte (nach MATTHÄUS et al., 2004).

Die Gehalte an ZON steigen dagegen bei verzögerter Ernte deutlich an (MATTHÄUS et al., 2004). Fusarien spielen nach LEPOM et al. (1990) als potentielle Toxinbildner in Silagen praktisch keine Rolle, da sie schon sehr bald nach Silierbeginn absterben. KASPERSSON et al. (1988) zeigten jedoch auf, dass während der Lagerung von feuchter Gerste in Hochbehältern eine Umschichtung des mikrobiellen Besatzes erfolgt, bei der auch Fusarienspezies eine Lagerung bis ins Folgejahr überstanden. Zu diesen zählt nach MAGAN UND LACEY (1984) vor allem *Fusarium culmorum* aufgrund seiner Anpassung an extrem niedrige Sauerstoffpartialdrücke.

2.5.1.3 Hefen und Schimmelpilze

Im Erntegut können in der Regel zahlreiche Spezies von Hefen und Schimmelpilzen festgestellt werden. Hefen vergären unter anaeroben Bedingungen Zucker zu Alkohol und CO₂. In Silagen hat Milchsäure auf sie, im Gegensatz zu Essig- und Buttersäure, keine hemmende Wirkung. Niedrige Konzentrationen an antimykotisch wirkenden Gärsäuren

wie Essig, Propion- und Buttersäure können bei Silagen trotz niedriger pH-Werte unter aeroben Bedingungen zu einem durch Hefen verursachten Verderb führen bei dem in kurzer Zeit ein Teil der gebildeten Gärssäuren unter rascher Erwärmung der Silage veratmet wird (MC DONALD et al, 1991, AUERBACH, 1996, DLG 2006).

Vielfach wird eine grundsätzliche Veränderung der Keimflora von typischen Feldpilzen zugunsten weniger Lagerpilzspezies während der anaeroben Lagerung von Feuchtgetreide beschrieben. Dabei werden Artenzusammensetzung und Entwicklung maßgeblich durch die Substratfeuchte und die Umgebungstemperatur beeinflusst (REED et al., 2007, MLP, 2005, KASPERSSON et al., 1988). Bei Hefen werden vorwiegend Spezies festgestellt, die zu den fermentativen Gattungen *Hansenula* und *Candida* zählen. Schimmelpilze treten erst deutlich später auf (AUERBACH, 2007). KASPERSSON et al., 1988 ermittelten in Gerste vorwiegend *Penicillium roqueforti*, REED et al. (2007) fanden vorwiegend *Eurotium* und *Aspergillus*-Arten. Auch aus Untersuchungen von OMEMU et al. (2007) geht hervor, dass beim Verderb von für Nahrungszwecke fermentiertem Getreide zunächst vermehrt Hefen auftreten, die zu einem Abbau der Milchsäure und einem Anstieg der pH-Werte führen. Nachfolgend setzt dann ein Verderb durch Schimmelpilze ein.

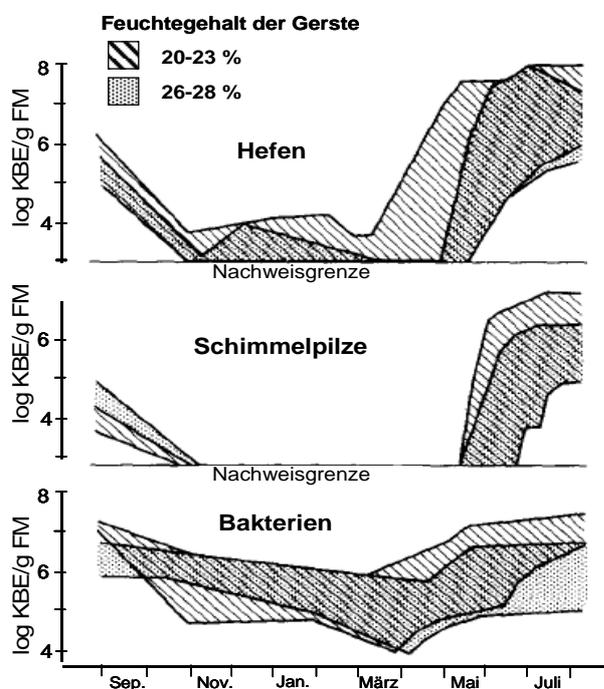


Abbildung 8: Entwicklung der Keimgehalte in Feuchtgerste bei anaerober Lagerung in Hochsilos (nach Kaspersson et al. (1988)).

Lagerung ganzer Gerstenkörner zweier Feuchteestufen in verschiedenen Hochsilos. Zusammenfassende Darstellung bei verschiedenen Konservierungsmaßnahmen.

In diesem Zusammenhang muss auch auf Hefenspezies hingewiesen werden, die eine direkte Wirkung gegen Schimmelpilze aufzeigen. DRUVEFORS (2004), BOYSEN et al. (2000) und PETERSSON et al. (1999) schreiben der Hefengattung *Pichia anomala* aufgrund der Bildung von Ethyl-Acetat eine natürliche Wirkung gegen Schimmelpilze insbesondere bei höheren Feuchtegehalten (>26 %) zu und sehen Einsatzmöglichkeiten als biologisches Silierhilfsmittel. Eine endgültige Bestätigung der Wirksamkeit solcher Hefen in Getreide und unter aeroben Bedingungen ist jedoch bisher nicht erbracht.

Als wichtigster Vertreter der für den Verderb in Feuchtgetreide verantwortlichen Schimmelpilze ist *Penicillium roqueforti* zu nennen, da dieser bei geringen Sauerstoffpartialdrücken (>0,14 %), hohen CO₂-Konzentrationen und tiefen Temperaturen wachsen kann und somit ein potentieller Mykotoxinproduzent ist (LACEY, 1989, HÄGGBLOM, 1990; OHMOMO UND KITAMOTO, 1994; AUERBACH, 1996). Das Wachstum der Kolonien wird durch Lufteintritt von außen in das Silo und durch Lufteinschlüsse in Folge von schlechter Verdichtung begünstigt. PAHLOW (2006) weist darauf hin, dass eingeschlossene Restluft nicht für eine Entwicklung von Schimmelpilzen während der Lagerung ausreicht, sondern stets ein Luftzutritt von außen gegeben sein muss. KASPERSSON et al. (1988) wiesen in feuchter Gerste auch *Aspergillus* nach. Dabei stellten sie fest, dass diese weniger bei Feuchten von 26-28 % als bei Feuchten von 20-23 % vorzufinden waren, was auf die Adaption an eine geringe Wasseraktivität hinweist.

Schimmelpilze verursachen neben dem Verlust an Nährstoffen und Energie des Futters durch toxische Stoffwechselprodukte auch eine Gesundheitsgefährdung der Tiere. Insbesondere die Fruchtbarkeit von Milchkühen kann negativ beeinflusst werden. Aus diesen Gründen ist die Vermeidung von Schimmel in Silagen ein sehr wichtiges Kriterium für das gesamte Verfahren der Silierung. Befallene Silagen dürfen keinesfalls verfüttert werden (AUERBACH, 1996, AUERBACH et al., 2000).

2.5.1.4 Bakterien

Nach KASPERSSON et al. (1988) und RICHTER (2006) haben Bakterien bei der Lagerung von Feuchtgetreide nur eine geringe Bedeutung. Der epiphytische Besatz an Milchsäurebakterien auf Getreide ist gering und stark schwankend. KASPERSSON et al. (1988) konnten bei Gerste mit zunehmendem Feuchtegehalt (20 bis 28 %) einen Anstieg von Milchsäurebakterien während der Lagerung feststellen. Eine starke Ansäuerung in Folge intensiver Milchsäuregärung unterdrückt die Aktivität weniger säuretoleranter

Schadorganismen. Clostridien, die für die Bildung von Buttersäure, Eiweißabbau und einen pH-Anstieg verantwortlich sind und in Grundfuttersilagen über Verschmutzungen ins Futter gelangen, treten aufgrund der Erntetechnik und dem fehlenden Bodenkontakt des Getreides kaum auf.

2.5.2 Aerobe Stabilität

Aerobe Stabilität ist ein Indikator für mikrobielles Wachstum, das durch wärmebildende Veratmungprozesse gekennzeichnet ist (HONIG, 1990). Nach DLG (2000) und PAHLOW (2004) ist die aerobe Stabilität definiert als der Zeitraum, gemessen in Tagen, bis die Temperatur des Siliergutes die Umgebungstemperatur unter Laborbedingungen dauerhaft um mindestens 3 K überschreitet. ADESOGAN et al. (2003) definieren den Beginn des Verderbs von gequetschtem Getreide schon bei einer Überschreitung der Umgebungstemperatur um 1 K. Für den Verderb in Praxissilos geht NUBBAUM (2006) von einer Nacherwärmung aus, wenn zwischen einzelnen Silagepartien Temperaturunterschiede von über 5°C auftreten. Nach SPIEKERS (2006) sollte die aerobe Stabilität für Silagen mindestens 3 Tage betragen, THAYSEN (2004) fordert mindestens fünf Tage.

Für Feuchtgetreide stellte JUNGBLUTH (1989) bei Weizen, der auf 33 % angefeuchtet wurde, einen positiven Einfluss der Lagerdauer auf die aerobe Stabilität fest. Auch für Gerste wird eine tendenzielle Erhöhung der aeroben Stabilität durch eine Verlängerung der Lagerdauer angegeben. Außerdem wird dort beschrieben, dass in Weizen mit 18 % während einer 14-tägigen Beobachtungszeit trotz niedriger Milchsäuregehalte und hoher pH-Werte keine Anzeichen von Verderb festzustellen waren. Dies wird durch geringe Wasseraktivität begründet.

Aus dem Blickwinkel der Verfahrenstechnik sind alle Maßnahmen, die die Lufteinwirkung auf die Silage beeinflussen, von großer Bedeutung. Dies sind vor allem die Verdichtung, der luftdichte Abschluss, der Feuchtegehalt, die Vermahlung, der tägliche Vorschub und die dabei eingesetzte Entnahmetechnik. Eine hohe Verdichtung, feine Vermahlung und Feuchten von 40-50 % minimieren das Porenvolumen in der Silage und verringern so die Diffusion der Luft von der Anschnittfläche in den Stapel (RATSCHOW, 1986, DEDERER, 1988, JUNGBLUTH, 1989, FÜRLI et al., 2006).

2.6 Aufbereitungsverfahren für Körnerfrüchte

Eine Zerkleinerung von Feuchtgetreide und -mais ist für die Verdichtung, die Silierung und vor allem für die Futtermittelverwertung im Verdauungssystem der Tiere, unabhängig vom

gewählten Konservierungsverfahren, von entscheidender Bedeutung. Im praktischen Einsatz sind vorwiegend die Aufbereitung durch Hammermühlen und Walzenstühle zu finden (AEL 1996, FÜRLI et al., 1997, JUNGLUTH et al., 2005).

2.6.1 Hammermühle

Hammermühlen sind universell für verschiedene Körnerfrüchte einsetzbar. Sie werden vorwiegend für die Schrotung von CCM eingesetzt. Die Körner werden durch schnell rotierende scharfkantige Schläger in einer Schrotkammer zerkleinert. Das geschrotete Gut gelangt aufgrund der Zentrifugalkraft durch Siebe in den Auswurfkanal, aus dem es durch den von den Schlägern erzeugten Luftstrom herausgeblasen wird. Die eingesetzte Siebgröße ist entscheidend für den Zerkleinerungsgrad des Futters, begrenzt jedoch gleichzeitig auch die Durchsatzleistung der Mühle. Die Funktionsweise einer Hammermühle und deren Arbeitswerkzeuge werden in Abbildung 9 dargestellt.

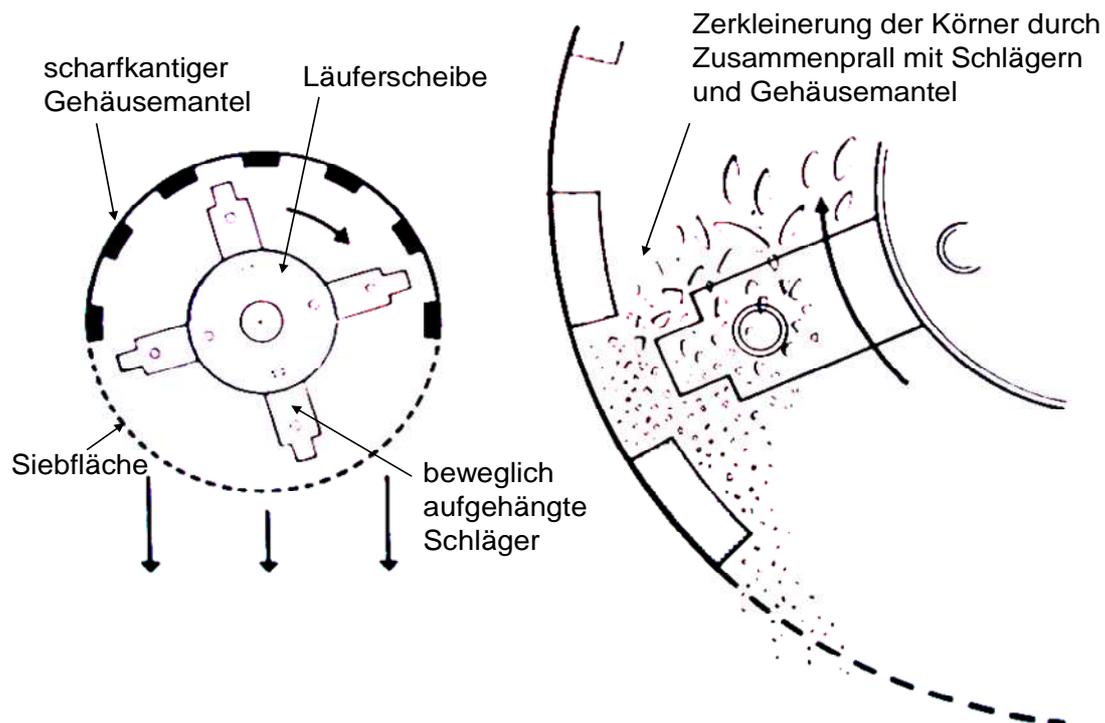


Abbildung 9: Arbeitswerkzeuge und Funktionsweise einer Hammermühle (mod. nach AEL 1996).

Im Vergleich mit anderen Aufbereitungssystemen wird in Hammermühlen der größte Zerkleinerungsgrad erreicht, so dass diese vorwiegend für die Bereitung von Schweinefutter zum Einsatz kommen.

Der Energieaufwand beträgt zwischen 7 und 15 kWh/t, was beim Einsatz von leistungsstarken Mühlen Antriebsleistungen von bis zu über 200 kW erforderlich macht (AEL 1996). FÜRLI et al. (1997) berichten in diesem Zusammenhang von einem gegenüber Walzenstühlen stark zunehmendem Leistungsbedarf bei ansteigenden Feuchtegehalten, der unter anderem durch das erschwerte Passieren der Sieböffnungen bedingt ist.

2.6.2 Walzenmühlen und Walzenquetschen

Walzenmühlen bestehen aus zwei geriffelten Walzen, die gegenläufig mit verschiedenen Geschwindigkeiten angetrieben werden. Das Verhältnis der Drehzahlen beträgt 1:2,5 bis 1:3. Im Mahlspace zwischen den Walzen wird das Korn gequetscht und infolge der Riffelung und der unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeit der Walzenoberfläche zerdrückt bzw. zerschnitten. Der Spalt zwischen den Walzen kann variiert und so die Mahlintensität verändert werden. Die Schroterwärmung ist mit 5 bis 10 K etwas geringer als bei den Hammermühlen (HOFFMANN, 1998). In Abbildung 10 ist das Prinzip der Walzenmühle schematisch dargestellt.

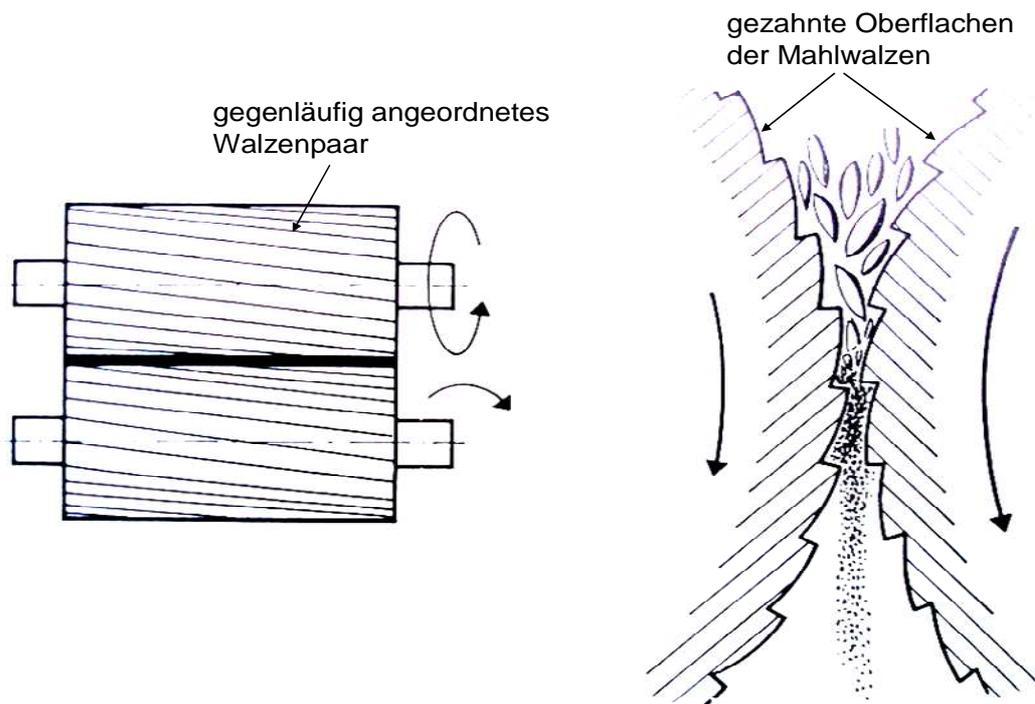


Abbildung 10: Arbeitsweise der Walzenmühle (mod. nach AEL 1996)

Nach HSIEH et al. (1980) beeinflussen Mahlspace und Differentialgeschwindigkeit den Mahleffekt deutlich stärker als die Umfangsgeschwindigkeit der Walzen. Die Anfeuchtung von Getreide wird bei der Weiterverarbeitung zur Konditionierung der Körner vor dem

Mahlvorgang eingesetzt. Untersuchungen von EDWARDS et al. (2007) beschreiben den Einfluss von Weizenart (Hart- bzw. Weichweizenvarianten) sowie Feuchtegehalt auf charakteristische Mahleigenschaften. Abbildung 11 zeigt die Widerstandskraft der Einzelkörner beim Mahlvorgang. Der Verlauf der Kurven gibt demnach zunächst den Widerstand der Fruchtschale und anschließend den des Endosperms wieder. Insbesondere bei Hartweizen führt eine geringfügige Anfeuchtung von etwa 9 auf 16 % zu einem deutlich verminderten Kraftbedarf für die Zerkleinerung. Dies wird auf eine Aufweichung des Endosperms durch Wassereinlagerung zurückgeführt. Auch GLENN et al. (1991) beschreiben, dass dieser Effekt bei Hartweizensorten deutlich stärker ausgeprägt ist als bei Weichweizen.

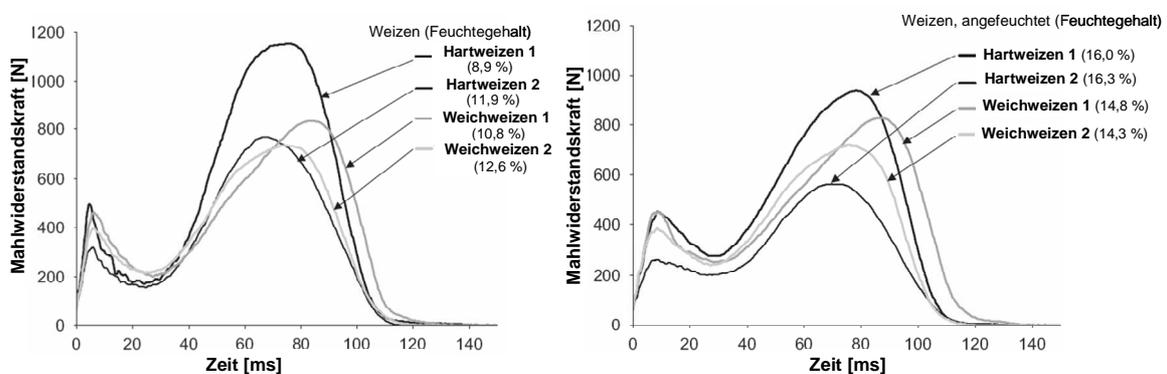
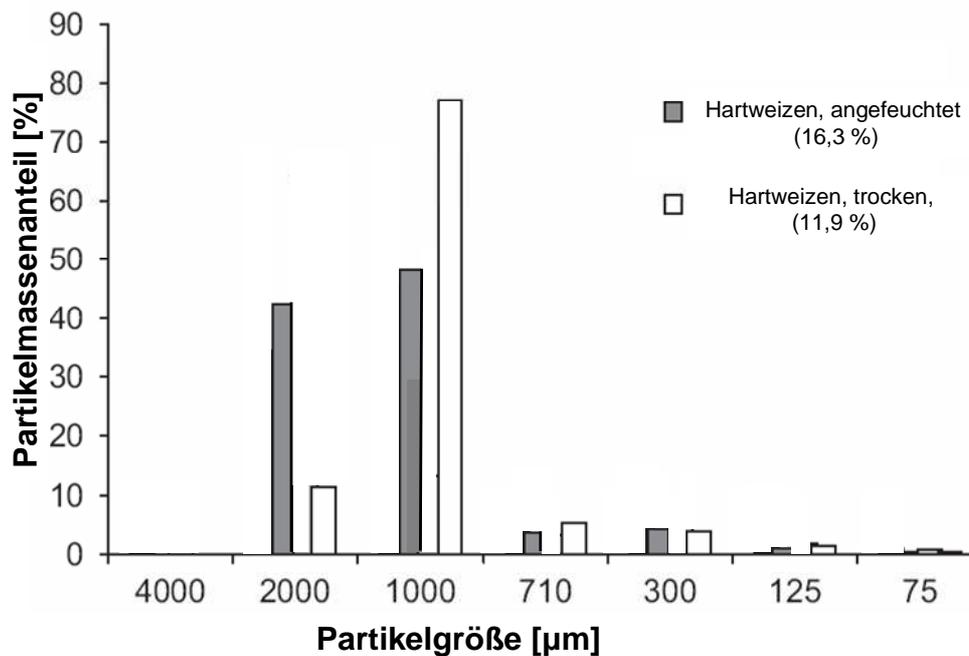


Abbildung 11: Mahl widerstand verschiedener Weizenvarianten in Abhängigkeit von Sorte und Feuchtegehalt (nach EDWARDS et al. 2007).

Die Untersuchungen von EDWARDS et al. (2007) zeigen, dass beim Einsatz einer Walzenmühle mit einem Malspalt von 0,67 mm keine Partikel > 4 mm entstehen. Eine geringfügige Anfeuchtung des Getreides von 12 auf 16 % führt allerdings zu einer deutlichen Verschiebung zugunsten größerer Partikel (Abbildung 12).



**Abbildung 12: Partikelgrößenverteilung von Hartweizen mit und ohne Anfeuchtung
Zerkleinerung durch eine Walzenmühle (Mahlspalt 0,67 mm). mod. nach
EDWARDS et al. (2007).**

Bei Walzenquetschen ist die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Walzen nur gering (<10%), weshalb die Zerkleinerung der Körner hauptsächlich durch Zerdrücken geschieht. Der erreichbare Zerkleinerungsgrad ist geringer als bei Hammer- oder Walzenmühlen. FÜRLI et al (1997) weisen auf die Partikelform (Flocken) hin, die eine Bestimmung der tatsächlichen Partikelgröße erschwert. Die erforderliche Antriebsleistung beträgt nach AEL, 1996 und HOFFMANN (1998) 4 bis 6 kWh/t. FÜRLI et al (1997) geben bei Kornfeuchten bis 25 % erreichbare Massenströme von 17 t/h bei einem spezifischen Energiebedarf <3 kWh/t an.

2.7 Untersuchungsmethoden zur Verdichtung

Eine Reihe von Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Dichte in Silagen sind an Messmethoden aus der Bodenkunde angelehnt. Die Lagerungsdichte wird dort als Dichte des Bodenkörpers einschließlich der zwischen den festen Bestandteilen befindlichen Hohlräume definiert. Als Porenvolumen wird der Teil des Bodenkörpers bezeichnet, der nicht von der Bodenfestschubstanz ausgefüllt wird und Wasser, Luft und Bodenlebewesen enthält. Zur Bestimmung der Lagerungsdichte in verschiedenen Bodenzonen werden Stechzylinder mit definiertem Volumen genutzt, die in den Boden eingeschlagen werden. Nach der Entnahme werden diese getrocknet und über die Gewichtsbestimmung die

Lagerungsdichte ermittelt (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2002). Nach vergleichbarem Prinzip kommen für die Bestimmung der Lagerungsdichte in Silagen Bohrstöcke zum Einsatz (KLEINMANNS et al., 2005).

Der Eindringwiderstand (EW) wird in bodenkundlichen Untersuchungen zur Charakterisierung des physikalischen Bodenzustandes genutzt. Er beschreibt die Kraft ($N \cdot cm^{-2}$), die aufgebracht werden muss, um die im Boden wirkenden Kräfte zu überwinden und ein Eindringen bzw. Verdrängen der Bodenpartikel zu ermöglichen. Dieser steht in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, zu denen unter anderem Lagerungsdichte, Grobporenanteil, Wassergehalt, Bodenart und auch die Messtechnik zählen (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2002). Eine praxisübliche Feldmethode zur Bestimmung des Eindringwiderstandes im Boden ist das Penetrometerverfahren. Das Penetrometer misst den EW eines definierten Kegels in den Boden. Mit zunehmender Tiefe gestaltet sich der Vortrieb bzw. das Eindringen immer schwerer und kann schließlich nur noch gelingen, wenn die verdrängte Bodenmasse in den Porenraum der Umgebung hineingepresst wird (WINDHORST, 1987). Da der veränderte EW selten auf nur einen Faktor zurückzuführen ist, kommt seiner Ermittlung besonders als einem vergleichendem Verfahren große Bedeutung zu. Als großer Vorteil der Methode wird die Einfachheit des Verfahrens und die geringe Spezifität der Messwerte als Garant für das Erkennen von Veränderungen des physikalischen Zustandes genannt. Als Kritikpunkt wird die beschränkte Aussagekraft der Werte bezogen auf einen losgelösten Bodenfaktor angeführt (BORCHERT UND GRAF, 1988, HARTGE UND HORN, 1999, SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2002).

Für eine Beschreibung der Verdichtung in Silagen konnte dieses Verfahren bisher nicht erfolgreich eingesetzt werden.

2.8 Anforderungen an Feuchtgetreide und -mais aus Aspekten der Tierernährung

Getreide und Mais werden in unterschiedlichen Formen in der Fütterung nahezu aller Nutztiere verwendet. Meist wird dieses Kraftfutter in getrockneter, gemahlener, gequeschter oder pelletierter Form eingesetzt. Insbesondere bezüglich der erforderlichen Kornaufbereitung und -partikelgrößen werden dazu sehr kontroverse Ansichten vertreten. Vielfach werden Erfahrungen mit trocken verfüttertem Getreide auch auf höhere Feuchtegehalte übertragen. Beispielhafte Untersuchungsergebnisse zeigen die Einsatzmöglichkeiten von Feuchtgetreide und -mais auf.

2.8.1 Verwendung von Feuchtgetreide in der Rinderfütterung

Für die Verwendung von Getreide in der Rinderfütterung ist eine über das Quetschen hinausgehende Zerkleinerung von Feuchtgetreide aus ernährungsphysiologischen Aspekten nicht erforderlich (CAMPLING, 1991, JEROCH et al., 1993, SCHRÖDER et al. 1998). Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass die Feuchtegehalte des Getreides in den meisten Untersuchungen 20 % kaum überschreiten. Nach BUCHANAN-SMITH et al. (2003) steigt bei zunehmendem Feuchtegehalt der Futterwert von Getreide beim Einsatz in der Rinderfütterung, wobei dieser Effekt bei Feuchtegehalten > 30 % bedingt durch geringere TM-Aufnahmen auch umgekehrt werden kann. Nach CAMPLING (1991) kann auch die Partikelgröße des Getreides einen Einfluss auf die Futteraufnahme nehmen. Zu stark zerkleinertes Getreide führt zu einer Reduzierung der Futteraufnahme.

STACEY et al. (2007) lagerten Feuchtweizen mit verschiedenen Konservierungsverfahren ein und verfütterten die Varianten an Jungbullen in der Endmast. Dazu wurden ganze Weizenkörner bei etwa 31 % Feuchte geerntet, gequetscht, mit Propionsäure behandelt und einsiliert. Eine zweite Weizenvariante wurde ohne Kornaufbereitung mit etwa 26 % unter Harnstoffzugabe anaerob eingelagert und eine dritte Variante bei 15 % Feuchte unter Zugabe von Propionsäure aerob gelagert und vor Verfütterung gequetscht. In einer Grassration mit ad libitum Fütterung betrug die Trockenmasseaufnahme von Weizen aller drei Varianten etwa 8 kg. Insbesondere bei hohen Trockenmasseaufnahmen lagen die Gehalte an unverdauten Körnern und Stärke im Kot bei der Weizenvariante mit 25 % Feuchte und Harnstoffkonservierung am höchsten. Die täglichen Gewichtszuwächse übertrafen mit 852 und 855 g bei silierten und trocken gequetschten Weizen signifikant die Zuwachsraten von mit Harnstoff eingelagertem Weizen mit 726 g. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine Einsilierung eine akzeptable Alternative zu getrocknet gequetschtem Weizen ist und ohne weitere Aufbereitung insbesondere gegenüber mit Harnstoff konservierten Weizen für die Endmast von Rindern geeignet ist.

Im Vergleich zum Getreide ist für Körnermais eine intensivere Aufbereitung notwendig. Dabei sinkt nach KALAYCI (2003) die notwendige Intensität der Zerkleinerung mit steigendem Feuchtegehalt. Bei Feuchtegehalten über 30 % sind demnach keine Partikel unter 2,2 mm erwünscht, um gesundheitliche Probleme bei Hochleistungskühen zu vermeiden (Tabelle 9).

Tabelle 9: Anforderungen an die Partikelgrößen von Körnermais in Abhängigkeit der Feuchte für den Einsatz in der Milchviehfütterung (nach KALAYCI, 2003)

Partikelgröße Körnermaisfeuchte	>4,5 mm [%]	>2,2 mm [%]	>1,1 mm [%]	>0,6 mm [%]	<0,6 mm [%]
>30 %	75	25	-	-	-
25-30 %	25	50	25	-	-
15 %	-	-	30	50	20

Für Maisstärke geht WEIßBACH (2007) von einer deutlich verbesserten biologischen Abbaufähigkeit und Verdaulichkeit durch eine Silierung aus.

2.8.2 Verwendung von Feuchtgetreide in der Schweinefütterung

Für die Verwendung von Feuchtgetreide und Mais in der Schweinefütterung wird insbesondere die anzustrebende Partikelgröße im Futter kontrovers diskutiert (KAMPHUES, 2007). Bei JUNGBLUTH (1989) wird berichtet, dass eine Aufbereitung von Getreidekörnern grundsätzlich notwendig ist, mit zunehmendem Feuchtegehalt aber auf eine intensivere Aufbereitung des Getreides zugunsten des Quetschens verzichtet werden kann. Es wird aber darauf hingewiesen, dass verschiedene Autoren von einer verminderten Mastleistung bei Schweinen beim Einsatz von feuchter Gerste gegenüber trockenem Futter berichten. Dies wird auf eine Proteinumsetzung während der Lagerung zurückgeführt, die zu einem Abbau der limitierenden Aminosäure Lysin führt.

FIEDLER (1980) berichtet von optimalen täglichen Zunahmen und Futterverwertungen bei der Fütterung von Körnermais an Mastschweine, wenn 85 % der Partikel kleiner als 1 mm sind. DEDERER (1988), JUNGBLUTH et al. (2005) und MATTHIAS UND PRIES (2006) fordern für Körnermais einen Anteil von 80 % <2 mm und maximal 55 % <1 mm. Für Feuchtgetreide wird aus Mangel an vergleichenden Untersuchungen oft der gleiche Wert angestrebt. (KAMPHUES, 2007) diskutiert die Fragen, ob es einen Mindestanteil an groben Partikeln bedarf, nur hohe Anteile sehr feiner Partikel vermieden werden müssen oder der Anteil der mittleren Korngrößenfraktion besonders hoch sein sollte. Zur Vermeidung von Magengeschwüren sollte der Anteil von Partikeln <0,2 mm weniger als 20 % und der Anteil >1 mm >20 % sein. Für eine Reduzierung von Salmonellen empfiehlt er eine noch gröbere Partikelstruktur (20-30 % >1,4 mm; 35-45 % >1,0 mm; 20-25 % <0,4 mm). Dabei wird auf das Fehlen von Standards für die Vorgehensweise beim Sieben

(Trocken/Nasssiebung) hingewiesen. SCHULZE-HORSEL (2007) berichtet, dass ein grobes Vermahlen auf Partikelgrößen von 2-5 mm zwar zu Lasten der Futterwertung gehen kann, aber eine reduzierende Wirkung auf Salmonellen hat, da eine stärkere Einspeichelung und verlangsamte Darmpassage erfolgt. KAMPHUES (2007) weist daraufhin, dass zu dieser Thematik weitere Untersuchungen notwendig sind.

2.9 Futterkonservierung in Folienschläuchen

Das Grundprinzip der Schlauchtechnologie basiert auf dem Einpressen von Siliergut in Folienschläuche durch eine Spezialmaschine, wodurch eine kurze aerobe Befüllphase und ein zügiger Luftabschluss gewährleistet werden können (STEINHÖFEL, 2001). Versuche zur Futterkonservierung in Folienschläuchen begannen bereits Ende der 1960er Jahre (STEINHÖFEL UND WEBER, 2003a,b). Seitdem ist die Technik intensiv weiterentwickelt worden und bietet zurzeit die Möglichkeit zur Einlagerung einer Vielzahl von Futtermitteln (Gräser, Leguminosen, Getreideganzpflanzen, Pressschnitzel, Biertreber, Lieschkolbenschrot, CCM, Feuchtgetreide und Mais) und wird weltweit in zunehmendem Maße eingesetzt (WEBER, 2006). DURLAND UND POHL (2002) heben die flexible Einsatzmöglichkeit der Schlauchsilierung hervor, die in den USA vielfach auch als Notfallsystem für die Konservierung von Mais, Hirse und Sojabohnen eingesetzt wird, wenn Kapazitäten in konventionellen Lagerungssystemen nicht ausreichen. Unter ungünstigen Witterungsbedingungen wird dies insbesondere zur Vermeidung von Ertragsverlusten genutzt, wenn statt des Mähdrusches eine Silierung der ganzen Früchte vorgenommen werden muss. Auch JÄKEL (2006) beschreibt die Flexibilität des Verfahrens als größten Vorteil. Es können in Abhängigkeit des verwendeten Schlauchdurchmesser sowohl kleine als auch große Futtermengen luftdicht eingelagert werden. Es sind Schlauchlängen von bis zu 90 m möglich, wobei diese je nach Erntemenge beliebig variiert werden kann (Tabelle 10).

Tabelle 10: Einlagerungsmengen verschiedener Futtermittel in Folienschläuche in Abhängigkeit der Schlauchmaße (Jäkel, 2006)

Schlauchmaße		Gras und Maissilage 30 % TS		Pressschnitzel > 22 % TS		Feuchtmais (gequetscht oder gemahlen) < 70% TS	
Durchmesser	Länge	t FM	t FM/lfd.m	t FM	t FM/lfd.m	t FM	t FM/lfd.m
1,65	60 m	75	1,4	80	1,5	85	1,6
1,95	60 m	95	1,7	100	1,8	105	1,9
2,40	45 m	130	3,3	140	3,5	170	4,3
	60 m	175	3,2	190	3,5	230	4,2
	75 m	220	3,1	240	3,4	290	4,1
2,70	45 m	150	3,8	165	4,1	195	4,9
	60 m	210	3,8	230	4,2	275	5,0
	75 m	265	3,8	290	4,1	350	5,0
3,00	45 m	185	4,6	200	5,0	240	6,0
	60 m	250	4,5	275	5,0	325	5,9
	75 m	320	4,6	350	5,0	420	6,0
	90 m	385	4,5	425	5,0	500	5,9

Neben einer hohen Futterqualität werden geringe Silier- und Trockenmasseverluste (2 bis 7 %), eine flexible Wahl des Lagerortes sowie im Vergleich zum Flachsilo geringere Kosten durch den Wegfall der Investitionskosten für eine feste Siloanlage als Vorteile genannt. Kleinere Anschnittflächen und damit verbundene große Vorschubgeschwindigkeiten reduzieren das Risiko einer Nacherwärmung gegenüber dem üblichen Flachsilo-Management (BÜSCHER, 2006). Diese können aber auch zu einer erschwerten Futterentnahme führen. Mögliche Fehleinstellungen des Maschinenbedieners und die Gefahr der Folienbeschädigung durch Vögel und Nagetiere werden als Nachteile des Verfahrens genannt (STEINHÖFEL, 2001, JÄKEL, 2006).

Die Möglichkeit auch gequetschtes Feuchtgetreide in einem Arbeitsgang mit diesem Verfahren einzulagern wird erst seit 2005 von verschiedenen Herstellern angeboten. Die in der vorliegenden Arbeit eingesetzte Maschine vom Typ Murska 1400 S 2x2 wird von BELLUS (2004) hinsichtlich verfahrenstechnischer Aspekte beschrieben. Da der Maschinentyp neben dem Folienschlauchsystem auch mit einem Elevator für alternative Einlagerungszwecke ausgerüstet werden kann, beschränken sich die Untersuchungen allerdings auf den Prozess des Quetschens ohne anschließende Einlagerung in Folienschläuche. Der Aufbereitungsgrad von Getreide durch den Crimper Bagger mit Feuchtegehalten von etwa 28 % wird für den Einsatz in der Rinderfütterung als

ausreichend charakterisiert, da bei den beschriebenen Einstellungen der Walzenquetsche keine ganzen Körner zu ermitteln waren. Untersuchungen des gesamten Verfahrens liegen bisher nicht vor.

Qualitätsanforderungen an Folienschläuche

Für eine sichere Konservierung von Futtermitteln in Schläuchen ist die Qualität des Folienschlauches von größter Bedeutung. Nach MEISE et al. (2006) bestehen jedoch zur Zeit noch keine objektiven Anhaltspunkte zur Qualitätsbeurteilung durch die Anwender. Die Foliendicke wird daher vielfach als Maßstab für die Qualität und Gasdurchlässigkeit der Folie genutzt. Die Gasdurchlässigkeit ist jedoch für die Erzeugung eines ausreichenden Luftabschlusses von sekundärer Bedeutung (FÜLL et al. 2006, ASHBELL et al., 2001, SNELL et al. 2000). Nach MEISE et al. (2006) ist die Dicke der Folie kein ausreichendes Qualitätsmerkmal. Im Gegensatz zu Fahrsilofolien müssen Schläuche durch den Pressvorgang der Silopresse hohe mechanische Belastungen durch Druck- und Zugkräfte überstehen. Damit kommt den Merkmalen Reißdehnung, Reißfestigkeit, Weiterreißfestigkeit, und Durchstoßfestigkeit eine besonders hohe Bedeutung zu. Die heutigen dreischichtigen Schläuche bestehen zumeist aus außen weißen und innen schwarzen Folien aus verschiedenen Polyethylen-Rohstoffen. Recyclate dürfen aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen nicht zum Einsatz kommen.

Dem Lichtwert und dem Weißgrad kommt eine höhere Bedeutung zu als bei Fahrsilofolien, da es insbesondere im Sommer durch die Sonneneinstrahlung zu einer deutlichen Erwärmung und Dehnung der Folie kommen kann, die bei unzureichendem Weißgrad ein Reißen des Schlauches verursachen kann. Einflüsse auf die Futterqualität konnten durch die Foliensfarbe bisher nicht nachgewiesen werden, obwohl eine deutliche Abhängigkeit von Foliensfarbe und Dicke auf deren Temperatur und die der direkt darunter befindlichen Silage festgestellt wurde. Die Anforderungen an die Folienschlauchqualität sind somit deutlich höher als an Fahrsilofolien. MEISE et al. (2006) fordern weitere Untersuchungen und eine Standardisierung der Qualitätsmerkmale für Folienschläuche, um eine sichere Anwendung des Verfahrens gewährleisten zu können. Tabelle 11 gibt einen Überblick über die Prüfnormen zur Erteilung des DLG-Gütezeichens für eine 200 µm dicke Fahrsilofolie und interne Qualitätsmindeststandards eines Herstellers für Folienschläuche.

Tabelle 11: Anforderungen an die Folienqualität von Fahrsilofolien und Folienschläuchen (nach MEISE et al., 2006).

Parameter	DLG-Standard Fahrsilofolie	Mindeststandard Siloschlauch (Durchmesser 2,7 m)
Recyclatanteil im Rohstoff	möglich	nicht möglich
Foliendicke (μm)	200	215
Abweichung von Nenndicke (%)	± 5	keine
Abweichung von Einzelwerten (%)	± 15	± 12
Reißfestigkeit (N/mm^2)	≥ 17	≥ 23
Reißdehnung (%)	≥ 400	≥ 750
Weiterreißfestigkeit (g)	-	≥ 1.800
Durchstoßfestigkeit (g)	-	≥ 800
Gasdurchlässigkeit ($\text{cm}^3\text{O}_2/\text{m}^2$)	≤ 250	≤ 200
UV-Beständigkeit (Monate)	je nach Hersteller	24

3 Material und Methoden

Die Untersuchungen zum Crimper-Bagger-Verfahren setzten sich aus verschiedenen Teiluntersuchungen zusammen, die auf der Aufbereitung und Einlagerung verschiedener Gerste- und Weizenvarianten der Erntejahre 2005 und 2006 basieren. Es wurden sowohl Untersuchungen auf Praxisebene mit dem Folienschlauchverfahren als auch im kleintechnischen Maßstab durchgeführt. Durch zwei Diplomarbeiten, in denen zum einen das Folienschlauchverfahren für Feuchtmals untersucht (MAACK, 2006) und zum anderen eine Praxiserhebung unter Anwendern des Verfahrens durchgeführt wurde (RABE, 2006) konnten die Untersuchungen ergänzt werden.

Im ersten Versuchsabschnitt sollten zunächst grundsätzliche Einflüsse auf die Qualität von Feuchtgetreide untersucht werden. Dazu wurde Gerste und Weizen mit Feuchtegehalten von etwa 20 % geerntet und ein Teil des Erntegutes nachträglich auf 30 % angefeuchtet. Neben dem Feuchtegehalt stand auch die Aufwandmenge eines ausgewählten Konservierungsmittels im Fokus. Mit Hilfe der ‚Bilanznetzmethode‘ (WEBER, 2006) wurde zunächst die anaerobe Lagerungsphase von Weizen im Folienschlauch untersucht. Untersuchungen zum Lufteinfluss wurden zunächst auf Versuchsebene von Siliergläsern unter standardisierten Bedingungen an Gerste und Weizen durchgeführt. Des Weiteren sollten durch verschiedene Untersuchungen physikalische Einflüsse auf die aerobe Stabilität näher beschrieben werden, wobei geeignete Messmethoden zu ermitteln waren.

Der zweite Versuchsabschnitt berücksichtigte die gewonnenen Erkenntnisse. Die Feuchtestufen von 30 % und 20 % im Getreide sollten im Gegensatz zum ersten Versuchsjahr durch eine vorgezogene Ernte von Gerste und Weizen erreicht werden. Die Einlagerung der verschiedenen Feuchtgetreidevarianten in Folienschläuche unter Nutzung der ‚Bilanznetzmethode‘ diente dabei wiederum als Basis verschiedener Untersuchungen, die sich auf eine Bestimmung der Einflüsse auf die aerobe Stabilität in den Folienschläuchen fokussierten. Durch Messungen im kleintechnischen Maßstab wurden diese ergänzt.

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die den Untersuchungen zugrunde liegenden Feuchtgetreidevarianten und die Versuchstruktur gegeben. Anschließend wird die eingesetzte Maschine und der Aufbau der Praxisversuche der beiden zugrunde liegenden Versuchsjahre erklärt und die dabei durchgeführten Untersuchungen erläutert. Abschließend folgt eine Beschreibung der verschiedenen Analysen im kleintechnischen Maßstab.

3.1 Variantenübersicht und Versuchsstruktur

Alle nachfolgend beschriebenen Untersuchungen basieren auf Feuchtgetreidevarianten, die mit einem ‚Crimper-Bagger‘ gequetscht wurden. Tabelle 12 gibt einen Überblick über die verschiedenen Weizen- und Gerstevarianten der zugrunde liegenden Versuchsjahre, die sich vorwiegend in ihrem Feuchtegehalt und dem Aufbereitungsgrad unterscheiden.

Tabelle 12: Variantenübersicht

Getreideart	Erntejahr	Standort	Sorte	Feuchte [%]	Bemerkung	Walzenabstand [mm]	Variantenbezeichnung
Gerste	2005	Rheinland (Frankenforst)	Krimhild	24		0,3	G-24-0,3
				30 ⁺	⁺ =angefeuchtet		G-30-0,3⁺
	2006	Nordfriesland (Bordelum)	Naomi	16		0,1	G-16-0,1
				31			G-31-0,1
Weizen	2005	Rheinland (Frankenforst)	Dekan	18		0,3	W-18-0,3
				30 ⁺	⁺ =angefeuchtet		W-30-0,3⁺
	2006	Nordfriesland (Bordelum)	Dekan	21		0,1	W-21-0,1
				28			W-28-0,1

Die Varianten wurden auf zwei Versuchsebenen bezüglich verschiedener Parameter untersucht (Tabelle 13). Zur Untersuchung der Effizienz eines chemischen Zusatzes in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Getreides wurde in allen Versuchen *KOFA®GRAIN-pH-5* (Gruppe E, Wirkungsrichtung 2: Verbesserung der aeroben Stabilität (DLG, 2006), (*Fa. Addcon*)) in verschiedenen Aufwandmengen eingesetzt. Dieses beinhaltet Natriumbenzoat, Propionsäure und Natriumpropionat.

Tabelle 13: Versuchstruktur

		Versuchsjahr	2005		2006	
Versuchsebene	Parameter	Gerste	Weizen	Gerste	Weizen	
	Variante	G-24-0,3 G-30-0,3 ⁺	W-18-0,3 W-30-0,3 ⁺	G-16-0,1 G-31-0,1	W-21-0,1 W-28-0,1	
	<i>angefeuchtet</i> Feuchtegehalt [%]	<i>nein;ja</i> 24; 30	<i>nein;ja</i> 18; 30	<i>nein</i> 16; 31	<i>nein</i> 21; 28	
Kleintechnischer Maßstab	Ernte- material	Rohnährstoffgehalte	x	x	x	x
		Keimbefall	x	x	x	x
	Silierglas	pH-Wert 3.Tag	x	x	x	x
		Gärqualität	x	x	x	x
		Keimbefall	x	x		
		Aerobe Stabilität	x	x	x	x
Siebung	Partikelgröße	x	x	x	x	
Material- prüf- maschine	Verdichtbarkeit	x	x	x	x	
Großtechnischer Maßstab	Folien- schlauch	Temperaturverlauf		<i>1)</i>	<i>1)</i>	<i>1)</i>
		- anaerob ¹⁾		x	x	x
		- aerob ¹⁾			x	x
		- Anschnittfläche		x	x	x
		Gärqualität		x	x	x
		Keimbefall		x	x	x
	Verdichtung					
Stechzylinder				x	x	
Penetrometer				x	x	

1) Bilanznetze

3.2 Funktionsweise des ‚Crimper-Bagger‘

Für die Versuche auf Praxisebene wurde in beiden Versuchsjahren Getreidequetschen mit integrierter Folienschlauchpresse (Crimper-Bagger, Abbildung 13) des Herstellers *Murska* (*Aimo Kortteen Konepaja, Ylivieska, Finnland*) verwendet, in 2005 der Typ 1400 S 2x2, in 2006 der Typ 2000 S 2x2, die sich nur in der Länge der Quetschwalzen unterschieden (70 bzw. 100 cm).

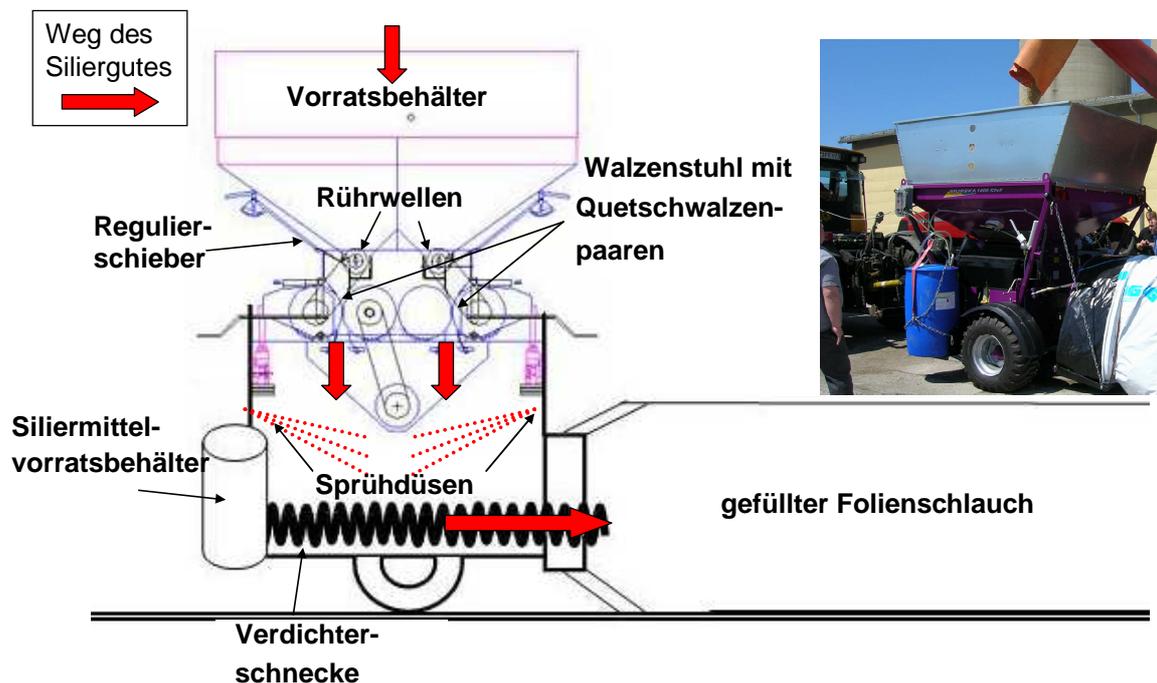


Abbildung 13: Schematische Darstellung des 'Crimper Bagger'

Für die Versuchszwecke wurde in die Maschinen im rückseitigen Bereich des Pressstunnels zwei Klappen im Kern- und Randbereich eingebaut, um nach einer Unterbrechung des Pressvorgangs das Schlauchinnere ohne eine Beschädigung des Folienschlauches zu erreichen. Auch sollte hierdurch die Durchführung der in Kap.3.3.3 beschriebenen Bilanznetzversuche ermöglicht werden.

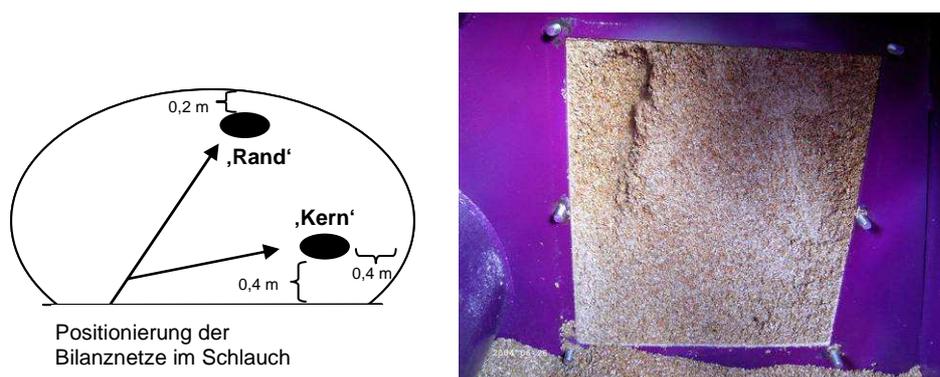


Abbildung 14: Positionierung der Bilanznetze im Folienschlauch.

Links: Skizze der Einlagepositionen der Bilanznetze.

Rechts: Foto von geöffneter Presstunnelklappe in Kernposition.

Die Überladung des geernteten Feuchtgetreides in den Vorratsbehälter erfolgt üblicherweise mit Front-, Rad- oder Teleskoplader bzw. direkt per Überladewagen. Für die Versuche mit Feuchtgetreide wurde eine Überladung mit einem Förderband gewählt, um eine Verunreinigung des Getreides auszuschließen.

Am Grund des aufgesetzten Vorratsbunkers befinden sich manuell in der Durchlassmenge variierbare Schieber zur Regulierung der Erntegutzufuhr zu den Quetschwalzenpaaren. Rührwellen sollen eine Stopfung des Materials in diesem Bereich verhindern. Beide verwendeten Maschinentypen verfügen über einen Doppelwalzenstuhl, der mit zwei Walzenquetschen mit einer Punktrillenstruktur an der Oberfläche ausgestattet ist. Der Antrieb der Walzen erfolgt über Zahnräder und Ketten wobei die Übersetzungsverhältnisse so gewählt sind, dass die Geschwindigkeit der äußeren Walzen gegenüber den inneren um 2,7 % erhöht ist (555 zu 540 U/min), wovon eine bessere Mahlwirkung sowie ein vibrationsärmerer Lauf der Quetsche ausgehen soll (AARNOS, 2006).

Als Sicherung gegen Fremdkörper im Erntegut dienen zwei Hydraulikzylinder. Durch manuellen Druckaufbau werden die äußeren Walzen in die Arbeitsposition gebracht. Bei Durchlauf eines harten Fremdkörpers können sie nach außen ausweichen. Der Abstand zwischen den Walzenquetschen und damit der Aufbereitungsgrad des Getreides kann manuell über Gewindestangen variiert werden. Der vom Hersteller empfohlene minimale Abstand wird mit 0,3 mm angegeben.

Das gequetschte Getreide kann nach dem Durchgang durch die Walzen optional mit einem Konservierungszusatz besprüht werden. Für die Versuche wurde ein Dosiergerät vom Typ *Silaspray-SP-comfort* (Fa. Sila) eingesetzt, das für die Dosierung von flüssigen

chemischen und biologischen Konservierungszusätzen geeignet ist. Die Dosierung des Zusatzes wird dabei manuell auf den stündlichen Durchsatz des Crimper-Baggers eingestellt. Dabei wird vorausgesetzt, dass dieser bekannt und gleichmäßig ist.

Durch die Walzenquetschen gelangen die Körner auf die Förder- und Verdichterschnecke, die dann das gequetschte Getreide längs zur Fahrtrichtung in den Tunnel mit dem umgebenden Folienschlauch befördert. Der Antrieb erfolgt direkt über die Gelenkwelle. Für die Versuche wurde dazu ein Schlepper mit 130 kW eingesetzt.

Füllung des Folienschlauches

Der gefaltete Folienschlauch besteht aus einer 200 µm dicken, dreischichtigen UV-stabilisierten Polyethylenfolie und besitzt im ungedehnten Zustand einen Durchmesser von 1,55 m (MEISE et al., 2006). Dieser wird auf den Tunnel gezogen. Bis zu einer maximalen Schlauchlänge von 60 m ist dies durch eine Person zu verrichten. Es ist dabei darauf zu achten, dass zur Verminderung einer Aufheizung der Folienschläuche die weiße Folienseite nach außen und die schwarze nach innen weist.

Vor Beginn des Pressvorganges wird der offene Folienschlauch mit einer Länge von etwa 2 – 3 m vom Tunnel gezogen und mit einem Seil zugebunden. Der verschlossene Schlauchanfang wird dann unter den Presstunnel gelegt. Das gequetschte Getreide fällt zunächst auf den Folienschlauchverschluss. Durch das Eigengewicht verbleibt dieser unter dem sich füllende Schlauch, sodass ein luftdichter Verschluss gewährleistet wird.

Die Maschine verfügt über ein eigenes Fahrwerk und wird über die Unterlenker des Schleppers fixiert und gezogen. Zum Erreichen eines Pressdruckes wird die Achse der Maschine gebremst, der Schlepper bleibt ungebremst und ohne eigenen Vortrieb. Durch die kontinuierliche Füllung des Schlauches durch die Förderschnecke bei gleichzeitiger Bremsung der Achse resultiert zum einen ein zunehmender Druck im Presstunnel, der zu einer Dehnung des Folienschlauches führt. Zum anderen wirkt der Druck auf die den Presstunnel nach vorne abschließende Tunnelwand in Fahrtrichtung des Gespanns.

Dieser Kraft entgegen wirkt der Rollwiderstand, der sich durch das Anbremsen der Achse des Crimper-Baggers variieren lässt. Hierfür kann der Druck der Bremshydraulik manuell bis zu 120 bar eingestellt werden. Je stärker die Achse angebremst wird, desto schwerer lässt sich die Maschine nach vorne schieben, woraus ein steigender Verdichtungsdruck im Presstunnel und im angeschlossenen Schlauch resultiert, vorausgesetzt der bereits gefüllte

Schlauch wird nicht verschoben. Um dies zu vermeiden, wird zu Beginn ein geringer Bremsdruck gewählt, der bei zunehmender Füllung des Folienschlauches auf den ‚Betriebsdruck‘ erhöht wird. Der Hersteller empfiehlt einen Bremsdruckbereich zwischen 50 - 60 bar. Der tatsächliche Pressdruck ist vom Maschinenbediener kontinuierlich zu kontrollieren. Als Orientierung dienen auf dem Folienschlauch in Querrichtung aufgedruckte, im ungedehnten Zustand 14 cm lange Dehnungsmessstreifen, deren Dehnung auf maximal 20 % begrenzt bleiben sollte, um ein Platzen zu vermeiden. Schon beim Auflegen des Schlauches ist darauf zu achten, dass sich die zwei Dehnmarkierungen jeweils im Schulterbereich des Schlauches, d.h. ca. 80 cm seitlich vom oberen Scheitelpunkt des Schlauches entfernt befinden.

Nach Beendigung des Pressvorganges wird vom Presstunnel wiederum 2 - 3 m Folienschlauch abgezogen und mit einem Seil zugebunden. Als Optimierung des Verschlusses wird vom Hersteller ein Klemmprofil angeboten, in dem die zwei Folienlagen zusammengelegt und mit einer Keder im Profil eingeklemmt werden. Anschließend kann ein Ventil in den Schlauch eingesetzt werden, durch welches anfänglich entstehende Gärgase entweichen können.

Abschließend ist eine gleichmäßige Beschwerung des Schlauchendes möglichst mit Sandsäcken o. ä. vorzunehmen, um durch Wind verursachte Pumpbewegungen zu vermeiden. Weiterhin wird der Folienschlauch zum Schutz vor Nagern und Vögeln und anderen Schadtieren vornehmlich auf einer befestigten Fläche abgelegt und vollständig mit Schutznetzen umgeben (Abbildung 15).



Abbildung 15: Abdichtung und Schutzmaßnahmen am Folienschlauch

Für den beschriebenen Verfahrensablauf sind zwei Arbeitskräfte erforderlich, wovon eine ausschließlich für die Bedienung des Crimper-Baggers und insbesondere die

Sicherstellung einer ordnungsgemäßen Füllung des Folienschlauches zuständig ist. Eine zweite Arbeitskraft ist für die Beschickung des Vorratsbunkers mit Erntegut notwendig.

3.3 Praxisversuche Folienschlauchverfahren

Die praktischen Versuche zur Einlagerung von Feuchtgetreide mit dem Folienschlauchverfahren wurden zur Ernte 2005 und 2006 durchgeführt. Im ersten Versuchsjahr wurde Weizen geerntet und zum Teil angefeuchtet und anschließend in zwei Feuchtestufen eingelagert. Im zweiten Jahr wurde sowohl Gerste als auch Weizen in zwei Feuchtestufen geerntet und eingelagert.

3.3.1 Versuchsaufbau 2005

Im ersten Versuchsjahr war eine Ernte von Getreide mit Feuchtegehalten von deutlich über 20 % aufgrund des fortgeschrittenen Reifegrades nicht möglich. Eine Anfeuchtung des Getreides für die Varianten mit hohem Feuchtegehalt war daher notwendig. Neben dem Einfluss des Feuchtegehaltes sollte der Effekt des Konservierungsmittelaufwandes auf die Gärqualität und Stabilität von Weizen im Folienschlauch untersucht werden.

Auf der Lehr- und Forschungsstation Frankenforst der Universität Bonn wurde Ende Juli 2005 an aufeinander folgenden Tagen Weizen (Sorte: Drifter) von einem Schlag mit einem Feuchtegehalt von etwa 20 % gedroschen. Die Hälfte des Erntegutes wurde in einem Vertikalfuttermischwagen angefeuchtet. Für die Anfeuchtung des Weizens wurden Chargen von etwa 4 t mit einem Förderband in einen Vertikalfuttermischwagen übergeladen. Die Ermittlung der aktuellen Feuchte erfolgte mit einem Schnelltester (*HE 50, Fa. Pfeuffer*), um die für eine Zielfeuchte von 30 % zu ergänzende Wassermenge zu ermitteln. Die Applikation des Wassers wurde mittels integrierter Wiegeeinrichtung des Futtermischwagens kontrolliert.

Nach einer Misch- und Einwirkungsdauer von zehn Minuten, wurde das angefeuchtete Getreide mittels Förderband in den Aufnahmebehälter des Crimper-Baggers verladen und jeweils ein Folienschlauch mit Weizen niedrigen Feuchtegehaltes und mit angefeuchtetem Weizen gefüllt (Abbildung 16).

Die Einstellung des Zerkleinerungsgrades muss allgemein bei jedem Erntegut in Abhängigkeit von Korngröße und Feuchtegehalt neu eingestellt werden. Es wurde unabhängig vom Feuchtegehalt ein Abstand der Walzenpaare von 0,3 mm gewählt. Mit Hilfe von Probennehmern, die auf beiden Seiten der Maschine im Bereich unterhalb der

Quetschwalzen und oberhalb der Förderschnecke eingebaut sind, konnten Proben des gequetschten Getreides entnommen werden, so dass sichergestellt wurde, dass nach dem Quetschvorgang keine Körner mit unbeschädigter Schale vorhanden waren.

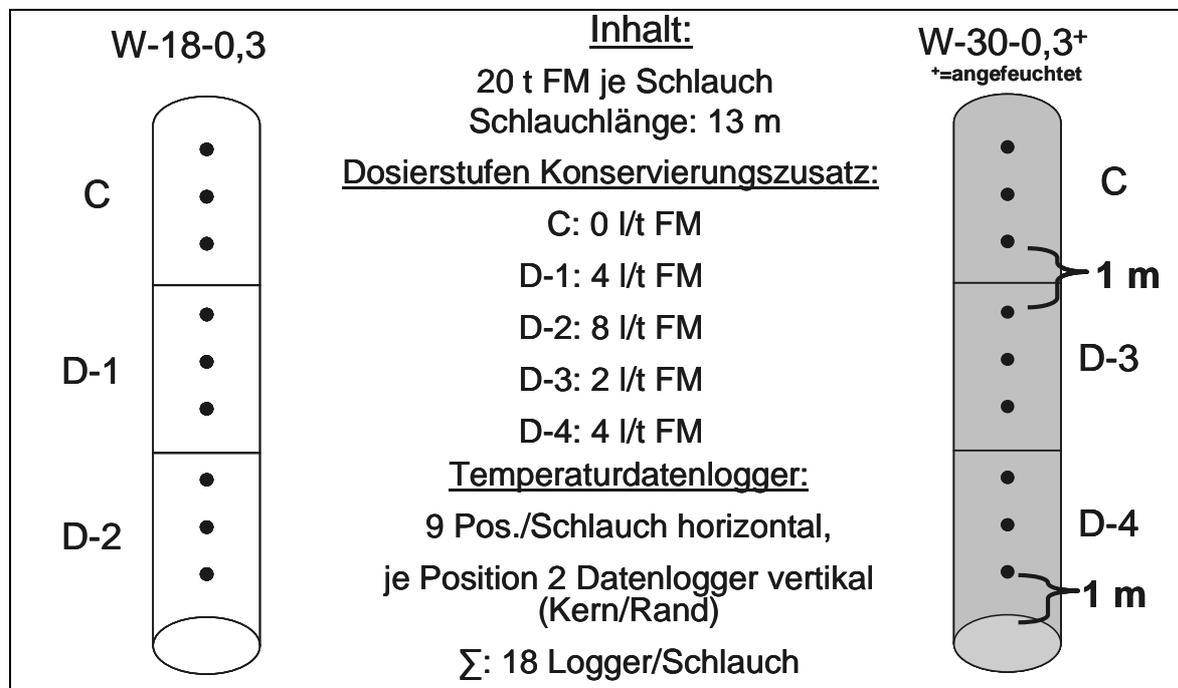


Abbildung 16: Versuchsaufbau des Folienschlauchversuches 2005 mit Weizen und Sensorpositionierung in der Draufsicht.

Die beiden Folienschläuche hatten jeweils eine Länge von 13 m, eine Höhe von etwa 1,10 m und eine Breite von etwa 2 m mit einer Gesamtmasse von etwa 20 t. Dabei entsprachen jeweils fünf Meter einer Applikationsstufe. Die ersten fünf Meter des Schlauches wurden als Kontrolle ohne Konservierungszusatz gelegt. Im zweiten und dritten Abschnitt des Schlauches mit angefeuchtetem Weizen wurde eine Zudosierung von zwei bzw. vier Liter Konservierungsmittel je Tonne Frischmasse vorgenommen.

Die Aufwandmengen der W-18-0,3-Varianten im zweiten Schlauch wurden auf 4 und 8 l/t FM verdoppelt, da aufgrund der geringeren Feuchtegehalte schlechtere Fermentations- und Lagerungsbedingungen gegenüber den angefeuchteten Varianten zu erwarten waren.

Mit einem Längsabstand von einem Meter wurden im Kern- und Randbereich ‚Bilanznetze‘ mit Temperaturloggern eingelegt, die zur Bestimmung der Qualität der anaeroben Lagerungsbedingungen alle nach 50 Tagen entfernt wurden (Kap.3.3.3).

3.3.2 Versuchsaufbau 2006

Der zweite Versuchsabschnitt stellte eine Erweiterung der Versuche des ersten Jahres dar. Es sollten Gerste wie auch Weizen in zwei Feuchtestufen in Folienschläuche eingelagert werden. Um die Effekte physiologisch bedingter Feuchteunterschiede ermitteln zu können, wurde angestrebt, sowohl Gerste als auch Weizen mit Feuchtegehalten von etwa 30 und 20 % zu ernten und in Folienschläuche einzulagern (Abbildung 17).

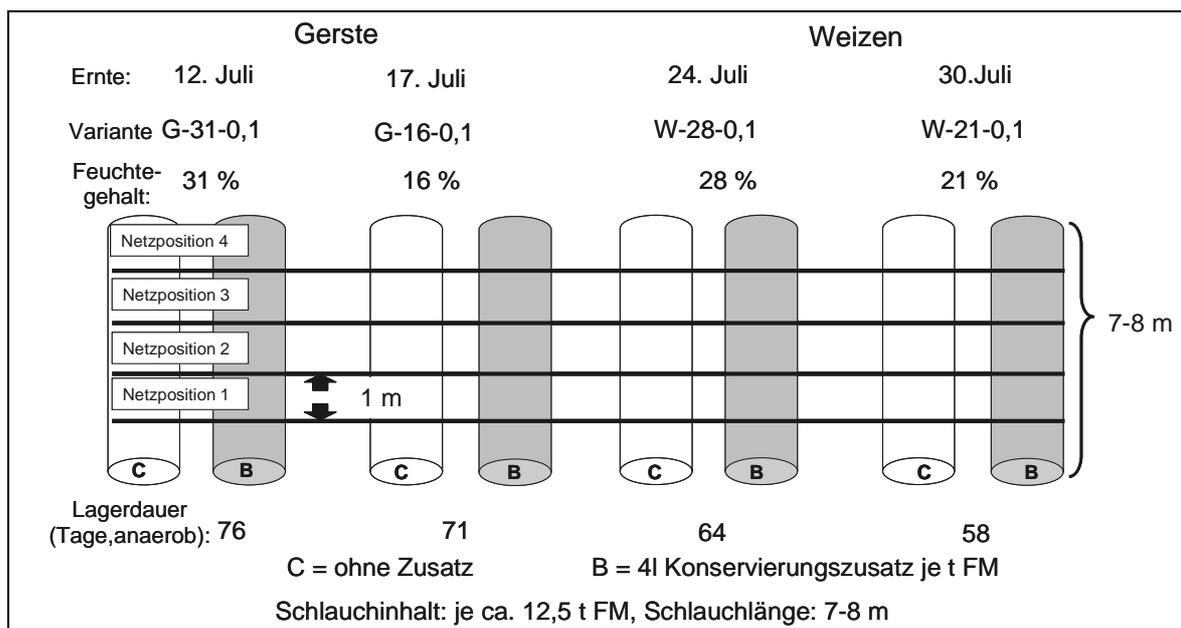


Abbildung 17: Versuchsaufbau des Folienschlauchversuches 2006 mit Gerste und Weizen.

Als Versuchsstandort wurde aus logistischen Gründen ein Betrieb in Bordelum (Nordfriesland) gewählt, da sowohl die erforderlichen Getreidearten zur Verfügung standen, als auch die spätere Verwertung aller Versuchsvarianten in einer Biogasanlage sichergestellt werden konnten.

Die Gerste (Sorte: Naomi) wurde am 12. Juli mit einem Feuchtegehalt von durchschnittlich 31 % geerntet. Nur fünf Tage später konnte die trockenere Variante mit einem Feuchtegehalt von nur etwa 16 % geerntet werden. Der Weizen (Sorte: Dekan) wurde mit Feuchtegehalten von 28 % am 24. Juli bzw. 21 % am 30. Juli geerntet, wobei für die trockenere Variante aufgrund zu weit fortgeschrittener Abreife ein zweiter Standort mit derselben Sorte gewählt werden musste.

Von jeder Feuchtestufe wurden zwei Folienschläuche mit einer Länge von etwa 8 m gelegt, wobei neben einer unbehandelten Kontrolle je ein Schlauch mit dem chemischen Konservierungszusatz in einer Aufwandmenge von 4 l/t FM behandelt wurde. Die gewählte Aufwandmenge resultierte aus den Ergebnissen des ersten Versuchsjahres.

Es wurden wie im ersten Versuchsjahr Bilanznetze mit einem Längsabstand von einem Meter im Kern- und Randbereich eingelegt. Im Gegensatz zum ersten Versuchsjahr wurden die Bilanznetze nach Öffnung der Schläuche erst zeitlich versetzt entnommen, um Aussagen zur aeroben Stabilität unter Praxisbedingungen treffen zu können. Die Entnahme erfolgte über einen Zeitraum von 18 Tagen, wobei ein wöchentlicher Vorschub von einem Meter verwirklicht wurde. Die Vorgehensweise in den Bilanznetzversuchen wird in Kap.3.3.3 näher beschrieben.

Ernte von Feuchtgetreide

Um die Einflüsse einer vorgezogenen Ernte auf technische Parameter zu untersuchen, wurde im zweiten Versuchsjahr in Zusammenarbeit mit dem Institut für landwirtschaftliche Verfahrenstechnik (ILV) der Universität Kiel in Schleswig-Holstein Feuchtgetreide mit einem Axialmähdröschler vom Typ John Deere CTS 9780 mit einer Schneidwerksbreite von 7,40 m gedroschen. Messungen des Kraftstoffverbrauchs und des Leistungsbedarfs am Strohhäcksler sollten Unterschiede zwischen Gerste und Weizen bei verschiedenen Feuchtegehalten aufzeigen. Die Erfassung der Messdaten erfolgte sekundlich an der Einspritzpumpe und der Antriebswelle des Strohhäckslers. Aus logistischen Gründen konnte von den Versuchsvarianten nur die feuchte Gerste (G-31-0,1) bezüglich der Mähdruschkenndaten untersucht werden. Es wurde jedoch zusätzlich Weizen gleicher Sorte (Dekan) mit einem mittleren Feuchtegehalt von 37,5 % (± 5 %) geerntet.

Als trockene Referenzvarianten dienten gleiche Sorten mit Feuchtegehalten von 10 % (Gerste) und 17 % (Weizen). Um einen Vergleich der Kraftstoffverbrauchs und des Leistungsbedarfs am Strohhäcksler zwischen den Varianten zu ermöglichen, wurden nur jene Daten verwendet, die in einem Fahrgeschwindigkeitsbereich zwischen 3,5 und 4,5 km/h bei gleichzeitigem Durchfluss von 8.000 bis 10.000 g FM/s erfasst wurden, was einem FM-Durchsatz von 29-36 t/h bei einer Flächenleistung von 2,9 bis 3,1 ha entspricht. Die effektiv zur Auswertung genutzten Flächen sind Tabelle 14 zu entnehmen.

Die weiteren Versuchsvarianten (G-16-0,1, W-28-0,1, W-21-0,1) wurden mit einem Mähdröschler mit konventionellen Schüttlersieben (New Holland TX 68) geerntet.



	Gerste		Weizen	
Feuchte[%]	31	10	38	17
Einzelmessungen [n]	800	885	420	1567
Fläche [ha]	0,6	0,7	0,3	1,3

Abbildung 18: Mähdrusch von Gerste (31 %) mit einem Axialmähdresscher (JD CTS 9780).

Tabelle 14: Erfassung von Mähdruschkennwerten in verschiedenen Getreidevarianten.

3.3.3 Bilanznetzversuche

Als primäre Untersuchungsmethode zur Beschreibung des Folienschlauchverfahrens hinsichtlich Futterqualitätsparameter wurde in beiden Versuchsjahren eine modifizierte „buried bag-Methode“ angewandt (WEBER, 2005). Zur Ermittlung von Gärqualität, Gärverlusten, Keimgehalten sowie des Temperaturverlaufs innerhalb der Schläuche während der anaeroben Lagerungsphase und nach Öffnung der Schläuche wurden Bilanznetze mit Temperaturloggern in die Folienschläuche eingelegt. Hierfür wurden Kunststoffsäcke (Gardinenstoff) mit den Maßen 250x370 mm und einer Maschenweite von 0,8 mm mit Feuchtgetreide gefüllt, das nach Unterbrechung des Quetschvorgangs über die Klappen im Presstunnel aus dem jeweiligen Schlauch entnommen wurde.

Zum Einlegen der Bilanznetze wurde die Maschine kurzzeitig gestoppt, das Feuchtgetreide für die Befüllung der Bilanznetze aus dem jeweiligen Schlauch über die Klappen im Presstunnel entnommen und der Pressvorgang erst nach dem Einlegen fortgesetzt. Mit dieser Vorgehensweise sollte sichergestellt werden, dass das Material in den Netzen identisch mit dem der jeweiligen Schlauchposition war. Die eingewogene Menge war dabei innerhalb der Wiederholungen der Varianten gleich, unterschied sich jedoch zwischen den Getreidevarianten, wie in Tabelle 15 dargestellt ist.

In die Netze wurden Datenlogger (*Typ Testo-175-T1, Fa. Testo*) eingelegt, die die Temperatur stündlich erfassten und abspeicherten. Anschließend wurden die Netze mit Kabelbindern verschlossen, gewogen und im Folienschlauch an den in Abbildung 14, Abbildung 16 (S.50) bzw. Abbildung 17 (S.51) beschriebenen Positionen eingelegt.

Tabelle 15: Übersicht Bilanznetzversuche

Versuchsjahr	Getreidevariante (Feuchtegehalt, Walzenabstand)	Konservierungsmittel [l/t FM]	Einwaage [g FM]
2005	W-30 ⁺ -0,3 (angefeuchtet)	chemisch: 0; 2; 4	2500
	W-18-0,3	chemisch: 0; 4; 8	2500
2006	W-28-0,1	chemisch: 0; 4	2000
	W-21-0,1	chemisch: 0; 4	2000
	G-31-0,1	chemisch: 0; 4	2000
	G-16-0,1	chemisch: 0; 4	1710

Es wurden jeweils zwei Netze in drei Wiederholungen (1. Versuchsjahr) bzw. vier Wiederholungen (2. Versuchsjahr) pro Behandlungsstufe in einem Längsabstand von je einem Meter über Klappen im Tunnel positioniert.

Im ersten Versuchsjahr fand nach einer Lagerdauer von 50 Tagen die Entnahme aller Bilanznetze statt, um den Einfluss von Feuchtegehalt und Konservierungszusatz auf die anaerobe Lagerung untersuchen zu können. Nach einer Rückwaage wurden von jedem Beutelinhalt Proben gezogen und für die spätere Analyse der Gärqualitätsparameter eingefroren. Zur Analyse der Keimgehalte wurde aus den drei Kern- und Randproben jeder Variante eine Mischprobe zusammengestellt. Diese wurden unverzüglich gekühlt und zur sofortigen Analyse an eine LUFA verbracht.

Für die Untersuchung der aeroben Stabilität des im Folienschlauch gelagerten Weizens wurden aus jedem Beutelinhalt Proben entnommen und analog zu den Silierglasversuchen im Klimaschrank eingelagert.

Im zweiten Versuchsjahr sollte durch die Bilanznetzversuche neben den beschriebenen Untersuchungszielen auch die aerobe Stabilität des konservierten Getreides nach Schlauchöffnung untersucht werden. Um vergleichbare Witterungsbedingungen vorauszusetzen, erfolgte die Öffnung aller Folienschläuche Ende September nach einer variantenabhängigen Lagerdauer von 58-76 Tagen.

Die Entnahme der Bilanznetze der Positionen 1 und 2 erfolgte 4 Tage nach Schlauchöffnung (Abbildung 17, S.51). Hierdurch sollte ein Lufteinfluss auf verschiedene Positionen im Folienschlauch nach Öffnung ermittelt werden.

Die Netze der Positionen 3 und 4 wurden bei einem Entnahmevorschub von etwa 1 m/Woche am 11. bzw. 18. Tag nach Schlauchöffnung entnommen.

Die Gehalte an Hefen und Schimmelpilzen wurde aus jedem Bilanznetz bestimmt. Für die Positionen 3 und 4 wurden jeweils zwei zusätzliche Proben aus der unmittelbaren Netzumgebung entnommen.

Die Gärproduktgehalte wurden für jeden Kern- und Randbereich der Positionen 3 und 4 zweifach bestimmt, jeweils aus den Netzen und deren unmittelbarer Umgebung.

Entnahmetechnik

Während im ersten Versuchsabschnitt alle Bilanznetze zeitgleich entnommen wurden, erfolgte die Entnahme im zweiten Versuchsjahr über mehrere Wochen. Zur Minderung des Lufteinflusses wurde eine möglichst senkrechte und ebene Anschnittfläche bereitet. Beim Feuchtgetreide konnte eine grobe Entnahme bei allen Varianten mit einem Siloblockschneider erfolgen. Bei Bedarf erfolgte eine manuelle Nachbereitung. Der Vorschub betrug nach 4 Tagen etwa 2,5 m, in den anschließenden 14 Tagen etwa 1 m pro Woche, wobei alle 2-3 Tage jeweils etwa 30 cm abgeschnitten wurden. Zur Verladung und auch zur direkten Entnahme aus dem Schlauch wurde ein Hoflader eingesetzt (Abbildung 19).



Abbildung 19: Entnahme von Feuchtgetreide aus dem Folienschlauch mit Siloblockschneider (links), manuell (mitte) und mit einem Hoflader (rechts).

3.3.4 Bestimmung der aeroben Stabilität im Folienschlauch

Die aerobe Stabilität von Feuchtgetreide wurden vorrangig im zweiten Versuchsjahr mittels der in den Bilanznetzen eingebrachten Temperaturdatenlogger ermittelt. Ergänzt wurden diese Daten durch verschiedene Temperaturmessungen an der Anschnittfläche.

Temperaturerfassung mittels Datenlogger

Durch eine kontinuierliche stündliche Erfassung der Temperatur im Kern- und Randbereich der Folienschläuche mit Hilfe von Temperaturdatenloggern in den Bilanznetzen, konnten in beiden Versuchsabschnitten Temperaturverlaufskurven vom Zeitpunkt der Einlagerung bis zur Entnahme der Bilanznetze erstellt werden.

Im ersten Versuchsjahr konnte aufgrund der gleichzeitigen Entnahme aller Bilanznetze am Tag der Schlauchöffnung auf diese Weise nur die anaerobe Lagerungsphase der verschiedenen Behandlungsstufen untersucht werden. In die unbehandelten Schlauchenden der beiden Folienschläuche, die durch die Entnahme mit dem Siloblockschneider eine ebene Anschnittfläche aufwiesen, wurden mit einem Bohrstock in einer Tiefe von 15 cm Temperaturdatenlogger in dreifacher Wiederholung im Kern- und Randbereich eingelegt. Dadurch konnte der Temperaturverlauf der folgenden 10 Tage erfasst werden.

Im zweiten Versuchsjahr wurde nach der anaeroben Lagerung auch die Auslagerungsphase aller Varianten über 18 Tage erfasst. Zur Bestimmung des Umgebungstemperatureinflusses wurde die Temperatur durch Datenlogger aufgezeichnet, die von Beginn der anaeroben Lagerungsphase bis zur Entnahme der letzten Bilanznetze auf vier Folienschläuchen mit der jeweiligen behandelten Getreidevariante platziert waren. Dadurch wurden Temperaturschwankungen und Extremwerte direkt über der Folie erfasst.

Temperaturerfassung mittels Stabthermometer

Im zweiten Versuchsjahr wurde die Temperatur an der Anschnittfläche während der Auslagerungsphase zweitäglich mit einem Stabthermometer (*Voltcraft 302 K/J*) in dreifacher Wiederholung im Kern- und Randbereich erfasst. Die Messpunkte befanden sich 10 cm unterhalb des oberen Randes, sowie in der Schlauchmitte 50 cm oberhalb des Bodens in einer Tiefe von 12,5 cm (Abbildung 20).

Temperaturerfassung mittels Thermografiekamera

Zur Ergänzung der beschriebenen Temperaturmessungen kam im zweiten Versuchsjahr eine Thermografiekamera (*Typ Varioscan, Fa. Jenoptik*) zum Einsatz. Es wurden Bilder der Anschnittfläche der acht Getreideschläuche nach Entnahme der letzten Bilanznetze (Pos.4) 19 Tage nach Schlauchöffnung erstellt (Abbildung 20).



Abbildung 20: Messungen der Temperatur an der Anschnittfläche mit Stabthermometer (links) und Thermografiekamera (rechts).

3.3.5 Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Lagerungsdichte

Der Lagerungsdichte von konserviertem Futter wird insbesondere in Bezug auf die Qualitätserhaltung unter aeroben Verhältnissen allgemein eine große Bedeutung zugeschrieben. Deren Bestimmung im Folienschlauch ist aufgrund der Schlauchgeometrie schwierig. In Vorversuchen mit in Folienschläuchen eingelagertem Körnermais, der bei einer Feuchte von 33 % und einem Walzenabstand von 0,4 mm gequetscht wurde (MAACK, 2006), wurden zunächst verschiedene Methoden zur Ermittlung bzw. Beschreibung der Lagerungsdichte untersucht:

Untersuchungen zur Lagerungsdichte im Folienschlauch mit

- Bohrstock (*Fa. Pioneer*)
- Bodenstechzylinder (100 cm³)
- Penetrometer

Vorversuche zur Lagerungsdichte mit einem Bohrstock

Der Bohrstock zur Dichtemessung in Gras- und Maissilagen wurde von *Fa. Pioneer* entwickelt. Er hat eine Länge von 532 mm bei einem Durchmesser von 46 mm an der Schneidklinge. Die Methode beruht auf der Entnahme eines Bohrkernes mit definiertem Volumen (892 cm³) aus dem Silo und anschließender Bestimmung der Frisch- und Trockenmassedichte (KLEINMANS et al., 2005).

Vorversuche zur Lagerungsdichte mit Bodenstechzylindern

Stechzylinder werden zur Entnahme von Bodenproben eines definierten Volumens eingesetzt. Deren Eignung für die Bestimmung der Lagerungsdichte an verschiedenen Positionen im Folienschlauch wurde an der Anschnittfläche von Folienschläuchen mit gequetschtem Körnermais ermittelt. Dazu wurden Stechzylinder mit einem Volumen von 100 cm^3 (Höhe 39 mm, Durchmesser 57 mm) an 20 Positionen der ebenen Anschnittfläche des Folienschlauches eingebracht. Anschließend wurde der gesamte Zylinder samt dem umliegenden Material entnommen und die überstehende Silage an beiden Enden mit einem scharfen Messer abgetrennt. Um Austrocknungs- und Atmungsverluste zu verhindern, wurden die Proben in Gefriertüten verpackt und in Kühltaschen transportiert. Anschließend wurden sie gewogen und bei 105°C getrocknet. Durch das definierte Volumen und die Wiegeung des Zylinderinhaltes konnten sowohl Frisch- als auch Trockenmassedichte bestimmt werden. Zur Bestimmung der Entnahmeposition diente eine Stahlmatte als Raster vor dem senkrechten Anschnitt.

Vorversuche mit einem Penetrometer

Eine weitere Messmethode zur Bewertung der Lagerungsdichte von Feuchtgetreide und Feuchtmais im Folienschlauch sollte mit einem Bodenpenetrometer (*Penetrologger, Typ 6.15, Fa. Eijkelkamp*) erprobt werden. Dieses Gerät wurde für die Untersuchung von Bodenverdichtungen in Ackerböden entwickelt.

Die Eignung eines Penetrometers zur Beschreibung der Verdichtung im Folienschlauch auf der Basis der Erfassung des Eindringwiderstandes wurde zunächst im verdichteten Feuchtmais ermittelt. Ziel war es, durch den Eindringwiderstand Rückschlüsse auf die Lagerungsdichte des Siliergutes zu ziehen.

Das Gerät war mit einer 80 cm-Messlanze und einem Konus mit einer Fläche von $1,3 \text{ cm}^2$ (Durchmesser 1,29 cm, Länge 2,5 cm, Winkel 30°) ausgestattet. Die Penetrometerspitze wird durch manuellen Druck senkrecht in die Silage getrieben. Über ein Ultraschallsignal erfolgt die Messung der Eindringtiefe und -geschwindigkeit. Dabei wird der Verlauf des Eindringwiderstandes wegabhängig alle 10 mm aufgezeichnet. Der Penetrologger wurde im gequetschten Körnermais in vertikaler Richtung mit Einstichabständen von 20 cm in mehrfacher Wiederholung eingesetzt. Die Einstiche wurden jeweils am Scheitelpunkt des Schlauches durch die unbeschädigte Folie hindurch vorgenommen (Abbildung 21).



Abbildung 21: Untersuchungen zur Lagerungsdichte mit einem Penetrometer in vertikaler Einstichrichtung in Feuchtgetreide und -mais.

3.3.5.1 Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Lagerungsdichte im Feuchtgetreide
Die für den Einsatz in Grundfuttersilagen geeignete Bohrstockmethode stellte sich nach Vorversuchen im Feuchtgetreide und -mais als ungeeignet heraus. Die Vorversuche mit Stechzylindern und Penetrometer erwiesen sich dagegen als erfolgreich, sodass diese Methoden im zweiten Versuchsjahr vorrangig eingesetzt wurden.

Stechzylinder

Nach erfolgreichen Vorversuchen wurden Stechzylinder zur Bestimmung der Lagerungsdichte eingesetzt. Zur Reduzierung des Messfehlers wurde allerdings im zweiten Versuchsjahr ein Stechzylinder mit einem größeren Volumen von 1570 cm^3 (Höhe 200 mm, Durchmesser 100 mm) konstruiert. Die Bohrproben wurden an 10 (8 bei Gerste 16 %) Positionen der Anschnittflächen aller Folienschläuchen in mehrfacher Wiederholung entnommen und gewogen (Abbildung 22). Anschließend erfolgte für jede Substratprobe eine Bestimmung der Trockenmasse.

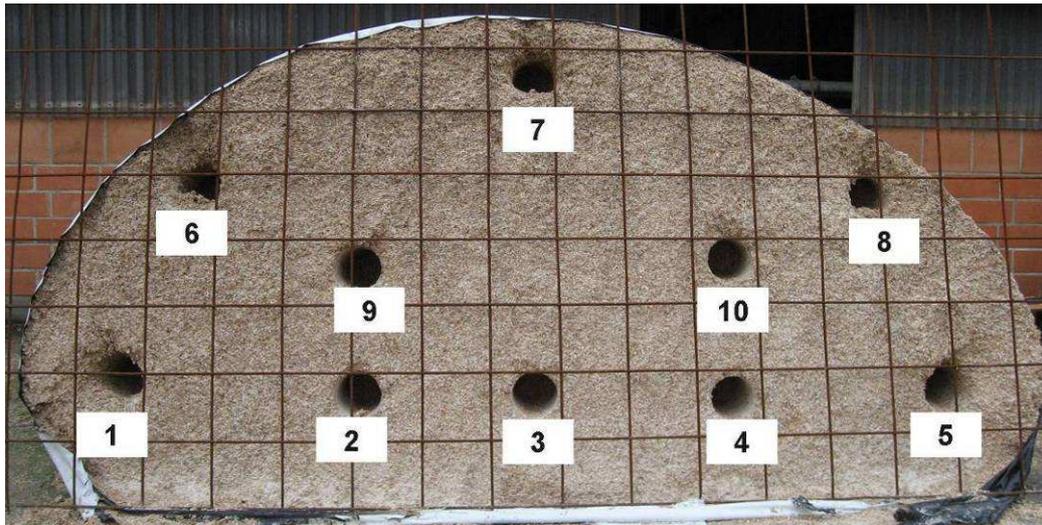


Abbildung 22: Ermittlung der Lagerungsdichte in Folienschläuchen mit Feuchtgetreide durch einen Stechzylinder.

Penetrometer

Nach erfolgreichen Vorversuchen im Feuchtmais wurde außerdem das Penetrometer (*Penetrologger, Typ 6.15, Fa. Eijkelkamp*) zur Bewertung der Lagerungsdichte von Feuchtgetreide im Folienschlauch genutzt. Der Penetrologger wurde in allen Schläuchen des zweiten Versuchsjahres in vertikaler Richtung mit Einstichabständen von 20 cm in mehrfacher Wiederholung eingesetzt. Um einen Vergleich der Daten mit den aus den Stechzylinderproben des Feuchtgetreides ermittelten Werten zu ermöglichen, wurden die Einstiche jeweils mittig von oben hinter dem Bereich der Stechzylinderproben durch die unbeschädigte Folie hindurch vorgenommen, so dass der Bereich der Stechzylinderprobenposition 3 und 7 (Abbildung 22) miterfasst wurde.

Schlauchvermessung

Die Schlauchvermessung der Folienschläuche des zweiten Versuchsjahres erfolgte durch digitale Bildauswertung mit dem Programm *DatInf®Measure (Version 2.0)*. Dieses wurde zur Bestimmung von Schlauchumfang, -breite, -höhe und Anschnittfläche genutzt. Zur Bestimmung des Maßstabes diente eine Stahlgittermatte mit einer gleichmäßigen Maschenweite von 15 cm, die senkrecht vor der Anschnittfläche positioniert wurde.

3.4 Versuche im kleintechnischen Maßstab

Alle beschriebenen Feuchtgetreidevarianten wurden in beiden Versuchsjahren unter standardisierten Bedingungen Untersuchungen im kleintechnischen Maßstab unterzogen.

Die Untersuchungen des Ausgangsmaterials, die Versuche mit Siliergläsern, zur Partikelgrößenbestimmung und zur Verdichtbarkeit werden im Folgenden erläutert.

3.4.1 Silierglasversuche

Silierglasversuche ermöglichen eine Untersuchung von Futterqualitätsparametern unter standardisierten Bedingungen. Dadurch können die Ansäuerungsgeschwindigkeit, die Gärqualität, sowie Keimgehalte und die aerobe Stabilität der verschiedenen Varianten ermittelt und mit einander verglichen werden.

Versuchsaufbau

Um die Varianten in standardisierter Form zu untersuchen, wurden nach Vorgabe der DLG (2000) Versuchsreihen in Kleinsilos (1,5 l Glas) angelegt. Das dafür verwendete Material wurde analog der bereits beschriebenen Methode zur Befüllung der Bilanznetze zum Zeitpunkt der Einlagerung aus den Schläuchen entnommen. Dadurch sollte parallel zu den Praxisversuchen die in Tabelle 16 aufgeführten Parameter untersucht werden.

Im ersten Versuchsjahr wurden Anfang Juli 2005 zunächst 3 t Gerste geerntet. Die gesamte Erntemenge wurde mit dem Crimper-Bagger gequetscht, aber nicht in einen Folienschlauch gepresst. Anschließend wurde eine Teilmenge von etwa 100 kg entnommen und der aktuelle Feuchtegehalt des Materials bestimmt. Die Anfeuchtung und Konservierungsmittelapplikation erfolgte mittels Kompressor und Zerstäuber in einem Mischer nach zehnminütiger Homogenisierung.

Die Vorgehensweise für den Weizen im ersten Versuchsjahr war ähnlich. Hier wurde parallel zum Praxisversuch mit der Schlauchpresse Material aus den entsprechenden Abschnitten beim Einlegen der Bilanznetze entnommen. Sowohl für Gerste als auch für Weizen wurden je Feuchtigkeitsstufe vier Behandlungsstufen mit 0, 2, 4 und 6 l/t FM angesetzt. Um die zusätzlichen Applikationsstufen im Weizen erstellen zu können, wurde unbehandeltes, gequetschtes Getreide aus dem jeweiligen Folienschlauch entnommen. Es wurden drei Versuchsreihen in handelsüblichen 1,5 l Glasgefäßen mit je drei Wiederholungen für die Untersuchungsziele pH-Wert-Absenkung nach drei Tagen, Gärqualität nach 90 Tagen und aerobe Stabilität nach 49 Tagen mit Luftstress an Tag 28 und 42 angesetzt (Tabelle 16). Die Vorgehensweise entsprach dabei dem DLG-Prüfschema (DLG 2000).

Tabelle 16: Übersicht Silierglasversuche (⁺=angefeuchtet).

Übersicht Silierglasversuche				
- Untersuchungsziele, Lagerdauer, Konservierungsmittelaufwandmengen (l/t FM) -				
J a h r	Untersuchungs- ziel	ASTA (aerobe Stabilität) (24 h Luftstress Tag 28+42)	pH 3.Tag	Gärqualität, ASTA
	Lagerdauer <i>n</i>	49 3	3 3	90 3
	Variante	Konservierungsmittelaufwand (l/t FM)		
2 0 0 5	G-30-0,3 ⁺ G-24-0,3 ----- W-30-0,3 ⁺ W-18-0,3	0, 2, 4, 6	0, 2, 4, 6	0, 2, 4, 6

Untersuchungs- ziel		ASTA (aerobe Stabilität) (24 h Luftstress Tag 28+42)	pH 3. Tag, Gärqualität	Gärqualität, ASTA		
Lagerdauer <i>n</i>	49 4	3 3	30 3	90 3	180 3	
Variante		Konservierungsmittelaufwand (l/t FM)				
2 0 0 6	G-31-0,1 G-16-0,1 ----- W-28-0,1 W-21-0,1	0, 2, 4	0, 4	0, 4		

Im zweiten Versuchsjahr wurde das Material zur Untersuchung im Labor ebenfalls aus den Folienschläuchen während der Einlagerung entnommen. Die Aufwandmenge des Konservierungszusatzes entsprach somit der in den Schläuchen (4 l/t FM). Aufgrund der Ergebnisse des ersten Versuchsjahres erschien eine weitere Differenzierung der Aufwandmengen nicht notwendig. Lediglich für die Untersuchung der aeroben Stabilität nach 49 Tagen wurde auch eine Messreihe mit einem Konservierungsmittelzusatz von 2l/t FM angesetzt. Hierfür wurde nach Anlegung der jeweiligen Folienschläuche mit dem Crimper-Bagger eine Menge von etwa 200 kg FM bei Dosierung von 2 l/t FM gequetscht.

In den Versuchreihen für ‚pH-Wert-3.Tag‘ und ‚Gärqualität‘ wurden die Gläser zu etwa 90 % gefüllt und das Getreide manuell verdichtet. Für die Reihe ‚aerobe Stabilität‘ blieb das Getreide unverdichtet bei einer Frischmassedichte, die 2/3 der Lagerungsdichte der übrigen Messreihen entsprach. Alle Gläser wurden luftdicht verschlossen und bei 25°C im Klimaschrank eingelagert (Abbildung 23).



Abbildung 23: Standardisierte Untersuchungen im kleintechnischen Maßstab.

links: Lagerung von Siliergläsern mit Feuchtgetreide im Klimaschrank bei 25°C,
rechts: Erfassung der Nacherwärmung in wärmeisolierten Gefäßen.

Zusätzlich zu dieser standardisierten Methode, wurde auch das Material aus den Siliergläsern mit dem Untersuchungsziel Gärqualität nach 90 Tagen Lagerdauer und das Material aus den Bilanznetzen der Folienschläuche des ersten Versuchsjahres nach 50 Tagen Lagerung aerob im Klimaschrank gelagert und die Temperatur aufgezeichnet.

Aerobe Stabilität

Der Temperaturverlauf unter aeroben Bedingungen im Klimaschrank wurde mit Temperaturdatenloggern (*Tinytalk, Fa. Gemini Data Loggers*) ermittelt. Dazu wurde ein Teil des Probenmaterials nach Ende der anaeroben Lagerungsphase in 800 ml Gefäße umgelagert. Die Frischmasseeinwaage betrug variantenabhängig 400 bis 500 g und blieb unverdichtet. Der Datenlogger wurde mittig im Gefäß positioniert. Um Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Gefäßen zu vermeiden und eine vollständige Intensität der Nacherwärmung zu erfassen wurden die Gefäße in wärmeisolierte Boxen aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum eingesetzt und im Klimaschrank bei 25°C gelagert (Abbildung 23). Die relative Luftfeuchte wurde aufgrund gleichzeitiger Untersuchung verschiedener Feuchtevarianten nicht reguliert. Die Messdauer betrug mindestens 10 Tage. Die Notwendigkeit der Wärmedämmung wird von REED et al. (2007) in vergleichbaren Versuchen mit Körnermais beschrieben. Eine fehlende Wärmedämmung führt zu deutlich verringertem Temperaturanstieg und Feuchteverlusten.

In Anlehnung an die Empfehlungen von DLG (2000), PAHLOW (2004), sowie ADESOGAN et al. (2003) wurde die kritische Temperatur für den Beginn des aeroben Verderbs mit einer Überschreitung der Umgebungstemperatur um 2 K definiert.

3.4.2 Analytik

Die Analysen zur Bestimmung von Gärprodukt- und Keimgehalten wurden nach Methoden der VDLUFA an den Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten (LUFA) Münster, Oldenburg und Kiel durchgeführt.

Charakterisierung von Ausgangsmaterial, Gärqualität und Keimgehalten

Zur Analyse des Feuchtgetreideerntematerials hinsichtlich Trockensubstanz, Rohnährstoffen, Pufferkapazität und Keimgehalten wurden während des Mähdrusches aus dem Korntank des Mähdreschers mehrere Stichproben entnommen. Diese wurden gekühlt und unverzüglich an einer LUFA auf ihren Gehalt an Hefen und Schimmelpilzen untersucht. Als Richtwerte für einen erhöhten Keimbesatz wurden für Schimmelpilze Werte größer 10^4 KBE/ g FM und für Hefen Werte größer 10^5 KBE/ g FM definiert. Dies wurde für das Erntematerial beider Jahre, sowie in den Schlauchversuchen beider Jahre durchgeführt. Auf Ebene der Siliergläser wurden die Keimgehalte nur im ersten Versuchsjahr in der Messreihe zur Bestimmung der aeroben Stabilität bestimmt (0). Weiterhin wurde der Besatz an Milchsäurebakterien auf dem Ausgangsmaterial ermittelt (VDLUFA, 1997, *Kap. 28.1.1. bis 28.1.4.*).

Proben des Erntematerials, aus den Siliergläsern, sowie aus den entnommenen Bilanznetzen nach deren Entnahme wurden zunächst bei -18°C eingelagert und anschließend zur Bestimmung der Gehalte an Rohnährstoffen, der pH-Werte und der Pufferkapazität am Institut für Tierernährung der Universität Bonn analysiert.

Als Gärprodukte wurden die Gehalte an Milch-, Essig-, Propion- und Buttersäure gaschromatografisch, sowie Ethanol enzymatisch (Hausmethoden LUFA Oldenburg) und weiterhin Ammoniumstickstoff elektrometrisch bestimmt (VDLUFA, 1995, *Kap. 3.2.6.*). Bestimmungen des pH-Wertes und der Trockenmasse gingen einher (VDLUFA, 1976, *Kap. 18.1 und 3.1.*).

Korrigierte Trockenmasse- und Verlustbestimmung

Als Trockenmasse (TM) oder Trockensubstanz gilt in der Futtermittelanalyse der Rückstand, der nach Trocknen einer Probe im Trockenschrank bei 105°C zurückbleibt. Dabei ist für lufttrockene Futtermittel eine Trocknungsdauer von 3 Stunden konventionell festgelegt, und für wasserreiche Futtermittel wird ein Trocknen bis zur Massekonstanz empfohlen. In der Untersuchungspraxis werden Silage- und Grünfutterproben meist bei 60 bis 65°C vorgetrocknet und anschließend 3 Stunden bei 105°C zu Ende getrocknet. Bei

dieser Prozedur verdampft aber nicht nur Wasser, sondern es verflüchtigen sich auch einige organische Verbindungen, wie niedere Fettsäuren, Alkohole und Ammoniumsalze.

Um Trockenmasse und Futterwert korrekt zu bestimmen, erfolgte eine Korrektur nach WEIBBACH UND KUHLA (1995). Die in den Korrekturgleichungen verwendeten Analyse-daten sind in Prozent der Frischmasse angegeben.

TM_k = korrigierter TM-Gehalt

TM_n = nicht korrigierter TM-Gehalt

FFS = Summe der Gehalte an flüchtigen Fettsäuren (C₂-C₆)

MS = Gehalt an Milchsäure

A = Summe der Gehalte an einwertigen Alkoholen (C₂-C₆)

Als Verlust gilt der mit pH-abhängigen Flüchtigkeitsfaktoren multiplizierte Gehalt an Gärprodukten in der Silage.

Korrekturgleichungen:

pH 4,01-4,5: $TM_k = TM_n + 0,80 * FFS + 0,08 MS + A + 0,32 * NH_3$

pH 4,51-5,0: $TM_k = TM_n + 0,68 * FFS + 0,08 MS + A + 0,48 * NH_3$

pH 5,01-5,5: $TM_k = TM_n + 0,58 * FFS + 0,08 MS + A + 0,64 * NH_3$

pH > 5,5 : $TM_k = TM_n + 0,50 * FFS + 0,08 MS + A + 0,80 * NH_3$

Anschließend wurde eine Bestimmung der Trockenmasseverluste nach WEIBBACH (1998) sowohl für die Siliergläser als auch für die Netze vorgenommen.

$$TM - Verlust[\%] = 100 \cdot \frac{(TM - Einwaage[g]) - (TM - Auswaage[g])}{(TM - Einwaage[g])}$$

Die Bestimmung der Gärverluste (GV) wurde in Anlehnung an WEIBBACH (1998) ohne Korrektur für eine CO₂-Bindung im Substrat vorgenommen, da diese sich nur auf Untersuchungen an Grundfuttersilagen bezieht.

$$GV[\%] = 100 \cdot \frac{MD[g]}{TM - Einwaage[g]} + \text{Korrekturglied}(2,5)$$

3.4.3 Partikelgrößenfraktionierung

Die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung erfolgte in einem Siebturm mit Rundlöchern in sechs Stufen ($x < 2$ mm, $2 \leq x < 3$ mm, $3 \text{ mm} \leq x < 4$ mm, $4 \text{ mm} \leq x < 5$ mm, $5 \text{ mm} \leq x < 6$ mm, ≥ 6 mm, Abbildung 24). Es wurde in vierfacher Wiederholung Material aus dem Folienschlauch entnommen, bei 105°C getrocknet und anschließend 200 g mit einer Laufzeit von 3 Minuten bei horizontaler Bewegung und einer Frequenz von 2,5 Hz

gesiebt. Eine Rückwaage der Einzelfractionen ermöglichte die Berechnung der Massenanteile.



Abbildung 24: Siebfraktionierung mittels Siebturm (Aufbau links) in 6 Stufen (rechts).

3.4.4 Bestimmung der Verdichtbarkeit

Um die Verdichtbarkeit von gequetschtem Feuchtgetreide zu untersuchen, wurden im kleintechnischen Maßstab Versuche mit einer Materialprüfmaschine durchgeführt. Die Vorgehensweise entspricht dabei der von WAGNER et al. (2004) und LEURS (2006) beschriebenen Methode der Verdichtbarkeitsprüfung von Maissilage. In einem Kunststoffzylinder mit einem Innendurchmesser von 130 mm und einer Höhe von 300 mm wurden Proben des frisch gequetschten Getreides lose eingeschüttet. Um eine reibungslose und zentrale senkrechte Führung des Pressstempels zu gewährleisten, wurde der Zylinder nur bis zu einer Füllhöhe von 295 mm ($=550 \text{ cm}^3$) aufgefüllt. Die Einwaage war abhängig von der Getreidevariante in den sechs Wiederholungen konstant.

Die Kraft zur Verdichtung des Materials wird über einen Kraftaufnehmer kontinuierlich gemessen und über den Weg aufgezeichnet. Bezogen auf die Stempelfläche kann diese auf den jeweiligen Druck umgerechnet werden. Die Ergebnisse werden in Druck-Dichte-Diagrammen wiedergegeben und können für eine vergleichende Charakterisierung der verschiedenen Getreidevarianten genutzt werden. Der Maximaldruck bei einer Kraft von 4800 N betrug bei den Varianten des ersten Versuchsjahres 0,38 MPa. Die Messung der Rückfederung erfolgte durch Ablesen des Füllstandes an einem integrierten Maßstab nach einer Wartezeit von einer Minute. Anschließend wurden diese Varianten ein zweites Mal verdichtet. Aufgrund der Ergebnisse des ersten Versuchsjahres wurde der Maximaldruck im zweiten Versuchsjahr auf 0,2 MPa beschränkt und auch auf eine wiederholte Verdichtung verzichtet.



Abbildung 25: Untersuchung der Verdichtbarkeit von Feuchtgetreide in der Materialprüfmaschine. Links: vor Verdichtung von gequetschtem Feuchtmais, rechts: nach einmaliger Verdichtung.

3.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe der Software SPSS (Version 14.0.1). Die Überprüfung der Normalverteilung der Daten erfolgte mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test. Bei Normalverteilung wurde für den Vergleich zweier Mittelwerte (Keimgehalte in Abhängigkeit von Variante, Entnahmeposition (Kern/Rand) und Behandlung in den Schläuchen 2006) der t-Test nach Student durchgeführt, andernfalls der U-Test nach Mann und Whitney. Für den Vergleich der Keimgehalte zu unterschiedlichen Entnahmezeitpunkten (Schläuche 2006, Position 2-4) wurde der Friedman-Test für abhängige Stichproben eingesetzt. Für multiple einfaktorielle Mittelwertvergleiche wurde eine Varianzanalyse durchgeführt. In Abhängigkeit der Varianzhomogenität (Levene-Test) wurde der Tukey-Test bzw. der Dunnett T3 Test durchgeführt (BÜHL UND ZÖFEL, 2006, KÖHLER et al., 2007). Die Irrtumswahrscheinlichkeit betrug in allen Berechnungen $\alpha \leq 0,05$.

4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den beschriebenen Untersuchungen für die Getreidearten Gerste und Weizen aufgeführt. Dabei wird zunächst auf die Untersuchungen zur Feuchtgetreideernte eingegangen. Im Anschluss folgt eine Beschreibung des Erntematerials bevor die Ergebnisse der Versuche zur Qualität und aeroben Stabilität der Konservate erläutert werden. Dabei werden ausgewählte Daten sowohl aus den Versuchen im Folienschlauch mit Gerste und Weizen als auch aus den dazugehörigen Silierglasversuchen genutzt, um die untersuchten Parameter zu charakterisieren und Unterschiede der Varianten zu verdeutlichen.

Anschließend werden die Ergebnisse zur Lagerungsdichte, Partikelgrößen und Verdichtbarkeit von Feuchtgetreide erläutert, wobei Untersuchungen zum Feuchtmais für eine bessere Einordnung mit einfließen.

4.1 Untersuchungsergebnisse zum Leistungsbedarf bei der Feuchtgetreideernte

Im ersten Versuchsjahr (2005) wurde Gerste mit einem Feuchtegehalt von 24 % ausschließlich für die Silierglasversuche geerntet. Der geerntete Weizen hatte einen Feuchtegehalt von etwa 23 % vor Anfeuchtung. Technische Probleme bei der Ernte traten nicht auf. Eine Ermittlung von Mähdruschkenndaten war jedoch nicht möglich.

Die Erntebedingungen im zweiten Versuchsjahr (2006) waren mit täglichen Abnahmen des Feuchtegehaltes von bis zu 3 % untypisch für die Region. Trotzdem gelang es die feuchte Versuchsvariante der Gerste (Naomi) mit einem mittleren Feuchtegehalt von etwa 31 % (± 4 %) ohne technische Probleme zu dreschen, obwohl die Restpflanzen teilweise noch deutlich grün waren. Dadurch konnten Mähdruschkenndaten bezüglich Kraftstoffverbrauch und Häcksler-Leistungsbedarf erfasst werden. Weiterhin konnte Weizen der in den Schlauchversuchen verwendeten Sorte (Dekan) mit einem Feuchtegehalt von durchschnittlich 37,5 % geerntet werden. Als Referenz dienten Varianten mit jeweils etwa 20 % geringeren Feuchtegehalten (Abbildung 26).

In allen Varianten mit hohen Feuchtegehalten von bis zu 41 % im Weizen und bis zu 35 % in Gerste konnten die Ähren vollständig ausgedroschen werden, so dass kein Anstieg der Verluste erkennbar war. Die Konsistenz der Körner ermöglichte einen problemlosen Transport aus dem Körnertank und vom Transportfahrzeug. Bei der Überladung des Weizens mit einem Feuchtegehalt von im Mittel 37,5 % in den ‚Crimper-Bagger‘ traten

jedoch teilweise technische Probleme auf. Beim Einsatz der gewählten Überladeförderschnecke mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Länge von 6 m kam es zu einer Vermusung und Verklumpung der Weizenkörner und dadurch bedingt zur Verstopfung der Förderschnecke.

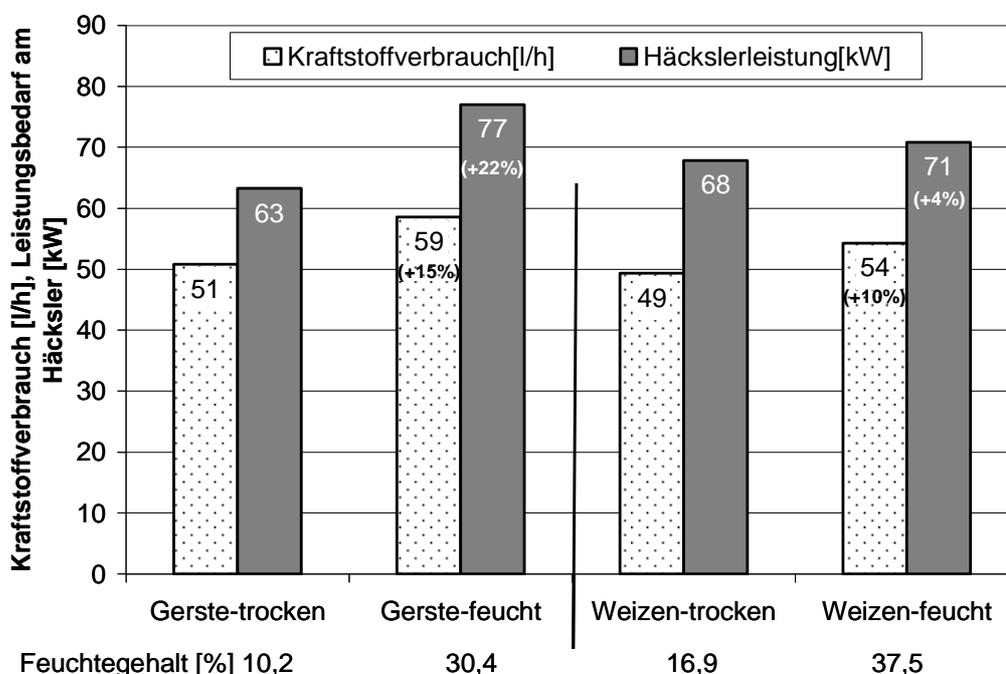


Abbildung 26: Kraftstoffverbrauch- und Leistungsbedarf am Häcksler beim Mähdrusch von Gerste und Weizen mit unterschiedlichen Feuchtegehalten.

Messungen mit Axialflussmährescher JD CTS 9780, 7,40 m Schneidwerk, ausgewählter Messbereich 3,5-4,5 km/h, 29-36 t/h FM-Durchsatz, Flächenleistung 2,9-3,1 ha/h.

Der Mähdrusch von Gerste und Weizen mit Feuchtegehalten über 30 % warf unter den genannten Voraussetzungen keine technischen Probleme auf. Für die Auswertung der Messungen des Kraftstoffverbrauchs- und der Häcksler-Leistungsaufnahme (Abbildung 26) wurden nur bestimmte Datenbereiche ausgewählt, um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Getreidevarianten zu ermöglichen. Berücksichtigt wurden lediglich jene Daten, die in einem Fahrgeschwindigkeitsbereich von 3,5 bis 4,5 km/h bei einem Frischmassedurchsatz von 29-36 t/h ermittelt wurden, was einer Flächenleistung von 2,9-3,1 ha/h entsprach.

Während bei Gerste der Kraftstoffverbrauch gegenüber der trockenen Variante um 15 % auf etwa 59 l/h anstieg und der Leistungsbedarf am Stroh Häcksler um etwa 22 % auf 77 kW zunahm, fiel der Mehraufwand bei Weizen mit einem Anstieg von 10 % auf 54 l/h beim Kraftstoffverbrauch bzw. mit 4 % auf 71 kW beim Häckslerleistungsbedarf deutlich

geringer aus. Dabei muss auf die großen Unterschiede im Feuchtegehalt zwischen den jeweiligen feuchten und trockenen Varianten von etwa 20 % hingewiesen werden.

4.2 Ausgangsmaterial

4.2.1 Trockenmassen

Ziel in beiden Versuchsjahren war die Ernte von Getreide mit Feuchtegehalten von 20 und 30 %, bzw. eine nachfolgende Anfeuchtung auf 30 % Feuchte. Die ermittelten tatsächlichen Feuchtegehalte in den Erntepartien zeigten deutliche Schwankungen von teilweise über 5 % auf, was auf die Schwierigkeit hindeutet, Getreide mit im Tagesverlauf einheitlichem Feuchtegehalt zu ernten. Bei der Anfeuchtung des Getreides im ersten Versuchsjahr konnte der Ausgangsfeuchtegehalt durch wiederholte Schnellbestimmung ermittelt und die zuzuführenden Wassermengen entsprechend angepasst werden. Die Feuchtegehalte nach Entnahme wiesen sowohl bei Gerste als auch bei Weizen Werte von knapp 30 % mit Schwankungen von etwa 0,5 % auf, was auf eine funktionierende Methode zur Anfeuchtung deutet. Die trockene Variante der Gerste hatte etwa 24 %, in der trockenen Weizenvariante (W-18-0,3) wurden Feuchtegehalte zwischen 17 und 20 % festgestellt.

Im zweiten Jahr war wiederum eine Ernte von Gerste und Weizen mit Feuchtegehalten von exakt 30 und 20 % aufgrund der Witterungsbedingungen in 2006 nicht möglich. Der mittlere Feuchtegehalt betrug 31 und 16 % bei der Gerste sowie 28 und 21 % beim Weizen und wurde bei der Variantenbezeichnung beibehalten, auch wenn in einzelnen Untersuchungen abweichende Feuchtegehalte bestimmt wurden. Diese Schwankungen im Feuchtegehalt fielen mit etwa 1 % etwas höher aus als im ersten Versuchsjahr.

Die Abreife des Getreides erfolgte in beiden Versuchsjahren aufgrund der günstigen Witterung sehr zügig. Probenahmeort und Zeitpunkt bedingten aufgrund sehr hoher Umgebungstemperaturen in den Substratproben für die Rohrnährstoffanalyse teilweise deutlich geringere Feuchtegehalte als bei den übrigen Trockenmassebestimmungen (Tabelle 17). Dies deutet auf die teilweise schnelle Nachtrocknung des Getreides auf den Transportfahrzeugen hin.

Die Korrektur der Trockenmassen nach WEIßBACH UND KUHLA (1995) ergab für Feuchtgetreide aufgrund der geringen Gehalte an Gärsäuren, Alkoholen und Ammoniak nur eine geringe Veränderung der Ausgangswerte. Sie wurden in 2005 um durchschnittlich

0,4 %, in 2006 um 0,2 % angehoben, wobei bei den Varianten mit maximalen Gehalten die Korrektur maximal 0,9 (2005) bzw. 0,3 % (2006) betrug. Aufgrund fehlender Gärprodukte in den Varianten ohne Fermentationsaktivität erfolgte hier keine weitere Korrektur der ermittelten Trockenmassen.

4.2.2 Rohnährstoffanalyse und Keimgehalte

Das Ausgangsmaterial aller Gerste- und Weizenvarianten wurde hinsichtlich der Rohnährstoffgehalte, Pufferkapazität und seines Keimbosatzes untersucht (Tabelle 17). Die ausgewiesenen Werte für Rohasche, Rohprotein, Rohfaser und Rohfett entsprachen den in der Literatur angegebenen Werten.

Tabelle 17: Rohnährstoffgehalte und Keimbosatz des Erntegutes verschiedener Feuchtgetreidevarianten.

Versuchsjahr Getreideart		2005			2006			
		Gerste	Weizen	Weizen	Gerste	Gerste	Weizen	Weizen
Variante		G-24/30- 0,3 ⁺	W-30- 0,3 ⁺	W-18- 0,3	G-31- 0,1	G-16- 0,1	W-28- 0,1	W-21- 0,1
Parameter	n	1	2	2	1	1	1	1
TM [g/kg]	x	744,0	818,5	866,5	698,0	848,0	763,0	794,0
	s	-	26,2	0,7	-	-	-	-
Feuchte [%]	x	25,6	18,2	13,4	30,2	15,2	23,7	20,6
	s	-	2,6	-	-	-	-	-
Rohasche [g/kg TM]	x	25,1	17	18,4	26,6	26,9	15,6	16,8
	s	-	1,1	0,1	-	-	-	-
Rohprotein [g/kg TM]	x	125,0	140,2	137,5	120,1	118,1	139,2	142,1
	s	-	0	2,1	-	-	-	-
Rohfaser [g/kg TM]	x	55,9	29,9	29,5	56,2	56,1	24,1	26,8
	s	-	2,1	1,6	-	-	-	-
Rohfett [g/kg TM]	x	26,1	19,3	20,1	21,2	22,7	20,5	21,4
	s	-	0,4	0,1	-	-	-	-
Zucker* [g/kg TM]	x	15,6	16,2	18,2	13,7	19,1	22,2	24,2
	s	-	0,6	0	-	-	-	-
Pufferkapazität [g Milchsäure/kg TM]	x	16,2	17,3	19,1	16,7	15,6	13,7	14,0
	s	-	0	0	-	-	-	-
Keimgehalte	n	2	4	3	2	2	2	2
Hefen [lg KBE/g]	x	5,3	4,8	4,7	4,6	5,2	4,7	4,6
	s	0,1	0,6	0,4	0,1	0	0,1	0,1
Schimmelpilze [lg KBE/g]	x	4,9	4,1	3,5	4	4,3	4,7	4,6
	s	0,1	0,5	0,9	0,5	0	0,1	0,1
Milchsäurebakterien [lg KBE/g]	x	4,3	-	-	<1	<1	3,4	2,8
	s	0	-	-	0	0	0,1	2,5

⁺ angefeuchtet
*Gesamtzucker als Saccharose nach VDLUFA Methode 7.1.2

Die Gehalte an verfügbarem Zucker waren mit Werten zwischen 14 und 24 g/kg TM zwar gering, allerdings wies die Pufferkapazität von etwa 15 bis 20 g Milchsäure/kg TM ebenfalls sehr geringe Werte auf, was eine Fermentation mit rascher pH-Absenkung begünstigt.

Die Gehalte an Hefen lagen bis auf leicht erhöhte Werte bei Gerste mit Werten um 10^5 KBE/g FM unter dem Richtwert. Der Besatz an Schimmelpilzen zeigte bei fast allen Varianten mit über 10^4 KBE/g FM erhöhte Werte auf.

Mit Ausnahme des Weizens aus dem ersten Versuchsjahr erfolgte auch eine Bestimmung des Milchsäurebakterienbesatzes des Ausgangsmaterials. Deutlich wird, dass in der Gerste des ersten Jahres mit Werten von $\lg 4,3$ KBE/g FM ein deutlicher Besatz vorlag, während im zweiten Versuchsjahr bei beiden Feuchtestufen keine Milchsäurebakterien nachzuweisen waren. Im Weizen des zweiten Versuchsjahres lag der Mittelwert bei einem Feuchtegehalt von 28 % bei $\lg 3,4$ KBE/g FM, wohingegen in den beiden Proben der trockeneren Variante $\lg 3,4$ KBE/g FM als auch $< \lg 1$ KBE/g FM nachgewiesen wurden, was auf die starke Streuung von Keimgehalten hindeutet.

Zusätzlich zum Erntematerial wurde im zweiten Versuchsjahr auch Material aus den Folienschläuchen nach deren Öffnung auf seine Inhaltsstoffe untersucht (Tabelle 18).

Tabelle 18: Rohnährstoffgehalte von Erntegut und Konservat verschiedener Feuchtgetreide-varianten im Folienschlauch in 2006 (n=1)

Parameter/ Material		TM [g/kg]	Feuchte [%]	pH- Wert	Roh- asche [g/kg TM]	Roh- protein [g/kg TM]	Roh- faser [g/kg TM]	Roh- fett [g/kg TM]	Zucker [g/kg TM]	Stärke [g/kg TM]
Gerste	Erntegut	698	30,2	5,9	26,6	120	56,2	21,2	13,7	696
	Konservat	699	30,1	5,7	27,7	122	60,0	23,7	38,8	560
	Konservat mit Zusatz	681	31,9	5,8	27,3	116	62,8	22,1	49,9	556
	Erntegut	848	15,2	5,9	26,9	118	56,1	22,7	19,1	556
	Konservat	829	17,1	6,1	27,2	117	59,1	23,5	16,5	574
	Konservat mit Zusatz	843	15,7	5,9	29,0	118	60,9	23,5	18,0	559
Weizen	Erntegut	763	23,7	5,9	15,6	139	24,1	20,5	22,2	638
	Konservat	740	26,0	4,6	16,4	143	26,2	20,0	18,2	654
	Konservat mit Zusatz	720	28,0	5,1	16,6	140	26,5	20,0	26,8	674
	Erntegut	794	20,6	6,2	16,8	142	26,8	21,4	24,2	641
	Konservat	789	21,1	6,5	16,7	145	27,3	20,5	15,6	693
	Konservat mit Zusatz	801	19,9	6,3	16,1	143	26,3	20,5	21,7	782

Bezüglich der Werte an Rohasche, Rohprotein, Rohfaser und Rohfett waren keine Unterschiede durch die Lagerung und den Konservierungszusatz festzustellen. Bei Betrachtung der Gehalte an Zucker und Stärke fielen variierende Werte auf. Der Zuckergehalt der feuchteren Gerstevariante wies in beiden Konservaten gegenüber dem Erntegut einen deutlich erhöhten Wert auf. Ohne Zusatz war dieser etwa verdreifacht, mit Zusatz auf knapp 50 g/kg TM fast vervierfacht. Ein Rückgang im Stärkegehalt um 20 % könnte auf eine Umwandlung der Stärke während der Lagerung hinweisen, wobei in der Gerstevariante mit Zusatz des Konservierungsmittels ein gegenüber der unbehandelten Konservat-Variante um knapp 29 % erhöhter Zuckergehalt nachgewiesen wurde. Die Unterschiede der Zucker- und Stärkegehalte in den übrigen Getreidevarianten waren nicht eindeutig zu erklären.

4.3 Untersuchungsergebnisse zur Fermentation

4.3.1 Ansäuerungsgeschwindigkeit

Eine rasche Absenkung des pH-Wertes ist ein Indikator für eine erfolgreiche Fermentation. Die im vorigen Kapitel aufgezeigte geringe Pufferkapazität von Getreide wies auf sehr günstige Bedingungen für eine schnelle pH-Absenkung hin. In Abbildung 27 sind die pH-Werte in Gerste und Weizen nach 3 Tagen Lagerung im Silierglas dargestellt.

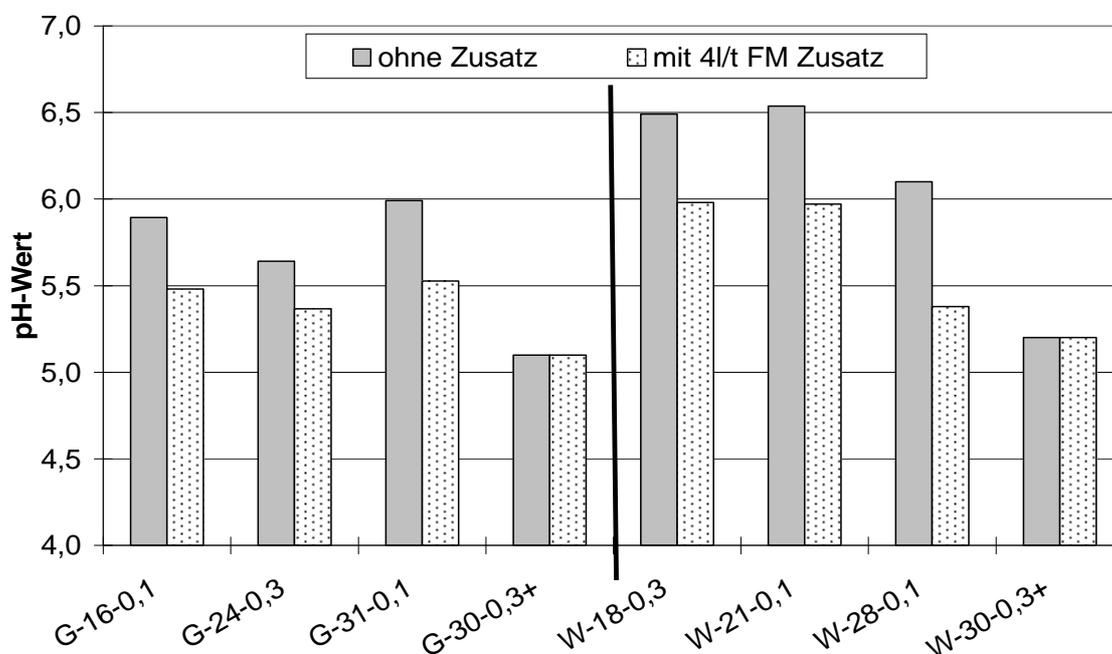


Abbildung 27: pH-Wert in Feuchtgetreide nach 3 Tagen Lagerung im Silierglas
(+=angefeuchtet; n=3)

In Gerste lagen diese ohne Anfeuchtung und ohne den chemischen Konservierungszusatz mit Werten zwischen 5,6 und 6 unter denen der Weizenvarianten, die pH-Werte zwischen 6,1 und 6,5 aufwiesen. In den drei Wiederholungen je Variante waren keine nennenswerten Schwankungen festzustellen.

Durch den Einsatz des Konservierungszusatzes wurde der pH-Wert im eingelagerten Feuchtgetreide signifikant abgesenkt. Eine Aufwandmenge von 4l/t FM führte unabhängig von Getreideart und –feuchte bei den nicht angefeuchteten Varianten im Mittel zu einer Absenkung des pH-Wertes um 0,5.

Auffällig ist, dass die angefeuchteten Gerste- und Weizenvarianten bereits nach dieser kurzen Einlagerungsdauer einen deutlichen pH-Abfall auf etwa 5,2 aufwiesen, wobei ein Konservierungszusatz keine weitere Absenkung bewirkte. Durch Untersuchungen an weiteren unbehandelten Weizenvarianten konnten die Unterschiede bezüglich der Ansäuerungsgeschwindigkeit bei physiologischer Feuchte und nach Anfeuchtung bestätigt werden (Abbildung 28). Danach lagen die pH-Werte in natürlich feuchtem Weizen nach drei Tagen Lagerung im Silierglas zwischen 6,0 und 6,5. Durch eine Anfeuchtung konnte bei Feuchtegehalten ab 29 % eine deutliche Abnahme des pH-Wertes auf Werte zwischen 5,0 und 5,3 festgestellt werden.

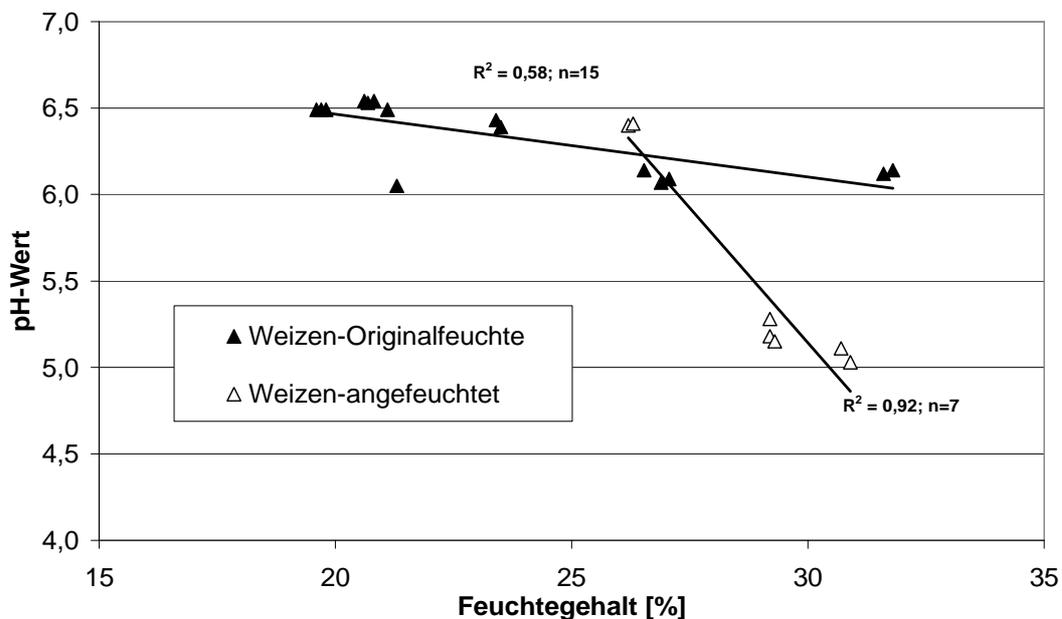


Abbildung 28: pH-Werte verschiedener Weizenvarianten nach drei Tagen Lagerung im Silierglas.

4.3.2 Gärqualität

Eines der primären Ziele der Versuche war die Ermittlung von Futterqualitätsparametern von Feuchtgetreide unter den Lagerungsbedingungen im Folienschlauch. Da nicht alle Getreide- und Feuchtevarianten mit verschiedenen Konservierungsmittelaufwandmengen im großtechnischen Maßstab im Schlauch untersucht werden konnten, wurde ein Teil der Untersuchungen im kleintechnischen Maßstab in Siliergläsern durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse beider Versuchsebenen dargestellt.

4.3.2.1 Erstes Versuchsjahr (2005)

Im ersten Versuchsjahr sollten die Unterschiede, die durch die Einlagerung von Getreide verschiedener Feuchtestufen und Konservierungsmittelaufwandmengen bedingt waren, zum Zeitpunkt der Siloöffnung ermittelt werden. Die Besonderheit lag dabei in der Wiederanfeuchtung der Varianten mit hohem Feuchtegehalt.

Gerste im Silierglas (mit und ohne Anfeuchtung)

Der Einfluss von Feuchtegehalt und Konservierungsmittelaufwandmenge auf die Qualität von Gerste wurde im ersten Jahr ausschließlich im kleintechnischen Maßstab in Siliergläsern ermittelt (Tabelle 19).

Tabelle 19: pH-Werte und Gärproduktgehalte verschiedener Gerstevarianten nach 90 Tagen Lagerdauer im Silierglas.

Mittelwertvergleich zwischen den Behandlungsvarianten einer Feuchtestufe ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; += angefeuchtet; n=3.

Ernte 2005			Gerste							
Variante			G-30-0,3 ⁺				G-24-0,3			
Trockenmasse	[g/kg]		700,2	718,7	689,7	692,9	756,3	762,7	761,1	765,1
Feuchte	[%]	ø	30,0	28,1	31,0	30,7	24,4	23,7	23,9	23,5
		s	0,4	0,3	0,6	0,3	0,3	0,2	0,3	0,5
Konservierungs-	[l/t FM]		0	2	4	6	0	2	4	6
zusatz										
pH-Wert		ø	4,3 ^a	4,5 ^b	4,3 ^a	4,3 ^a	5,7 ^e	5,4 ^d	5,1 ^c	5,1 ^c
		s	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Essigsäure	[g/kg TM]	ø	1,8 ^{bcd}	0,8 ^{abc}	2,5 ^d	2,1 ^{cd}	0,3 ^a	0,4 ^a	0,5 ^{ab}	0,3 ^a
		s	0,7	0,2	1,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,1
Propionsäure	[g/kg TM]	ø	0,5 ^a	1,1 ^b	2,3 ^c	3,3 ^d	0,5 ^a	2,2 ^c	3,4 ^d	4,6 ^e
		s	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Milchsäure	[g/kg TM]	ø	13,7 ^{bc}	11,4 ^b	14,1 ^c	13,4 ^{bc}	1,1 ^a	0,6 ^a	0,8 ^a	2,0 ^a
		s	0,6	0,6	0,7	0,3	0,3	0,3	0,6	2,2
Ethanol	[g/kg TM]	ø	5,0 ^e	2,8 ^d	1,9 ^{bc}	1,3 ^{ab}	4,5 ^e	2,4 ^{cd}	1,5 ^{ab}	0,8 ^a
		s	0,6	0,3	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1
NH ₄ -N	[mg/kg TM]	ø	593,3 ^c	435,1 ^b	618,6 ^c	569,9 ^c	160,9 ^a	139,4 ^a	180,9 ^a	163,9 ^a
		s	29,8	48,9	17,1	14,3	10,3	13,2	27,6	21,6

Aus Tabelle 19 geht hervor, dass bei Gerste mit einem Ausgangsfeuchtegehalt von etwa 24 % bereits eine Fermentation mit geringer Milchsäurebildung von 0,6-2,0 g/kg TM stattfand. Durch eine Anfeuchtung auf etwa 30 % stiegen diese Werte auf etwa 14 g/kg TM.

Essigsäure war bei einer Feuchte von 24 % nur in Spuren nachzuweisen. Die Anfeuchtung bewirkte eine Steigerung auf geringe Gehalte von etwa 2 g/kg TM. Eine Steigerung der Konservierungsmittelaufwandmenge war erwartungsgemäß in einer Zunahme der Propionsäuregehalte zu erkennen, wobei kein Effekt auf andere Gärssäuregehalte erkennbar war. Die Wirkung des zunehmenden Konservierungsmittelaufwandes lässt sich aus den abnehmenden Ethanolgehalten in beiden Feuchtestufen ableiten. Deutlich wird ebenfalls, dass es zu keinerlei Fehlgärungen während der Lagerung gekommen war, da keine Buttersäure nachzuweisen war. Die sehr geringen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte deuteten auf einen schnellen Abschluss des Fermentationsprozesses hin.

Weizen im Folienschlauch (mit und ohne Anfeuchtung)

Die Einlagerung von Weizen im Folienschlauch erfolgte in zwei Feuchtestufen. Die feuchte Variante wurde mit einem Feuchtegehalt von etwa 23 % geerntet und auf 30 % angefeuchtet. Die Feuchte der trockenen Variante lag zwischen 17 und 20 %, was auf die Schwierigkeit der Ernte von Getreide mit einheitlichem Feuchtegehalt hindeutet.

Tabelle 20 zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Feuchtestufen auf. Aus einer Anfeuchtung des Weizens auf etwa 30 % ergab sich eine Fermentation, die nach 50 Tagen Lagerdauer in Milchsäuregehalten zwischen 10 und 17 g/kg TM und Essigsäuregehalten zwischen 4 und 6 g/kg TM resultierte. In allen angefeuchteten Varianten ging der pH auf Werte zwischen 4,1-4,2 zurück. Buttersäure wurde nicht nachgewiesen. Sehr geringe $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte deuten wie bei Gerste auf einen schnellen Abschluss des Fermentationsprozesses hin. Der Einsatz des Konservierungsmittels führte zu einer Halbierung der Ethanolgehalte.

Bei einem Feuchtegehalt von etwa 18 % trat keine Fermentation auf. Ein Rückgang des pH-Wertes von 6,5 auf 6,0 und 5,6 war hier durch die gegenüber der angefeuchteten Variante vergleichsweise hohen Aufwandmengen des Konservierungszusatzes von 4 und

8 l/t FM bedingt, wobei die Propionsäuregehalte in allen Varianten eine exakte Dosierung in den angegebenen Stufen bestätigten. Ein Rückgang der ohnehin geringen Ethanolgehalte deutete wie in der feuchten Variante und der Gerste auf die Wirkung des Zusatzes hin.

Die vorliegenden Ergebnisse wurden durch die Untersuchungen an Weizen nach 90 Tagen in Siliergläsern bestätigt (Tab. A1). Lediglich die in den Gläsern auf 800-900 mg/kg TM leicht erhöhten Gehalte an NH₄-N in den Varianten mit 0, 2 und 4 l Zusatz je Tonne Frischmasse deuteten auf einen Einfluss der mit 90 Tagen gegenüber den Schlauchvarianten fast verdoppelten Lagerdauer. Durch eine Aufwandmenge von 6 l/FM konnte dieser Wert auf das Niveau im Schlauch reduziert werden.

Tabelle 20: pH-Werte und Gärqualität verschiedener Weizenvarianten nach 50 Tagen Lagerung im Folienschlauch.

Mittelwertvergleich zwischen den Behandlungsvarianten einer Feuchtestufe ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; += angefeuchtet, n=6.

Ernte 2005		Weizen					
Variante		W-30-0,3 ⁺			W-18-0,3		
Trockenmasse	[g/kg]	700,0	697,2	695,5	800,2	819,3	826,0
Feuchte	[%]	∅ 30,0	30,3	30,5	20,0	18,1	17,4
		s 0,4	0,6	0,6	1,1	1,2	0,5
Konservierungs-	[l/t FM]	0	2	4	0	4	8
pH-Wert		∅ 4,2 ^a	4,2 ^a	4,1 ^a	6,5 ^d	6,0 ^c	5,6 ^b
		s 0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
Essigsäure	[g/kg TM]	∅ 6,0 ^b	4,6 ^b	4,2 ^b	0,0 ^a	0,1 ^a	0,0 ^a
		s 2,0	1,5	1,0	0,0	0,0	0,0
Propionsäure	[g/kg TM]	∅ 1,1 ^a	1,4 ^{ab}	2,5 ^c	0,9 ^a	2,3 ^{bc}	4,6 ^d
		s 0,4	0,3	0,5	0,1	0,5	1,1
Milchsäure	[g/kg TM]	∅ 16,7 ^c	10,1 ^b	13,1 ^b	0,0 ^a	0,0 ^a	0,0 ^a
		s 4,0	2,2	1,7	0,0	0,0	0,0
Ethanol	[g/kg TM]	∅ 2,8 ^d	1,7 ^c	1,5 ^{bc}	1,0 ^b	0,2 ^a	0,1 ^a
		s 0,5	0,3	0,3	0,5	0,1	0,0
NH ₄ -N	[mg/kg TM]	∅ 527,8 ^b	533,7 ^b	544,6 ^b	66,4 ^a	50,0 ^a	64,4 ^a
		s 88,0	50,2	64,0	8,0	0,9	6,5

4.3.2.2 Zweites Versuchsjahr (2006)

Folienschläuche (ohne Anfeuchtung)

Im Gegensatz zum ersten wurden im zweiten Versuchsjahr alle Varianten mit den in Tabelle 21 aufgeführten Feuchtegehalten frühzeitig geerntet, eingelagert und nicht nachträglich angefeuchtet.

Die Gärproduktgehalte und pH-Werte aus den Folienschläuchen nach einer Lagerdauer von etwa 2 Monaten wiesen sowohl deutliche Unterschiede als auch Gemeinsamkeiten zu den Ergebnissen des ersten Versuchsjahres auf. Eine Fermentation wurde nur bei Gerste mit einem Feuchtegehalt von 31 % sowie beim Weizen mit 27 % nachgewiesen. Die Gehalte an Milch- und Essigsäuresäure lagen bei Weizen etwa doppelt so hoch wie bei Gerste, insgesamt jedoch mit Höchstwerten von 7 g/kg TM bei Milchsäure bzw. 2 g/kg TM bei Essigsäure auf einem sehr niedrigen Niveau und deutlich niedriger als nach einer Anfeuchtung auf vergleichbare Feuchtegehalte im ersten Versuchsjahr.

Tabelle 21: Gärqualität von Feuchtgetreide im Folienschlauch mit und ohne chemischen Konservierungszusatz.

Mittelwertvergleich zwischen den Feuchtgetreidevarianten ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet; n=8

Ernte 2006		Gerste				Weizen			
Variante		G-31-0,1		G-16-0,1		W-28-0,1		W-21-0,1	
Lagerdauer anaerob	[Tage]	76		71		64		58	
Trockenmasse	[g/kg]	685,5	689,6	826,2	831,6	733,5	727,0	789,3	793,6
Feuchte	[%]	ø 31,4	31,0	17,4	16,8	26,6	27,3	21,1	20,6
		s 0,9	1,1	0,9	1,5	0,6	0,8	1,0	1,0
Konservierungs- zusatz	[l/t FM]	0	4	0	4	0	4	0	4
pH-Wert		ø 5,2 ^b	5,7 ^c	6,1 ^c	5,8 ^c	4,6 ^a	5,1 ^b	6,1 ^c	6,2 ^c
		s 0,7	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
Essigsäure	[g/kg TM]	ø 0,8 ^b	0,4 ^{ab}	0,3 ^a	0,3 ^a	1,6 ^c	0,3 ^a	0,1 ^a	0,2 ^a
		s 0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,2	0,0	0,1
Propionsäure	[g/kg TM]	ø 0,2 ^a	3,1 ^c	0,1 ^a	1,3 ^b	0,1 ^a	1,3 ^b	0,1 ^a	0,9 ^b
		s 0,2	0,5	0,0	0,4	0,0	0,7	0,0	0,5
Milchsäure	[g/kg TM]	ø 2,1 ^c	0,2 ^a	0,1 ^a	0,1 ^a	6,9 ^d	1,1 ^b	0,2 ^a	0,1 ^a
		s 0,5	0,1	0,0	0,0	1,3	0,5	0,1	0,0
Ethanol	[g/kg TM]	ø 3,0 ^d	1,4 ^{bc}	0,4 ^a	0,6 ^{ab}	1,6 ^c	1,4 ^{bc}	0,4 ^a	1,0 ^{abc}
		s 1,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,8	0,3	0,3
NH ₄ -N	[mg/kg TM]	ø 378,7 ^c	281,1 ^b	88,4 ^a	55,9 ^a	249,8 ^b	103,7 ^a	59,1 ^a	55,4 ^a
		s 118,6	47,3	56,5	13,8	72,6	21,4	17,1	11,9

Der Zusatz des Konservierungsmittels mit einer Aufwandmenge von 4 l/t FM bewirkte eine signifikante Reduzierung der Fermentation sowohl in Gerste als auch im Weizen. Demzufolge sank der pH-Wert bei Gerste mit 31 % Feuchte ohne Zusatz auf 5,2, mit Zusatz auf 5,7, bei Weizen mit 27 % Feuchte ohne Zusatz auf 4,6 und mit Zusatz auf 5,1.

In Gerste mit einem Feuchtegehalt von etwa 17 % fand keine Fermentation statt. Der pH-Wert betrug 6,1. Durch den Zusatz konnte dieser leicht auf 5,8 abgesenkt werden. In Weizen mit 21 % Feuchte fand ebenfalls keine Fermentation statt. Hier schien kein Effekt des Konservierungszusatzes auf den pH-Wert aufzutreten. Untersuchungen des Benzoatgehaltes als Bestandteil des Konservierungsmittels deuteten allerdings auf Schwankungen in der tatsächlichen Aufwandmenge hin, die hierfür die Ursache sein können.

Auch bei Betrachtung der Gehalte an Propionsäure fallen die Unterschiede zwischen den behandelten Varianten auf. Die rechnerische Menge an aus dem Konservierungsmittel stammender Propionsäure betrug bei einer Aufwandmenge von 4 l/t FM 1,8 g/kg FM. Somit ergab sich für G-31-0,1 eine leichte Überdosierung, während in den übrigen drei Getreidevarianten eine Unterdosierung zu verzeichnen war. Die Standardabweichungen deuteten auf Schwankungen innerhalb der acht zugrunde liegenden Stichproben hin. Dies erklärt auch die gegenüber der Kontrolle mit 1,0 g/kg TM leicht erhöhten Ethanolgehalte in der behandelten W-21-0,1-Variante. Diese sind aber in allen untersuchten Varianten als sehr gering einzustufen. Lediglich in G-31-0,1 trat mit 3,0 g/kg TM ein leicht erhöhter Ethanolgehalt auf, der durch den Zusatz halbiert wurde.

Lagerung im Silierglas über 3, 30, 90 und 180 Tage

Abbildung 29 gibt die Ergebnisse der Gärqualitätsanalysen der Varianten des zweiten Versuchsjahres wieder, die über einen Zeitraum von 3, 30, 90 und 180 Tagen in Siliergläsern gelagert wurden. Die Aussagen zum dazugehörigen Schlauchversuch (Tabelle 21) wurden bestätigt und in der Weise ergänzt, dass neben dem Einfluss von Getreideart und -feuchte sowie des Zusatzes auch die Lagerdauer einen deutlichen Einfluss auf die Gehalte an Gärsäuren sowie den pH-Wert hatte.

Wie in den Folienschläuchen, fand auch in den Siliergläsern eine Fermentation mit geringen Milch- und Essigsäuregehalten nur in den Gerste- und Weizenvarianten mit dem jeweils hohen Feuchtegehalt statt, die durch den Einsatz des Konservierungszusatzes von 4 l/t FM reduziert wurde.

Der Verlauf der Fermentation wurde insbesondere beim Weizen mit einem Feuchtegehalt von 27 % deutlich. Nach 3 Tagen Lagerung im Glas waren zwar bereits Spuren von Milch- und Essigsäure (0,9 bzw. 0,5 g/kg TM) nachweisbar, dies reichte jedoch nur für eine geringe pH-Absenkung auf etwa 6,1. Nach 30 Tagen wurde ein Milchsäuregehalt von 7 g/kg TM und ein Essigsäuregehalt von 1,4 g/kg TM erreicht, der zu einer Absenkung des pH-Wertes auf 4,8 führte. Dies entsprach den Werten im Folienschlauch nach 64 Tagen Lagerdauer. Durch eine längere anaerobe Lagerung über 90 und 180 Tage stiegen die Milchsäuregehalte weiter auf 9,5 und 11 g/kg TM bzw. die Essigsäuregehalte auf 1,8 und 2,2 g/kg TM, was zu einer weiteren pH-Absenkung auf 4,5 und 4,3 führte.

Durch den Einsatz des Konservierungsmittels wurde die Fermentation nachweislich gehemmt. Die Gärproduktgehalte erreichten bei gleicher Lagerdauer nur etwa 50 % der Kontrolle.

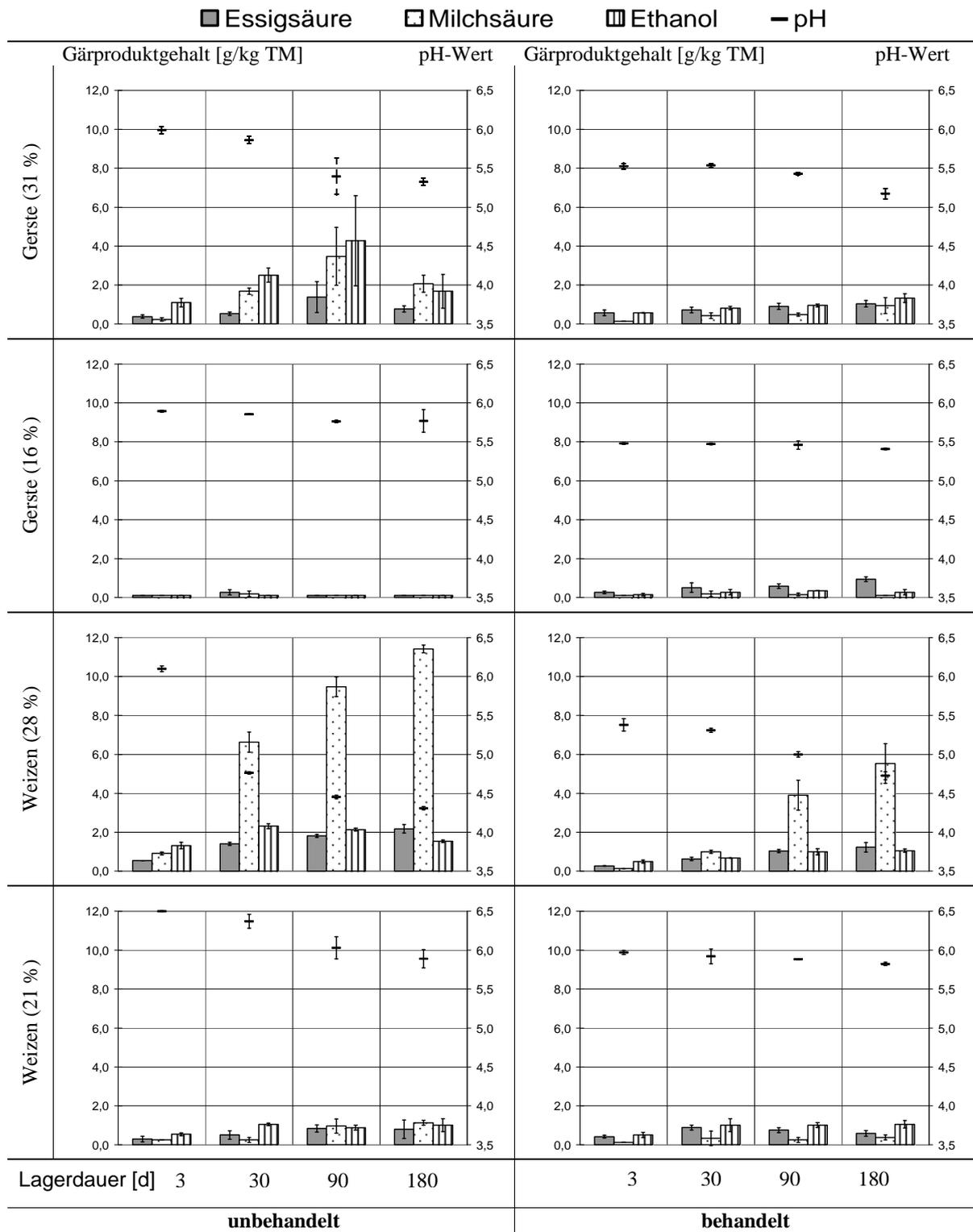


Abbildung 29: Gärproduktgehalte und pH-Werte verschiedener Feuchtgetreidevarianten in Abhängigkeit von Getreideart, Feuchtegehalt, Konservierungsmiteleinsatz und Lagerdauer im Silierglas (2006; n=3).

In Gerste war ebenfalls ein Anstieg der Gärproduktgehalte über eine Lagerdauer bis 90 Tage zu erkennen, wobei insbesondere der Gehalt an Milchsäure mit 3,5 g/kg TM nur etwa ein Drittel des Wertes des unbehandelten Weizens erreichte. Relativ hohe Gehalte an Ethanol von 4,3 g/kg TM nach 90 Tagen Lagerung, einhergehend mit einem Rückgang der Milch- und Essigsäuregehalte nach einer Lagerdauer von 180 Tagen deuteten auf einen Abbau der Gärsäuren hin. Keimgehalte wurden in den Gläsern nicht bestimmt. Die mit etwa 4 Tagen ähnlich geringe aerobe Stabilität nach 90 und 180 Tagen Lagerdauer (Tabelle 23) unterstützt diese Annahme ebenso wie Untersuchungen am entsprechenden Folienschlauch (Kap.4.4.2).

4.3.3 Gärverluste

Eine Bestimmung von Verlusten, die bei der Lagerung von Feuchtgetreide entstehen, sollte auf Basis von Gewichts-differenzen nach der Bilanzmethode (WEIBBACH, 1998) erfolgen. Extrem geringe Gewichts-differenzen in den untersuchten Siliergläsern von deutlich unter 0,5 % deuteten jedoch auf eine verlustarme Lagerung des Feuchtgetreides hin. Auch in den Varianten in denen nachweislich eine Fermentation stattfand, waren die Gewichtsverluste unter diesem Wert.

Eine Verlustbestimmung in den Bilanznetzen ergab für alle Feuchtgetreidevarianten keine verwertbaren Ergebnisse. Die Gewichtsschwankungen lagen trotz einiger unerklärlicher Ausreißer im Mittel unter einem Prozent. Auf eine weitere Differenzierung soll daher verzichtet werden.

4.4 Keimgehalte

Hefen und Schimmelpilze sind primär für den Verderb von konserviertem Futter verantwortlich. Die Bestimmung ihrer Gehalte ist für eine Charakterisierung der Futterqualität und deren Erhaltung notwendig.

4.4.1 Erstes Versuchsjahr (2005)

Weizen nach 50 Tagen im Folienschlauch

Die Bestimmung der Keimgehalte im Folienschlauch erfolgte nach der Öffnung der Schläuche am 50. Tag (Abbildung 30). Mit Ausnahme der unbehandelten Variante W-18-0,3 wiesen alle Varianten bezüglich Hefen- und Schimmelpilzen Werte unterhalb der kritischen Keimzahlen von 10^5 bzw. 10^4 KBE/g FM auf. Hervorzuheben ist, dass insbesondere die angefeuchtete Kontrolle kaum nachweisbare Keimgehalte enthielt. Im

Vergleich zu den übrigen angefeuchteten Varianten war ein mit $\lg 3,9$ bzw. $\lg 4,5$ KBE/g FM leicht erhöhter Gehalt an Hefen in der angefeuchteten 4-Liter-Variante erkennbar und nicht eindeutig zu erklären. Eine Unterdosierung des zugesetzten Konservierungsmittels konnte aufgrund der Propionsäuregehalte und zusätzlich durch eine Stichprobe des Benzoatgehaltes ausgeschlossen werden. Allerdings wurden stellenweise Dosierungsschwankungen unter den Versuchsbedingungen ermittelt. Weiterhin wurde bereits auf die Schwankungen der Keimgehalte am Beispiel des Ausgangsmaterials hingewiesen (Kap.4.2.2).

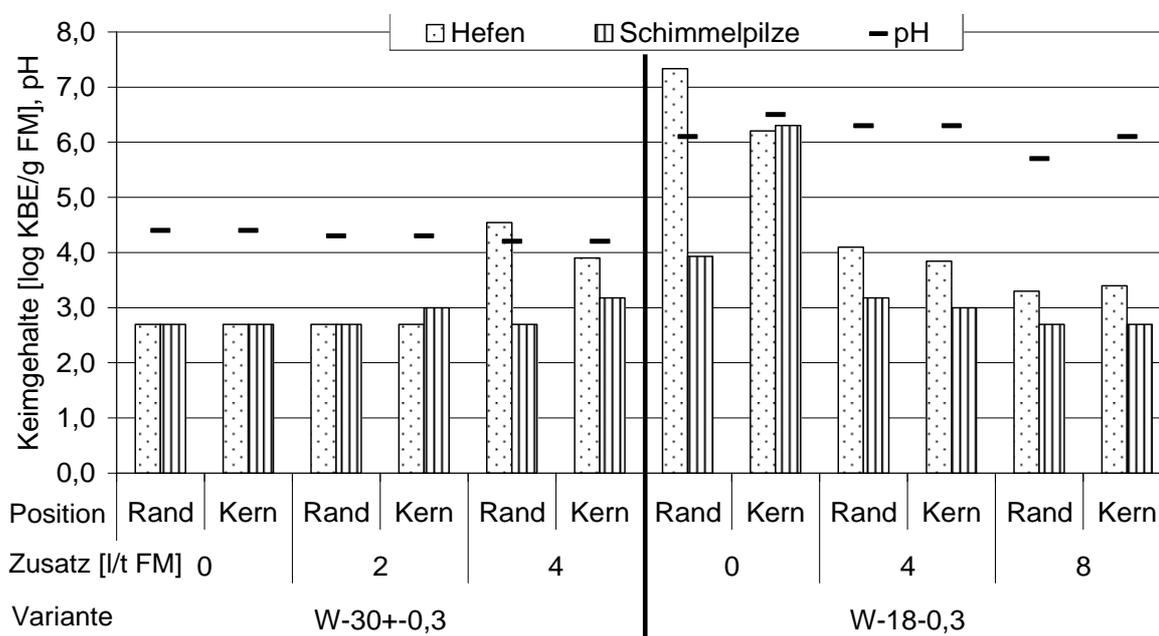


Abbildung 30: Keimgehalte und pH-Werte von Weizen nach 50 Tagen Lagerung im Folienschlauch (2005; n=1).

Gläserversuche

Die in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellten Keimgehalte zeigen die Belastung der Gerste- und Weizenvarianten nach 49 Tagen Lagerdauer im Glas bei 24-stündigem Luftstress am 28. und 42. Tag. Hieraus geht hervor, dass die Kontrollen sowohl bei Hefen als auch bei Schimmelpilzen kritische Werte von 10^6 KBE/g bzw. 10^4 KBE/g erreichten. Die Belastung mit Hefen schien jedoch gegenüber Schimmelpilzkeimen von primärer Bedeutung im Feuchtgetreide zu sein.

Ein Konservierungsmittelleinsatz führte bereits ab 2 l/t FM zu einer signifikant abgeschwächten Entwicklung der Keime, so dass die hohen Werte der jeweiligen Kontrolle nicht erreicht wurden. Aus Tab. A 2 im Anhang ist ebenfalls zu entnehmen, dass eine Erhöhung des Konservierungszusatzes auf 4 bzw. 6 l/t FM zu keiner weiteren Absenkung der Keimgehalte im Glas führte und Schimmelbildung keine primäre Bedeutung hatte. Die dargestellte Standardabweichung der drei Wiederholungen deutete wiederum auf die starken Schwankungen der Keimgehalte hin, die auch durch die methodische und analytische Vorgehensweise bedingt war.

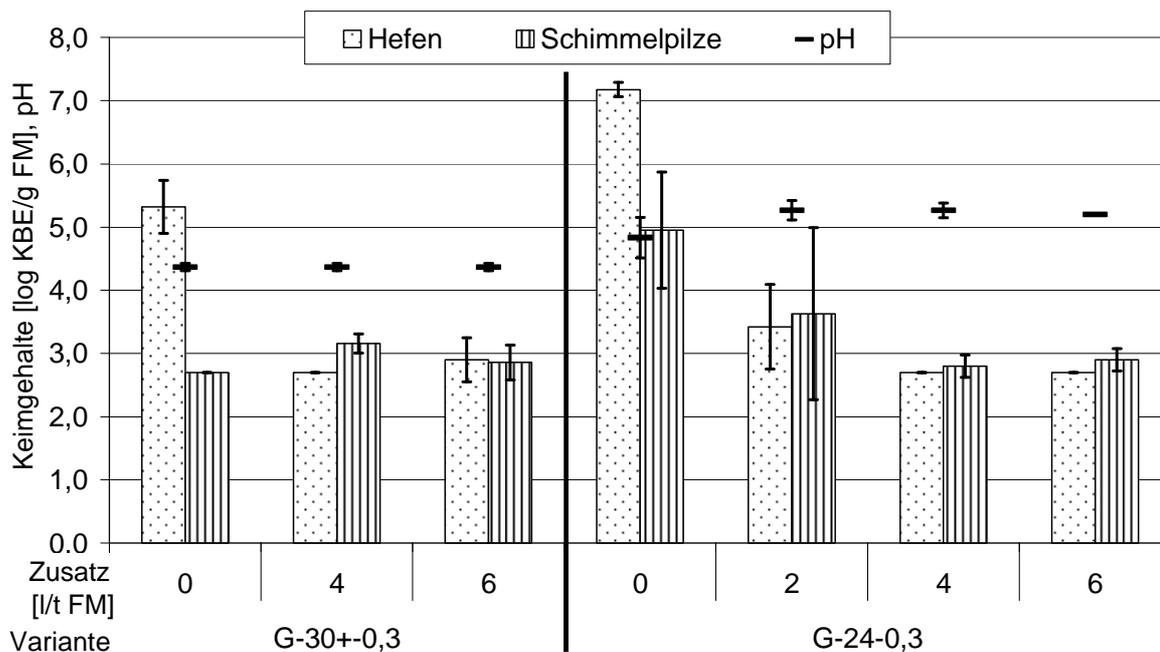


Abbildung 31: Keimgehalte und pH-Werte von Gerste nach 49 Tagen Lagerung im Silierglas mit 24 Stunden Luftstress nach 28 und 42 Tagen (Ernte 2005; +=angefeuchtet; n=3)

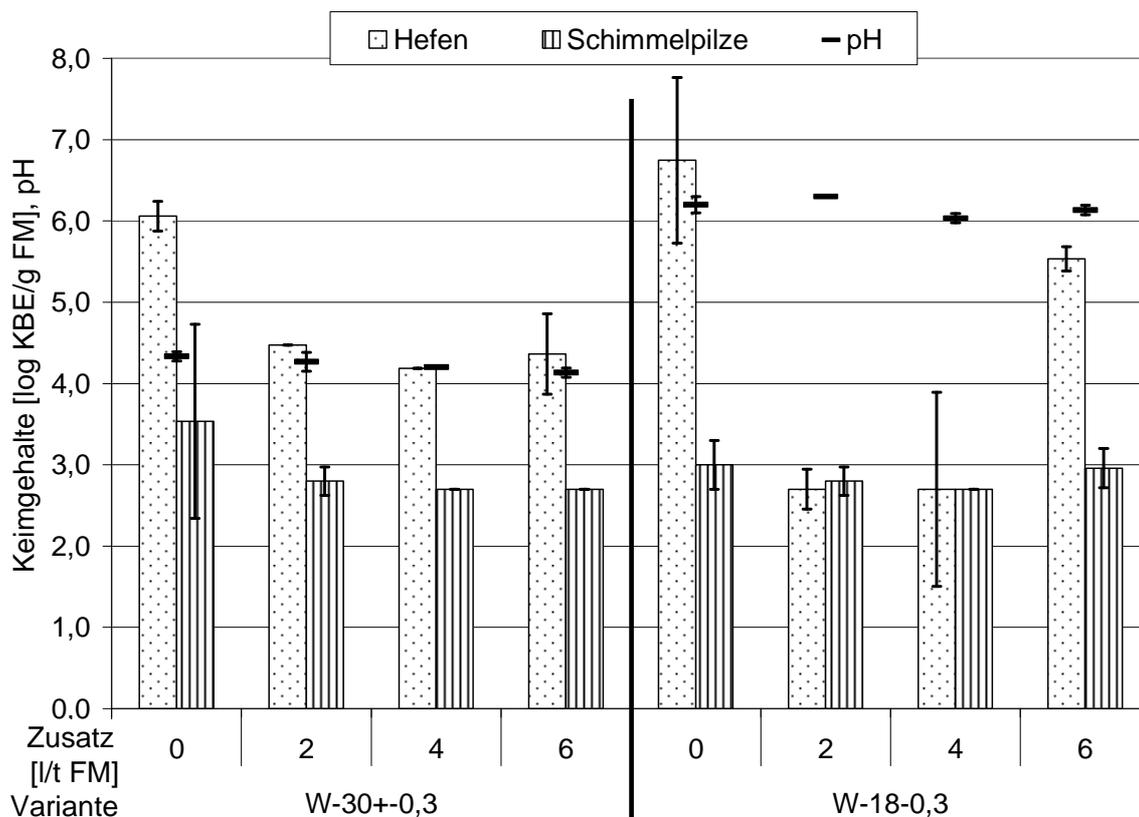


Abbildung 32: Keimgehalte und pH-Werte von Weizen nach 49 Tagen Lagerung im Silierglas mit 24 Stunden Luftstress nach 28 und 42 Tagen (Ernte 2005; +=angefeuchtet; n=3)

4.4.2 Zweites Versuchsjahr (2006)

Keimgehalte nach Schlauchöffnung

Der Abbildung 33 sind die Keimgehalte an den Bilanznetzpositionen 1 und 2 zu entnehmen, die gleichzeitig an Tag 4 nach Öffnung der Folienschläuche bestimmt wurden. Die Getreidevarianten sind untereinander, die Behandlungsstufen nebeneinander aufgeführt. Die in der Literatur beschriebenen Richtwerte für unbedenkliche Futtermittel von 10^5 KBE/g FM bei Hefen bzw. 10^4 bei Schimmelpilzen sind durch die unterbrochene Linie gekennzeichnet.

Aufgrund der hohen Werte der Hefengehalte von bis zu 10^7 KBE/g FM ist von einem Lufteinfluss auszugehen, der insbesondere bei den unbehandelten Varianten am Schlauchende zu beginnenden Verderbprozessen geführt hat. Ein mangelhafter Verschluss der Folienschläuche, sowie das Eindringen von Mäusen in diesem Bereich konnten als mögliche Ursache ermittelt werden. Dies hatte zur Folge, dass teilweise bereits während der Lagerung Luft in den Endbereich einiger Folienschläuche eindringen konnte. Die verfahrensbedingte Abnahme der Verdichtung zum Schlauchende hin ermöglicht dann insbesondere im Randbereich ein Eindringen von Sauerstoff. Nach Öffnung der Schläuche konnte innerhalb der ersten vier Tage Luft in diesem Bereich bis zur ersten Netzposition vordringen und die intensive Hefenbildung fördern. Dies wurde allgemein durch gegenüber den Kernbereichen erhöhte Gehalte an Hefen in den Randpositionen aller Varianten bestätigt. Als einzige Ausnahme trat die behandelte Variante von G-31-0,1 auf, die für die Netzposition 1 im Kern gegenüber der Randposition leicht erhöhte Werte aufzeigte. Ursache hierfür kann zum einen die verminderte Verdichtung dieses Materials sein, die sich bis in den Kernbereich auswirkte. Zum anderen muss darauf hingewiesen werden, dass die tatsächliche Position einiger Bilanznetze, die im Kernbereich eingelegt wurden, durch den Pressvorgang in den unteren Randbereich verschoben wurde. Dies trifft für das genannte Netz zu und bestätigt einen Lufteinfluss auch im unteren seitlichen Rand. Zudem sei darauf hingewiesen, dass die Bestimmung der Keimgehalte der Netzposition 1 auf lediglich einer Probe basiert.

Im Vergleich zur Netzposition 1 waren die Gehalte an Hefen bei allen Varianten mit und ohne Zusatz an der Netzposition 2 deutlich vermindert. Der Richtwert von 10^5 KBE/g FM wurde allerdings im Randbereich aller unbehandelten Varianten überschritten, während in den Kernbereichen noch akzeptable Werte unter 10^5 KBE/g FM ermittelt wurden. Ein fortgeschrittener Verderb der unbehandelten Varianten vier Tage nach Schlauchöffnung

konnte somit auch in einer Tiefe von etwa 3,5 m vom FuÙe des Schlauchendes zumindest für den Randbereich bestätigt werden, während dieser im Kernbereich am Beginn stand.

Durch den chemischen Zusatz konnten die Hefengehalte in allen Varianten im Vergleich zur jeweiligen unbehandelten Variante an beiden Netzpositionen sowohl im Kern- als auch im Randbereich ausreichend gesenkt werden. Eine Ausnahme bildete die Variante G-31-0,1 an Netzposition 1. Die wenigen auftretenden Ausnahmen waren in allen Fällen mit einer Verschiebung der Netze in Folienrandbereiche begründet. Um diese Netze war teilweise ein deutlich sichtbarer Verderb durch Schimmelbildung erkennbar, was auf einen verstärkten Lufteinfluss in diesem Bereich hindeutet. Beispielhaft waren dafür auch die Proben aus Rand- und Kernbereich der Netzposition 1 in der behandelten W-21-0,1-Variante, die als einzige stark erhöhte Schimmelpilzgehalte von $\lg 5,6$ KBE/g FM aufwiesen. Insgesamt war die Bedeutung von Schimmelpilzen für den primären Verderb den Hefen untergeordnet.

Die pH-Werte der untersuchten Proben stimmten größtenteils mit denen für Netzposition 3 und 4 bestimmten Werten (Kap. 4.3.2.2, Tabelle 21) überein. Lediglich bei der trockenen Gerstevariante G-16-0,1 lagen die pH-Werte sowohl bei der nicht behandelten als auch bei der behandelten Version um etwa 0,3 unter jenen der Positionen 3 und 4. Die relativ geringen Schwankungen lassen jedoch keinen eindeutigen Schluss auf einen Effekt der Entnahmeposition zu.

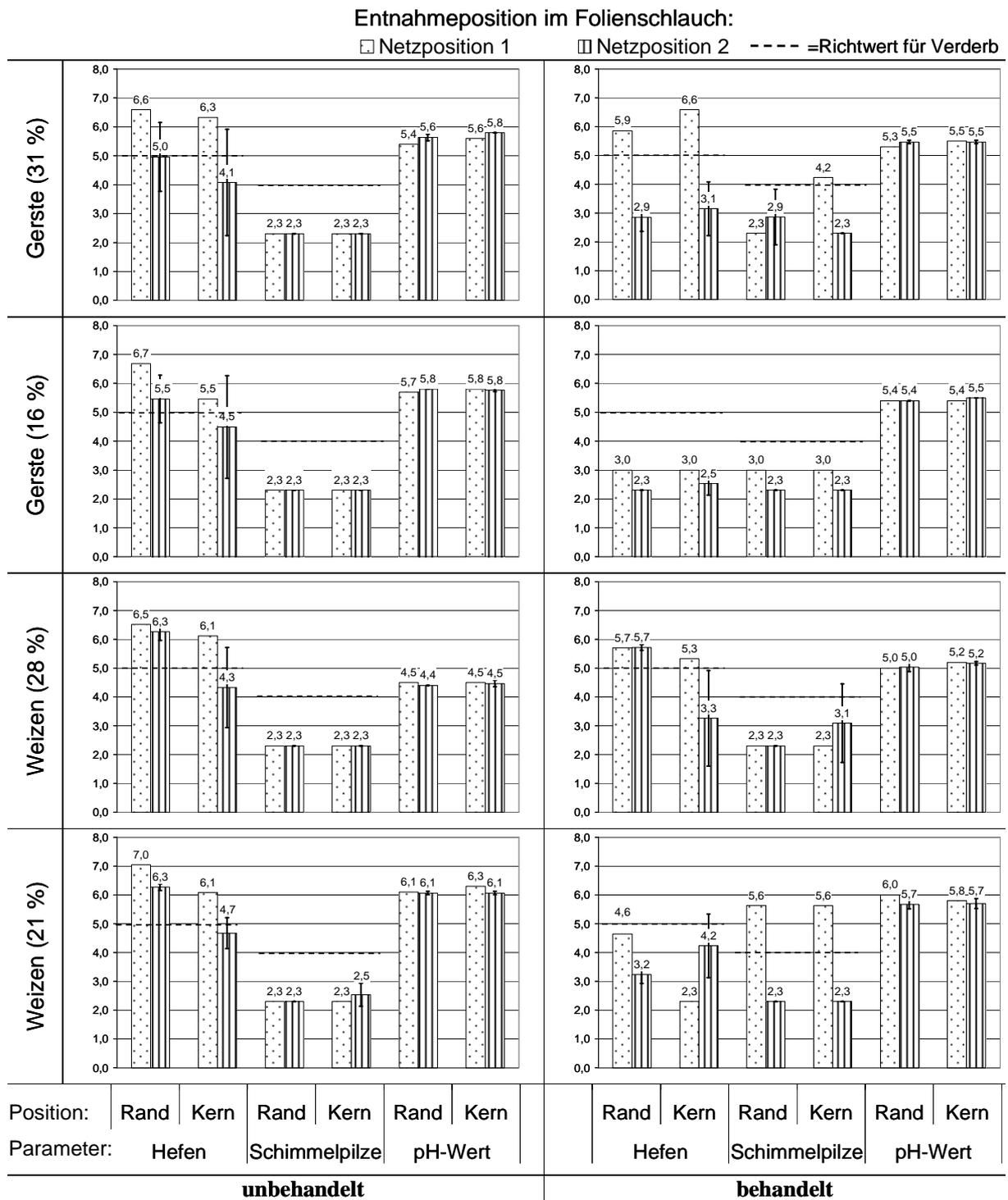


Abbildung 33: Keimgehalte [log KBE/g FM] und pH-Werte von Feuchtgetreide in Abhängigkeit von der Entnahmeposition 4 Tage nach Schlauchöffnung

Position 1=2,5 m; Position 2=3,5 m hinter dem Schlauchende;
 Position 1:n=1; Position 2: n=3.

Keimgehalte in Abhängigkeit der Öffnungsdauer

In Abbildung 34 sind die Gehalte an Hefen und Schimmelpilzen, sowie die pH-Werte in den Rand- und Kernbereichen der Folienschläuche 4 Tage (Woche 1), 11 (Woche 2), sowie 18 Tage (Woche 3) nach Schlauchöffnung wiedergegeben. Die Entnahmepositionen der Woche 1 entsprechen damit der Netzposition 2, Woche 2 und 3 den Netzpositionen 3 und 4. Alle Kontrollen wiesen kritische Hefengehalte auf. Wie bereits für die Netzpositionen 1 und 2 beschrieben, waren die Hefengehalte in den Kernbereichen (teilweise signifikant) geringer als in den Randbereichen derselben Schläuche (Tab. A 3 - Tab. A 6). Der tolerierbare Wert von 10^5 KBE/g FM wurde teilweise deutlich überschritten.

Der Anstieg der Hefengehalte durch zunehmende Lagerdauer unter Lufteinfluss von Netzposition 2 bis 4 war zwar nur für W-21-0,1 signifikant (Tab. A 6). Es wurden jedoch im Kernbereich aller unbehandelten Varianten bereits 11 Tage nach Schlauchöffnung bei einem Vorschub von einem Meter pro Woche kritische Gehalte von mehr als 10^5 KBE/g FM festgestellt, die nach einer weiteren Woche auf bis zu 10^7 KBE/g FM zunahmen. Durch den Einsatz des chemischen Konservierungsmittels konnten die Gehalte an Hefen gegenüber der entsprechenden Position der unbehandelten Variante signifikant gesenkt werden (Tab. A 3- Tab. A 6). Ein Anstieg des Hefenbesatzes mit zunehmender Lagerdauer war hier im Randbereich von W-21-0,1 und in den Kernbereichen von G-31-0,1 und W-28-0,1 erkennbar. In den behandelten Weizenvarianten sind insbesondere im Randbereich teilweise Hefengehalte nachgewiesen worden, die den Richtwert erreichten.

Die bereits für die Netzpositionen 1 und 2 beschriebene Problematik der Netzverschiebung direkt unter die Folie und der damit verbundene mögliche Lufteinfluss könnten hierfür verantwortlich gewesen sein. Weiterhin ergaben nachträgliche Analysen des Benzoesäuregehaltes Aufschluss über den tatsächlichen Gehalt des Konservierungszusatzes. Dabei wurde festgestellt, dass die mittlere Aufwandmenge bei beiden Feuchtevarianten den angestrebten 4 l/t FM entsprach, teilweise jedoch deutliche Schwankungen festzustellen waren. Für die Entnahmeposition 4 wurden jeweils lediglich 3 l/t FM nachgewiesen. Dies erklärte die erhöhten Hefenwerte und zeigte gleichzeitig den Bedarf sowohl an einem ausreichend hohen Gehalt an Konservierungszusätzen als auch an dessen gleichmäßiger Verteilung auf.

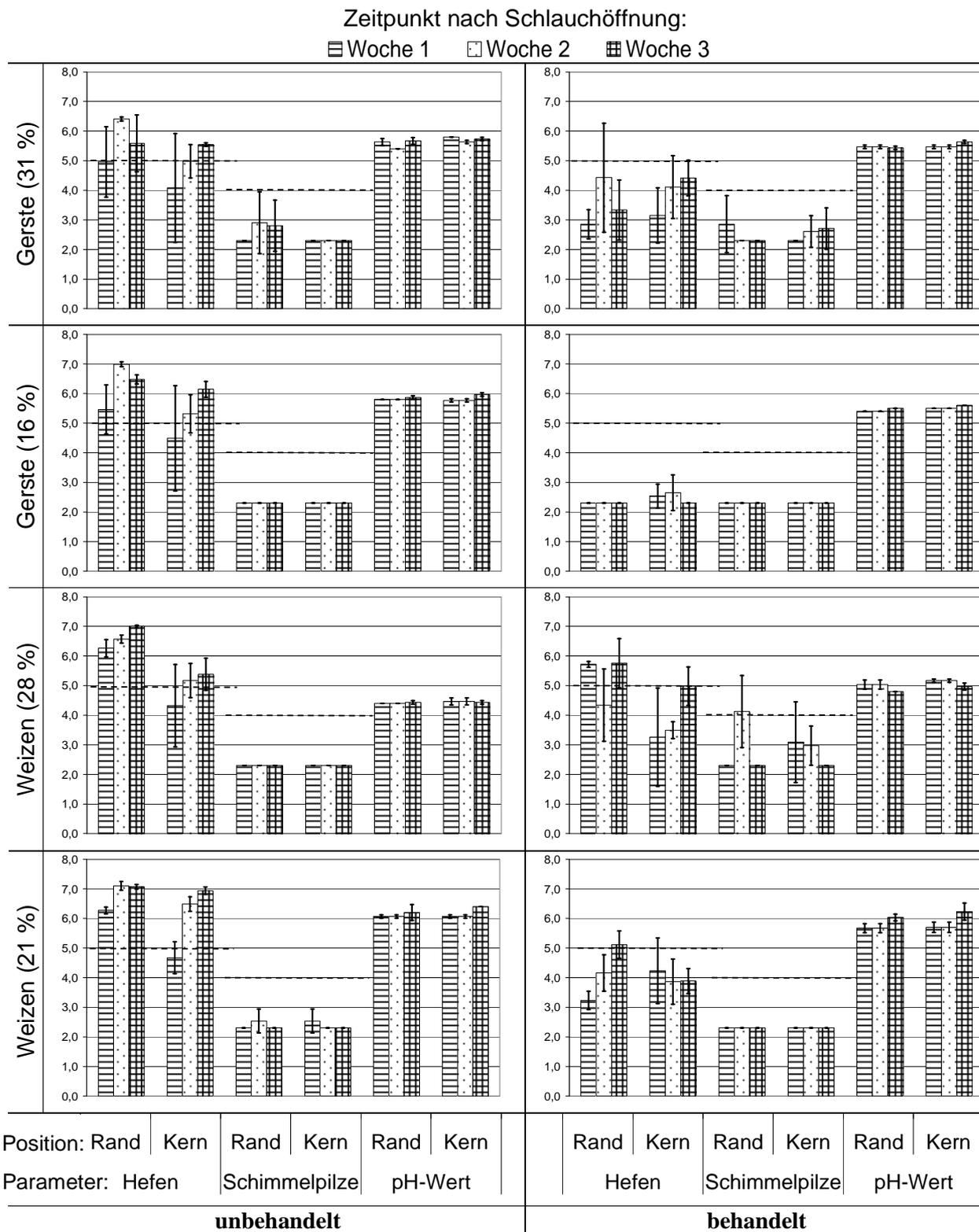


Abbildung 34: Keimgehalte [log KBE/g FM] und pH-Werte von Feuchtgetreide in Abhängigkeit der Lagerdauer nach Schlauchöffnung und der Entnahmeposition.

(Woche 1=Netzposition 2;Woche 2=Netzposition 3;Woche 3=Netzposition 4; n=3.

Eine Schimmelpilzbelastung konnte bis auf wenige Ausnahmen an und um Netze mit direktem Foliengkontakt (W-28-0,1) zum Zeitpunkt der jeweiligen Netzentnahme in diesen nicht nachgewiesen werden. Allerdings trat im Randbereich der Anschnittfläche der unbehandelten Folienschläuche mit G-31-0,1 und W-21-0,1 ab Tag 14 ein zunehmend sichtbarer Pilzbefall auf, der durch die gewählte Vorschubgeschwindigkeit nicht nachhaltig unterbunden werden konnte.

Verderbanzeige durch Geruchsunterschiede

Zusätzlich zu den beschriebenen sichtbaren Verderbmerkmalen wurden insbesondere bei den jeweiligen trockenen unbehandelten Varianten G-16-0,1 und W-21-0,1 Geruchsunterschiede gegenüber den behandelten Varianten festgestellt. Das unbehandelte Getreide wies bereits nach Öffnung der Folienschläuche einen „muffigen“ Geruch auf. Dieser verstärkte sich zunehmend während der Entnahmephase und bestätigte die beschriebene hohe Keimbelastung.

In den feuchten unbehandelten Getreidevarianten konnten diese geruchlichen Unterschiede nicht festgestellt werden. Dies kann auf die Fermentation und die damit verbundenen Gärprodukte zurückgeführt werden, die insbesondere in feuchtem Weizen zu einem Geruch führten, der mit Brotteig vergleichbar war. Dies traf auf alle Weizenvarianten mit nachgewiesener Fermentation sowohl im Folienschlauch als auch in Siliergläsern zu.

4.5 Temperaturverlauf im Schlauch in der anaeroben Lagerungsphase

Die Temperaturverläufe in den Folienschläuchen in der anaeroben Lagerungsphase der verschiedenen Feuchtgetreidevarianten des zweiten Versuchsjahres sind in Abbildung 36 (S. 93) und Abbildung 37 (S. 94) wiedergegeben. Daraus geht hervor, dass in allen Varianten eine Abnahme der Temperatur vom Beginn der Lagerung bis zum Tag der Öffnung der Schläuche zu verzeichnen war. Der stärkste Temperaturabfall erfolgte dabei in allen Varianten in den ersten drei Wochen nach Einlagerung. Die Temperatur des Erntegutes lag zum Zeitpunkt der Einlagerung bei etwa 30-35°C und sank in diesem Zeitraum um etwa 10 - 12°C.

Die Ausgangstemperaturen waren zum Teil durch die sommerliche Witterung zum Zeitpunkt der Einlagerung bedingt. Die Temperatur der Randpositionen unterlag großen Schwankungen. Dies konnte durch die dargestellten Tagestiefst- und Tageshöchsttemperaturen, die direkt über den Schläuchen erfasst wurden, erklärt werden. Durch eine direkte Sonneneinstrahlung wurden direkt an der Oberfläche tagsüber Temperaturmaxima

von über 50°C erreicht. Im betrachteten Zeitraum von Mitte Juli bis Ende September fielen die Nachttemperaturen auf bis zu 6°C. Direkt unterhalb der Folie wirkten sich diese Temperaturschwankungen abgeschwächt auf die Temperaturen der Konservate aus. Dabei ist der Einfluss hoher Tagestemperaturen deutlich höher ausgeprägt, als ein nächtlicher Abfall der Temperaturen. Weiterhin ergaben Temperaturmessungen am Erntegut und unmittelbar nach Einlagerung einen Temperaturanstieg im gequetschten Getreide. Die Messungen wurden mit einem Stabthermometer im Vorratsbehälter des Crimper-Bagger unmittelbar vor dem Quetschen und nach Einlagerung beim Einlegen der Bilanznetze in der Kernposition durchgeführt. Durch den Quetsch- und Pressvorgang wurden im Mündungsbereich der Förderschnecke Temperaturen von etwa 45°C erreicht (Abbildung 35). Dadurch erhöhte sich die Temperatur im Folienschlauch um etwa 5 K. Dies erklärt die hohen Ausgangstemperaturen von etwa 35°C in der Kernposition aller Schläuche.

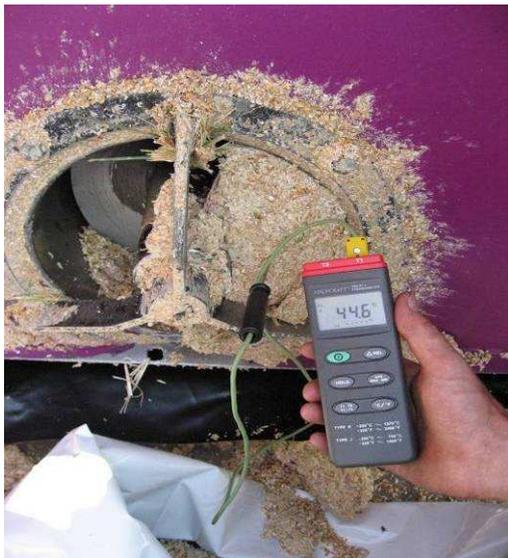


Abbildung 35: Messung des Temperaturanstiegs im Feuchtgetreide im Mündungsbereich der Förderschnecke des Crimper-Bagger

Die dargestellten Ergebnisse sind mit den Temperaturverläufen in den Folienschläuchen mit Weizen im ersten Versuchsjahr vergleichbar. Schwankungen der Außentemperatur beeinflussten auch hier den Randbereich stärker als den Kernbereich.

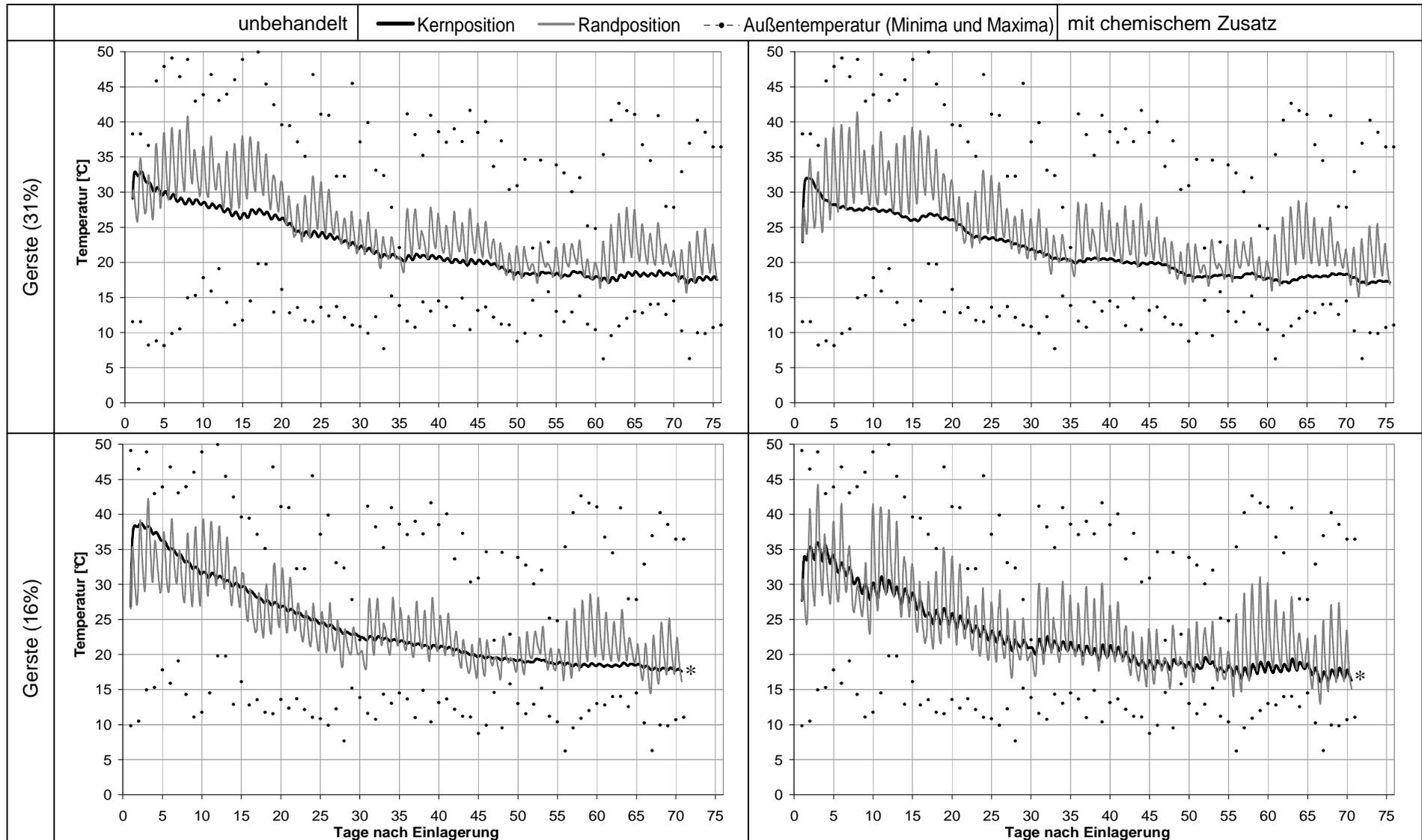


Abbildung 36: Temperaturverläufe in Rand- und Kernposition im Folienschlauch während der anaeroben Lagerungsphase verschiedener Gerstevarianten (2006).

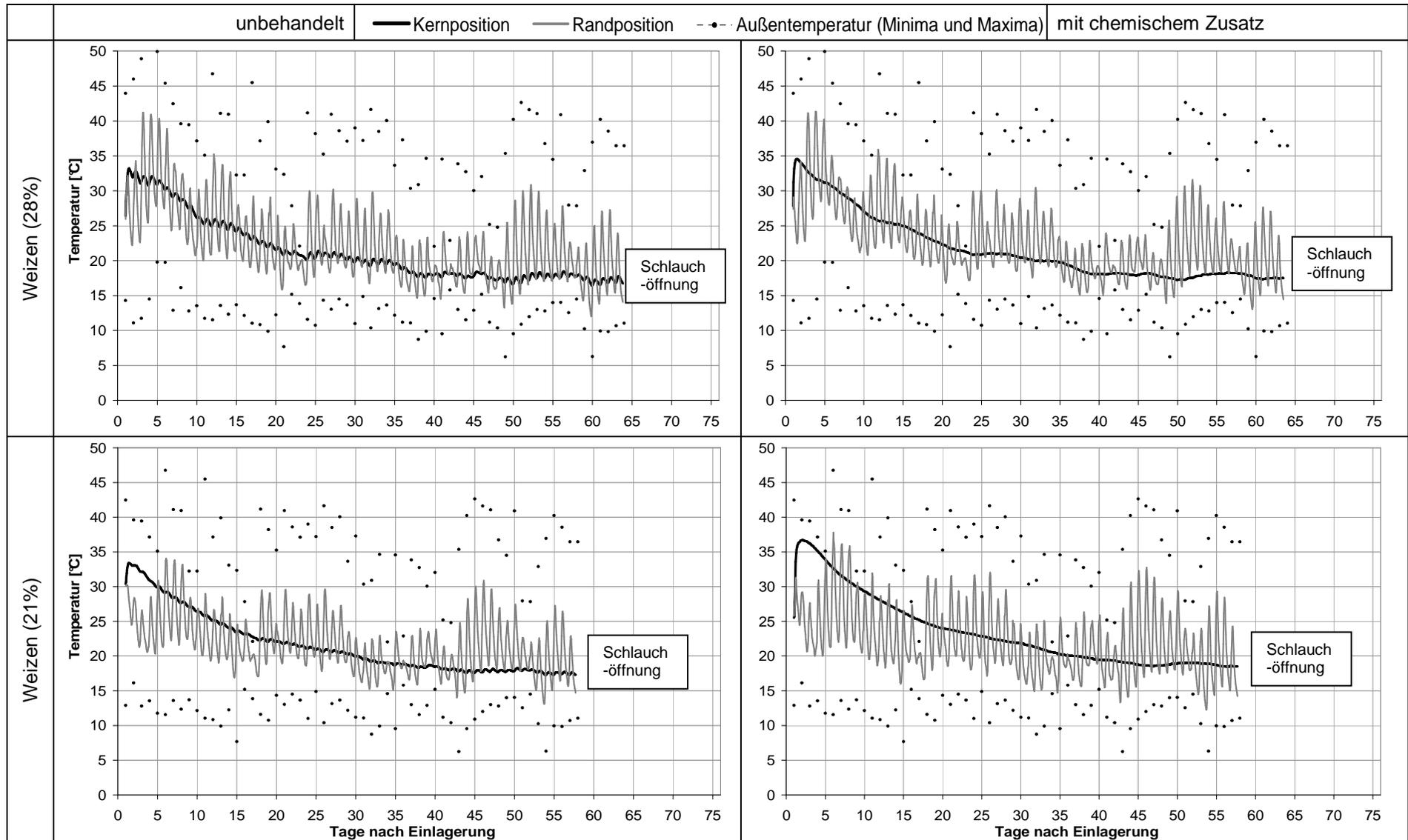


Abbildung 37: Temperaturverläufe in Rand- und Kernposition im Folienschlauch während der anaeroben Lagerungsphase verschiedener Weizenvarianten (2006), *=Schlauchöffnung.

4.6 Aerobe Stabilität

Die aerobe Stabilität (ASTA) stellt einen der wichtigsten Parameter für die Qualitätsbewertung und -erhaltung von Futtermitteln dar. Zur Bestimmung der ASTA wurden verschiedene Methoden verwandt, deren Ergebnisse im folgenden Kapitel zusammengefasst werden.

4.6.1 Folienschläuche

Weizen (1.Versuchsjahr)

Im ersten Versuchsjahr ergaben die Untersuchungen zur aeroben Stabilität der Weizenproben aus den Bilanznetzen im Klimaschrank für keine der Varianten eine Nacherwärmung. Die Untersuchungen am Folienschlauch zeigten dagegen einen deutlichen Einfluss des Feuchtegehaltes. Die Messung der Temperatur an zwei Rand- und einer Kernposition in einer Tiefe von 15 cm hinter der senkrechten Anschnittfläche der unbehandelten Schlauchenden zeigt eine deutliche Nacherwärmung der Weizenvariante mit einem Feuchtegehalt von etwa 18 %. Bereits nach 1,8 Tagen liegt die mittlere Temperatur in der Anschnittfläche um 2 K über jener der angefeuchteten Variante mit 30 % Feuchte (Abbildung 38).

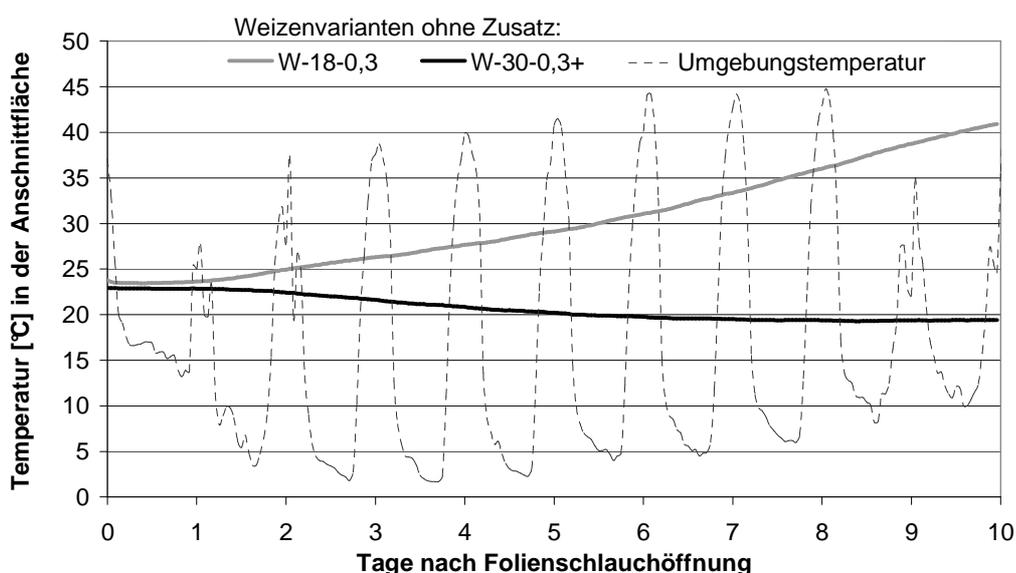


Abbildung 38: Temperaturverlauf in der Anschnittfläche von unbehandeltem, gequetschtem Weizen in zwei Feuchtestufen im Folienschlauch nach Schlauchöffnung (2005; += angefeuchtet; n=3).

Gerste und Weizen (2. Versuchsjahr)

Im zweiten Versuchsjahr wurde der Temperaturverlauf nach Öffnung der Folienschläuche mittels der in den Bilanznetzen eingelegten Temperaturdatenlogger erfasst (Abbildung 39 und Abbildung 40).

Die acht Folienschläuche wurden am 25. September 2006 geöffnet. Vier Tage später erfolgte die Entnahme der Bilanznetze aus den Positionen 1 und 2, um eine Bestimmung der Keimgehalte zum selben Zeitpunkt an Positionen mit unterschiedlichem Abstand zur Anschnittfläche zu ermöglichen. Der Abstand der Anschnittfläche zu den Netzen in Kern- und Randlage der Positionen 3 und 4 betrug zu diesem Zeitpunkt ein bzw. zwei Meter. Über die folgenden zwei Wochen erfolgte alle 2-3 Tage eine Entnahme des Getreides mit einem Siloblockschneider, wobei ein wöchentlicher Vorschub von einem Meter eingehalten wurde.

Abbildung 39 und Abbildung 40 geben die Aufzeichnungen der Temperaturen aus den Bilanznetzen der Netzpositionen 3 und 4 aus Rand und Kernbereich wieder, die bis zur Entnahme der Netze an Tag 11 bzw. 18 erfasst wurden. Zusätzlich ist die Umgebungstemperatur dargestellt, die ebenfalls stündlich direkt über den Schläuchen mit Datenloggern erfasst wurde.

Es wird deutlich, dass die Temperatur im Randbereich aller Getreidevarianten den Umgebungstemperaturen um einige Stunden verzögert folgte, wobei Umgebungstemperaturmaxima von etwa 29°C weniger starken Einfluss hatten als nächtliche Tiefsttemperaturen von 7,5°C. Die mittlere Außentemperatur direkt über den Schläuchen betrug über den Messzeitraum von 18 Tagen 15,9 °C. Diese lag etwa 1 K unter der mittleren Temperatur im Kernbereich der Folienschläuche. Der Einfluss der Schwankungen der Umgebungstemperatur auf die Temperatur im Kernbereich war gering, was an einem stetigen, leicht sinkenden Verlauf erkennbar ist.

Eine Nacherwärmung konnte nur in den beiden unbehandelten Varianten G-31-0,1 und W-21-0,1 eindeutig nachgewiesen werden. Die unbehandelte feuchte Gerste zeigte dabei die stärkste Temperaturerhöhung, die durch einen plötzlichen Anstieg des Kurvenverlaufes in der Randposition ab Tag 7 bzw. 11 deutlich wird. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Abstand der Anschnittfläche zu den Positionen 3 auf 0,6 m bzw. 4 auf 1 m verkürzt.

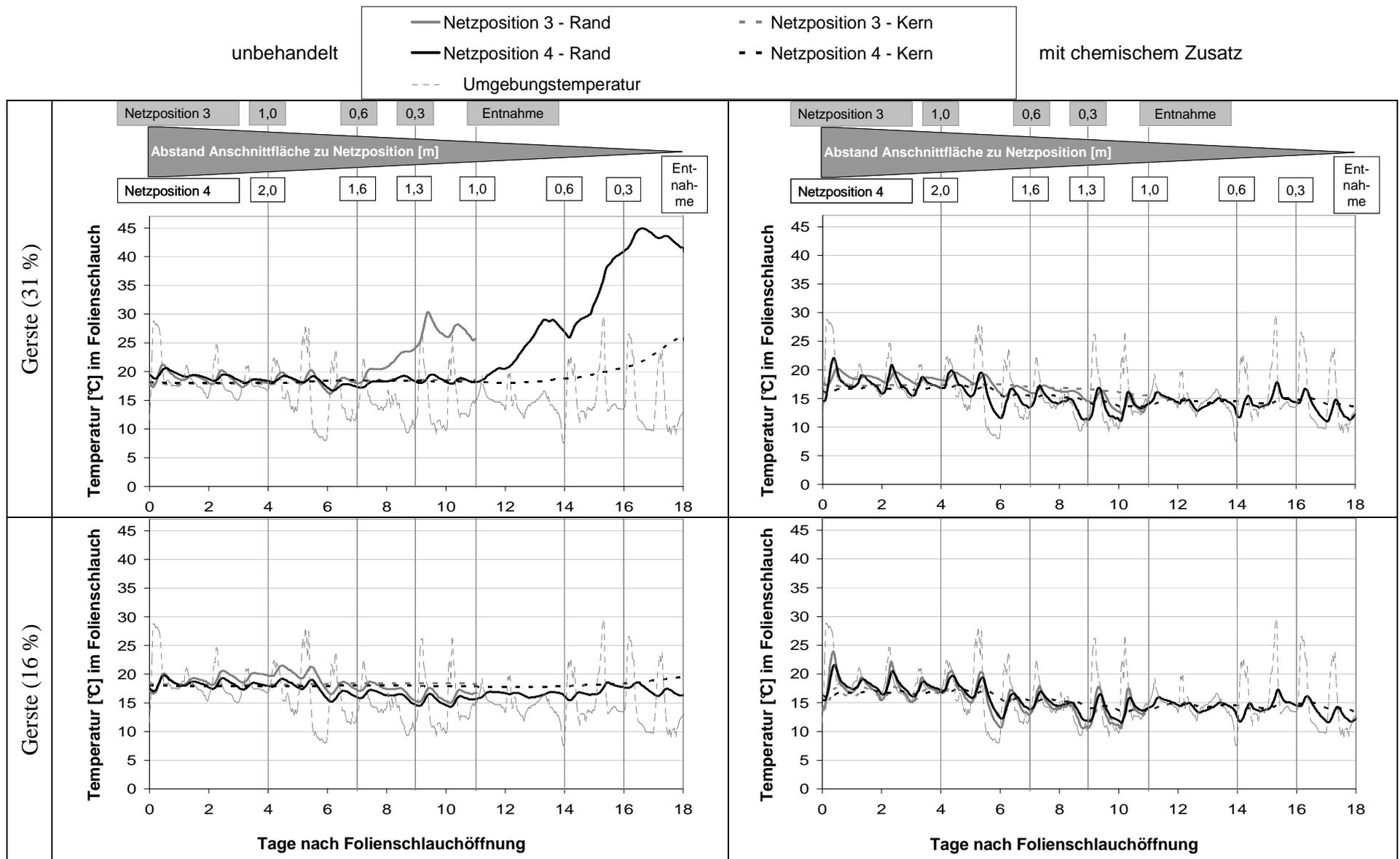


Abbildung 39: Temperaturverlauf in Folienschläuchen mit Gerste verschiedener Feuchtestufen mit und ohne Zusatz nach Öffnung (2006)

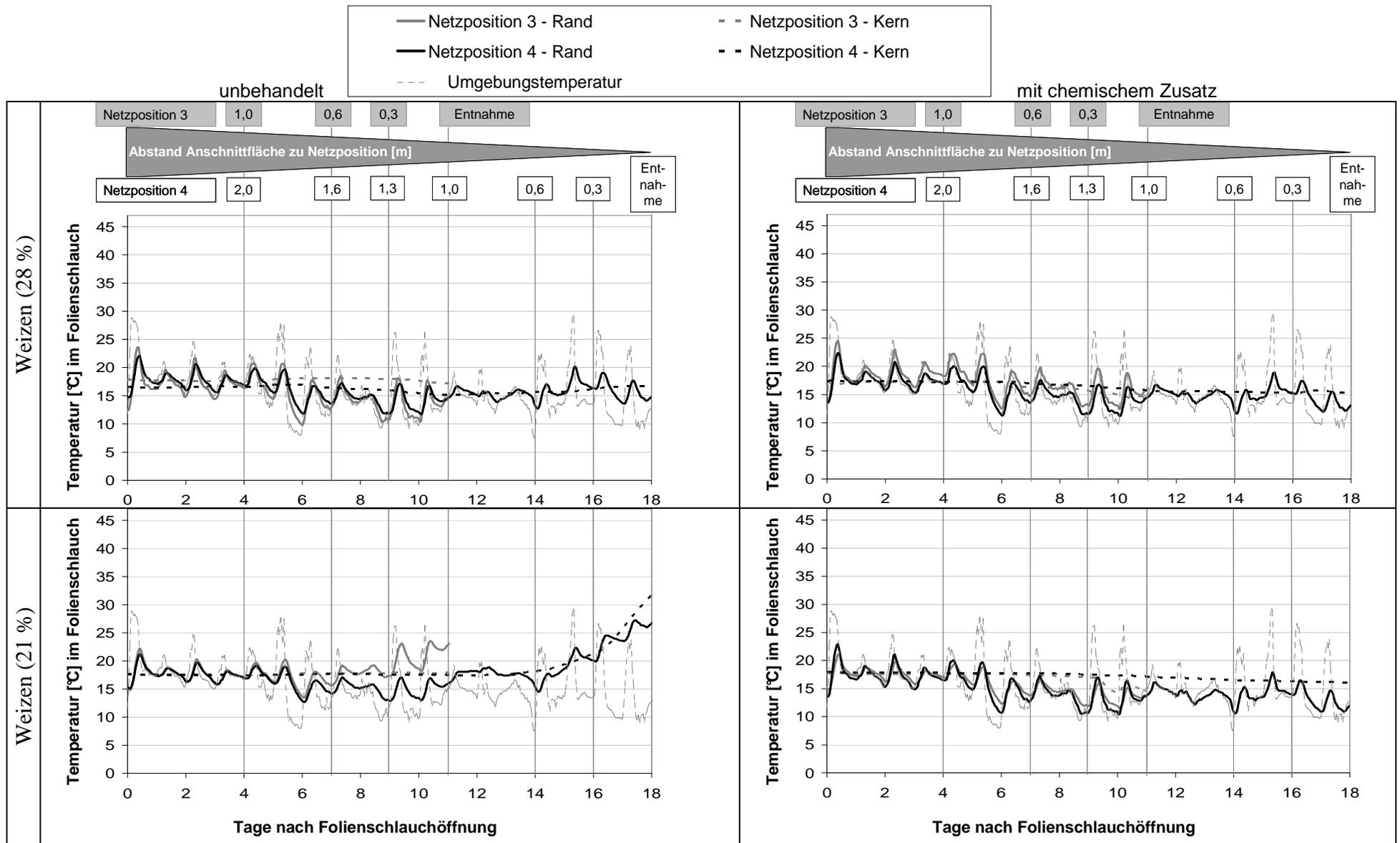


Abbildung 40: Temperaturverlauf in Folienschläuchen mit Gerste verschiedener Feuchtestufen mit und ohne Zusatz nach Öffnung (2006)

Dies zeigt, dass in feuchter Gerste trotz einer senkrechten Anschnittfläche insbesondere im Randbereich Sauerstoff innerhalb einer Woche über einen Meter weit hinter die Anschnittfläche eindringen konnte und eine Nacherwärmung initiierte. Der gewählte Vorschub von einem Meter pro Woche war in dieser Variante nicht ausreichend, um einer Nacherwärmung vorzubeugen.

In unbehandeltem Weizen mit einem Feuchtegehalt von 21 % trat ebenfalls eine Nacherwärmung ein. Gegenüber der unbehandelten Gerste war der Abstand der Bilanznetze zur Anschnittfläche mit 30 bis 60 cm deutlich geringer, als eine Temperaturerhöhung festzustellen war. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Luftzutritt in den Folienschlauch im Vergleich zur Gerste reduziert war.

In den unbehandelten Varianten von G-16-0,1 und W-28-0,1 wurde ebenso wie in allen Varianten mit chemischem Zusatz keine Nacherwärmung festgestellt.

Temperaturmessungen an der Anschnittfläche der Folienschläuche

Zusätzlich zu den kontinuierlichen Messungen der Temperatur in den Bilanznetzen, wurde diese mit einem Stabthermometer jeweils unmittelbar vor deren Entnahme in einer Tiefe von 15 cm hinter der Anschnittfläche erfasst (Abbildung 41). Der Vorteil dieser Methode gegenüber den Messungen in den Bilanznetzen lag in der definierten vertikalen Messposition im Rand- und Kernbereich (10 cm unterhalb des oberen Randes bzw. 50 cm oberhalb der Ablagefläche).

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen in den Bilanznetzen wurden bestätigt. Die Variante G-31-0,1 ohne Zusatz zeigte ab Tag 9 nach Schlauchöffnung eine deutliche Erwärmung sowohl im Kern- als auch im Randbereich auf, der durch den gewählten Vorschub nicht zu verhindern war. Weiterhin wird deutlich, dass eine Nacherwärmung im Weizen ab Tag 9 zunächst nur in der Randposition der unbehandelten trockeneren Variante (W-21-0,1) festzustellen war. Im Kernbereich begann die Nacherwärmung 5 Tage verzögert.

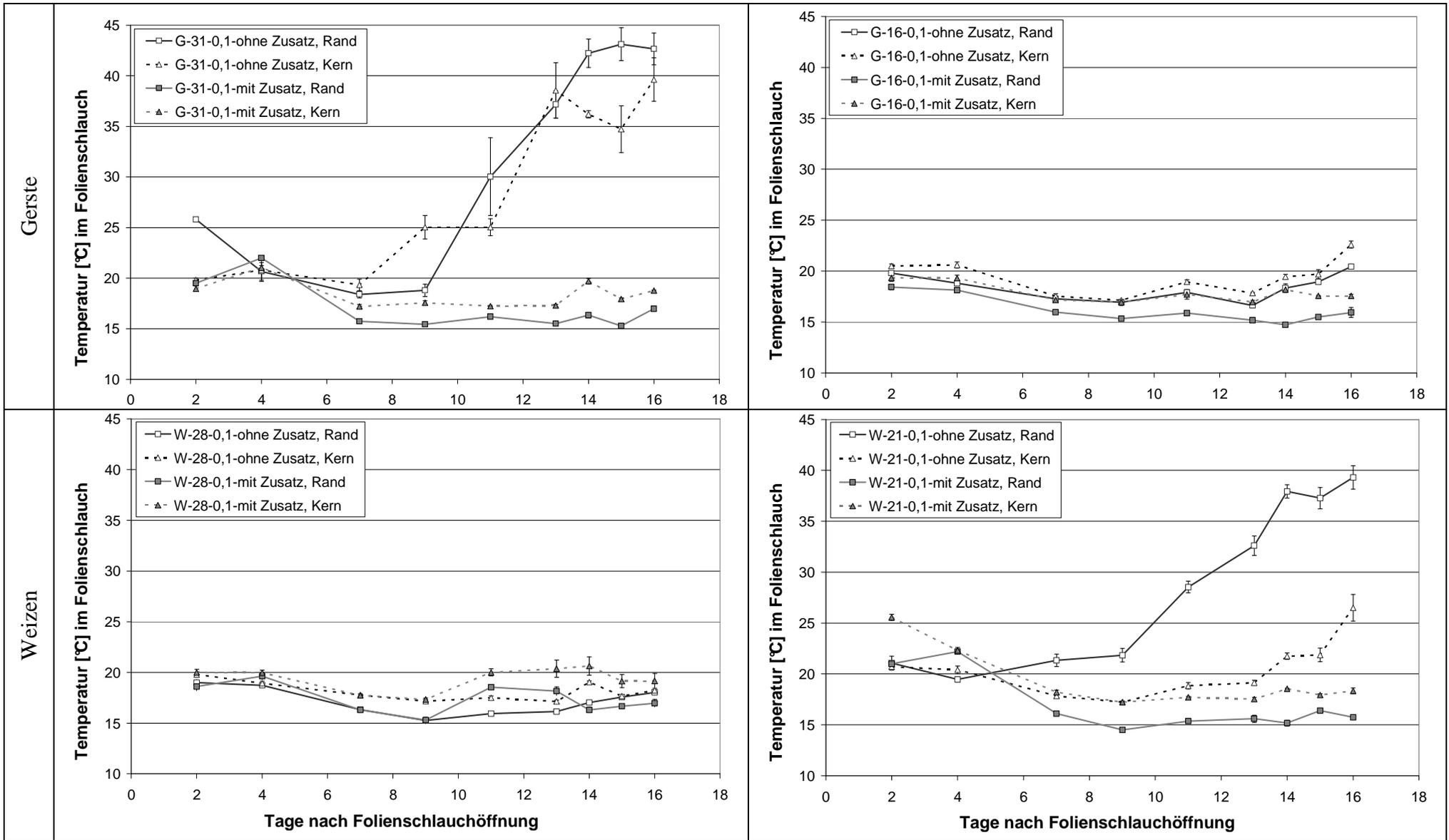


Abbildung 41: Temperatur in der Anschnittfläche verschiedener Feuchtreidevarianten im Folienschlauch nach deren Öffnung (2006; n=3).

Die Intensität der Nacherwärmung im Folienschlauch mit unbehandelter Gerste (Feuchtegehalt 31 %) ist dem Thermografiebild zu entnehmen (Abbildung 42).

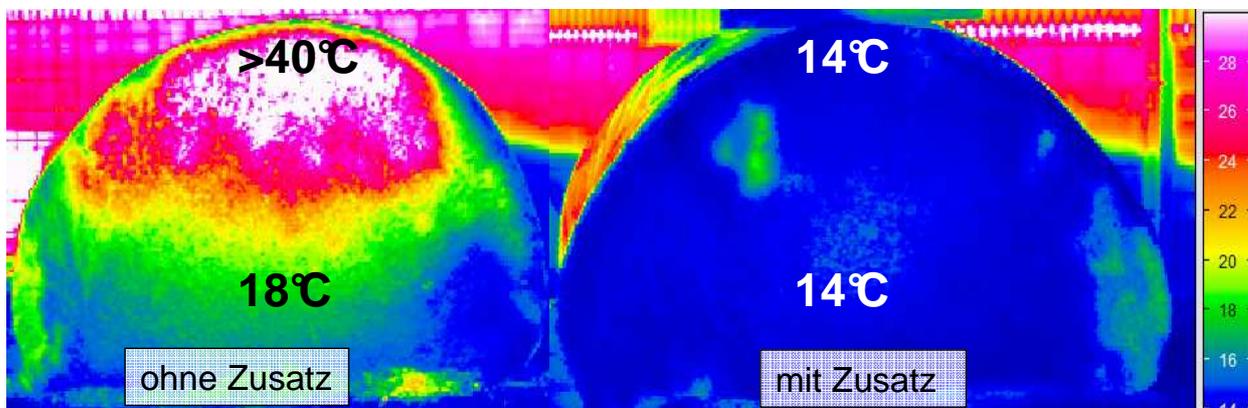


Abbildung 42: Nacherwärmung von Gerste (Feuchte 31%) im Folienschlauch am 19. Tag nach Öffnung. Aufnahmen einer Thermografiekamera, links unbehandelt, rechts mit chemischem Zusatz.

Die Nacherwärmung betraf besonders den oberen Randbereich der unbehandelten Variante. Hier wurden 19 Tage nach Schlauchöffnung bei der gewählten Vorschubgeschwindigkeit Temperaturen über 40°C gemessen. Der Verderb war soweit fortgeschritten, dass eine Verwertung für Fütterungszwecke hier nicht mehr möglich war. Durch das eingesetzte Konservierungsmittel konnte bei den behandelten Substraten eine Nacherwärmung über den Untersuchungszeitraum unterbunden werden.

4.6.2 Silierglasversuche zur aeroben Stabilität

Im kleintechnischen Maßstab wurden Silierglasversuche verwandt, um die ASTA der verschiedenen Feuchtgetreidevarianten unter standardisierten Bedingungen bestimmen zu können. Definiert wurde die ASTA als Zeitraum in Tagen, bis zum Eintreten einer Überschreitung der Umgebungstemperatur von 25°C um 2 K im Feuchtgetreide.

Einfluss von Luftstress und Konservierungsmittelaufwand

Tabelle 22 gibt einen Überblick über die aerobe Stabilität der verschiedenen Gerste- und Weizenvarianten, die im Silierglas für 49 Tage eingelagert waren. Diese Varianten wurden einem 24-stündigen Luftstress an den Tagen 28 und 42 ausgesetzt, bevor die Aufzeichnung des Temperaturverlaufes innerhalb des Feuchtgetreides an Tag 49 für mindestens 10 Tage begann.

Tabelle 22: Aerobe Stabilität verschiedener Gerste- und Weizenvarianten nach 49 Tagen Lagerung im Glas bei Luftstress am 28. Tag und 42.

Tag (2005/2006, + = angefeuchtet, *=signifikante Unterschiede zu 0 l/t FM Konservierungs-mittelaufwand ($\alpha \leq 0,05$)).

49 Tage Lagerung von Feuchtgetreide in Gläsern mit zweimaligem Luftstress					Konservierungsmittel-aufwand [l/t FM]			
Getreideart	Variante	Feuchte [%]	n		0	2	4	6
					Aerobe Stabilität [Tage]			
Gerste	G-16-0,1	17	4	∅	10,0	10,0	10,0	-
				s	0,0	0,0	0,0	-
	G-24-0,3	24	3	∅	1,2	10,0 *	10,0 *	10,0 *
				s	0,9	0,0	0,0	0,0
	G-31-0,1	31	4	∅	1,6	2,2	7,4 *	-
				s	0,4	0,7	3,4	-
	G-30-0,3 ⁺	30 ⁺	3	∅	1,5	-	10,0 *	10,0 *
				s	1,4	-	0,0	0,0
Weizen	W-18-0,3	18	3	∅	10,0	10,0	10,0	10,0
				s	0,0	0,0	0,0	0,0
	W-21-0,1	21	4	∅	1,0	3,3	3,1	-
				s	0,2	2,6	0,6	-
	W-28-0,1	27	4	∅	1,7	1,6	10,0 *	-
				s	0,3	0,1	0,0	-
	W-30-0,3 ⁺	30 ⁺	3	∅	1,4	8,6 *	10,0 *	10,0 *
				s	1,1	2,4	0,0	0,0

Ohne einen Zusatz war nur bei den trockenen Varianten G-16-0,1 und W-18-0,3 keine Nacherwärmung zu ermitteln. Bei einer Aufwandmenge von 2 l/t FM zeigten zusätzlich die Varianten G-24-0,3 und W-30-0,3⁺ eine hohe Stabilität von 10 bzw. etwa 8 Tagen. Die übrigen Varianten wiesen bei dieser Aufwandmenge eine zu geringe Stabilität von weniger als 5 Tagen auf. Bei einem Konservierungsmittelaufwand von 4 l/t FM zeigte keine der untersuchten Varianten über den Untersuchungszeitraum von 10 Tagen eine Nacherwärmung auf. Aus diesem Grunde wurden im zweiten Versuchsjahr für alle Getreidevarianten eine Aufwandmenge von 4 l/t FM gewählt.

Das Ausbleiben einer Nacherwärmung in den trockenen Varianten G-16-0,1 und W-18-0,3 deutete zunächst auf eine scheinbar ausreichende aerobe Stabilität hin. Obwohl keine Nacherwärmung durch die angewandte Methode ermittelt werden konnte, wiesen jedoch die Keimgehalte (Kap.4.4) auf einen eindeutigen Verderb dieser unbehandelten Varianten hin. Die ausschließliche Bestimmung der aeroben Stabilität durch eine Temperaturmessung scheint in Feuchtgetreide mit weniger als 20 % Restfeuchte daher nicht auszureichen.

Einfluss von Lagerdauer und Konservierungsmittelaufwand bei Luftstress

Tabelle 23 gibt die ermittelten aeroben Stabilitäten verschiedener Gerstenvarianten wieder, die über einen Zeitraum von 3 bis 180 Tagen in Siliergläsern anaerob gelagert und anschließend auf ihre aerobe Stabilität untersucht wurden.

Vergleichbar den Untersuchungen mit zwischenzeitlichem Luftstress zeigten die unbehandelten Gerstevarianten mit einem Feuchtgehalt von 16 % unabhängig von der Lagerdauer eine scheinbar hohe Stabilität. Bei Betrachtung der Keimgehalte (Kap. 4.4.2) war aber wiederum trotz fehlender Nacherwärmung von einem Verderb auszugehen. Die Ergebnisse aus dem Versuch mit Luftstress wurden bestätigt. Alle Gerstenvarianten mit einem Zusatz von 4 l/t FM wiesen keine Nacherwärmung über den Untersuchungszeitraum auf. Für einige Varianten konnte dies auch schon bei einer Aufwandmenge von 2 l/t FM nachgewiesen werden.

Bei der Variante G-31-0,1 war ein leichter Anstieg der Stabilität mit zunehmender Lagerdauer zu erkennen. Bei einer Lagerdauer von 3 Tagen trat bereits unmittelbar nach Öffnung der Gläser eine Nacherwärmung ein. Nach 30 Tagen Lagerdauer dauerte es etwa 2,5, nach 90 Tagen etwa 4 Tage bis eine Nacherwärmung eintrat. Bei 180 Tagen Lagerdauer begann die Nacherwärmung nach knapp fünf Tagen. In Varianten, in denen eine Fermentation stattfand wirkte sich die Lagerdauer positiv auf die aerobe Stabilität aus.

Tabelle 23: Aerobe Stabilität verschiedener Gerstevarianten in Abhängigkeit von Einlagerungsfeuchte und Lagerdauer im Silierglas

2005/2006; + = angefeuchtet; n=3, *=signifikante Unterschiede zu 0 l/t FM Konservierungsmittelaufwand ($\alpha \leq 0,05$).

Variante	Getreide-			Konservierungsmittelaufwand [l/t FM]			
	Lagerdauer [Tage]	Feuchte [%]		0	2	4	6
				Aerobe Stabilität [Tage]			
G-31-0,1	3	31	∅	0,3	-	10,0 *	-
			s	0,1	-	0,0	-
G-16-0,1	30	16	∅	10,0	-	10,0	-
			s	0,0	-	0,0	-
G-31-0,1	30	31	∅	2,5	-	10,0 *	-
			s	0,6	-	0,0	-
G-16-0,1	90	16	∅	10,0	-	10,0	-
			s	0,0	-	0,0	-
G-24-0,3	90	24	∅	4,5	10,0 *	10,0 *	10,0 *
			s	0,4	0,0	0,0	0,0
G-31-0,1	90	31	∅	4,2	-	10,0 *	-
			s	2,5	-	0,0	-
G-30-0,3 ⁺	90	30 ⁺	∅	1,8	10,0 *	10,0 *	10,0 *
			s	0,2	0,0	0,0	0,0
G-16-0,1	180	16	∅	10,0	-	10,0	-
			s	0,0	-	0,0	-
G-31-0,1	180	31	∅	4,7	-	8,1	-
			s	0,1	-	3,3	-

Tabelle 24 gibt die aeroben Stabilitäten verschiedener Weizenvarianten wieder, die über einen Zeitraum von 3 bis 180 Tagen in Siliergläsern gelagert wurden. Ebenso wie in Gerste wies keine der Weizenvarianten mit einem Zusatz von 4 l/t FM eine Nacherwärmung über den Untersuchungszeitraum auf. Für die Varianten W-18-0,3 und W-30-0,3⁺ konnte dies auch bereits bei einer Aufwandmenge von 2 l/t FM nachgewiesen werden.

Ähnlich der Gerste und im Unterschied zur Untersuchung mit Luftstress zeigten unbehandelte Weizenvarianten mit einem Feuchtgehalt von mehr als 27 % schon ab einer Lagerdauer von 30 Tagen eine deutlich längere Stabilität als Varianten mit etwa 20 % Feuchte. Bei der Variante W-28-0,1 war ein Anstieg der Stabilität mit zunehmender Lagerdauer zu erkennen. Nach 30 Tagen dauerte es etwa 6, nach 90 Tagen knapp 8 Tage bis eine Nacherwärmung auftrat. Bei 180 Tagen Lagerdauer trat nach 10 Tagen noch keine

Nacherwärmung auf. Für die angefeuchtete Weizenvariante W-30-0,3⁺ traf dies auch bei einer Lagerung über 90 Tage im Silierglas zu. Hier wurde die Messung nach 25 Tagen unter Lufteinfluss ohne Nacherwärmung abgebrochen. Ein positiver Einfluss der Lagerdauer auf die aerobe Stabilität in den Varianten mit Fermentation konnte aufgezeigt werden.

Bei einem Feuchtegehalt von etwa 21 % war kein Einfluss der Lagerdauer auf die Stabilität erkennbar. Mit Werten zwischen 2 und 3,5 Tagen ist diese als zu gering einzustufen. Eine recht hohe Stabilität von etwa 8 Tagen in der W-18-0,3-Variante ist nicht eindeutig erklärbar. Von drei Wiederholungen blieben zwei über den Messzeitraum stabil, während sich eine nach etwa 5 Tagen erwärmte. Dies deutete wiederum auf die begrenzte Eignung der Temperaturmessung zur Bestimmung des Verderbs in Getreide mit weniger als 20 % Feuchte hin.

Tabelle 24: Aerobe Stabilität verschiedener Weizenvarianten in Abhängigkeit von Einlagerungsfeuchte und Lagerdauer im Silierglas

2005/2006; ⁺=angefeuchtet; n=3; *=signifikante Unterschiede zu 0 l/t FM Konservierungsmittelaufwand ($\alpha \leq 0,05$)).

Variante	Getreide-			Konservierungsmittelaufwand [l/t FM]			
	Lagerdauer [Tage]	Feuchte [%]		0	2	4	6
				Aerobe Stabilität [Tage]			
W-21-0,1	3	21	∅	3,5	-	10 *	-
			s	0,8	-	0,0	-
W-21-0,1	30	21	∅	2,1	-	10 *	-
			s	0,6	-	0,0	-
W-28-0,1	30	27	∅	5,8	-	10 *	-
			s	0,3	-	0,0	-
W-18-0,3	90	18	∅	8,4	10,0	10,0	10,0
			s	2,7	0,0	0,0	0,0
W-21-0,1	90	21	∅	2,0	-	10,0 *	-
			s	0,2	-	0,3	-
W-28-0,1	90	27	∅	7,6	-	10,0 *	-
			s	0,9	-	0,0	-
W-30-0,3 ⁺	90	30	∅	10,0	10,0	10,0	10,0
			s	0,0	0,0	0,0	0,0
W-21-0,1	180	21	∅	3,2	-	10,0 *	-
			s	0,7	-	0,0	-
W-28-0,1	180	27	∅	10,0	-	10,0	-
			s	0,0	-	0,0	-

4.7 Partikelgrößenverteilung

Die Bestimmung der Partikelgrößen lässt sowohl einen deutlichen Einfluss der Getreideart als auch der Getreidefeuchte erkennen (Abbildung 43). Für eine bessere Einordnung der Ergebnisse fließen die Untersuchungen zum Feuchtmais von MAACK (2006) mit ein.

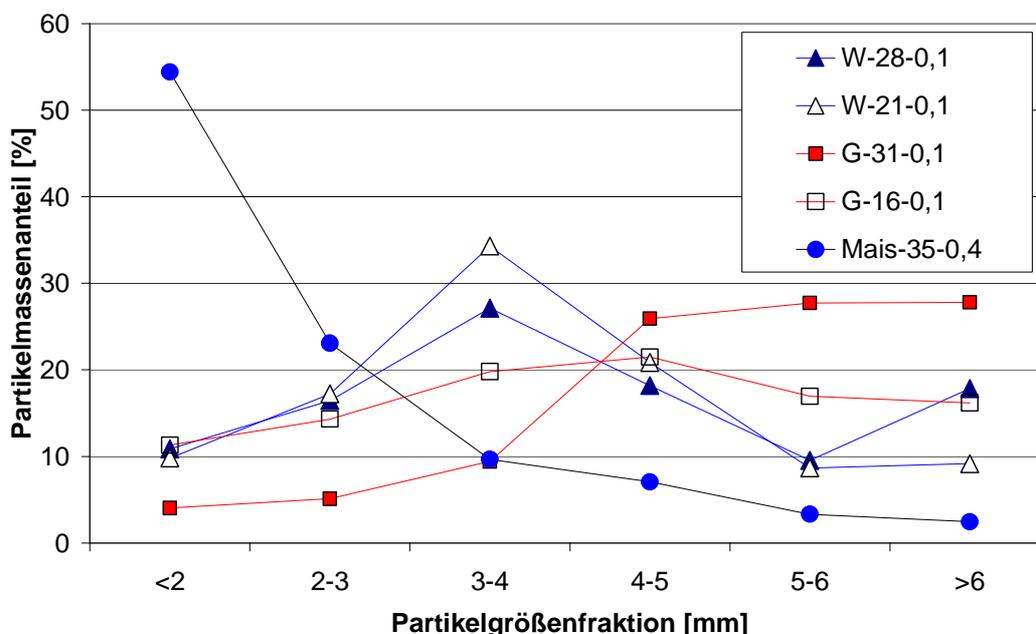


Abbildung 43: Partikelgrößenverteilung von gequetschtem Feuchtgetreidevarianten aus Folienschläuchen

Weizen, Gerste und Mais verschiedener Feuchtegehalte, Mahlschlitz 0,1 bzw. 0,4 mm für Mais

Während das Quetschen feuchter Maiskörner bereits bei einem Walzenabstand von 0,4 mm zu einem Anteil von über 50 % in der Fraktion <2 mm führte, waren bei Weizen und Gerste in dieser Fraktion trotz eines Walzenabstandes von 0,1 mm nur etwa 10 % zu finden.

Bei Weizen lag der größte Massenanteil sowohl bei einem Feuchtegehalt von 28 %, als auch bei 21 % in der Fraktion 3-4 mm. Ein relativ hoher Anteil von knapp 20 % war beim feuchten Weizen in der Fraktion >6 mm festzustellen. Die Feuchte des Getreideskörners bedingte eine Agglomeration kleiner Partikel, die aufgrund der Inhaltsstoffe des Getreides regelrecht verklebt wurden. Diese Verbindung konnte teilweise selbst durch eine Trocknung bei 105°C nur bedingt aufgelöst werden. Dieser Effekt war ebenfalls bei feuchter Gerste zu erkennen. Die Spelzen des Gerstenkörners verursachten einen hohen Anteil von Partikeln >4 mm, da die Rillen der Quetschwalzen bei feuchten Gerstenkörnern

zwar die Bauch- und Rückenspelzen durchdrangen und zu der gewünschten Beschädigung der Frucht- und Samenschale führten. Die Spelzen selbst wurden jedoch aufgrund ihrer Elastizität nicht zerkleinert, so dass das Korn insgesamt nur geplättet wurde. Mit abnehmendem Feuchtegehalt traten insbesondere bei Gerste signifikant mehr Bruchstücke in der Fraktion <2 mm bzw. weniger in der Fraktion >6 mm auf, was zu einer Absenkung der mittleren Partikelgröße führte (Tab. A 8, S.166). Neben den Einflüssen von Getreideart und -feuchte wurden teilweise auch Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit der Entnahmeposition an der Anschnittfläche der Folienschläuche festgestellt (Tab. A 9, S. 167). Eine allgemeingültige Abhängigkeit der Partikelgröße von der Entnahmeposition konnte daraus aber nicht abgeleitet werden.

4.8 Untersuchungen zur Lagerungsdichte und Verdichtbarkeit

Aus den Untersuchungen konnte ein deutlicher Einfluss von Getreideart und -feuchte abgeleitet werden. Für eine bessere Einordnung der Ergebnisse werden die Untersuchungen von MAACK (2006) im Folgenden mit einbezogen.

4.8.1 Lagerungsdichte im Folienschlauch

Die Bestimmung der Lagerungsdichte im Folienschlauch erwies sich aufgrund der Silogeometrie und materialspezifischer Eigenschaften als schwierig. Voruntersuchungen zur punktuellen Bestimmung der Lagerungsdichte an der Anschnittfläche mit einem Bohrstock für Grundfuttersilagen (*Fa. Pioneer*) stellten sich als ungeeignet heraus, da sich der Durchmesser des verwendeten Bohrstockes als zu gering erwies und es im Öffnungsbereich zu Verstopfungen kam. Dagegen ergaben sowohl die Untersuchungen mit einem Stechzylinder als auch Messungen mit einem Penetrometer auswertbare Ergebnisse.

Ergebnisse der Vorversuche an Feuchtmais im Folienschlauch

Abbildung 44 gibt die Ergebnisse der Vorversuche mit Stechzylindern (100 cm³) an der Anschnittfläche von Feuchtmais im Folienschlauch wieder. Die aufgezeigten Trockenmassedichten zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Entnahmeposition. Eine minimale Lagerungsdichte von etwa 380 kg TM/m³ war dabei im linken oberen Rand zu finden, der Maximalwert von 556 kg TM/m³ befand sich erwartungsgemäß im Kernbereich.

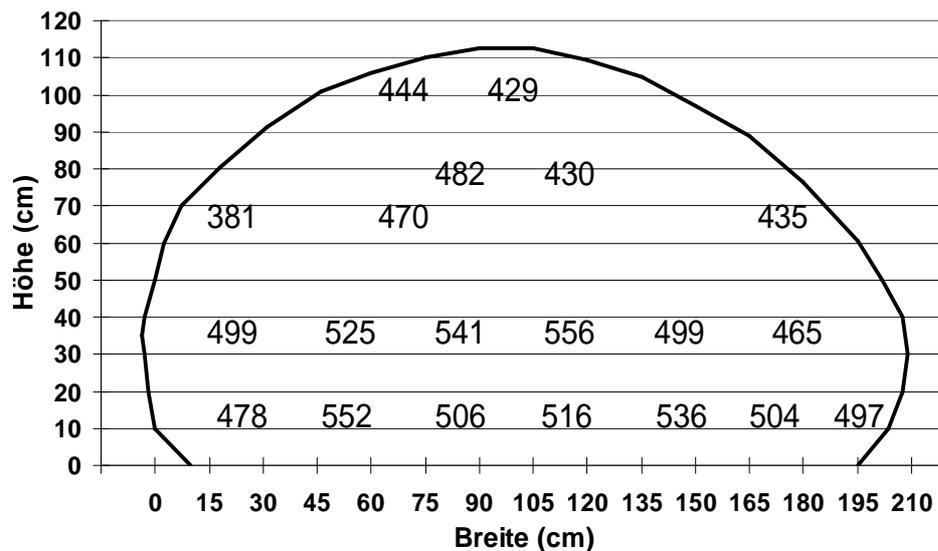


Abbildung 44: Lagerungsdichte von Feuchtmais im Folienschlauch an verschiedenen Positionen der Anschnittfläche (kg TM/m³, n=1; MAACK, 2006).

Aus den 20 Einzelwerten ergab sich für den untersuchten gequetschten Körnermais mit einem Feuchtegehalt von etwa 33 % eine durchschnittliche Trockenmasselagerungsdichte von 487 kg TM/m³. Für die Einlagerung von 300 t Feuchtmais wurde durch Schlauchvermessung ein Wert von 513 kg TM/m³ ermittelt. Die Wiegung eines definierten Schlauchabschnittes ergab einen Wert von mit 503 kg TM/m³. Die messmethodisch bedingten Unterschiede waren mit weniger als 5 % als gering einzustufen, so dass alle drei Bestimmungsmethoden für die Lagerungsdichte grundsätzlich als geeignet beurteilt werden konnten (MAACK, 2006).

Ermittlung der Lagerungsdichte im Feuchtgetreide mittels Stechzylinder

Die verwendete Stechzylindermethode erwies sich für eine quantitative Bestimmung der Lagerungsdichte an verschiedenen Positionen der Anschnittfläche von Folienschläuchen mit Gerste und Weizen zweier Feuchtestufen im zweiten Versuchsjahr als geeignet (Abbildung 45).

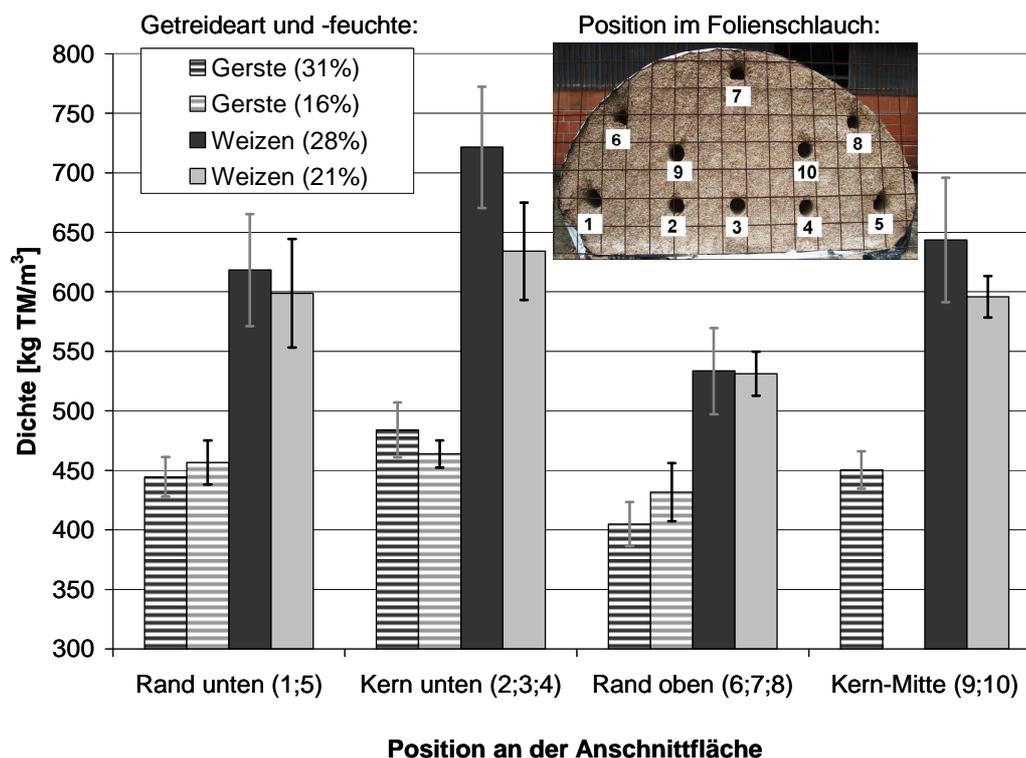


Abbildung 45: Lagerungsdichte verschiedener Getreidevarianten in Abhängigkeit der Entnahmeposition an der Anschnittfläche von Folienschläuchen (n=5).

Die Getreideart hatte den stärksten Einfluss auf die Lagerungsdichte im Folienschlauch. Weizen erreichte an allen Schlauchpositionen signifikant höhere Trockenmasselagerungsdichten als Gerste (Tab. A 7, S.165). Dabei war bei Weizen zusätzlich ein Einfluss des Feuchtegehaltes erkennbar. So lagen die Lagerungsdichten von Weizen mit einem Feuchtegehalt von 28 % über alle 10 Positionen und mit 5-facher Wiederholung gemittelt bei 630 kg TM/m³. Der entsprechende Wert des Weizens mit einer Feuchte von 21 % war mit 590 kg TM/m³ etwa 6 % geringer. In Gerste wurden bei beiden Feuchtestufen im Mittel nur etwa 450 kg TM/m³ erreicht. Unabhängig von der Entnahmeposition lagen somit die Dichten von Weizen mit 21 % Feuchte um etwa 30 %, bei Weizen mit 28 % Feuchte um etwa 40 % über denen der Gerste.

In der Abbildung 45 sind Rand- und Kernpositionen zusammengefasst. Die maximalen bzw. minimalen Dichtewerte wurden in allen Varianten für die Positionen 3 und 6 ermittelt. Dabei war in W-28-0,1 eine Abnahme der Trockenmassedichte von Position 3 zu 7 um 30 %, bei G-31-0,1 um 21,5 %, bei W-21-0,1 um 18,7 % und bei G-16-0,1 um 7,2 % festzustellen. Der obere Randbereich wies somit in allen Varianten die geringste

Verdichtung auf, wobei in der Variante G-31-0,1 mit 405 kg TM/m³ der geringste und in W-28-0,1 mit 533 kg TM/m³ der höchste Wert für diese Position zu finden war.

Folienschlauchvermessung zur Bestimmung der Lagerungsdichte

Tabelle 25 zeigt die Anschnittfläche der Folienschläuche im zweiten Versuchsjahr. Bei Entnahme mit einem Blockschneider konnte an allen untersuchten Getreidevarianten eine stabile Anschnittfläche hinterlassen werden. Lediglich bei Gerste mit einem Feuchtegehalt von 16 % musste zur Bereitung einer senkrechten Anschnittfläche eine manuelle Entnahme erfolgen.

Zur Bestimmung der Folienschlauchmaße wurden Bilder der Anschnittflächen mit einem davor positionierten Gitter mit einer Maschenweite von 15 cm erstellt. Die Auswertung der Bilddaten ergab nur geringe Unterschiede bezüglich Schlauchhöhe und -breite. Je nach Getreidevariante lagen die Schlauchhöhen am Scheitelpunkt zwischen 1 m und 1,25 m, die Schlauchbreiten zwischen 2,10 m und 2,30 m. In Hinblick auf den Schutz der Folienschläuche vor Schadtieren ist dabei darauf hinzuweisen, dass die maximale Breite bei allen Schläuchen etwa 20 cm über der Ablagefläche lag. Unterhalb dieses Bereiches kommt einem Schutz der Folie gegen Nager eine besondere Bedeutung zu. Ein direktes Anliegen von Schutznetzen ist hier nur mit erhöhtem Aufwand zu erzielen.

Die Verhältnisse von Schlauchbreite zu -höhe zeigen auf, dass die Weizenvarianten mit 2,01 (W-28-0,1) bzw. 1,90 (W-21-0,1) eine flachere Form aufwiesen als die Gerstevarianten mit 1,77 (G-31-0,1) bzw. 1,85 (G-16-0,1). Dies kann durch die generell höheren Lagerungsdichten von Weizen erklärt werden (Abbildung 45, S.109). Durch das höhere Eigengewicht kommt es im Vergleich zu Gerste zu einer stärkeren Setzung des Folienschlauches.

Mit 1,85 m² hatte W-28-0,1 die kleinste Anschnittfläche und G-16-0,1 mit 2,22 m² die größte. Die Anschnittflächen der trockeneren Varianten von Gerste und Weizen waren gegenüber den feuchteren etwa 10 % größer. Es ergaben sich je laufenden Meter Folienschlauch Inhalte von etwa 900 bis 1200 kg TM. Die scheinbar geringen Unterschiede in der Anschnittfläche verursachten teilweise deutliche Differenzen bezüglich des Inhalts an Trockenmasse je laufenden Meter Folienschlauch. Bei Gerste führte eine 10 % größere Anschnittfläche bei G-16-0,1 gegenüber G-31-0,1 aufgrund der gleichen durchschnittlichen TM/m³ zu 10 % mehr Inhalt an TM je Meter Folienschlauch.

Tabelle 25: Übersicht der Anschnittflächen und Folienschlauchmaße (2006).

	<p>Gerste (31%) (G-31-0,1) Breite: 2,11 m Höhe: 1,19 m Breite:Höhe : 1,77 Umfang. 5,54 m Anschnittfläche: 2,03 m² Masse je lfd. Meter: 914 kg TM</p>
	<p>Gerste (16%) (G-16-0,1) Breite: 2,26 m Höhe: 1,22 m Breite:Höhe : 1,85 Umfang. 5,86m Anschnittfläche: 2,22 m² Masse je lfd. Meter: 1000 kg TM</p>
	<p>Weizen (28%) (W-28-0,1) Breite: 2,15 m Höhe: 1,07 m Breite:Höhe : 2,01 Umfang. 5,47 m Anschnittfläche: 1,85 m² Masse je lfd. Meter: 1166 kg TM</p>
	<p>Weizen (21%) (W-21-0,1) Breite: 2,20 m Höhe: 1,16 m Breite:Höhe : 1,90 Umfang. 5,66 m Anschnittfläche: 2,06 m² Masse je lfd. Meter: 1215 kg TM</p>

Die Anschnittfläche von W-21-0,1 war um etwa 11 % größer als bei der feuchteren Weizenvariante. Die durchschnittliche Lagerungsdichte von Weizen mit einem Feuchtegehalt von 21 % war jedoch gegenüber Weizen mit 28 % um etwa 6 % auf 590 kg TM/m³ verringert. Daher nahm die eingelagerte Trockenmasse lediglich um etwa 4 % zu, erreichte jedoch bei dem gewählten Tunneldurchmesser von 1,55 m mit 1215 kg TM in den untersuchten Getreidevarianten den Maximalwert an Trockenmasse je Meter Folienschlauch. Dies deutet darauf hin, dass bereits geringe Variationen im gewählten Druckbereich von 50-60 bar auch bei geringen Unterschieden im Feuchtegehalt zu deutlichen Unterschieden in der durchschnittlich eingelagerten Trockenmasse führen können.

Für die Folienschläuche mit Feuchtmais wurde eine Anschnittfläche von 2,08 m² ermittelt. Unter Berücksichtigung der ermittelten durchschnittlichen Trockenmassedichten von etwa 500 kg/m³ ergab sich je laufenden Meter Folienschlauch ein Inhalt von 1042 kg TM. Dieser Wert lag somit zwischen den für Gerste und Weizen ermittelten Inhalten (MAACK, 2006).

Beschreibung der Lagerungsdichte durch Eindringwiderstandsmessungen

Die Messungen mit einem Penetrometer zur Bestimmung des Eindringwiderstandes in Folienschläuchen ergab deutliche Unterschiede zwischen den Getreidevarianten (Abbildung 46). Es kann somit zunächst eine qualitative Aussage über den vertikalen Verlauf der Verdichtung von Gerste und Weizen im Folienschlauch getroffen werden. Bei vertikaler Einstichrichtung in der Mitte der Folienschläuche wies Weizen in beiden untersuchten Feuchtevarianten die stärkste Zunahme des Eindringwiderstandes bei zunehmender Tiefe auf. Dabei war ab einer Tiefe von etwa 30 cm im Weizen mit 28 % Feuchte gegenüber der trockeneren Variante mit 21 % Feuchte ein erhöhter Kraftaufwand nötig, um den Konus in das Material zu drücken. Um in eine Tiefe von 80 cm vorzudringen war bei der feuchteren Weizenvariante eine Kraft von etwa 370 N/cm² aufzubringen, während bei der trockeneren Variante etwa 300 N/cm² ausreichten. Die benötigte Kraft bei feuchter Gerste mit 31 % Feuchte war mit etwa 145 N/cm² weniger als halb so groß und bei einer Feuchte von nur 16 % waren lediglich 75 N/cm² notwendig, um in 80 cm Tiefe vorzudringen. Die geringe Zunahme des Eindringwiderstandes in trockener aber auch feuchter Gerste, sowie die deutliche Zunahme in Weizen kann als Bestätigung der durch Stechzylinder ermittelten Ergebnisse zur Lagerungsdichte interpretiert werden.

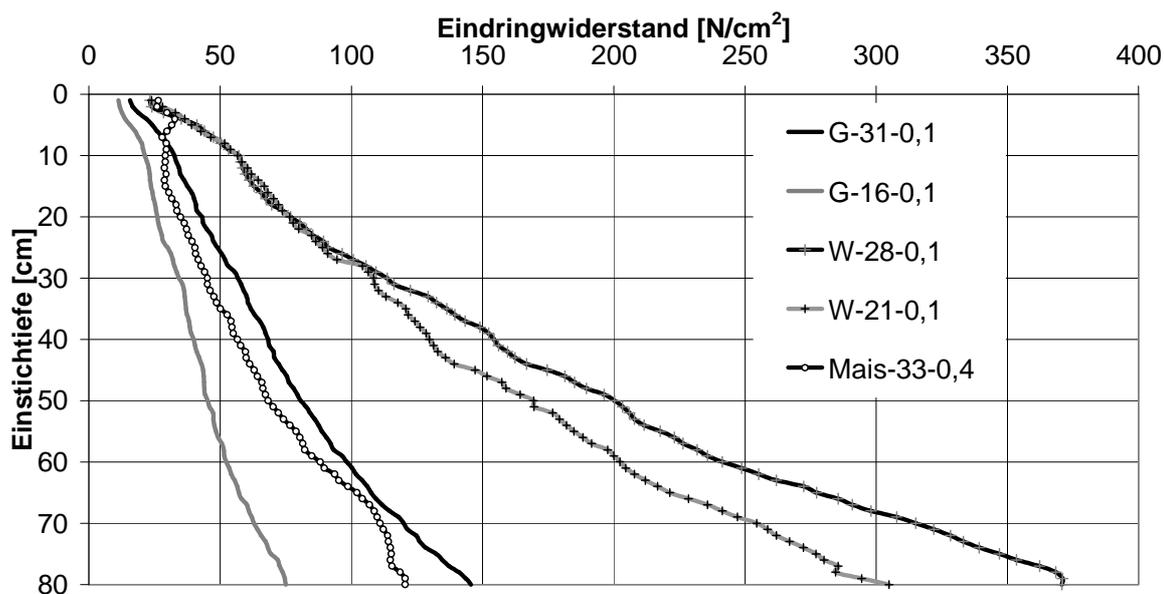


Abbildung 46: Vertikaler Eindringwiderstand in Folienschläuchen mit verschiedenen Getreidevarianten ($n \geq 10$).

4.8.2 Untersuchungen mit einer Materialprüfmaschine

Die bereits beschriebenen Unterschiede in der Verdichtbarkeit und Lagerungsdichte der Getreidevarianten konnten durch Untersuchungen mit der Materialprüfmaschine in beiden Versuchsjahren bestätigt werden.

Zunächst wurden im ersten Versuchsjahr Feuchtgetreidevarianten mit der Materialprüfmaschine mit einem Maximaldruck von 0,38 MPa untersucht. Die maximal erreichbaren Trockenmassedichten wurden in Weizen festgestellt (Tab. A 10). Eine Anfeuchtung des Getreides um 10 Prozentpunkte auf 28 % Feuchte führte zu einer Steigerung der Verdichtbarkeit um 4 % auf 701 kg bzw. 6 % auf 723 kg/m³ nach Wiederholung der Verdichtung gegenüber der trockenen Variante. Nach Relaxation erreichten die angefeuchteten Weizen- wie auch Gerstevarianten nur 1,5-2 % höhere Lagerungsdichten als die trockenen Vergleichsvarianten. Die Druck-Dichte-Diagramme (Abb. A 1, S.169) zeigen den Verlauf und die maximal erreichbare Trockenmassedichte von ganzen Weizenkörnern, mit einem Mahlpalt von 0,3 mm gequetschten Weizen, sowie nach wiederholter Verdichtung nach 1 min Wartezeit. Aus dem Kurvenverlauf sowie der Übersicht der untersuchten Varianten (Tab. A 10) wird deutlich, dass eine Verdopplung des Pressdruckes von 0,2 auf 0,38 MPa lediglich zu einer geringen Steigerung der Trockenmassedichte führte. Diese betrug etwa 6-10 % bei Weizen und Mais bzw. 12 % bei Gerste. Auch eine wiederholte Pressung des Materials nach einer Minute Relaxationszeit

hatte einen geringen Effekt. Die Steigerung betrug bei 0,2 MPa 4 %, bei 0,38 MPa 1 % bei der trockenen Weizenvariante bzw. 7 und 3 % beim angefeuchteten Weizen. Aus diesem Grunde wurde der Maximaldruck für die Varianten des zweiten Versuchsjahres auf 0,2 MPa beschränkt und auch auf eine Wiederholung des Pressvorganges verzichtet. Aus Abbildung 47 und (Tab. A 10) geht hervor, dass sowohl bei Gerste als auch bei Weizen mit fortschreitender Abreife und somit abnehmendem Feuchtegehalt die Verdichtbarkeit der gequetschten Körner deutlich abnahm.

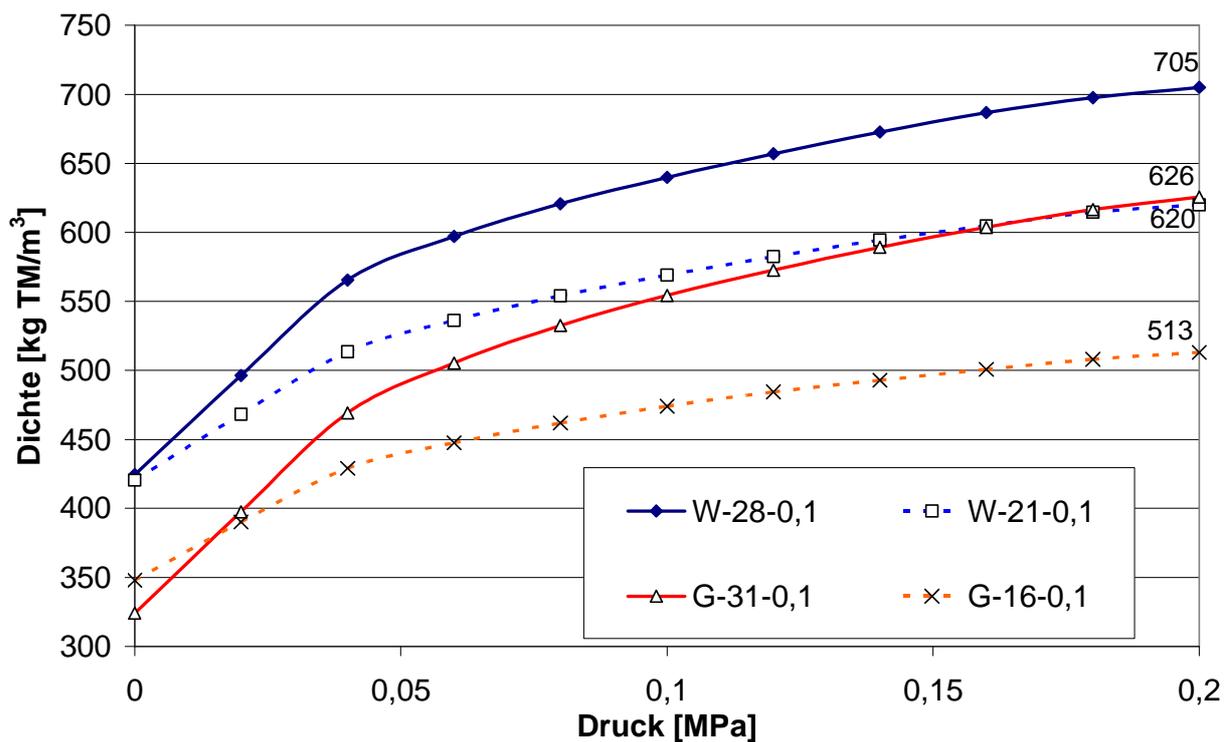


Abbildung 47: Druck-Dichte-Diagramm gequetschter Gerste- und Weizenvarianten mit unterschiedlichem Abreifungsgrad (2006)

Ergänzend dazu sind in Abbildung 48 die Schüttdichten, sowie die im Presszylinder bei einem Maximaldruck von 0,2 MPa und nach einer Relaxationszeit von einer Minute ermittelten Trockenmassedichten dargestellt. Gerste mit einem Feuchtegehalt >30 % wies zwar bezogen auf die Schüttdichte mit 94 % die höchste Verdichtbarkeit bei einem Maximaldruck von 0,2 MPa auf, die Rückfederung nach Entlastung hatte jedoch mit 28 % ebenfalls den höchsten Wert. Verglichen mit der feuchten Variante führte eine Halbierung des Feuchtegehaltes auf etwa 16 % zu einer Reduzierung der Verdichtbarkeit auf 56 %. Die Rückfederung war mit 17 % nur gering reduziert.

Im Vergleich dazu konnte die Trockenmassedichte von Weizen bei einem Feuchtegehalt von 27 % um 75 %, bei 21 % Feuchte um 54 % gegenüber der losen Schüttdichte gesteigert werden. Die Rückfederung betrug bei beiden Feuchtevarianten mit 10 bzw. 9 % nur ein Drittel bzw. die Hälfte der Rückfederung von Gerste.

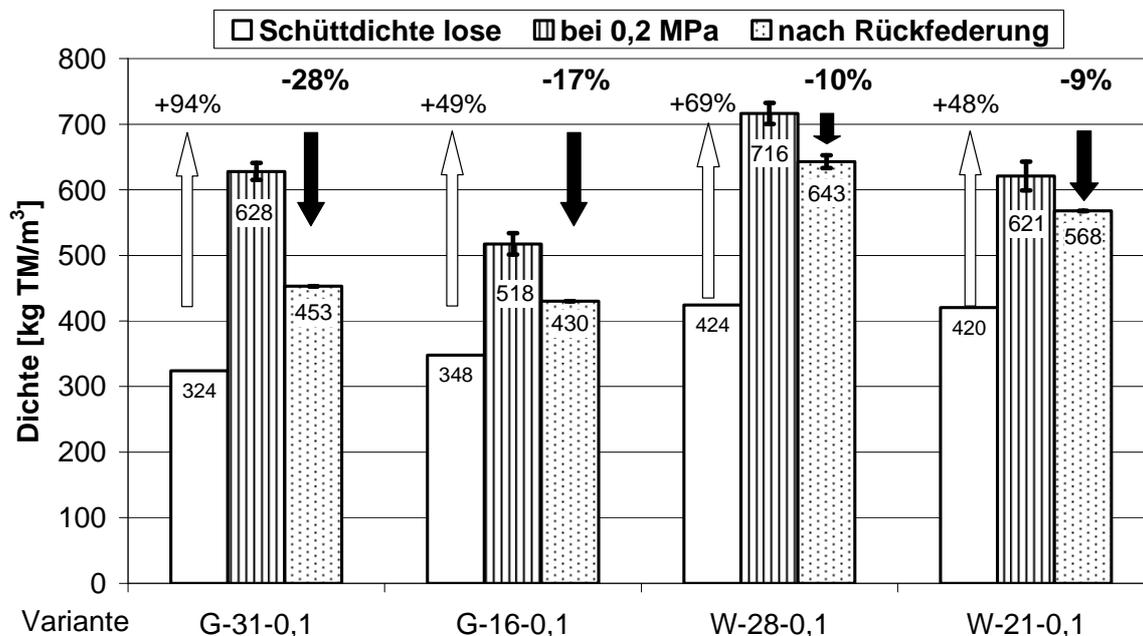


Abbildung 48: Verdichtbarkeit und Relaxation verschiedener Feuchtgetreidevarianten im Presszylinder (n=6).

4.9 Ergebnisse einer Praxiserhebung

Zur Ermittlung von Erwartungen, Erfahrungen, sowie eventuellen Problemen und Optimierungsvorschlägen bezüglich des Folienschlauchverfahrens zur Konservierung von Feuchtgetreide, wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (RABE, 2006) im Herbst 2005 eine Befragung unter Nutzern des Verfahrens durchgeführt. Aufgrund der zum Zeitpunkt der Erhebung noch geringen Verbreitung der Technik, konnten nur wenige Nutzer befragt werden, deren Betriebsstandorte ausschließlich im Osten Deutschlands lagen. Auf den Betrieben kamen ‚Crimper-Bagger‘ vom Hersteller *Murska* zum Einsatz, die denen in den vorliegenden Untersuchungen eingesetzten Maschinen entsprachen. Es wurden vier Lohnunternehmer und elf Landwirte mit Hilfe eines Fragebogens zu dem Verfahren befragt. Dabei sollten sowohl die Motivation zum Einsatz, die Zufriedenheit mit Technik und Produkt, als auch auftretende Probleme und Optimierungsansätze zum Verfahren ermittelt werden. Aufgrund ihrer geringen Teilnehmerzahl erlaubte die Befragung keine

repräsentativen Schlüsse. Dennoch lieferte sie zusätzliche Informationen zum untersuchten Verfahren, die eine Beurteilung und Optimierung unterstützen konnten.

Die Befüllung des Crimper-Baggers erfolgte größtenteils mit Radladern, vereinzelt kamen auch Frontlader und Überladewagen zum Einsatz, auf deren hohen Rangierplatzbedarf hingewiesen wurde. Bemängelt wurde eine zu geringe Leistung der eingesetzten Maschinen, da die vom Hersteller angegebene Leistung von 20-30 t/h insbesondere bei zunehmender Feuchte nicht erreicht wurde und somit Engpässe in der Verfahrenskette auftraten. Weiterhin blieb die durchschnittliche Lagerungsdichte unter den erwarteten zwei Tonnen Frischmasse je Meter Folienschlauch, so dass ein erhöhter Folienschlauchbedarf auftrat. Als Leistungsbedarf für den Betrieb des ‚Crimper-Baggers‘ wurden 118 kW angegeben.

Zur Konservierung des Feuchtgetreides wurden vorwiegend chemische Zusätze verwendet, wobei meist im pH abgepufferte Zusätze mit einer Aufwandmenge von 1-6 l/t FM zum Einsatz kamen, aber auch Propionsäure. Korrosionserscheinungen an der Maschine, insbesondere an der Förderschnecke wurden festgestellt. Weiterhin wurde eine hohe Arbeitslautstärke der verwendeten Crimper-Bagger bemängelt. Ein zusätzlicher, nicht beeinflussbarer Mahleffekt der Förderschnecke und ein erhöhter Zeitbedarf für die Reinigung der Maschine wurden ebenfalls als Kritikpunkte aufgeführt.

Bezüglich der Futterqualität konnte nicht von allen Landwirten Aussagen getroffen werden. Dies ist auch dadurch begründet, dass eine Vergleichbarkeit fehlte, da einige Betriebe erstmals selbst eine Lagerung ihres Futtergetreides durchführten. Betriebe, die zuvor eine andere Konservierungsmethode nutzten – dazu zählten vorwiegend Trocknung und Zusatz von Propionsäure – gaben eine vergleichbare bzw. eine verbesserte Futterqualität an, die teilweise durch Futtermitteluntersuchungen bestätigt werden konnte.

Für die Entnahme aus dem Folienschlauch wurden verschiedene Techniken genutzt. Genannt wurden verschiedene Front- und Radlader, Silozange und Greifschaufel. Erste vorliegende Erfahrungen berichten von teilweise erhöhtem Arbeitsaufwand durch Reinigungsarbeiten auf der Lagerfläche beim Einsatz von Greifschaufel, Befüllfräse, Schneidschild und Frontlader, wobei anfallende Handarbeiten als Belastung empfunden wurden. Beim Einsatz eines kleinen Radladers wurde gegenüber vorher eingesetzten Lagerungsverfahren kein erhöhter Zeitaufwand registriert.

Die Kosten des Verfahrens unterlagen nach Angaben der Lohnunternehmer und Landwirte einer großen Streuung. Es wurden für die Einlagerung in den Folienschlauch Kosten zwischen 0,80 und 1,89 €/dt angegeben, woraus sich ein Mittelwert von 1,29 € ergab.

Die Motivation der befragten Lohnunternehmer für den Einsatz des Folienschlauchverfahrens zur Konservierung von Feuchtgetreide basierte zum einen auf den positiven Erfahrungen mit dieser Technik bei der Konservierung anderer Futtermittel. Es wurde davon ausgegangen, dass das Verfahren, wie bei der Einlagerung von Zuckerrübenpressschnitzeln, zunehmend nachgefragt werden wird. Zudem wurde eine optimierte Ausnutzung des vorhandenen Maschinenparks erwartet, da von einer verlängerten Mähdruschphase ausgegangen wurde, die sich durch eine vorgezogene Ernte, sowie durch einen Mähdrusch bei ungünstigen Witterungsbedingungen ergeben sollte.

Die befragten Landwirte nannten die Vermeidung von Trocknungskosten in Verbindung mit niedrigen Getreidepreisen als wichtigsten Anreiz für den Einsatz des Verfahrens. Der Feuchtegehalt des geernteten Getreides lag zwischen 14 und 24 %, wobei 8 der 11 Landwirte eine Gutfeuchte von 17-20 % angaben. Weiterhin wurde die Vermeidung von Investitionskosten für neue Getreidelager und eine erhöhte Flexibilität bei der Ernte, sowie gute Erfahrungen mit anderen Folienschlauchkonservaten genannt. Das eingelagerte Getreide (Weizen, Roggen, Triticale) sollte vorwiegend in der Milchviehfütterung, aber auch in der Schweine- und Rindermast und in Biogasanlagen eingesetzt werden. Der zukünftige Einsatz des Verfahrens wurde von den befragten Landwirte vorwiegend von der weiteren Getreidepreisentwicklung abhängig gemacht.

5 Diskussion

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war eine Beschreibung der Einflüsse von Getreideart und Einlagerungsfeuchte unter Anwendung eines chemischen Konservierungszusatzes auf die Feuchtgetreidekonservierung im Folienschlauchverfahren. Aufgrund der vielfältigen Versuchsansätze konnten zahlreiche grundlegende Erkenntnisse und Unterschiede aufgezeigt werden.

Im Folgenden sollen zunächst die ausgewählten Messmethoden bewertet werden. Anschließend werden einige ausgewählte Ergebnisse diskutiert, die für das Verfahren von Bedeutung sind. Eine abschließende Darstellung von Optimierungsansätzen und offenen Fragestellungen verdeutlicht, dass weiterer Forschungsbedarf zu dieser Thematik notwendig ist.

5.1 Bewertung der ausgewählten Messmethoden

5.1.1 Bilanznetzmethode

Die ‚buried-bag-Methode‘ wurde eingesetzt um die Gärqualität, Gärverluste und aerobe Stabilität von Feuchtgetreide im Folienschlauch zu untersuchen. Bei der Einlage der Netze durch Klappen im Presstunnel kam es aufgrund des Pressvorgangs insbesondere in der Randposition in Einzelfällen zu einer Verschiebung. Dies hatte zur Folge, dass Netze teilweise direkten Folienkontakt hatten. Um diese war bei Lagerung unter aeroben Bedingungen (2. Versuchsjahr) in Einzelfällen ein deutlicher Verderb durch Schimmelbildung erkennbar, was auf einen verstärkten Lufteinfluss in diesem Bereich deutet. Für eine exakte Bestimmung von Gärverlusten und Keimgehalten muss ein Folienkontakt unbedingt vermieden werden. Zur Bestimmung der Keimgehalte im Feuchtgetreide wurde daher neben einer Probe aus den Bilanznetzen noch zwei weitere aus der näheren Umgebung dieser entnommen. Für die Bestimmung der anaeroben und aeroben Stabilität durch Temperaturmessung mittels eingelegter Temperaturdatenlogger lieferte die ‚buried-bag-Methode‘ aussagekräftige Ergebnisse.

5.1.2 Silierglasversuche

Die verwendete Methode zur Bestimmung der aeroben Stabilität (49 Tage Lagerung im Silierglas mit zweimaligem Luftstress und anschließender Temperaturerfassung) ist für Feuchtgetreide nur bedingt einsetzbar. Die scheinbare Stabilität der Varianten mit einem Feuchtegehalt von weniger als 20 % deutet auf ein methodisches Problem hin.

Getreidevarianten mit einem Feuchtegehalt von weniger als 20 % bieten verschiedenen Keimen gute Bedingungen, um bei Anwesenheit von Sauerstoff einen Verderb einsetzen zu lassen. Die Bestimmung der ASTA über das Auftreten einer Nacherwärmung ist auf einen exothermen Verderbprozess insbesondere durch Hefen begründet.

Das Getreide bleibt während der 49 Tage im Silierglas und ebenfalls während des anschließenden Temperaturmesszeitraums unverdichtet. Durch die zweimalige Öffnung der Gläser für 24 Stunden wird ein Verderb initiiert, der teilweise durch das Entstehen deutlicher Pilzmycele erkennbar war. Die Erfassung der Temperatur beginnt in diesem Test jedoch erst ab dem 49. Tag. Trotz eines sicht- und riechbaren Verderbs war in einigen Varianten mit weniger als 20 % Feuchte keine Nacherwärmung zu ermitteln.

Auch bei der unmittelbaren Temperaturmessung nach Luftzufuhr ohne zwischenzeitlichen Luftstress (Lagerdauer 30, 90 bzw. 180 Tage) wurde teilweise nur ein schleichender Temperaturanstieg festgestellt, der den mit 2 K niedrig gewählten Schwellenwert für aerobe Stabilität nicht oder nur kaum überschritt. Trotzdem konnte auch hier ein deutlich sicht- und riechbarer Verderb mit beginnender Schimmelbildung in unbehandelten Varianten festgestellt werden (Abbildung 49, oberes Foto). Dieser Effekt konnte auch an den Folienschläuchen nachgewiesen werden. Dies verdeutlicht, dass ein Verderb des Feuchtgetreides schon bei Feuchtegehalten von 16 % festzustellen ist, auch wenn keine Nacherwärmung registriert wird und diese als alleiniger Indikator für einen Verderb nicht ausreicht. Untersuchungen von REED et al. (2007) an angefeuchteten Maiskörnern mit Feuchtegehalten zwischen 15 und 18,5 % bestätigen diese Ergebnisse. Hier wurde keine dauerhafte Nacherwärmung, sondern nach der Bildung von ‚Hot-Spots‘ ein Austrocknen und anschließendes Abkühlen des Substrates festgestellt.

Weiterhin werden die Aussagen von HONIG (2007) unterstützt, wonach nicht die absolute Temperaturerhöhung, sondern die Temperatursumme als Indikator für Verderb besser geeignet ist. Deren Definition für verschiedene Getreidevarianten ist in diesem Zusammenhang jedoch nicht verfügbar. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Siliergütern geringen Feuchtegehalte ist die Aussagefähigkeit der verwendeten Silierglasversuche hinsichtlich der Bestimmung der aeroben Stabilität bei Getreidefeuchten von weniger als 20 % in Frage zu stellen.

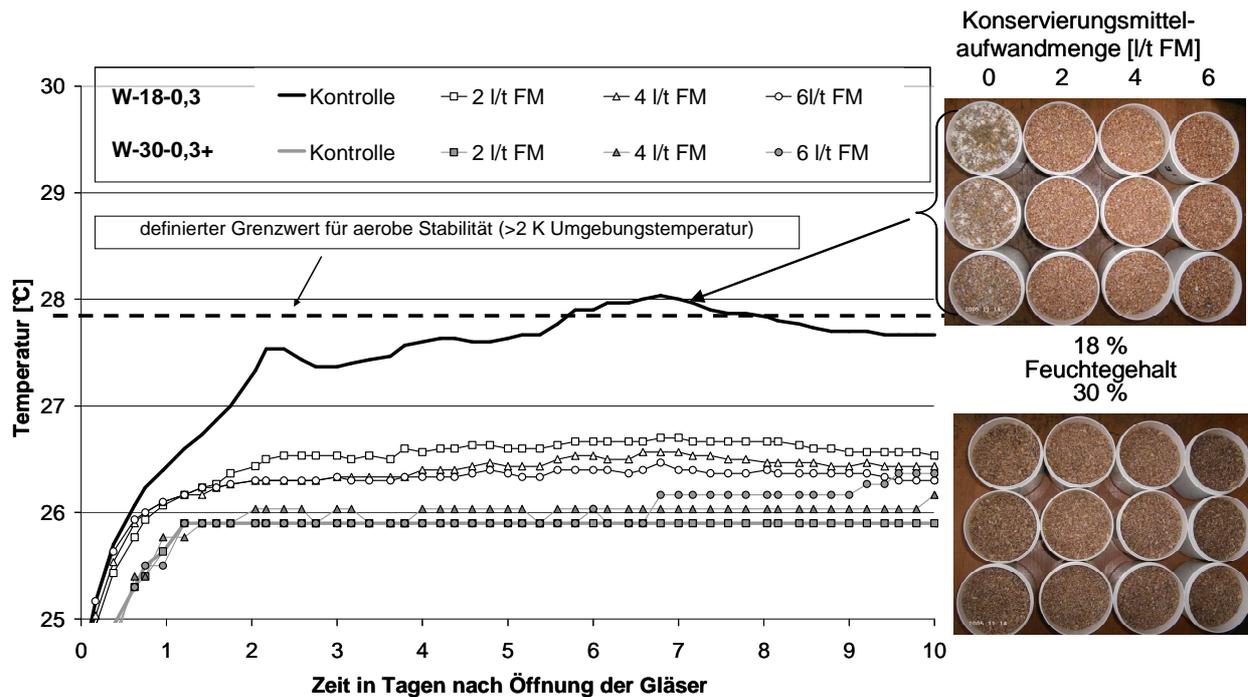


Abbildung 49: Temperaturverlauf der Weizenvarianten W-18-0,3 und W-30-0,3+ nach 90 Tagen anaerober Lagerung im Glas und anschließender aerober Lagerung bei 25,9°C (n=3).

5.1.3 Partikelgrößenbestimmung

Durch die angewandte Messmethode der Trockensiebung von gequetschtem Getreide aus verschiedenen Entnahmepositionen der Folienschläuche konnten Einflüsse von Getreideart und -feuchte auf die Partikelgrößenverteilung gezeigt werden. Bereits FÜRLI et al. (1997) weisen darauf hin, dass beim Einsatz von Walzenquetschen eine Veränderung der Partikelform zu „Flocken“ resultieren kann, was die Bestimmung der Partikelgröße erschwert. Die eigenen Untersuchungen bestätigen dies bei zunehmenden Feuchtegehalten (> 20 %).

Es muss darauf hingewiesen werden, dass in ungetrocknetem Material kleine Partikel oft an einander haften und es insbesondere im Weizen aufgrund des ‚Weizenklebers‘ zu Agglomerationen kommt, die auch durch eine Trocknung nicht zu lösen sind. Für eine exakte Bestimmung der Partikelgröße ist diese Methode daher nicht geeignet. Gerade bei Weizen kann davon ausgegangen werden, dass der tatsächliche Anteil von Partikeln <2 mm in wässriger Lösung deutlich höher ist. Dies wird auch von KAMPHUES (2007) für die Bestimmung der Partikelgröße in Mischfuttern für die Schweinefütterung beschrieben und bemängelt, da sowohl Trocken- als auch Nasssiebung zum Einsatz kommen, die deutliche Unterschiede in den Partikelgrößen aufzeigen. Die Vorgehensweise für die

Siebung von Feuchtgetreide muss hinterfragt werden. Die Festlegung von Standards für Siebanalysen ist daher notwendig (KAMPHUES, 2007).

5.1.4 Untersuchungen zur Lagerungsdichte

Die Ermittlung von Lagerungsdichtewerten im Folienschlauch ist aufgrund der Silogeometrie und der Materialeigenschaften schwierig. Der Einsatz eines Bohrstockes, der zur Bestimmung der Verdichtung in Grundfuttersilagen geeignet ist (KLEINMANS et al. 2005), erwies sich für Feuchtgetreide und -mais als ungeeignet, da beim Eindrehen nach wenigen Umdrehungen eine Verstopfung im Einlassbereich des Bohrstockes auftrat. Der Einsatz eines Stechzylinders mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Tiefe von 200 mm erwies sich dagegen in allen untersuchten Varianten als praktikabel. Dabei lag der Messfehler dieser Methode im Mittel unter 5 % (Tab. A 7, S.165). Die ermittelten Lagerungsdichten zeigten sowohl einen Einfluss von Getreideart und -feuchte als auch von der Entnahmeposition im Schlauch.

Die Untersuchungen mit einem Bodenpenetrometer sollten die Beschreibung der Verdichtung im Folienschlauch unterstützen. Die vorliegenden Ergebnisse (Abbildung 46, S.113) zeigen auf, dass eine grundsätzliche Bestimmung der Eindringwiderstände in gequetschtem Getreide möglich ist. Es konnten eindeutige Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten aufgezeigt werden. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass bereits WINDHORST (1987) sowie HARTGE UND HORN (1992) bezüglich der Bestimmung von Verdichtungen im Boden übereinstimmend von der Einfachheit des Verfahrens und von der hohen Empfindlichkeit der Messungen berichten, aber gleichzeitig auch die beschränkte Aussagekraft der Werte bezogen auf einen losgelösten Bodenfaktor kritisieren. Im Boden übt der Wassergehalt einen großen Einfluss auf den Eindringwiderstand aus. Mit zunehmendem Feuchtegehalt ist eine Abnahme des EW zu verzeichnen (BORCHERT UND GRAF, 1988). Aus Abbildung 50 geht hervor, dass dies ebenfalls für die Messungen im Feuchtgetreide zu gelten scheint. Die geringere Geradensteigung der feuchten gegenüber der trockenen Getreidevarianten deutet hierauf hin.

Eine Ableitung absoluter Lagerungsdichten aus dem Eindringwiderstand ist aufgrund hoher Schwankungen der Einzelwerte bisher nur bedingt möglich. Der Stichprobenumfang der Penetrometermessungen war hinreichend (G-31: n=60, G-16: n=30, W-28:n=40, W-21: n=20), für die Bestimmung der Lagerungsdichte an den entsprechenden Positionen lagen jedoch mit n=3 bis 5 deutlich weniger Wiederholungen vor. Die Methode ist daher

geeignet Inhomogenitäten aufzuzeigen, die gegebenenfalls helfen zonale Verderbprozesse besser zu erklären. Auch zur Wirkungsoptimierung im Verdichtungsprozess der Einlagerungsmaschine können Penetrometer–Untersuchungen hilfreich sein. Für eine weitergehende Interpretation müssten jedoch zusätzliche Untersuchungen folgen.

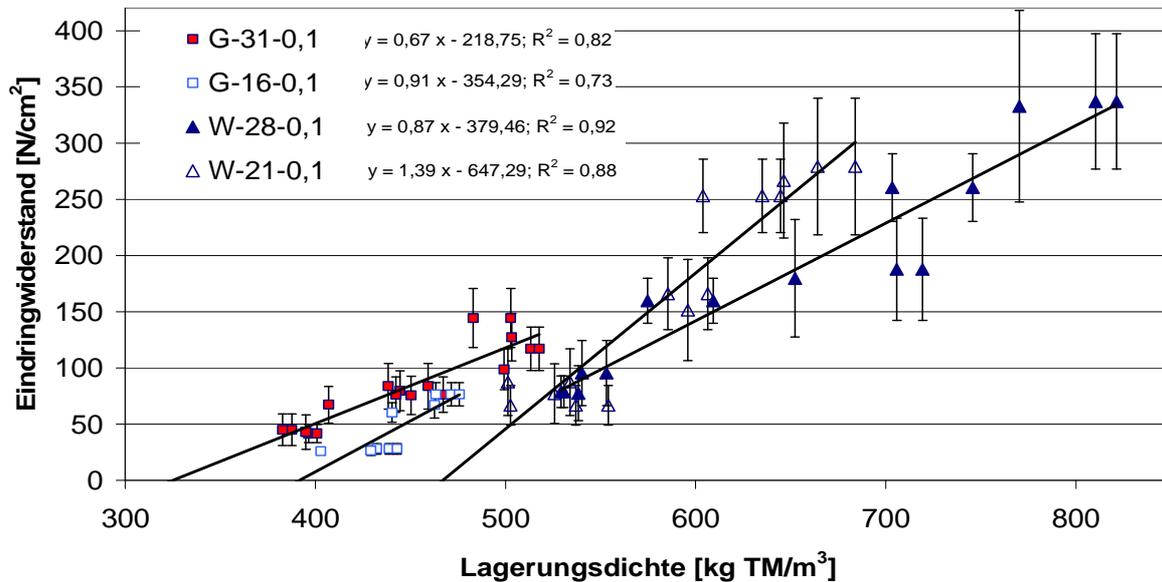


Abbildung 50: Zusammenhang von Lagerungsdichte und Eindringwiderstand in Abhängigkeit von Getreideart und Einlagerungsfeuchte.

5.2 Ernte und Rückanfeuchtung von Feuchtgetreide

Die Beweggründe für eine Ernte von Feuchtgetreide sind vielfältig. In den meisten Fällen zwingen ungünstige Witterungsbedingungen zur Ernte bei Feuchtegehalten, die spezielle Konservierungsmaßnahmen erfordern (FEIFFER, 2004). Vorwiegend wird eine Trocknung des Getreides durchgeführt (ECKL, 2005). Die Option verschiedener Vermarktungsmöglichkeiten begünstigt dieses Verfahren. Da jedoch ein Großteil des Getreides für Futterzwecke verwendet wird und steigende Energiekosten die Trocknung von Futtergetreide in Frage stellen, kommt den Feuchtgetreidekonservierungsverfahren eine zunehmende Bedeutung zu. Daraus ergibt sich die Frage des optimalen Feuchtegehaltes für eine Ernte.

In Deutschland besteht große Skepsis gegenüber einer beabsichtigten Ernte bei Feuchtegehalten von weit über 20 %, da bisher kaum Erfahrungen dazu vorliegen. BUCHANAN-SMITH et al. (2003) fordern für die Ernte von Feuchtgetreide einen Wasser-

gehalt zwischen 25 und 30 %. Darunter liegende Werte führen zu keiner ausreichenden Silierung, darüberliegende können den Futterwert herabsetzen.

Eine beabsichtigt vorgezogene Ernte wird bisher selten praktiziert, obwohl die Möglichkeiten dazu gegeben sind:

- Aus Sicht der Pflanzenphysiologie resultieren keine Ertragsverluste, da die Einlagerung von Stärke und Protein bereits vor Erreichen der Gelb- bzw. Teigreife abgeschlossen ist (GEISLER, 1983, MATTHÄUS et al, 2004).
- Unter günstigen Witterungsbedingungen ist eine Ernte von Gerste und Weizen bei Feuchtegehalten von deutlich über 30 % technisch möglich. Eigene Untersuchungen zeigten für die Feuchtgetreideernte gegenüber trocken geernteten Varianten einen erhöhten Kraftstoffaufwand von 15 % bei Gerste bzw. 10 % bei Weizen. Die Ergebnisse bestätigen Untersuchungen von HARA et al. (2002) sowie GENTA et al. (2006), die zudem keine Qualitätsverluste des Getreides bis zu Feuchtegehalten von über 40 % feststellten.

Durch die vorliegenden Untersuchungen konnte aufgezeigt werden, dass eine um ein bis zwei Wochen vorgezogene Ernte technisch realisierbar ist. Dadurch können sich eine Reihe von Vorzügen ergeben:

- Bessere Maschinenauslastung/Kappung von Arbeitsspitzen bei der Ernte/Folgefrucht und ökonomische Vorteile (FEIFFER, 2004, HOFFMANN UND FÜRL, 2000),
- zusätzliche Zeit für phytosanitäre und ackerbauliche Maßnahmen,
- Verminderung von Mykotoxingehalten im Futtergetreide.

Feuchtegehalte und Rückanfeuchtung

Das Erreichen eines definierten Feuchtegehaltes bei der Ernte ist schwierig. Wie die Untersuchungen zeigten, kann die Reduzierung des Feuchtegehaltes in den Getreidekörnern unter günstigen Witterungsbedingungen täglich bis zu 3 % betragen, wobei tageszeitliche Schwankungen von bis zu 5 % auftreten können. Zum Erzielen eines bestimmten Feuchtegehaltes ist jedoch eine ständige Kontrolle der aktuellen Feuchte notwendig. Unter Feldbedingungen ist dies bisher problematisch, da die meisten Schnellbestimmungsgeräte für Getreide nur bis etwa 30 % Feuchte verlässliche Ergebnisse erbringen. Zudem ist eine Probenahme bei hohen Feuchten im Bestand bisher sehr

aufwendig. Die Entwicklung von handlichen Probendreschern kann dies jedoch vereinfachen (WILMER, 2007).

Eine Rückanfeuchtung von Getreide ist grundsätzlich möglich. Die angewandte Methode zur Anfeuchtung im Futtermischwagen liefert zufrieden stellende Ergebnisse, ist aber für größere Mengen nicht praktikabel. Für verschiedene Crimper-Bagger Typen wird die Möglichkeit einer Wasserzugabe während des Pressvorganges angeboten. Dabei bleibt jedoch zu bedenken, dass für eine Anfeuchtung von 20 auf 30 % fast 150 Liter Wasser je Tonne Frischmasse notwendig sind. Können mit dem Crimper-Bagger Durchsätze von 30 t/h erreicht werden, wäre eine Zugabe von 4500 Liter Wasser pro Stunde notwendig. Eine sinnvolle verfahrenstechnische Umsetzung bleibt deshalb fragwürdig.

5.3 Futterqualität bei Lagerung unter Luftabschluss

5.3.1 Charakteristische Eigenschaften des Ausgangsmaterial und Gärqualität

Der epiphytische Besatz des Getreides hatte in beiden Versuchsjahren mit 10^4 bis 10^5 KBE/g FM an Hefen und Schimmelpilzen für die Feldflora typische Werte (THAYSEN, 2004, MLP, 2005, RICHTER, 2006). Ein Besatz an Milchsäurebakterien konnte ebenfalls für einzelne Varianten nachgewiesen werden. Das Fehlen einheitlicher Keimgehalte in nahezu gleichen Erntepartien deutet zum einen auf die starken Streuungen des Feldkeimbesatzes hin. Andererseits bietet die methodische Vorgehensweise bei der Bestimmung der Keime ausreichend Fehlerquellen, sodass einer besonderen Sorgfalt und unverzüglichen Analyse möglichst vieler Wiederholungen eine große Bedeutung zukommt, die aber logistisch und finanziell nur mit hohem Aufwand zu gewährleisten sind.

Für eine Silierung bieten die Inhaltsstoffe von Gerste und Weizen trotz geringer Zuckergehalte von 16-24 g/kg TM günstige Voraussetzungen (JEROCH et al., 1993). Die geringe Pufferkapazität ist mit Werten von knapp 15-20 g Milchsäure/kg TM etwa halb so hoch wie bei Mais- und Grassilagen (KALZENDORF, 2002). Die Untersuchungen zur Gärqualität bestätigen die in der Literatur beschriebenen Eigenschaften von Feuchtegetreide (WEISSBACH UND BUDZIER, 1968, LOTZ UND VON OY, 1982, OH, 1985, JUNGBLUTH, 1989, BUCHANAN-SMITH et al. 2003). Bei einem Feuchtegehalt von weniger als 25 % findet keine Silierung statt. Trotzdem kann das Getreide im verschlossenen Folienschlauch stabil gelagert werden. Dies kann auf das Entstehen einer CO₂-Atmosphäre im verschlossenen Folienschlauch und dem damit verbundenen konservierenden Effekt zurückgeführt werden.

Eine Fermentation mit nennenswerter Milchsäurebildung beginnt erst ab Feuchtegehalten von über 25 %. Es kann von einer leicht heterofermentativen Gärung gesprochen werden, da neben Milchsäure stets auch Essigsäure zu ermitteln war. Die Gehalte an Essigsäure betragen dabei etwa ein Drittel bis die Hälfte der jeweiligen Milchsäuregehalte, die in Weizen maximal 2 % in der TM erreichten. Die Gärproduktgehalte von Gerste waren grundsätzlich deutlich geringer, was Untersuchungen von WEISSBACH UND BUDZIER (1968) bestätigt, die für Nacktgetreidearten wie Weizen und Roggen höhere Gär säuregehalte ermittelten als für bedecktsamige Gerstevarianten.

Die großen Unterschiede des epiphytischen Besatzes spiegelten sich zum Teil in den Gärproduktgehalten wieder. Gerste mit 24 % Feuchte wies mit lg 4,3 KBE/g FM den höchsten Besatz an Milchsäurebakterien auf. Im zweiten Versuchsjahr wurden trotz höherer Erntefeuchte von 31 % keine Milchsäurebakterien auf Gerste gefunden. Die Gehalte an Milchsäure in der Silage waren dann jedoch mit etwa 2 g/kg TM gering, gegenüber der Variante mit 24 % Feuchte jedoch verdoppelt.

Trotz der geringen Gärproduktgehalte konnte aufgrund der für eine Silierung günstigen Eigenschaften des Erntegutes eine zügige Absenkung des pH-Wertes erfolgen. Versuche mit Siliergläsern zeigten zudem den positiven Einfluss der Lagerdauer. Bereits nach 30 Tagen im Silierglas wurde in Weizen (W-28-0,1) ein Milchsäuregehalt von 7 g/kg TM und ein Essigsäuregehalt von 1,4 g/kg TM erreicht, der zu einer Absenkung des pH-Wertes auf 4,8 führte. Dies entspricht den Werten im Folienschlauch nach 64 Tagen. Bis zu einer Lagerdauer von 180 Tagen wurde ein stetiger Anstieg der Milchsäuregehalte auf knapp 12 g/kg TM ermittelt, der mit einer weiteren pH-Absenkung auf 4,3 verbunden war. Die Gehalte an Essigsäure blieben allerdings mit etwa 2 g/kg TM unverändert gering. Der stetige Anstieg der Milchsäuregehalte widerspricht Ergebnissen von JUNGBLUTH (1989), der einen Abschluss der Fermentation nach 40 bis 60 Tagen vermutete und keine direkte Abhängigkeit des pH-Wertes von der Lagerdauer fand. Tendenziell zeigte sich dort aber ein Einfluss der Partikelgröße, da bei gleicher Gutfeuchte mit zunehmendem Vermahlungsgrad der pH-Wert abnahm, wobei auch Ausnahmen auftraten. Diese Einflüsse konnten in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden. Die in Siliergläsern bei Gerste mit 180 Tagen Lagerdauer gegenüber 90 Tagen Lagerdauer verminderten Gär säuregehalte lassen jedoch darauf schließen, dass eine anhaltende Fermentation nur unter optimalem Luftabschluss und minimaler Keimbelastung erfolgen kann.

Buttersäure wurde in keiner der Weizen- und Gerstevarianten nachgewiesen. Auch sehr geringe Ethanolgehalte bestätigen die stabilen anaeroben Lagerungsbedingungen im Schlauch. Zusätzlich weisen die geringen Gehalte an $\text{NH}_4\text{-N}$ auf sehr geringe Abbauvorgänge während der Lagerung hin.

Beim Vergleich des Erntematerials mit dessen Konservaten fällt auf, dass es bei den meisten Inhaltsstoffen zu keinerlei Veränderungen während der Lagerung im Folienschlauch kam. Lediglich die Variante G-31-0,1 zeigte eine Variation der Stärke- und Zuckergehalte auf. Das Konservat zeigt gegenüber dem Erntematerial eine Senkung des Stärkegehaltes bei gleichzeitigem Anstieg des Zuckergehaltes auf. Dies kann auf eine Stärkeumsetzung während der Lagerung hindeuten. Nach Untersuchungen von OH (1985) findet in angefeuchteter Gerste eine im Vergleich zu Weizen schnellere Verzuckerung von Stärke statt. Dabei muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass für die Analysen dieser Arbeit nur jeweils eine Wiederholung vorlag. Substratbedingte wie auch analysebedingte Schwankungen sind denkbar (SÜDEKUM, 2007). Für Maisstärke geht WEIßBACH (2007) von einer deutlich verbesserten biologischen Abbaufähigkeit und Verdaulichkeit durch eine Silierung aus. Tiefergehende Untersuchungen der Einflüsse von Einlagerungsfeuchte und Fermentation auf einen eventuellen Aufschluss der Stärke in Feuchtgetreide sind angebracht.

5.3.2 Vergleich des Gärverhaltens von Getreide mit und ohne Anfeuchtung

Bisherige Untersuchungen vernachlässigten oftmals die Frage nach eventuellen Unterschieden zwischen erntebedingter Feuchte und einer Rückanfeuchtung des Getreides bezüglich der Gärqualität und des Keimbesatzes. Wie die eigenen Ergebnisse jedoch zeigen, sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Aus den Untersuchungen zur Ansäuerungsgeschwindigkeit (pH-Wert 3. Tag) geht hervor, dass in angefeuchtetem Getreide eine signifikant schnellere Absenkung des pH-Wertes stattfindet als in Substrat mit vergleichbarem Feuchtegehalt ohne Anfeuchtung, in denen eine pH-Absenkung zunächst nur durch den chemischen Konservierungszusatz bedingt war (Abbildung 51). Zudem erreichten die Milch- und Essigsäuregehalte in angefeuchtetem Getreide im Vergleich zu erntefeuchten Varianten mit vergleichbarem Feuchtegehalt doppelte bis siebenfache Werte (Tabelle 26, S.130).

Eine Anfeuchtung von Getreide kann somit zu einer schnelleren Fermentation und erhöhten Gärsäuregehalten führen. Dies kann durch physikalische und biologische

Unterschiede zwischen physiologisch feuchtem und wiederangefeuchtetem Getreide erklärt werden. HOEDTKE (2007) und SÜDEKUM (2007) weisen daraufhin, dass der Feuchtegehalt selbst keine ausreichende Aussage über die Verfügbarkeit des Wassers gibt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass bei einer nachträglichen Anfeuchtung des Getreides mehr Wasser für mikrobielle Stoffumsetzungen verfügbar ist als in Getreide mit vergleichbarem, natürlich hohen Feuchtegehalt, in dem ein Großteil des Wassers zellulär gebunden ist. Nach JUNGBLUTH (1989) beginnt die Bildung von Gärsäuren bereits unmittelbar nach einem Befeuchten und dem Mahlen des Getreides.

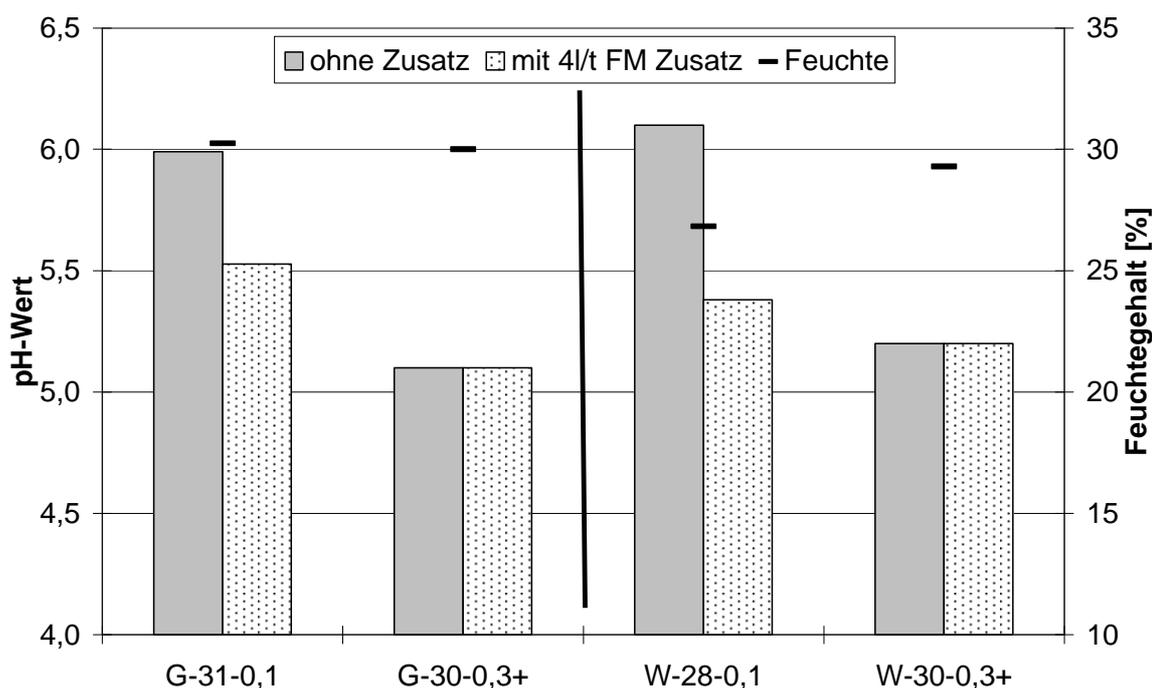


Abbildung 51: pH-Wert ausgewählter Feuchtgetreidevarianten nach 3 Tagen Lagerung im Glas (n=3)

Weiterhin sind Unterschiede in der Zusammensetzung der Keimflora zu nennen. Der epiphytische Besatz zum Erntezeitpunkt ist sehr vielfältig. Während der Abreife und der Lagerung findet eine Verschiebung der Keimflora zugunsten osmotoleranterer Pilze und Bakterien statt, die auch bei geringen Feuchtegehalten überlebensfähig sind (KASPERSSON et al., 1988, MLP, 2005, RICHTER, 2006, REED et al., 2007). Nach einer Rückanfeuchtung verfügen solche Milchsäurebakterien unter anaeroben Lagerungsbedingungen über günstigere Ausgangsbedingungen als jene Milchsäurebakterien, die sich zunächst gegen eine breitere Keimflora durchsetzen müssen. PIEPER (2005) empfiehlt aus diesem Grund osmotolerante Milchsäurebakterien zu ergänzen, die ab einem Feuchtegehalt von 25 % wirksam werden und zu erhöhten Milchsäuregehalten führen.

5.3.3 Keimgehalte bei anaerober Lagerung

Eine Umschichtung der Mikroflora während der Lagerung konnte für Hefen und Schimmelpilze nachgewiesen werden, deren Gehalte nach einer anaeroben Konservierung deutliche Unterschiede aufzeigten. Abbildung 52 zeigt die Gehalte des Feuchtgetreides direkt nach der Ernte im unbehandelten Konservat nach Schlauchöffnung, wobei für die Varianten des zweiten Versuchsjahres die Werte aus den Bilanznetzen der Randposition an Entnahmeposition 2 dargestellt sind. Im Vergleich zum Erntegut fand in fast allen Varianten während der Lagerung ein Rückgang der Schimmelpilzgehalte auf unbedenkliche Werte statt. Die Hefengehalte stiegen dagegen in den meisten Varianten an, wobei dies vorwiegend im Randbereich festzustellen war. Lediglich in der angefeuchteten Weizenvariante konnten durch die Lagerung sowohl unbedenkliche Schimmelpilz- als auch Hefengehalte festgestellt werden, was durch die anschließend hohe aerobe Stabilität (Abbildung 38, S.95) bestätigt wurde. Dies widerspricht jedoch Aussagen von MORCOS (1986) nach denen rückbefeuchtetes Getreide einem schnelleren Verderb durch mikrobielle Entwicklung unterliegt als Getreide mit vergleichbarer, natürlicher Feuchte.

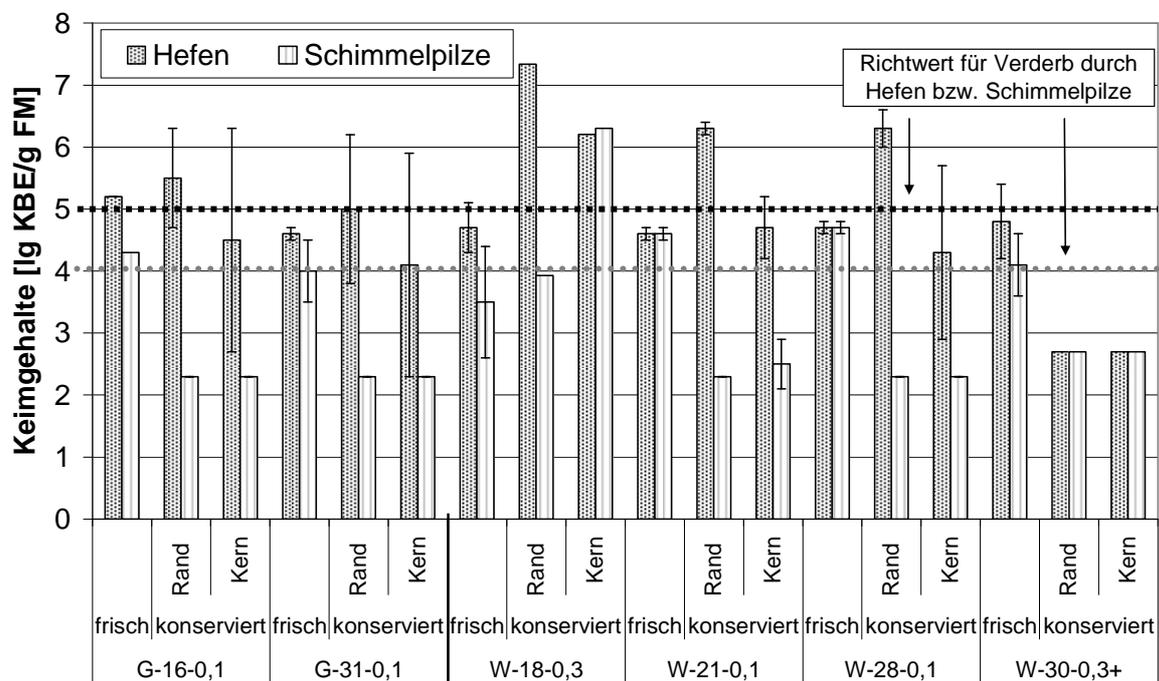


Abbildung 52: Vergleich der Gehalte an Hefen und Schimmelpilzen in Erntegut von Feuchtgetreide und nach Lagerung im Folienschlauch ohne Konservierungszusatz

Auch die standardisierten Versuche mit in Siliergläsern unverdichtet gelagertem Feuchtgetreide, das zweimaligem Luftstress ausgesetzt wurde, zeigten für alle unbehandelten Gerste- und Weizenvarianten erhöhte Hefengehalte nach 49 Tagen (Tab. A 2). Auch hier trat Schimmel bis zu diesem Zeitpunkt nur vereinzelt auf und entwickelte sich variantenabhängig erst nach längerem kontinuierlichem Lufteinfluss. Der Einsatz des chemischen Konservierungszusatzes führte bereits bei einer Aufwandmenge von 2 l/t FM zu reduzierten Keimgehalten. Dies zeigt, dass in Feuchtgetreide von Hefen das größte Verderbrisiko ausgeht, da sie sich auch unter vermeintlichem Luftabschluss weiterentwickeln können. Durch hohe Gärproduktgehalte, wie sie nur in angefeuchtetem Weizen erreicht wurden, kann ihr Wachstum reduziert werden, wobei die bessere Verdichtbarkeit dieses Materials diesen Effekt unterstützt. Schimmelpilze haben während der anaeroben Lagerungsphase im Schlauch keine Bedeutung.

5.3.4 Gärverluste

Eine Bestimmung von Gärverlusten war für die Feuchtgetreidevarianten nur bedingt möglich. Sie sollte auf Basis von Massedifferenzen nach der Bilanzmethode (WEIßBACH, 1998) erfolgen. Extrem geringe Gewichtsunterschiede in den untersuchten Siliergläsern von deutlich unter 0,5 % deuten jedoch auf eine verlustarme Lagerung des Feuchtgetreides hin, wie sie bereits von diversen Autoren beschrieben wurden (WEISSBACH UND BUDZIER, 1968, LOTZ UND VON OY, 1982, JUNGBLUTH, 1989). Auch in den Varianten, in denen nachweislich eine Fermentation stattfand, waren die Gewichtsverluste unter diesem Wert. Eine Korrektur der Verluste durch einen pauschalen Faktor, wie es nach WEIßBACH (1998) für Grundfuttersilagen empfohlen wird, erscheint für Feuchtgetreide derzeit nicht sinnvoll. Die genannten Korrekturfaktoren beruhen auf Untersuchungsergebnissen von BERG (1971), die Feuchtgetreide nicht mit einschließen.

Für die untersuchten Feuchtgetreidevarianten ergab eine Verlustbestimmung in den Bilanznetzen keine verwertbaren Ergebnisse. Die Gewichtsschwankungen lagen trotz einiger unerklärlicher Ausreisser im Mittel unter einem Prozent. STEINHÖFEL UND WEBER (2006) stellten bei der Fermentation von Feuchtmais im Folienschlauch ohne Konservierungszusatz Gärverluste von 3,4 % fest. Die bei der Lagerung von Feuchtgetreide im Folienschlauch zu erwartenden Verluste können somit als gering eingestuft werden, da selbst bei hohen Feuchtegehalten nur eine Fermentation mit geringen Gärproduktgehalten und damit verbundenen Verlusten stattfindet.

5.4 Futterqualität unter aeroben Bedingungen

Während ein sichtbarer Qualitätserhalt des Futters unter Luftabschluss im Folienschlauch für alle Varianten gewährleistet werden konnte, traten bei Luftzutritt deutliche Unterschiede in Geschwindigkeit und Intensität der Verderbprozesse auf. Die möglichen Ursachen hierfür sollen im Folgenden diskutiert werden. Dafür sind in Tabelle 26 die aufgezeigten charakteristischen Unterschiede der verschiedenen Varianten zusammengefasst.

Tabelle 26: Ergebnisübersicht der untersuchten Varianten

Parameter	Zusatz	Milchsäure			pH	Ethanol			Hefen ^c	Schimmel ^c	Partikelmassenanteil <2 mm	Lagerdichte im Schlauch	Nacherwärmung Schlauch		Verderb
		Essigsäure	Asta ^d (nach 90 Tagen im Glas)												
Variante	l/t FM	[g/kg TM]	[g/kg TM]		[g/kg TM]	[lg KBE/g FM]	[lg KBE/g FM]	[%]	[kg TM/m ³]	[Tage]					
G-16-0,1	0	0,1	0,3	6,1	0,4	5,5	2,3	11,3	450		nein	>10	ja		
	4	0,1	0,3	5,8	0,6	2,3	2,3				nein	>10	nein		
G-24-0,3 ^a	0	1,1	0,3	5,7	4,5	7,2	5,0	0,5	-		-	4,5	ja		
	4	0,8	0,5	5,1	1,5	2,7	2,8				-	>10	nein		
G-30-0,3 ^a	0	13,7	1,8	4,3	5,0	5,3	2,7	-	-		-	1,8	ja		
	4	14,1	2,5	4,3	1,9	2,7	3,2				-	>10	nein		
G-31-0,1	0	2,1	0,8	5,2	3,0	5,0	2,3	4,0	450		ja	4,2	ja		
	4	0,2	0,4	5,7	1,4	2,9	2,9				nein	>10	nein		
W-18-0,3	0	0,0	0,0	6,5	1,0	7,3	3,9	1,9	-		ja	8,4	ja		
	4	0,0	0,1	6,0	0,2	4,1	3,2				nein	>10	nein		
W-21-0,1	0	0,2	0,1	6,1	0,4	6,3	2,3	9,8	590		ja	3,2	ja		
	4	0,1	0,2	6,2	1,0	3,2	2,3				nein	>10	nein		
W-28-0,1	0	6,9	1,6	4,6	1,6	6,3	2,3	10,9	630		nein	>10	ja ^e		
	4	1,1	0,3	5,1	1,4	5,7	2,3				nein	>10	ja ^e		
W-30-0,3 ⁺	0	16,7	6,0	4,2	2,8	2,7	2,7	2,1	-		nein	>10	nein		
	4	13,1	4,2	4,1	1,5	4,5	2,7				-	>10	nein		
Mais -33-0,4 ^b	0	19,6	5,2	4,2	4,9	-	-	54,4	487		nein	>10	nein		
	3	20,9	4,6	4,1	2,7	-	-				nein	>10	nein		
	biol. ^b	21,8	7,6	4,1	4,0	-	-				nein	>10	nein		

Erläuterungen: G-16-0,1 = Gerste, 16 % Feuchte, Mahlpalt der Walzenquetsche: 0,1 mm

W-30-0,3+ = Weizen, auf 30 % angefeuchtet, Mahlpalt: 0,3 mm

^a: nur Lagerung im Glas, Keime nach 49 Tagen, Gärqualität+ASTA nach 90 Tagen

^b: MAACK (2006), heterofermentative Milchsäurebakterien

^c: Randposition nach Schlauchöffnung(2005) bzw. Netzposition 2 (2006)

^d: aerobe Stabilität nach 90 Tagen Lagerung im Glas und anschließendem Luftstress

^e: erhöhter Keimgehalt im Randbereich durch Lufteinfluss methodisch bedingt (Bilanznetze)

Das verfahrenstechnische Ziel sollte eine Gewährleistung einer ausreichenden aeroben Stabilität ohne Einbußen in der Futterqualität für alle Getreidevarianten sein. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass diese durch verschiedene Faktoren beeinflusst wird.

5.4.1 Einflussfaktoren auf Keimgehalte und Aerobe Stabilität

Als Indikator für den Verderb von Silagen wird in der Praxis oft der sichtbare Nachweis von Schimmel genutzt. Die vorliegenden Ergebnisse unterstützen jedoch Aussagen von KASPERSSON et al. (1988), PETERSSON et al. (1999) und AUERBACH (2007), die beschreiben, dass ein Verderb von Feuchtgetreide primär durch Hefen und erst verzögert durch Schimmelpilze hervorgerufen wird.

Eine Nacherwärmung wurde in trockener Gerste gar nicht und bei Weizen mit 21 % Feuchte relativ spät festgestellt. Ein ‚muffiger‘ Geruch in diesen trockenen Varianten war jedoch ein eindeutiger Indikator für Verderb, der durch die Analyse der Keimgehalte bestätigt wurde. Die enorme Nacherwärmung in unbehandelter feuchter Gerste und der Nachweis von starkem Hefenwachstum in allen unbehandelten Varianten (2006) deuteten vor dem sichtbaren Auftreten von Schimmel auf einen Verderb hin, was die Untersuchungen von KARUNAKARAN et al. (2001) an rückbefeuchtetem Weizen bestätigt.

Die gewählte Entnahmegeschwindigkeit von etwa einem Meter pro Woche war somit für unbehandelte Varianten nicht ausreichend. Weizen mit hohen Feuchtegehalten stellt dagegen eine Ausnahme dar. Bei Feuchtegehalten von etwa 30 % zeigte dieser bei verdichteter Lagerung sowohl im Schlauch als auch im Glas eine hohe Stabilität, die teilweise sogar die Untersuchungszeiträume (min. 10 Tage) überschritt. Dies ist vor allem durch die gegenüber Gerste deutlich bessere Verdichtbarkeit von feuchtem Weizen bedingt, die in den Untersuchungen zur Lagerungsdichte im Folienschlauch und mit der Materialprüfmaschine ermittelt wurde (Tab. A 10). Dadurch ergaben sich trotz der geringen Vorschubgeschwindigkeit keine wahrnehmbaren Verderbmerkmale.

Die Bestimmung der Keimgehalte zeigte jedoch auch in diesen unbehandelten Varianten eine Zunahme der Hefengehalte auf kritische Werte, die jedoch nicht zu einer Nacherwärmung führten. Dies verdeutlicht wiederum, dass schon bei Feuchtegehalten, die nur knapp über den lagerstabilen Werten von 14 % liegen, unter Lufteinfluss ein Verderb auftritt, der jedoch nicht zwangsläufig mit einer Nacherwärmung verbunden sein muss.

Die untersuchten Feuchtgetreidevarianten im Schlauch wiesen nur vereinzelt Schimmelbildung auf. Gerste mit hohem Feuchtegehalt (etwa 30 %) und Weizen mit

geringem Feuchtegehalt (18-21 %) zeigten dabei die höchste Anfälligkeit für einen Schimmelbefall. Dieser trat jedoch verstärkt erst zum Ende der 18-tägigen Entnahmephase auf und ist gegenüber Hefen von sekundärer Bedeutung.

Für das Feuchtgetreide wurde während des Untersuchungszeitraumes von 18 Tagen ab Ende September über den Schläuchen eine durchschnittliche Temperatur von 16°C ermittelt. KARUNAKARAN et al. (2001) und KASPERSSON et al. (1988) weisen darauf hin, dass die Umgebungstemperatur neben der Keimbelastung des Getreides einen beschleunigenden Einfluss auf den Verderb hat. Es ist daher zu erwarten, dass der schnell einsetzende Verderb in unbehandeltem Feuchtgetreide bei höheren Temperaturen im Sommer noch deutlich verstärkt wird.

Lagerungsdichte

Die Erhaltung der Futterqualität unter aeroben Entnahmebedingungen erfordert in erster Linie optimale verfahrens- und siliertechnische Voraussetzungen. Einer Reduzierung des Gasaustausches kommt dabei nach HONIG (1991) und FÜRLI et al. (2006) die größte Bedeutung zu. Der Umfang des Gasaustausches zwischen dem Konservat und der Umgebungsluft ist vor allem von der Größe des Porenvolumens im Futterstock abhängig, das seinerseits durch dessen Lagerungsdichte bestimmt wird. Die Lagerungsdichte steht wiederum in engem Zusammenhang mit der Einlagerungsfeuchte und der Partikelgröße (AL-MAHASNEH UND RABABAH, 2007).

Die Lagerungsdichte im Folienschlauch konnte in dieser Arbeit nicht für alle Varianten bestimmt werden, ebenso wie der Einfluss einer Variation der Partikelgröße. Die Definition einer optimalen Lagerungsdichte für Feuchtgetreide im Folienschlauch ist bislang nicht möglich, da diese nicht losgelöst, sondern insbesondere unter Berücksichtigung der Getreideart und Einlagerungsfeuchte betrachtet werden muss. Diese bedingen wiederum das Einsetzen einer Fermentation und die Produktion stabilisierender Gärprodukte. In Feuchtmais und angefeuchtem Weizen wurden die höchsten Milch- und Essigsäuregehalte und niedrigsten pH-Werte ermittelt. Hier wurden weder erhöhte Hefengehalte noch eine Nacherwärmung festgestellt. Die Fermentation in W-28-0,1 war mit deutlich geringeren Gärsäuregehalten verbunden. Auch hier war keine Nacherwärmung feststellbar, die Hefengehalte im Randbereich des Folienschlauches deuteten jedoch auf einen einsetzenden Verderb hin, obwohl in dieser Variante die durchschnittlich höchste Lagerungsdichte nachgewiesen wurde.

Im Feuchtmais wurde dagegen mit 490 kg TM/m^3 eine deutlich geringere mittlere Lagerungsdichte festgestellt als im Weizen. Ein hoher Anteil kleiner Partikel und die relativ hohen Gärproduktgehalte konnten die aerobe Stabilität jedoch positiv beeinflussen. Dadurch wird hervorgehoben, dass nicht die durchschnittliche Lagerungsdichte entscheidend, sondern eine möglichst hohe Verdichtung im Randbereich anzustreben ist. Bisher kann diese als allgemein nicht ausreichend bezeichnet werden, um einen Verderb unter Lufteinfluss ausreichend zu reduzieren. Die erreichbaren Lagerungsdichten von feuchtem Getreide überstiegen stets jene Werte vergleichbarer trockener Varianten (Tab. A 10). Die geringe Verdichtbarkeit von Gerste zeigt jedoch auf, dass die Beeinflussung der Lagerungsdichte auch durch die Eigenschaften des Getreides begrenzt sind.

Biologische und Physikalische Einflüsse auf die Zerkleinerung und Verdichtbarkeit

Es wurden Aussagen von FÜRLL et al. (1997) bestätigt, dass die Aufbereitung durch eine Walzenquetsche bei Gerste und Weizen nicht zu einer effektiven Zerkleinerung führt. Die Fruchtschale von Gerste konnte mit dem eingesetzten Quetschentyp beschädigt werden. Statt einem Bruch der Körner, wie er insbesondere bei Feuchtmais und auch bei Weizen mit geringem Feuchtegehalt aufgezeigt wurde, trat bei steigendem Feuchtegehalt jedoch zunehmend eine „Flockenbildung“ auf. Dies kann auf die Elastizität der Spelzen zurückgeführt werden. Dadurch ließ sich im Gegensatz zum Weizen bei zunehmendem Feuchtegehalt keine Erhöhung der Lagerungsdichte realisieren. Diese lagen mit etwa 450 kg TM/m^3 etwa 25-30 % unter der durchschnittlichen Lagerungsdichte von Weizen im Folienschlauch.

Ob sich aus einer intensiveren Zerkleinerung, die beispielsweise durch den Einsatz einer Walzenmühle erreichbar wäre (HSIEH et al., 1980, GLENN et al., 1991, FÜRLL et al., 1997, EDWARDS et al., 2007), ein positiver Effekt auf die aerobe Stabilität ergäbe, ist ebenso fraglich wie der Effekt eines höheren Verdichtungsdruckes, dem zudem die endliche Dehnbarkeit des Folienschlauches entgegensteht. Eine intensivere Zerkleinerung und Verdichtung ist mit einem höheren Leistungsbedarf bei gleichzeitig vermindertem Durchsatz verbunden (FÜRLL et al., 1997, AEL, 1996, HOFFMANN, 1998). Außerdem ist eine über das Quetschen hinausgehende Aufbereitung des Getreides für die Rinderfütterung und den Einsatz in Biogasanlagen nicht notwendig bzw. nicht erwünscht (SCHRÖDER et al., 1998, KALAYCI, 2003, OECHSNER, 2004).

Eine Gewährleistung einer ausreichenden aeroben Stabilität durch technische Optimierung ist daher fraglich und zweifelsohne mit höherem Aufwand verbunden als der Einsatz eines Konservierungszusatzes.

5.4.2 Konservierungsmiteleinsatz

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zum Keimbesatz und der aeroben Stabilität zeigten für die meisten Getreidevarianten die Notwendigkeit eines fungizid wirksamen Konservierungszusatzes. Der in den Versuchen eingesetzte chemische Zusatz hat sich dabei unabhängig von der Einlagerungsfeuchte sowohl für Gerste und Weizen als auch für Mais als geeignet erwiesen. Insbesondere die Entwicklung von Hefen und die damit verbundene Alkoholentwicklung konnte nachhaltig reduziert werden. Dadurch konnte auch bei geringer Vorschubgeschwindigkeit von etwa einem Meter pro Woche ein Verderb deutlich hinausgezögert werden, sodass eine Nacherwärmung nicht registriert wurde.

Im Silierglas konnte nachgewiesen werden, dass bereits eine Aufwandmenge von 2 l/t FM das Keimwachstum in Gerste und Weizen signifikant reduzieren kann (Tab. A 2). Zur Verfahrenssicherung sollte jedoch eine Aufwandmenge von 4 l/t FM verwendet werden, da diese in allen untersuchten Varianten zu einer ausreichenden aeroben Stabilität geführt hat.

Vereinzelt wurden in den Feuchtgetreidevarianten mit chemischem Konservierungszusatz höhere Keimgehalte festgestellt als in der Kontrolle. Die Analysen bezüglich der Wirkstoffe des Zusatzes (Propionsäure, Benzoesäure) zeigten teilweise erhebliche Schwankungen der tatsächlich applizierten Aufwandmenge unter den Versuchsbedingungen. Dies ist dadurch zu begründen, dass bei jeder Unterbrechung des Pressvorgangs auch die Konservierungsmittelapplikation manuell gestoppt und anschließend wieder fortgesetzt werden musste. Hier ergaben sich teilweise Verzögerungen bei der Applikation.

Des Weiteren muss unter Praxisbedingungen auf eine Abstimmung der Förderpumpe und Spritzdüsen geachtet werden. In den Versuchen waren die Düsen teilweise nicht für Durchsätze von mehr als 40 l/h geeignet. Weiterhin wurde bereits auf die Schwankungen der Keimgehalte im Ausgangsmaterial hingewiesen. Auch MATTHIAS UND PRIES (2006) weisen daraufhin, dass die tatsächliche Ausbringmenge von Zusätzen während der Einlagerung wiederholt geprüft werden sollte. Beim Einsatz von Säuren und insbesondere bei der Verwendung von im pH-Wert abgepufferten Säureprodukten ist der Temperatureinfluss auf deren Viskosität zu beachten.

Neben der nachgewiesenen Wirkung gegen Schadkeime wurde bei Einsatz des chemischen Konservierungszusatzes in Varianten mit natürlich hohem Feuchtegehalt eine Reduzierung der Gärproduktgehalte festgestellt (Tabelle 21, S.78; Abbildung 29, S.81). In angefeuchteten Varianten traf dies dagegen nicht zu (vgl. Tabelle 19, S. 75; Tabelle 20, S.77; Tab. A 1). Dies kann durch die bereits in Kap.5.3.2 aufgeführten Ansätze erklärt werden. Die Wirkung des chemischen Zusatz ist nicht keimspezifisch, so dass neben unerwünschten Schadkeimen auch Milchsäurebakterien reduziert werden, die sich somit erst verzögert entwickeln. Dies wurde beim Vergleich der Gärproduktgehalte bei verschiedenen Lagerdauern deutlich (Abbildung 29, S.81).

In Bezug auf die aerobe Stabilität bei der Lagerung von Feuchtgetreide in Folienschläuchen darf die Wirkung von Gärproduktgehalten jedoch nicht überschätzt werden. Insbesondere die Gehalte antimykotisch wirksamer Gärsäuren sind mit deutlich weniger als 2 % der TM sehr gering. Eine Absenkung des pH-Wertes durch Milchsäure allein hat keine Wirkung gegen die primär verderbverursachenden Hefen (ADESOGAN et al., 2003; AUERBACH, 1996, 2007). Aufgrund fehlender Buttersäure kann davon ausgegangen werden, dass Clostridien, die durch niedrige pH-Werte inaktiviert werden, in Feuchtgetreide keine Bedeutung haben. Daher sind für Feuchtgetreide lediglich Konservierungszusätze mit einer direkten Wirkung gegen Hefen und Schimmelpilze sinnvoll.

Die Einsatzmöglichkeiten biologisch wirksamer Konservierungsmittel sind begrenzt. Die Wasseraktivität von Milchsäurebakterien bedingt in der Regel Getreidefeuchten über 25 %. Eine Fermentation mit antimykotisch wirksamen Gärsäuregehalten und pH-Absenkung erfolgt allerdings erst bei Feuchtegehalten von etwa 30 %. Für den Anwender liegt die Schwierigkeit in den Schwankungen des Feuchtegehaltes, wie sie bereits für das Ausgangsmaterial beschrieben wurden. Eine Wirksamkeit von biologischen Zusätzen kann daher nur bedingt und bei hohen Einlagerungsfeuchten sichergestellt werden, wie die Untersuchungen von AUERBACH (2007) bestätigen (Abbildung 53). In den Versuchen wurde Weizen aus dem vorliegenden Folienschlauchversuch (2006), zum einen mit homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien und zum anderen mit zwei Aufwandstufen des chemischen Konservierungszusatzes behandelt und 90 Tage in Siliergläser eingelagert. Die Ergebnisse zeigen, dass ein heterofermentativ wirksamer Zusatz bei einem Feuchtegehalt von 28 % zu einer ausreichenden aeroben Stabilität führen kann. Bei einem geringeren Feuchtegehalt von 21 % ist diese jedoch im Vergleich zur Kontrolle

unzureichend. Der chemische Zusatz ist bei einer Aufwandmenge von 4 l/t FM unabhängig vom Feuchtegehalt des Substrates den biologisch wirksamen überlegen.

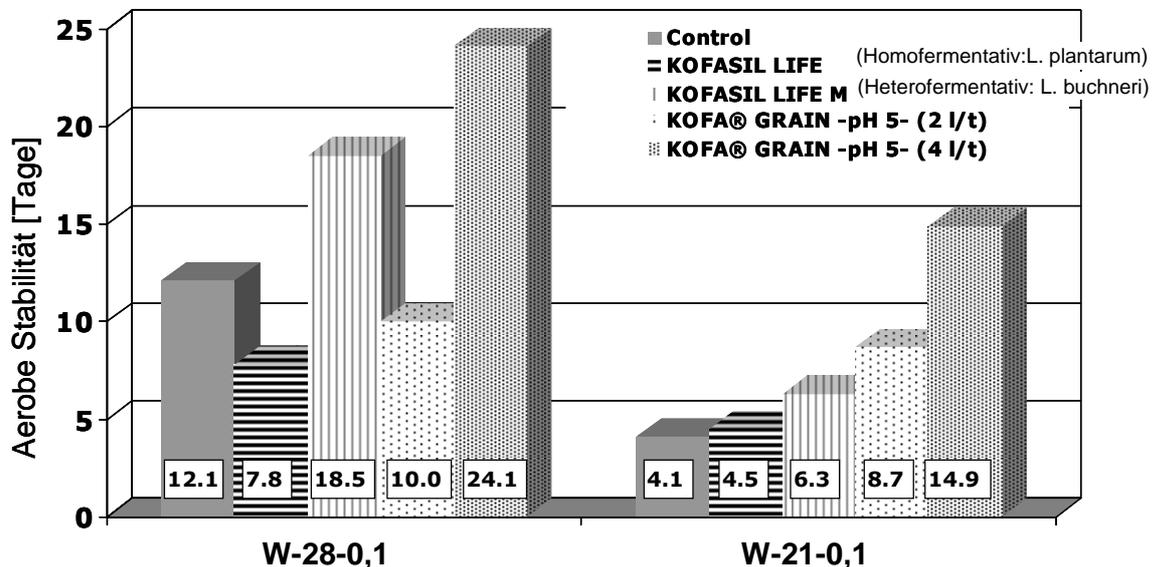


Abbildung 53: Aerobe Stabilität von gequetschtem Weizen zweier Feuchtestufen in Abhängigkeit des eingesetzten Konservierungszusatzes nach 90 Tagen Lagerung im Silierglas und anschließendem Luftstress bei 25°C (nach AUERBACH, 2007, unveröffentlicht)

In einem derzeit praxisüblichen Erntefeuchtebereich für Getreide bis 25 % sind Zusätze, die auf der Basis von heterofermentativen Milchsäurebakterien wirken, daher nicht zu empfehlen. Eine Anfeuchtung des Getreides wie sie von PIEPER (2005) vorgeschlagen wird, ist realisierbar, aber aus arbeitswirtschaftlichen Aspekten bei großen Mengen an zu ergänzendem Wasser nicht praktikabel. Allerdings muss in diesem Zusammenhang erneut auf den positiven Einfluss einer Anfeuchtung auf die Verfügbarkeit des Wassers (Wasseraktivität) für mikrobielle Stoffumsetzungen hingewiesen werden. Untersuchungen von HOEDTKE (2007) bestätigen die hohe Relevanz der Wasseraktivität bzw. Osmolalität für die Silierbarkeit von Pflanzenmaterial mit vergleichbarer Trockenmasse.

Für Feuchtmais mit Feuchtegehalten von vorwiegend mehr als 30 % können heterofermentative Milchsäurebakterien eine Alternative zu chemisch wirksamen Zusätzen darstellen.

5.5 Entnahme von Feuchtgetreide aus dem Folienschlauch

Die Vorgehensweise bei der Entnahme von Feuchtgetreide aus den Folienschläuchen nimmt im gesamten Verfahren eine Schlüsselposition ein. Zusätzliche Handarbeit im Vergleich zu anderen Lagerungsverfahren wird als häufigster Kritikpunkt angeführt. Wie die Praxiserhebung ergab, werden zur Entnahme verschiedenste Techniken eingesetzt, die allesamt Vor- und Nachteile aufweisen. Vorwiegend kommen Front- oder Radlader zum Einsatz.

Aus den eigenen Untersuchungen erwies sich auch die Entnahme mit einem Siloblocksneider als mögliche Alternative. Bis auf Gerste mit Feuchtegehalten um 16 % konnten sowohl feuchte Gerste (31 %) als auch Weizen mit Feuchtegehalten von 21 und 28 % auf diese Weise entnommen werden, wobei für einen Zusammenhalt beim Transport ein Abschnitt von mindestens 50 cm zu empfehlen ist.

Der Einsatz eines kleinen Radladers mit einer Schaufelbreite von etwa einem Meter ist aufgrund der Schlauchdimension mit einer Höhe von etwa einem Meter und einer Breite von etwa zwei Meter für die Entnahme optimal. Aufgrund der Wendigkeit und Übersichtlichkeit kann zusätzliche Handarbeit minimiert werden. Dabei ist zu empfehlen, insbesondere die unterseitige Folie nach Entnahme des Getreides nicht direkt zu entfernen, sondern in der Länge des Entnahmefahrzeugs zu belassen. Durch das Befahren der Folie wird ein Zusammenschieben vermieden und die Entnahmeschaufel kann in einer Höhe von etwa 2 cm oberhalb des Bodens eingesetzt werden, so dass die Folie unbeschädigt bleibt und nur geringe Mengen zurückbleiben. Anschließend können die Rückstände durch Anheben der Folie an die Anschnittfläche geworfen werden. Da sich das körnige Material in der Regel ohne eine tiefgehende Auflockerung der Anschnittfläche gut herausbrechen lässt, kann die Entnahme mit einem Radlader grundsätzlich als praxistauglich empfohlen werden.

Im Gegensatz zu Gerste ergibt sich bei Weizen mit zunehmender Einlagerungsfeuchte eine Aggregation der Partikel, was durch den Weizenkleber begünstigt wird. Bei Frischemasosedichten von über 1100 kg/m^3 entstehen bei der Entnahme Brocken, die eine Zerkleinerung erfordern. Dies wurde sowohl bei physiologisch feuchtem als auch bei rückangefeuchtetem Weizen mit Feuchtegehalten von etwa 30 % festgestellt. Aus Aspekten der Tierernährung ist eine Zerkleinerung zu empfehlen. Liegt eine saubere feste Lagerfläche vor, können diese Brocken größtenteils durch Überfahren mit dem Radlader

aufgelöst werden. Daher ist grundsätzlich eine befestigte und saubere Ablagefläche für die Folienschläuche zu empfehlen. Ob Mischaggregate eines Futterwagens eine ausreichende Auflösung solcher Brocken gewährleisten können, bleibt zu untersuchen.

5.6 Optimierungsansätze zum Folienschlauchverfahren

5.6.1 Optimierungsvorschläge aufgrund von Praxiserfahrungen

Aus der Befragung von Lohnunternehmern und Landwirten gingen einige Optimierungswünsche zum Verfahren hervor, die in Tabelle 27 wiedergegeben sind.

Tabelle 27: Auftretende Probleme und Optimierungsvorschläge von Nutzern des Folienschlauchverfahrens zur Konservierung von Feuchtgetreide

Aufgeführte Probleme	Optimierungsvorschläge von Nutzern
geringe Durchsatzleistung	
aufwendige Befülltechnik und/oder hoher Rangierplatzbedarf	alternative Befülltechniken frontale Befüllung per Förderband
hohe Lärmbelastung	
Wartezeiten bei der Befüllung	Vorratsbehälter mit erhöhtem Volumen
unkontrollierter zusätzlicher Mahleffekt durch Förderschnecke	
eingeschränkte Siliermittelauswahlmöglichkeiten	flexiblere Wahlmöglichkeiten von Konservierungszusätzen
ungenügende Kontrollmöglichkeiten der tatsächlich applizierten Konservierungsmittelmengen/ Unregelmäßigkeiten in der Dosierung	Steuerung der Konservierungsmitteldosierung durch Erfassung der tatsächlichen Quetschleistung/ Abstimmung von Förderpumpe und Spritzdüsen auf gewünschte Durchsatzleistung
Anfall zu großer Futtermengen aufgrund der Schlauchdimensionierung	Möglichkeit zum Einsatz kleinerer Schläuche
aufwändige Futterentnahme aus dem Folienschlauch verbunden mit zusätzlicher Handarbeit	Entwicklung spezieller Entnahmetechnik

Aus der Praxiserhebung ging hervor, dass die Durchsatzleistung des Crimper-Bagger den 'Flaschenhals' in der Verfahrenskette der Folienschlauchkonservierung darstellt. Bei steigendem Substratfeuchtegehalt konnten teilweise deutlich weniger als 20 t/h verarbeitet werden. Können diese Durchsatzleistungen nicht durch eine technische Optimierung erhöht werden, müsste die Leistung der gesamten Erntekette angepasst und eventuell reduziert werden, da eine längere Zwischenlagerung des Feuchtgetreides aufgrund des hohen Verderbrisikos keine Option ist.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Unabhängigkeit des Folienschlauchverfahrens bezüglich der Einlagerungsfeuchte eine Erweiterung des Erntezeitraumes ermöglicht. Damit kann auch eine Ernte bei höheren Feuchtegehalten ökonomisch interessant werden, die ihrerseits mit geringeren Durchsatzleistungen verbunden ist (FEIFFER, 2004, HOFFMANN UND FÜRL, 2000).

Die Befüllung des Crimper-Baggers erfolgt in der Regel seitlich durch Rad- oder Frontlader, für deren Bedienung somit kontinuierlich eine Arbeitskraft verfügbar sein muss. Diese Vorgehensweise erfordert zudem einen hohen Rangierplatzbedarf, da bei Vorratsbehältern mit 5 m³ Fassungsvermögen substratabhängig nur etwa 3-4 t übergeladen werden können, was für eine Schlauchlänge von etwa 2-3 m ausreicht. Eine direkte seitliche oder frontale Überladung des Feuchtgetreides von den Transportfahrzeugen durch eine Förderschnecke wäre denkbar.

Die Einstellung und Kontrolle des Aufbereitungsgrades erfolgt bislang über eine Sichtung des Getreides nach unmittelbarem Durchgang durch die Walzenquetsche. Aufgrund des Förder- und Pressvorganges im Schlauch erfolgt eine weitere Zerkleinerung des Getreides. Die Einflüsse von Getreideart und -feuchte auf die Intensität dieses Effektes sind bisher nicht bekannt.

Für Getreide hat sich ein chemischer Konservierungszusatz empfehlenswert herausgestellt. Insbesondere für die Konservierung von Feuchtmais werden in der Praxis auch biologische Zusätze eingesetzt. Der Einsatz beider Konservierungsmitteltypen sollte daher möglich sein, wobei eine exakte Dosierung gewährleistet sein muss. Dafür wäre primär eine Erfassung der tatsächlichen Durchsätze des Crimper-Baggers notwendig.

Futtermengen von 900-1200 kg TM je Meter Folienschlauch machen den Einsatz dieser Technik bereits für mittlere Viehbestände attraktiv. Unter Verwendung eines chemischen Konservierungszusatzes ist ein Vorschub von einem Meter pro Woche realisierbar, was einer täglichen Futtermenge von 130-170 kg entspricht. Dies ist für sehr kleine Viehbestände eventuell noch zu viel. Eine weitere Verringerung des Schlauchdurchmessers wäre denkbar. Die Entwicklung spezieller Entnahmetechniken ist generell für das Folienschlauchsystem in Erwägung zu ziehen. Es konnte jedoch auch aufgezeigt werden, dass die Entnahme von Feuchtgetreide mit einem Radlader praxistauglich und mit geringer Handarbeit verbunden ist.

5.6.2 Maßnahmen zur Aufrechterhaltung anaerober Lagerungsbedingungen

Nach FÜRLL et al. (2006) und HONIG (1991) ist die Minimierung des Gasaustausches zwischen Silage und Umgebungsluft von primärer Bedeutung für die Qualitätserhaltung der Silage. Die Gasdurchlässigkeit der Folie sollte zwar möglichst gering sein, bei heutigen Qualitätsstandards ist dies jedoch für die Erzeugung eines ausreichenden Luftabschlusses von sekundärer Bedeutung (FÜRLL et al. 2006, ASHBELL et al., 2001, SNELL et al. 2000). Aus den vorliegenden Ergebnissen geht hervor, dass der Vermeidung von Beschädigungen der Folie die größte Bedeutung zukommt. Nach MEISE et al. (2006) ist die Dicke der Folie kein ausreichendes Qualitätsmerkmal, um eine Beschädigung zu vermeiden. Wirkungsvolle Schutzmaßnahmen gegen mechanische Beschädigungen der Folie sind somit unumgänglich.

Im zweiten Versuchsjahr wurde an den Schlauchenden aller untersuchten Varianten nach Schlauchöffnung gegenüber dem Erntematerial unerwartet erhöhte Keimgehalte ermittelt. Sowohl ein mangelhafter Schlauchverschluss als auch Nagetierschäden im unteren seitlichen Folienbereich konnten als Ursache für den Lufteintritt ermittelt werden. Insbesondere das unverdichtete Schlauchende war für einen Verderb besonders anfällig. Bei einem Böschungswinkel von 40-50° und einer Schlauchhöhe von etwa einem Meter sind dadurch vom Fuß des Schlauches ausgehend etwa 2-2,5 m besonders stark von einem Verderb gefährdet. Es muss sichergestellt werden, dass das Schlauchende nach Beendigung des Pressvorganges luftdicht verschlossen wird. Zur Optimierung praxisüblicher Methoden kommen dafür spezielle Klemmprofile in Frage, in die, nach dem Prinzip wiederverschließbarer Gefriertüten, die obere und untere Folienlage zusammengelegt und mit einer Keder eingeklemmt werden. Eine Beschwerung des Schlauchendes mit Großballen aus Stroh, wie es in der Praxis teilweise üblich ist, sollte vermieden werden, da dies Nagetieren optimale Lebensbedingungen bietet.

Für die Schlauchoberfläche haben sich Vogelschutznetze bewährt. Da die Getreideschläuche ihre maximale Ablagebreite nicht direkt auf der Ablagefläche, sondern in etwa 20 cm Höhe erreichen, stellt der entstehende Hohlraum jedoch einen Problembereich dar (Abbildung 54). Hat das Schutznetz keinen direkten Folienkontakt bis zum Boden, können sich Nagetiere in diesem Bereich gefahrlos aufhalten und Beschädigungen der Folie verursachen. Der durch den Lufteintritt bedingte Verderb ist neben der Einflussdauer insbesondere vom eingelagerten Erntegut abhängig. Aufgrund der hervorragenden Siliereigenschaften und der hohen Verdichtbarkeit tritt bei Weizen mit Feuchtegehalten

von mehr als 28 % über einen langen Zeitraum kein Verderb ein. Bei geringeren Feuchtegehalten dagegen und generell bei Gerste kann ein Luftzutritt enormen Schaden verursachen.

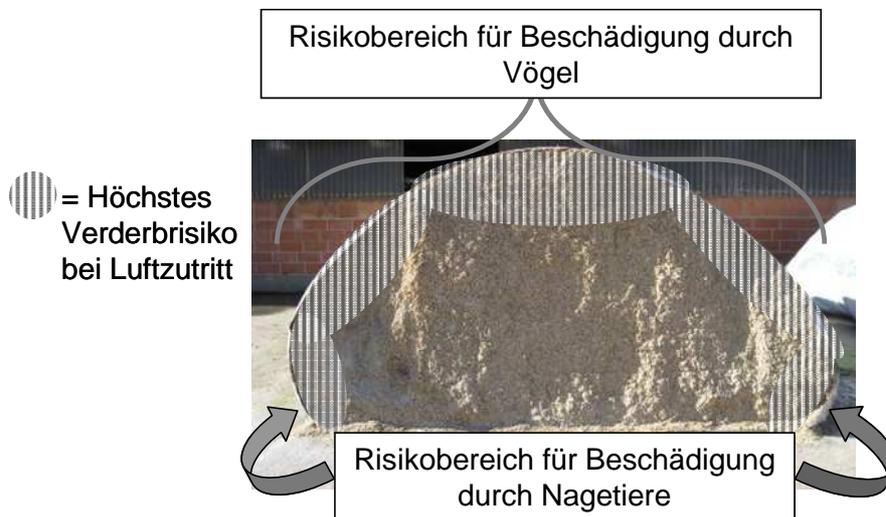


Abbildung 54: Risikobereiche für Beschädigung und Verderb im Folienschlauch

Nach BÜSCHER (2006) hat ein gutes Qualitätsmanagement in der Verfahrenskette „Futterernte, -konservierung und -entnahme“ auch das Ziel wirtschaftliche Risiken zu minimieren. Eine Verbesserung des nachhaltigen Schutzes des Folienschlauches vor mechanischen Beschädigungen durch anwenderfreundliche Maßnahmen sollte daher ein primäres Ziel für eine zukünftige Verfahrensoptimierung sein. Zurzeit liegen für dieses Problem noch keine Lösungen vor. Abbildung 55 und Abbildung 56 zeigen zwei Optimierungsansätze für eine Reduzierung des Verderbrisikos auf. Der seitliche Risikobereich könnte durch den Einsatz von bissfestem, feinmaschigem Draht geschützt werden.

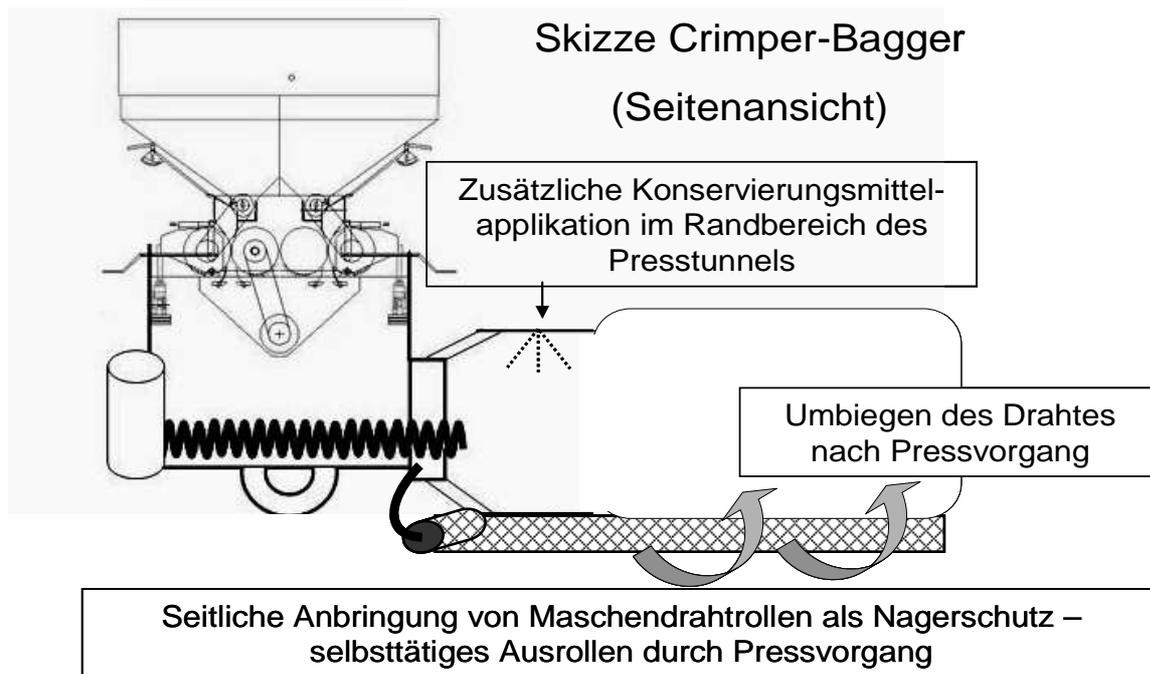


Abbildung 55: Optimierungsansatz für verbesserten Schutz des Folienschlauches gegen Beschädigung und für Senkung des Verderbrisikos im Folienrandbereich.

Dafür müssten beidseitig des Presstunnels Halterungen für Drahtrollen angebracht werden. Der Maschendraht, der eine Breite von etwa 50 cm haben sollte, wird dann zu Beginn des Pressvorgangs soweit unter den Schlauch gelegt, dass das eingelagerte Getreide ihn auf einer Breite von etwa 10 cm fixiert. Durch den Pressvorgang wird der Draht dann selbsttätig abgerollt und anschließend seitlich hochgebogen. Diese Schutzmaßnahme kann mit dem Einsatz eines Vogelschutznetzes kombiniert werden. Bei der Entnahme kann der Maschendraht dann aufgerollt und eventuell sogar wieder verwendet werden.

Der Folienrandbereich hat nach Luftzutritt das größte Verderbpotential (vgl. Abbildung 42, S.101). Eine zusätzliche Applikation eines Konservierungszusatzes in diesem Bereich könnte diese Gefahr reduzieren (Abbildung 56). Dafür könnten zusätzliche Applikationsdüsen im Presstunnel angebracht werden, ohne dass die durchschnittliche Aufwandmenge erhöht werden müsste.

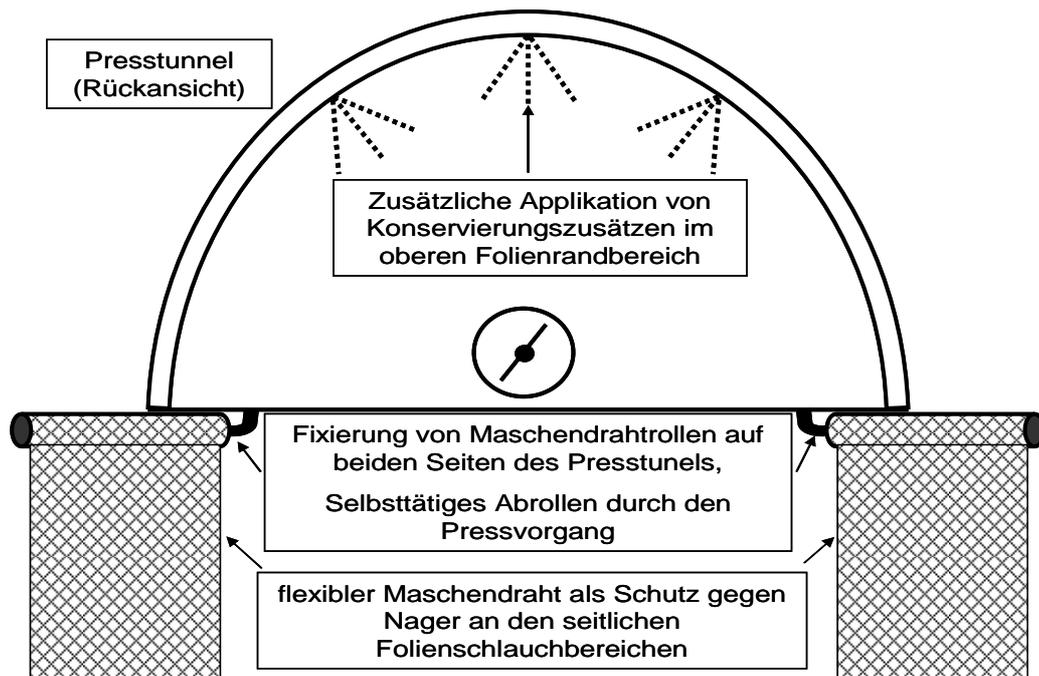


Abbildung 56: Optimierungsansatz für verbesserten Schutz des Folienschlauches gegen Beschädigung und für Senkung des Verderbrisikos im Folienrandbereich (Rückansicht).

5.7 Einsatzpotentiale der Feuchtgetreidekonservierung im Folienschlauch

Die Einsatzmöglichkeiten der Feuchtgetreidekonservierung sind vielfältig. Aufgrund der Unabhängigkeit von Getreideart und -feuchte ist grundsätzlich die Einlagerung einer Vielzahl von Körnerfrüchten denkbar. Der Einsatz des Verfahrens hängt somit im wesentlichen von den Verwendungszielen und den Verfahrenskosten ab. Der Einsatz in der Tierernährung konzentriert sich momentan auf die Wiederkäuerfütterung. Obwohl bisher kaum Untersuchungen dazu vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass die Aufbereitung der Körner durch den Crimper-Bagger dabei für Getreide und Mais ausreichend ist, sodass keine weitere Zerkleinerung notwendig erscheint.

Für die Verwendung in der Schweinefütterung ist die aufgezeigte Zerkleinerung von Gerste und Weizen nicht ausreichend. Für Mais erscheint eine Annäherung an die Anforderung der Partikelgrößen und deren Verteilung am ehesten möglich. Nach KAMPHUES (2007) sind jedoch die Einflüsse der Partikelgröße auf die Tiergesundheit noch nicht ausreichend untersucht. Unter Berücksichtigung des hohen Automatisierungsgrades in der Schweinefütterung stellt die Integrierung des Folienschlauchsystems in bestehende Fütterungssysteme allerdings eine weitere Herausforderung dar.

Das Verfahren ist auch für die Konservierung von Substraten zur Verwendung in Biogasanlagen geeignet. Nach OECHSNER (2006) ist ein Quetschen von Getreidekörnern für eine Aufschluss in Biogasfermentern ausreichend. Versuche von BÜRGER (2006) mit Weizen aus den Folienschläuchen des ersten Versuchsjahres zeigten mit trockenen Referenzvarianten vergleichbare, teilweise sogar leicht erhöhte Gasausbeuten. Der Einsatz des chemischen Konservierungszusatzes hatte hierauf keinen Einfluss.

Die Kosten des Crimper-Bagger-Verfahrens wurden von RABE (2006) mit im Mittel 13,- €/t angegeben. Aktuelle Angaben von WEBER (2007) bestätigen diese Zahlen. Die Kosten für den Einsatz des in dieser Arbeit verwendeten chemischen Konservierungszusatzes liegen bei 1,50 €/l (AUERBACH, 2007). Bei einer allgemeingültig zu empfehlenden Aufwandmenge von 4 l/t FM müssten zu den Einlagerungskosten noch etwa 6 €/t FM addiert werden. Die Kosten für das gesamte Einlagerungsverfahren inklusive Lohnarbeit, Diesel, Schlauch und Konservierungszusatz betragen somit etwa 19 €/t FM. Das Vorhandensein einer befestigten Ablagefläche, die eine Entnahme des Getreides ohne Verschmutzung erlaubt, ist dabei die einzige bauliche Voraussetzung. Die Verfahrenskosten der Feuchtgetreidekonservierung entsprechen damit etwa den Trocknungskosten bei einer Feuchte von knapp 20 % (Tabelle 28). Dabei muss daraufhin hingewiesen werden, dass zusätzlich zu den Trocknungskosten noch Lagerungs- und Aufbereitungskosten entstehen, die im Folienschlauchverfahren bereits enthalten sind. Die Kosten für das Quetschen durch einen Lohnunternehmer liegen bei etwa 10 €/t (KTBL, 2005).

Unter Berücksichtigung der um mehr als 20 % gestiegenen Kosten für die Trocknung der letzten Jahre und der Annahme, dass dieser Trend sich fortsetzt, kann das Folienschlauchverfahren bereits bei geringen Erntefeuchtegehalten eine ökonomisch interessante Alternative für die Konservierung von Futtergetreide sein.

Tabelle 28: Vergleich von Trocknungskosten für Feuchtgetreide und Verfahrenskosten des Crimper-Bagger-Verfahrens (nach *ANONYMUS, 2007, **WEBER, 2007)

Feuchte [%]	Trocknungskosten für Getreide* [€/t]		Verfahrenskosten Crimper-Bagger** [€/t]
	2001	2007	
16	8,44	10,20	13,-
18	14,57	17,60	(Lohnarbeit, Diesel, Schlauch)
20	20,71	25,00	+ 6,-
22	26,84	32,40	(<u>chemischer Konservierungszusatz</u>)
24	32,98	39,80	=19,-

5.8 Schlussfolgerungen

- Eine stabile Lagerung von gequetschtem Getreide im Folienschlauch kann unabhängig vom Feuchtegehalt des Getreides und vom Konservierungszusatz unter Luftabschluss gewährleistet werden.
- Die Erhaltung anaerober Lagerungsbedingungen ist Voraussetzung für den Erhalt der Futterqualität. Wirkungsvolle Schutzmaßnahmen gegen mechanische Beschädigungen der Folie sind unbedingt durchzuführen. Eine weitere Optimierung dieser Maßnahmen ist für die Verfahrenssicherheit und die Akzeptanz des Verfahrens in der Praxis notwendig.
- Für eine Silierung sind Feuchtegehalte ab etwa 25 % notwendig, stabilitätswirksame Gärsäuregehalte treten bei Weizen erst ab etwa 27 % Feuchte, bei Gerste über 30 % auf, wobei die Fermentation für die aerobe Stabilität im Folienschlauch nur sekundäre Bedeutung hat.
- Eine Anfeuchtung von Getreide führt zu Gärsäuregehalten, die deutlich höher sind als bei vergleichbarer Erntefeuchte. Eine Ergänzung von Wasser ist bei größeren Mengen aufwendig. Die verfügbaren technischen Lösungen sollten dafür optimiert werden.
- Mit steigendem Feuchtegehalt steigt die Verdichtbarkeit von gequetschtem Weizen, bei Gerste ist der Anstieg minimal und trägt nicht zu einer verbesserten aeroben Stabilität bei.
- Findet eine Silierung statt, kann in Weizen und Mais auch ohne Konservierungszusatz eine aerobe Stabilität erreicht werden, bei Gerste konnte dies nicht nachgewiesen werden.
- Bei Luftzufuhr besteht ein hohes Risiko des Verderbs ohne den Einsatz eines Konservierungsmittels, insbesondere bei Feuchtegehalten, bei denen keine Silierung stattfindet und nur eine geringe Verdichtbarkeit möglich ist.
- Der Einsatz eines chemischen Konservierungszusatzes mit einer Aufwandmenge von 4 l/t FM hat in allen untersuchten Getreidearten und Einlagerungsfeuchten die Keimentwicklung und eine Nacherwärmung vermindert und ist zur Sicherung der Futterqualität zu empfehlen.
- Das Folienschlauchverfahren stellt ein konkurrenzfähiges Verfahren zur Trockenkonservierung von Futtergetreide dar.

5.9 Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, substratbedingte und verfahrenstechnische Einflüsse auf die Futterqualität bei der Einlagerung von Feuchtgetreide im Folienschlauch zu analysieren. Durch die Breite der durchgeführten Untersuchungen konnten Einflüsse von Getreideart und Einlagerungsfeuchte und die Wirkungsweise eines chemischen Konservierungszusatzes beschrieben, Empfehlungen für die Anwendung des Verfahrens gegeben und Optimierungsansätze aufgezeigt werden.

Eine Reihe von Versuchsergebnissen zeigt auf, dass diesbezüglich vertiefende Untersuchungen sinnvoll erscheinen. Im Folgenden sollen einige dieser Bereiche vorgestellt werden:

- Bauartbedingte Einflüsse auf die Lagerungsdichte im Folienschlauch
 - Das Prinzip des Crimper-Baggers ist bei allen am Markt erhältlichen Maschinen gleich. Unterschiede sind u.a. in der Positionierung der Förder- und Verdichterschnecke zu finden. Einflüsse auf die Verdichtung des Feuchtgetreides insbesondere in den oberen Bereichen des Folienschlauches sind möglich.
 - Hinsichtlich Verdichtbarkeit und aerober Stabilität ist eine Bestimmung der Einflüsse des Aufbereitungsgrades und einer Variation der Partikelgröße unter Beibehaltung von Getreideart und -feuchte sinnvoll. Diesbezüglich ergibt sich die Frage nach den Einflüssen auf den zusätzlichen Aufbereitungseffekt durch die Förderschnecke des Crimper-Bagger während der Einlagerung. Weiterhin ist die optimale Kombination aus Walzentyp, Umlauf- und Differenzgeschwindigkeit für verschiedene Getreidevarianten zu ermitteln.
 - Die Regulierung des Pressdruckes basiert bisher auf den individuellen Erfahrungen des Maschinenbedieners. Die Entwicklung von automatischen Regelkreisen für verschiedene Substrate könnte zur Reduzierung von Bedienungsfehlern Abhilfe schaffen.
- Eindringwiderstand als Indikator für die Lagerungsdichte
 - Ein Potential dieser Messmethode für die Bestimmung der Lagerungsdichte wurde aufgezeigt. Für verlässliche Aussagen ist eine Erhebung bei verschiedenen Getreidevarianten (Getreideart, -feuchte und -aufbereitungsgrad) notwendig.

-
- Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen gegen Beschädigungen des Folienschlauches
 - Die unteren Flanken des Folienschlauches stellen das größte Gefahrenpotential für Beschädigungen durch Nager dar. Arbeitswirtschaftlich sinnvolle und zugleich kostengünstige Methoden müssen entwickelt und untersucht werden.
 - Einsatzmöglichkeiten in der Tierernährung
 - Die Unabhängigkeit des Verfahrens in Bezug auf die Einlagerungsfeuchte wurde aufgezeigt. Mögliche Konsequenzen bezüglich des Futterwertes insbesondere bei Feuchtegehalten um 30 % und damit verbundener intensiver Fermentation stehen noch aus.
 - Der Einsatz von Feuchtgetreide erfolgt bisher vorwiegend in der Rinderfütterung. Die Verwendbarkeit dieses Konservierungsverfahrens in der Schweinefütterung ist zu untersuchen. Damit verbunden ist die Entwicklung von geeigneten Entnahmesystemen

6 Zusammenfassung

Alternativen zur Trocknung von Futtergetreide erlangen aufgrund steigender Energiepreise eine zunehmende Bedeutung. Für die Konservierung von Feuchtgetreide für Fütterungszwecke werden verschiedene Verfahren in der Praxis eingesetzt. Die Einlagerung von gequetschtem Futtergetreide in Folienschläuchen mit einer Schlauchpresse mit integrierter Walzenquetsche (Crimper-Bagger) stellt eine neue technische Alternative zu konventionellen Verfahren dar, weil erntefrisches Getreide mit hohen Feuchtegehalten in einem Arbeitsgang gequetscht, mit Konservierungszusätzen behandelt, verdichtet und luftdicht eingelagert werden kann.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Analyse und Beschreibung substratbedingter und verfahrenstechnischer Einflüsse auf die Futterqualität bei der Einlagerung von Feuchtgetreide im Folienschlauch. In feucht und zerkleinert eingelagerter Gerste und Weizen sind unter Anwendung eines chemischen Konservierungszusatzes experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden.

Im ersten Versuchsabschnitt wurden zur Bestimmung grundsätzlicher Einflüsse auf Gärqualität und aerobe Stabilität sowie der Wirkung verschiedener Aufwandmengen eines chemischen Konservierungszusatzes zunächst standardisierte Versuche in Kleinsilos angelegt. Dafür wurden Gerste und Weizen bei einer Feuchte von etwa 20 % geerntet und eine Teilmenge auf 30 % angefeuchtet. Der Weizen wurde zudem in Folienschläuche eingelagert.

Die Zwischenergebnisse dienten als Grundlage für die Planungen des zweiten Versuchjahres, in dem Gerste und Weizen in den gleichen Feuchtestufen geerntet und in Folienschläuche eingelagert wurden. Dadurch sollten insbesondere die Einflüsse auf die Futterqualität und aerobe Stabilität im Folienschlauch während der Auslagerungsphase näher bestimmt werden. Durch verschiedene Untersuchungen zu Partikelgrößen, Lagerungsdichte und Verdichtbarkeit wurden diese ergänzt. Zusätzliche Untersuchungen an Feuchtmais und eine Befragung von Anwendern des Folienschlauchverfahrens sollten Praxisempfehlungen, Optimierungspotentiale und eine Gesamtbewertung des Verfahrens ermöglichen.

Es konnte aufgezeigt werden, dass eine verlustarme Lagerung aller untersuchten Feuchtgetreidearten unabhängig vom Feuchtegehalt unter Luftabschluss im Folienschlauch möglich ist. Die Aufrechterhaltung anaerober Lagerungsbedingungen ist daher von größter Bedeutung für eine stabile Lagerung im Folienschlauch. Beschädigungen durch Vögel und

Nagetiere müssen dauerhaft verhindert werden. Eine Optimierung der verfügbaren Schutzmaßnahmen ist unbedingt erforderlich.

Die Erhaltung der Futterqualität unter aeroben Entnahmebedingungen erfordert in erster Linie optimale verfahrens- und siliertechnische Voraussetzungen. Ein stabilisierender Effekt durch die Bildung von Gärsäuren tritt in Getreide nur bedingt und erst ab Feuchtegehalten über 25 % auf. Es wurden charakteristische Unterschiede zwischen den Getreidearten aufgezeigt. In Weizen konnten generell höhere Gärsäuregehalte erreicht werden als in Gerste. Durch eine Anfeuchtung sind im Vergleich zu erntefrischem Getreide mit vergleichbarem Feuchtegehalt verdoppelte Gärsäuregehalte in der Silage erreichbar.

Weiterhin resultieren Unterschiede im Kornaufbau in differenzierter Reaktion auf Kornaufbereitung und Partikelgröße sowie Verdichtbarkeit und Lagerungsdichte im Folienschlauch. Bei hohen Feuchtegehalten nimmt die Partikelgröße bei Gerste und Weizen im Gegensatz zum Körnermais ab. Während ein hoher Feuchtegehalt bei Weizen und Mais mit einer verbesserten Verdichtbarkeit und teilweise mit hohen Trockenmasselagerungsdichten verbunden ist, kann Gerste aufgrund seiner Spelzen nur schlecht verdichtet werden. Dies führte insbesondere bei hohen Feuchtegehalten zu einer schnellen Nacherwärmung im Folienschlauch. Bisher muss die Lagerungsdichte im Randbereich der Folienschläuche als allgemein nicht ausreichend bezeichnet werden. Das Risiko eines Futtermittelsverderbs ist daher nicht auszuschließen.

In Folienschläuchen mit Weizen- und Mais mit Feuchtegehalten von etwa 30 % wurde zwar ebenso keine Nacherwärmung während der Auslagerungsphase festgestellt wie in Gerste mit etwa 16 %. Ein muffiger Geruch, der besonders beim Fehlen von Gärsäuren deutlich wurde und stark erhöhte Hefengehalte in nahezu allen unbehandelten Varianten wiesen jedoch trotz der fehlenden Nacherwärmung eindeutig auf einen Verderb hin.

Durch den Einsatz eines chemischen Konservierungsmittels wurde die Fermentation zwar deutlich reduziert, jedoch konnten die Keimgehalte signifikant gesenkt werden. Daraus resultierte selbst bei einem minimalen Vorschub von einem Meter pro Woche bei einer Aufwandmenge von 4 l/t FM eine ausreichende Stabilität aller Getreidevarianten. Der Einsatz eines chemischen Konservierungsmittels ist daher grundsätzlich zu empfehlen.

Es konnte aufgezeigt werden, dass das Crimper-Bagger-Verfahren unter Berücksichtigung qualitätserhaltender Maßnahmen eine geeignete technische Alternative zu herkömmlichen Konservierungsmethoden für Feuchtgetreide darstellen kann.

7 Literaturverzeichnis

- AARNOS, R. (2006): persönliche Mitteilung des Crimper-Bagger-Herstellers Aimo Kortteen Konepaja ,Ylivieska, Finnland
- AEL (1996): Mahl- und Mischanlagen im landwirtschaftlichen Betrieb. AEL Schriftenreihe Heft 7/1996, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup
- ANONYMUS (2006): Feuchtigkeitsverrechnung für Getreide Ernte 2001 und 2006, Tabelle 78, VR- Bank eG - Agrarhandel-Süderlügum.
- ADESOGAN, A. T. (2003): Effect of *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus fermentum*, *Leuconostoc mesenteroides* inoculants, or a Chemical Additive on the Fermentation, Aerobic Stability, and Nutritive Value of Crimped Wheat Grains. *J. Dairy Sci.* 86:1789-1796
- ALB, 2001: Getreide und Ölsaaten nach der Ernte fachgerecht lagern und gesund erhalten. Arbeitsgemeinschaft für Rationalisierung, Landtechnik und Bauwesen in der Landwirtschaft Hessen e.V., Bericht Nr. 70
- AL-MAHASNEH, M. A., RABABAH, T.M. (2007): Effect of moisture content on some physical properties of green wheat. *Journal of Food Engineering* 79, 1467-1473
- ASHBELL, G., KIPNIS, T., TITTERTON, M. HEN, Y., AZRIELI, A., WEINBERG, Z.G. (2001): Examination of a technology for silage making in plastic bags. *Animal Feed Science and Technology* (91), 213-222
- AUERBACH, H. (2007): Persönliche Mitteilung, unveröffentlicht
- AUERBACH, H. (1996): Verfahrensgrundlagen zur Senkung des Risikos eines Befalls von Silagen mit *Penicillium roqueforti* und einer Kontamination mit Mykotoxinen dieses Schimmelpilzes. Dissertation, Universität Hohenheim, in *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 168.
- AUERBACH, H., OLDENBURG, E., PAHLOW, G. (2000): Prevention of *Penicillium roqueforti* – associated aerobic deterioration of maize silage by various additives. *Proceedings of 22. Mykotoxin – Workshop, Bonn, Germany, 5-7 June 2000*, 146-149
- BELLUS, Z. (2004): *Agricultural Machinery Test – Murska 1400 S 2x2 Corn Crushing Roller-Mill*, Ministry of Agriculture and Rural Development, Gödöllő, Hungary
- BERG, K. (1971): Die Trockensubstanzbestimmung von Silagen und die Erfassung flüchtiger, den Futterwert beeinflussender Verbindungen sowie Modellversuche zur Ermittlung des Gärverlustes. Dissertation, Deutsche Akademie der Landwissensch., Berlin
- BORCHERT, H., GRAF, R. (1988): Zum Vergleich von Penetrometermessungen, durchgeführt bei unterschiedlichem Wassergehalt. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 151, 69-71
- BOEKELMANN, M., LÜCKE, W., WEIMAR, R.-J. (2007): Bewertung landwirtschaftlicher Trocknungsanlagen – Anforderungen und Möglichkeiten. *Landtechnik* 2/2007, 84-85

- BOYSEN, M. E., BJÖRNEHOLM, S. , SCHNÜRER, J. (2000): Effect of biocontrol yeast *Pichia anomala* on interactions between *Penicillium roqueforti*, *Penicillium carneum* and *Penicillium paneum* in moist grain under restricted air supply. *Postharvest Biology and Technology* 19, 173-179
- BUCHANAN-SMITH J., SMITH T. K., MORRIS J.R. (2003): High-Moisture Grain and Grain By-Products. In: Buxton R., Muck R. E., Harrison J.H., *Silage Science and Technology*, ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin, USA, 825-854
- BÜHL, A., ZÖFEL, P. (2002): SPSS 11 – Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. 8. Auflage. Pearson Studium
- BÜRGER, G. (2006): Bewertung der Effizienz ausgewählter Energiepflanzen zur Biogaserzeugung auf Basis von Gärversuchen. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich Wilhelms Universität, Bonn
- BÜSCHER, W. (2006): Risikomanagement und Entscheidungsfindung aus verfahrenstechnischer Sicht. Tagungsband GKL-Frühjahrstagung 2006 - Siliererfolg auch bei großen Erntemassen. KTBL, Darmstadt
- CAMPLING, R. C. (1991): Processing cereal grains for cattle - a review. *Livestock Production Science*, 28, 223-234
- COENEN, A. (1988): Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Kühlzwischenlagerung und Belüftungssatztrocknung von Weizen, Diss. Göttingen, MEG-Forschungsbericht Agrartechnik 134.
- CEYNOWA, J. (1986): Mykologische Untersuchungen an luftdicht gelagertem Getreide, Diss. Kiel
- CZARNECKA, M., CZARNECKI, Z., ZUROMSKA, M. (1991): Effects of chemical preservation of high-moisture grain on carbohydrates and nitrogen compounds: in vitro experiments. *Ani. Feed Sci. Tech.*, 34, 343-352
- DEDERER, M. (1988): Ermittlung von Verfahrenskennwerten und vergleichende Beurteilung von Konservierungsverfahren für Corn-Cob-Mix. Selbstverlag, Diss. Hohenheim
- DLG (2000): DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit , DLG-Verlag, Frankfurt am Main
- DLG (2006): Praxishandbuch Futterkonservierung - Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. 7. Auflage, DLG-Verlag, Frankfurt am Main
- DRUVEFORS, U. Ä. (2004): Yeast Biocontrol of Grain Spoilage Moulds - Mode of Action of *Pichia anomala*. Doctoral thesis, Uppsala, Sweden
- DURLAND, G. R., POHL, S. (2002): Harvesting and Ensiling High-Moisture Crops. Extension Extra 1015, College of Agriculture & Biological Sciences/South Dakota State University. <http://agbiopubs.sdstate.edu/articles/ExEx1015.pdf> 01.08.2007
- ECKL, J. (2005): Getreide günstig konservieren, DLZ-Agrarmagazin 6/2005, 60-65

- EDWARDS, M. A., OSBORNE, B. G., HENRY, R.J. (2007): Investigation of the effect of conditioning on the fracture of hard and soft wheat grain by the single-kernel characterization system: A comparison with roller milling
- FEIFFER, D. (2004): Gute Bilanz trotz großer Extreme - Ernte mit vielen regionalen Unterschieden. *Neue Landwirtschaft* 9/2004, S.44-46
- FIEDLER, E (1980): Versuchs- und Erfahrungsbericht, Landesanstalt für Schweinezucht, Forchheim, 126-127
- FÜRL, C., IDLER, C., HOFFMANN, T. (1997): Untersuchungen zu Verfahren der Konservierung von erntefeuchtem, grobgeschrotetem Getreide. *Agrartechnische Forschung* 3, 66-75
- FÜRL, C., SCHMERBAUCH, K.-J., KAISER, E., IDLER, C. (2006): Einflüsse durch das Verdichten und den äußeren Luftabschluss auf die Qualität von Grassilagen - Ergebnisse und Anforderungen. *Agrartechnische Forschung* 12, S. 19-29
- GEDEK, B. (1973): Futtermittelverderb durch Bakterien und Pilze und seine nachteiligen Folgen, Übers. Tierern. 1, 45-56
- GEISLER, G. (1983): Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas, Verlag Paul Parey, Hamburg
- GENTA, K., KATSUHIKO, T., YUJI, N., TAKAOKI, S. (2006): High-moisture Wheat Harvesting Conditions and Quality Using an Ordinary-type combine. *J.Jap.Soc. Agric. Machinery*, Vol. 68, No. 1, 87-95.
- GLENN, G.M., YOUNCE, F.L., PITTS, M.J. (1991): Fundamental physical properties characterizing the hardness of wheat endosperm. *Journal of Cereal Science* (13), 179-194
- GROB, F.; RIEBE, K. (1974): Gärfutter. Eugen Ulmer-Verlag, Stuttgart
- HARA, K., IHORI, H., HARA, Y., TAKENAKA, H.; SEKIGUCHI, K. (2002): Upper limit of harvesting grain moisture content and proper drying temperature for spring wheat from the viewpoint of quality. *Bulletin of Hokkaido Prefectural Agricultural Experiment Stations. Hokkaido Central Agricultural Experiment Station, Hokkaido, Japan.* 82, 75-82. 10 ref
- HARTGE, K., HORN, R. (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. 3. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- HARTGE, K., HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- HÄGGBLOM, P., 1990. Isolation of Roquefortine C from feed grain. *Appl. Environ. Microbiol.* 56, 2924-2926
- HOEDTKE, S. (2007): Die Quantifizierung der Osmolalität in Futterpflanzen und ihre Veränderung in verschiedenen Stadien der Silierung. Dissertation Universität Rostock
- HOFFMAN, T., FÜRL, C. (2000): Einfluss der Witterung auf den Mähdreschereinsatz. *Landtechnik* 2/2000, 158-159

- HOFFMANN, T. (1998): Gestaltung von Technik und Verfahren für die Ernte und Konservierung von Getreide auf der Grundlage witterungsbedingter Kornfeuchten, 96-113
- HONIG, H., PAHLOW, G. (1986): Wirkungsweise und Einsatzgrenzen von Silage-Impfkulturen aus Milchsäurebakterien. *Das wirtschaftseigene Futter* 32, S. 205-228
- HONIG, H. (1987): Influence of forage type and consolidation on gas exchange and losses in silo. In: Summary of papers, 8th Silage Conference, Hurley (UK), 51-52
- HONIG, H. (1990): Evaluation of aerobic stability. *Grass and Forage Reports* 3, 76-82
- HONIG, H. (1991): Reducing losses during storage and unloading of silage. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 123, 116-128
- HONIG, H. (2007): Persönliche Mitteilung
- HSIEH, F.H., MARTIN, D. G., BLACK, H.C., TIPPLES, K.H. (1980): Some factors affecting the first break grinding of Canadian wheat. *Cereal Chemistry* 57, 217-223
- HÜFNER, E. (1984): Beurteilung der Getreidekonservierung unter Wasserzusatz anhand von Verlustmessungen, Studienarbeit, Institut für Agrartechnik, Hohenheim
- JÄKEL, K. (2006): Einsatz der Schlauchtechnologie. Tagungsband GKL-Frühjahrstagung 2006 - Siliererfolg auch bei großen Erntemassen. 28./29.3.2006, Bonn
- JEROCH, H., FLACHOWSKY, G., WEIBBACH, F. (1993): *Futtermittelkunde*, Fischer Verlag, Stuttgart, 238-281
- JEROCH, H., DROCHNER, W., SIMON, O. (1999): *Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere*, Ulmer Verlag, Stuttgart
- JESENSKA, Z. (1993): Micromycetes in Foodstuffs and Feedstuffs. In: *Progress in Industrial Microbiology*, Vol. 28, 102-111
- JUNGBLUTH, T. (1989): Beurteilung von Verfahren der Feuchtgetreidekonservierung. Habilitationsschrift Universität Hohenheim
- JUNGBLUTH, T., BÜSCHER, W., KRAUSE, M. (2005): *Technik Tierhaltung*. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart
- KALAYCI, U. (2003): Partikelgrößen von Mais - Wann ist er zu grob, wann zu fein? *Milchpraxis* 1/2003, 41. Jg., 44-47
- KALZENDORF, C. (2002): Grundlagen der Silierung. *Futtermittelkunde - Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien*. Arbeitsgemeinschaft der nordwestdeutschen Landwirtschaftskammern
- KAMPHUES, J. (2007): Die "Struktur" im Mischfutter für Schweine: Charakterisierung und Bedeutung. In: *Tierernährung für Tierärzte-Im Fokus: Die Fütterung von Schweinen*, 37-45
- KARREN, D. (1996): High Moisture Grain Production, Alberta Feedlot Management Guide, Section 1, Fact Sheet 3, 1-3

- KARUNAKARAN, C., MUIR, W. E., JAYAS, N. D. G. WHITE, ABRAMSON D. (2001): Safe storage time of high moisture wheat. *Journal of Stored Products Research* 37, 303-312.
- KASPERSSON, A., LINDGREN, S., EKSTRÖM, N. (1988): Microbial Dynamics in Barley Grain Stored Under Controlled Atmosphere. *Ani. Feed Sci. Tech.*, 19, 299-312
- KLEINMANS, J., RUSER, B., OETJEN, G., THAYSEN, J. (2005): Eine neue Methode zur Bestimmung der Verdichtung in Praxissilos, *Mais*, 4/2005
- KÖHLER, W., SCHACHTEL, G., VOLESKE, P.(2007): Biostatistik – Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler. 4. Auflage, Springer-Lehrbuch.
- KTBL (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup
- LACEY, J., 1989. Pre- and post-harvest ecology of fungi causing spoilage of foods and other stored products. *J. Appl. Bacteriol. Symp. Suppl.* 67, 11S-25
- LEPOM, P.; KNABE, O. UND BAATH, H. (1990): Vorkommen von *Fusarium*-Arten und ihren Mykotoxinen auf Silomais. 7. Mitteilung: Bildung von Deoxynivalenol (DON) in einem künstlich mit *F. culmorum* infizierten Maisbestand sowie der Einfluss der Silierung auf die Stabilität des gebildeten DON. *Arch. Anim. Nutr.*40 (10), p 1005-1012
- LEURS, K. (2006): Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die Siliereigenschaften von Mais. Dissertation, Rheinische Friedrich Wilhelms Universität, Bonn
- LINDGREN, S. (1991): Hygienic problems in conserved forage. *Forage conservation towards 2000*, Landbauforschung Völkensrode, Sonderheft 123, 177-190
- LOTZ, A., VON OY, K.J. (1982): Zur beurteilung der Konservierung von Körnerfrüchten unter Wasserzusatz, *Grundl. Landt.* 32, 208-211
- LUDEWIG, A., KABSCH, U., VERREET, J-A. (2005): Comparative deoxynivalenol accumulation and aggressiveness of isolates of *Fusarium graminearum* on wheat and the influence on yield as affected by fungal isolate and wheat cultivar. *Journal of Plant Diseaseses and Protection*, 112 (3), pp 1-13, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- MAACK, C. (2006): Verfahrenstechnische Bewertung der Körnermaiskonservierung im Folienschlauch. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich Wilhem Universität, Bonn
- MAGAN, N., LACEY, J. (1984): Effects of gas composition and water activity on growth of field and storage fungi and their interactions. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 82: 305-314
- MATTHÄUS, K., DÄNICKE, S., VAHJEN, W., SIMON, O., WANG, VALENTA, H., MEYER, K., STRUMPF, A., ZIESENIB, H., FLACHOWSKY, G. (2004): Progression of Mycotoxin and nutrient concentrations in wheat after inoculation with *Fusarium culmorum*. *Arch. Anim. Nutr.*, Vol. 58(1), 19-35
- MATTHIAS, J., PRIES, M. (2006): Feuchtgetreidekonservierung. In: *Praxishandbuch Futterkonservierung*. DLG-Verlag, 7. Auflage, 117-125
- MLP (2005): RICHTER, W., SCHUSTER, M., TISCHNER, H., ZIMMERMANN, G., DOLESCHEL, P., BECK, R. LEPSCHY VON GLEISSENTHALL, J.; STEINHÖFEL, O., HÖRÜGEL, K., HANSCHMANN, G.; HEINZE, A., JAHN, O., HARTUNG, H., MÜLLER, G.; THALMANN, A.

- (2005): Schimmelpilze und Mykotoxine in Futtermitteln - Mehrländerprojekt der Landesanstalten für Landwirtschaft der Bundesländer Bayern, Sachsen, Thüringen und Baden-Württemberg.
http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/download/BU_Mykotoxine_April2005.pdf letztes Update:02.07.2007
- MORCOS, B. (1986): Mikrobielle Entwicklung und Verderb bei der Konservierung und Lagerung von Getreide-Schädigungsfreie Verweilzeiten und tolerierbare Grenzen-, Diss. Göttingen, MEG-Forschungsbericht Agrartechnik 114
- NUSSBAUM, H. J. (2006): Umgang mit nicht optimal konservierten Silagen. In: Praxishandbuch Futtermittelkonservierung. DLG-Verlag, 7. Auflage, 83-90
- OECHSNER, H. (2006): Prozessbestimmende Parameter in Biogasanlagen. Internationaler Workshop Biogas auf der ‚New Energy‘, 23.3.2006
- OH, I.-H.(1985): Verfahren der Flüssigkonservierung von Getreide und Mais, Dissertation Kiel
- OMEMU, A. M., BANKOLE, M.O., OYEWOLE, O. B., AKINTOKUN, A.K. (2007): Yeasts and Moulds Associated with *ogi* - A Cereal Based Weaning Food During Storage. Research Journal of Microbiology 2 (2): 141-148
- PAHLOW, G., HONIG H., MARTENS, S. (2004): Simple laboratory scale techniques for monitoring and controlling the lactic acid fermentation and shelf life of feeds and foods. Food safety under extreme conditions - A conference on small-scale producing units of traditional fermented foods, Jaén (Spain), September 6-8, 2004
- PAHLOW, G. (2006): Gärungsbiologische Grundlagen und biochemische Prozesse der Silagebereitung. In: Praxishandbuch Futtermittelkonservierung. DLG-Verlag, 7. Auflage, 11-30
- PETERSSON, S., JONSSON, N., SCHNÜRER, J. (1999): *Pichia anomala* as a biocontrol agent during storage of high-moisture feed grain under airtight conditions. Postharvest Biology and Technology 15, p 175-184
- PICK, E., NOREN, O., NIELSEN, V., (1989): Energy consumption and Input-Output Relations of Field Operations. Food and Agriculture Organization of the United Nations, (Rome).
- PIEPER, B. (2005): Fütterung und Management von Kühen mit hohen Leistungen, Tagungsbericht 9. Symposium, Neuruppin 27.10.2005
- RABE, M (2006): Feuchtgetreidekonservierung im Folienschlauch Verfahrensbewertung durch Praxiserhebungen. Diplomarbeit, Bonn
- RATSCHOW, J.P. (1986): Konservierung und Lagerung von Getreide in Flachsilos, RKL-Schrift, Kiel
- REED, C., DOYUNGAN, S., IOERGER, B., GETCHELL, A. (2007): Response of storage molds to different initial moisture contents of maize (corn) stored at 25 °C, and effect on respiration rate and nutrient composition. Journal of Stored Products Research 43, 443-458
- REXILIUS, R. (1984): Konservierungsbedingte Verluste bei der Silierung von Ährengetreide und Körnermais. Diplomarbeit, Hohenheim

- RICHTER, W. (2006): Mykotoxine und deren Vermeidung in Silage, Heu und Futtergetreide. In: Praxishandbuch Futterkonservierung. DLG-Verlag, 7. Auflage, 21-27
- RIEMANN, U. (1965): Das Arbeitsverfahren der Feuchtgetreidesilage. Habilitationsschrift, Kiel
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- SCHNEIDER, G. (1994): Entwicklung und Erprobung kostengünstiger Konservierungsverfahren für Feuchtgetreide. Dissertation Hohenheim
- SCHÖN, H., AUERNHAMMER, H., BAUER, R. (1998): Landtechnik, Bauwesen Bd.3, BLV-Verlag
- SCHRÖDER, A., SÜDEKUM, K.-H., FÜRLI, C., IDLER, C. (1998): Qualität und Futterwert für Wiederkäuer von luftdicht gelagertem Feuchtgetreide. 110. VDLUFA-Kongreß, Gießen, Kurzfassungen der Vorträge 1998, 72
- SCHULZE-HORSEL, T. (2007): Salmonellen wirksam reduzieren. LZ 31 2007, 32-34
- SNELL, H., G., J., OBERNDORFER, C., KUTZ, A., LÜCKE, W., VAN DEN WEGHE, H., F., A., (2000): A system for Testing Plastic Film for Bunker Silage Preservation - Design and Preliminary Findings. J.agric. Engng Res. 79 (1), 37-45
- SPIEKERS, H. (2006): Grundlagen der Silierung - Einleitung und Zielgrößen. In: Praxishandbuch Futterkonservierung. DLG-Verlag, 7. Auflage, 7-10
- STACEY, P., O'KIELY, P., MOLONEY, A. P., O'MARA, F.P. (2007): Feeding value for finishing beef steers of wheat grain conserved by different techniques. Livestock Science 106: 2/3, 154-168
- STEINHÖFEL, O. (2001): Silierung im Folienschlauch-Wo passt sie hin? Top Agrar-Spezial, 9/2001, 19-22
- STEINHÖFEL, O. ; WEBER, U. (2003a): ‚Haben Sie noch Fragen zur Schlauchsilierung?‘ BAG Budissa Agroservice GmbH, Malschwitz, 2003
- STEINHÖFEL, O. ; WEBER, U. (2003b): Silierung im Folienschlauch. Milchpraxis 3/2003, 41. Jg., 156-169
- STEINHÖFEL, O. ; WEBER, U. (2006): Feuchtkornmais im Schlauch rechnet sich. DLZ 9/2006, 102-104
- MCDONALD, P., HENDERSON, A. R., HERON, S. J. E. (1991): The biochemistry of silage. Chalcombe Publications, Marlow
- MEISE, S., STEINHÖFEL, O., WEBER, U. (2006): Dick allein genügt nicht - Folienqualität von Siloschläuchen. Neue Landwirtschaft, 4-2006-Sonderdruck, Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin
- THAYSEN, J. (2004): Die Produktion von qualitativ hochwertigen Grassilagen. Übers. Tierernährg. 32, 57-102
- VDLUFA (1995): VDLUFA-Methodenbuch, Band II

- VDLUFA (1997): VDLUFA-Methodenbuch, Band III: Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, 4. Ergänzungslieferung, Darmstadt
- WAGNER, A., LEURS, K., BÜSCHER, W. (2004): Einfluss der Häcksellänge auf Verdichtbarkeit, Silierung und Nacherwärmung von Silomais. Agrartechnische Forschung Band 10 , Heft 4-6, 54-61
- WEBER, U. (2005): Untersuchung zur Silierung von Zuckerrübenpressschnitzeln in Folienschläuchen. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin
- WEBER, U. (2007): Persönliche Mitteilung
- WEIBBACH, F. UND BUDZIER, H.H. (1968): Untersuchungen zur Konservierung von Feuchtgetreide durch Silierung, 1.Mitt.: Silierversuche mit Feuchtgetreide, Arch. Tierern. 18, 49-59
- WEIBBACH, F. (1998): Über die Bestimmung der Gärverluste in Silierversuchen unter Laborbedingungen. Kongreßband zum 110. VDLUFA-Kongreß, Gießen, 1998, 461-464
- WEIBBACH, F. (2007): Persönliche Mitteilung
- WEIBBACH, F., KUHLA, S. (1995): Stoffverluste bei der Bestimmung des Trockenmassegehaltes von Silagen und Grünfutter: Entstehende Fehler und Möglichkeiten der Korrektur. Übers. Tierernährung 23, 189-214
- WILMER, H. (2007): Schluss mit der Reiberei - Praxistest Reichhardt Probendrescher „Minibatt“. Profi 6/2007, 16-17
- WINDHORST, W. (1987): Vorschlag einer Methodik zur Beschreibung der Festigkeit landwirtschaftlich genutzter Böden, Dissertation, Kiel
- YAREMICIO, B., MATHISON, G.W., ENGSTROM, D.F. (1991): Ammoniation does not Improve the Feeding Value of Barley Grain. Feeders' Day Report. Agriculture and Forestry Bulletin Special Issue. University of Alberta, 51-55
- ZIMMER, E. (1985): Verluste bei der Maiskonservierung, Mais Heft 4, 30-35

8 Anhang

Tab. A 1:	Gärqualität von Weizen mit und ohne Anfeuchtung und verschiedenen Aufwandmengen eines chemischen Konservierungszusatzes nach 90 Tagen Lagerung in Siliergläsern.	159
Tab. A 2:	Keimgehalte und pH-Werte in Feuchtgetreide in Abhängigkeit von Getreideart, Einlagerungsfeuchte und Konservierungsmittelaufwandmenge nach 49 Tagen Lagerung im Glas und 24 Std Luftstress an Tag 28 und 42.	160
Tab. A 3:	Keimgehalte und pH-Werte von Gerste (31%) im Folienschlauch in Abhängigkeit von Entnahmeposition und -zeitpunkt (2006).	161
Tab. A 4:	Keimgehalte und pH-Werte von Gerste (16%) im Folienschlauch in Abhängigkeit von Entnahmeposition und -zeitpunkt (2006).	162
Tab. A 5:	Keimgehalte und pH-Werte von Weizen (28%) im Folienschlauch in Abhängigkeit von Entnahmeposition und -zeitpunkt (2006).	163
Tab. A 6:	Keimgehalte und pH-Werte von Weizen (21%) im Folienschlauch in Abhängigkeit von Entnahmeposition und -zeitpunkt (2006).	164
Tab. A 7:	Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Feuchtgetreidevariante und Entnahmeposition an der Folienschlauchanschnittfläche (n=5).	165
Tab. A 8:	Partikelgrößenverteilung der untersuchten Feuchtgetreidevarianten ohne Berücksichtigung der Entnahmeposition am Folienschlauch.	166
Tab. A 9:	Partikelgrößen von gequetschtem Feuchtgetreide in Abhängigkeit der Entnahmeposition am Folienschlauch.	167
Tab. A 10:	Lagerungsdichten, Verdichtbarkeit und Relaxation verschiedener Feuchtgetreidevarianten vor und nach Verdichtung mit einer Materialprüfmaschine bei 0,2 bzw. 0,38 MPa (n=6).	168
Abb.A 1:	Druck-Dichte-Diagramme verschiedener Feuchtweizenvarianten (2005, n=6)	170

Tab. A 1: Gärqualität von Weizen mit und ohne Anfeuchtung und verschiedenen Aufwandmengen eines chemischen Konservierungszusatzes nach 90 Tagen Lagerung in Siliergläsern.

Mittelwertvergleich zwischen den Behandlungsstufen einer Getreidevariante ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit hochgestellten Buchstaben gekennzeichnet. (n=3, +=angefeuchtet).

Ernte 2005		Weizen								
Variante		W-30-0,3 ⁺				W-18-0,3				
Trockenmasse	[g/kg]		705,7	709,7	706,0	708,9	798,8	826,0	834,2	802,7
Feuchte	[%]	∅	29,4	29,0	29,4	29,1	20,1	17,4	16,6	19,7
		s	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,4
Konservierungs- zusatz	[l/t FM]		0	2	4	6	0	2	4	6
pH-Wert		∅	4,2 ^a	4,2 ^a	4,2 ^a	4,1 ^a	6,4 ^d	6,2 ^c	5,9 ^b	6,1 ^c
		s	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0
Essigsäure	[g/kg TM]	∅	4,3 ^c	7,2 ^d	5,4 ^c	2,4 ^b	0,1 ^a	0,5 ^a	0,1 ^a	0,1 ^a
		s	0,5	0,6	0,8	1,1	0,1	0,5	0,1	0,1
Propionsäure	[g/kg TM]	∅	0,2 ^a	0,9 ^{ab}	1,8 ^{bc}	2,8 ^d	0,1 ^a	2,1 ^{cd}	4,6 ^c	3,1 ^d
		s	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
Milchsäure	[g/kg TM]	∅	16,2 ^c	13,6 ^b	14,4 ^{bc}	17,0 ^c	0,0 ^a	0,0 ^a	0,0 ^a	0,0 ^a
		s	1,6	0,9	1,6	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Ethanol	[g/kg TM]	∅	2,8 ^d	1,7 ^c	1,5 ^c	1,0 ^b	0,2 ^a	0,1 ^a	0,1 ^a	0,1 ^a
		s	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NH ₄ -N	[mg/kg TM]	∅	868,7 ^d	887,7 ^d	800,3 ^c	572,2 ^b	67,6 ^a	60,5 ^a	59,9 ^a	62,3 ^a
		s	29,8	48,9	17,1	14,3	8,7	0,1	0,1	0,0

Tab. A 2: Keimgehalte und pH-Werte in Feuchtgetreide in Abhängigkeit von Getreideart, Einlagerungsfeuchte und Konservierungsmittelaufwandmenge nach 49 Tagen Lagerung im Glas und 24 Std Luftstress an Tag 28 und 42.

Mittelwertvergleich zwischen den Behandlungsstufen einer Getreidevariante ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit hochgestellten Buchstaben gekennzeichnet. (2005, +=angefeuchtet, n=3).

Erntefeuchtes Getreide, 49 Tage Lagerung im Glas, 24 Std Luftstress an Tag 28 und 42		G-24-0,3 (Gerste, 24 % Feuchte)				W-18-0,3 (Weizen, 18 % Feuchte)			
		Konservierungsmittelaufwand [l/t FM]							
		0	2	4	6	0	2	4	6
Hefen [log KBE/g FM]	∅	7,2 ^b	3,4 ^a	2,7 ^a	2,7 ^a	6,7 ^c	2,7 ^a	2,7 ^a	5,5 ^b
	s	0,1	0,7	0,0	0,0	1,0	0,2	1,2	0,1
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	∅	5,0	3,6	2,8	2,9	3,0	2,8	2,7	3,0
	s	0,9	1,4	0,2	0,2	0,3	0,2	0,0	0,2
pH-Wert	∅	4,8	5,3	5,3	5,2	6,2 ^{ab}	6,3 ^b	6,0 ^a	6,1 ^{ab}
	s	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Auf 30 % angefeuchtetes Getreide, 49 Tage Lagerung im Glas, 24 Std Luftstress an Tag 28 und 42		G-30 ⁺ - 0,3				W-30 ⁺ - 0,3			
		Konservierungsmittelaufwand [l/t FM]							
		0	2	4	6	0	2	4	6
Hefen [log KBE/g FM]	∅	5,3 ^b	-	2,7 ^a	2,9 ^a	6,1	4,5	4,2	4,4
	s	0,4	-	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,5
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	∅	2,7 ^a	-	3,2 ^b	2,9 ^{ab}	3,5	2,8	2,7	2,7
	s	0,0	-	0,2	0,3	1,2	0,2	0,0	0,0
pH-Wert	∅	4,4	-	4,4	4,4	4,3 ^b	4,3 ^{ab}	4,2 ^{ab}	4,1 ^a
	s	0,1	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1

Tab. A 3: Keimgehalte und pH-Werte von Gerste (31%) im Folienschlauch in Abhängigkeit von Entnahmeposition und -zeitpunkt (2006).

Mittelwertvergleich zwischen den Entnahmepositionen Kern und Rand je Entnahmezeitpunkt (Position 2-4; $\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen hochgestellten Buchstaben gekennzeichnet.

Mittelwertvergleich zwischen den Behandlungsvarianten je Position ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit großen, tiefgestellten Buchstaben gekennzeichnet.

Gerste, 31 % Feuchte, unbehandelt		Position 1 (Tag 4)		Position 2 (Tag 4)		Position 3 (Tag 11)		Position 4 (Tag 18)	
	n	1	1	3	3	3	3	3	3
		Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern
Hefen [log KBE/g FM]	ø	6,6	6,3	5,0	4,1	_B 6,4 ^b	_B 5,0 ^a	5,6	_B 5,5
	s			1,2	1,8	0,1	0,6	1,0	0,1
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	ø	2,3	2,3	2,3	2,3	2,9	2,3	2,8	2,3
	s			0,0	0,0	1,0	0,0	0,9	0,0
pH-Wert	ø	5,4	5,6	5,6	5,8	5,4	5,6	5,7	5,7
	s			0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Gerste, 31 % Feuchte, mit Konservierungszusatz		Position 1 (Tag 4)		Position 2 (Tag 4)		Position 3 (Tag 11)		Position 4 (Tag 18)	
	n	1	1	3	3	3	3	3	3
		Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern
Hefen [log KBE/g FM]	ø	5,9	6,6	2,9	3,1	_A 4,4	4,1	3,3	_A 4,4
	s			0,5	0,9	1,8	1,1	1,0	0,6
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	ø	2,3	4,2	2,9	2,3	2,3	2,6	2,3	2,7
	s			1,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,7
pH-Wert	ø	5,3	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,4	5,6
	s			0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tab. A 4: Keimgehalte und pH-Werte von Gerste (16%) im Folienschlauch in Abhängigkeit von Entnahmeposition und -zeitpunkt (2006).

Mittelwertvergleich zwischen den Entnahmepositionen Kern und Rand je Entnahmezeitpunkt (Position 2-4; $\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen hochgestellten Buchstaben gekennzeichnet.

Mittelwertvergleich zwischen den Behandlungsvarianten je Position ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit großen, tiefgestellten Buchstaben gekennzeichnet.

Gerste, 16 % Feuchte, unbehandelt		Position 1 (Tag 4)		Position 2 (Tag 4)		Position 3 (Tag 11)		Position 4 (Tag 18)	
	n	1	1	3	3	3	3	3	3
		Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern
Hefen [log KBE/g FM]	ø	6,7	5,5	_B 5,5	4,5	_B 7,0 ^b	_B 5,3 ^a	_B 6,5	_B 6,1
	s			0,8	1,8	0,1	0,6	0,2	0,3
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	ø	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
	s			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
pH-Wert	ø	5,7	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,9	6,0
	s			0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
Gerste, 16 % Feuchte, mit Konservierungszusatz		Position 1 (Tag 4)		Position 2 (Tag 4)		Position 3 (Tag 11)		Position 4 (Tag 18)	
	n	1	1	3	3	3	3	3	3
		Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern
Hefen [log KBE/g FM]	ø	3,0	3,0	_A 2,3	2,5	_A 2,3	_A 2,6	_A 2,3	_A 2,3
	s			0,0	0,4	0,0	0,6	0,0	0,0
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	ø	3,0	3,0	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
	s			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
pH-Wert	ø	5,4	5,4	5,4	5,5	5,4	5,5	5,5	5,6
	s			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tab. A 5: Keimgehalte und pH-Werte von Weizen (28%) im Folienschlauch in Abhängigkeit von Entnahmeposition und -zeitpunkt (2006).

Mittelwertvergleich zwischen den Entnahmepositionen Kern und Rand je Entnahmezeitpunkt (Position 2-4; $\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen hochgestellten Buchstaben gekennzeichnet.

Mittelwertvergleich zwischen den Behandlungsvarianten je Position ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit großen, tiefgestellten Buchstaben gekennzeichnet.

Weizen, 28 % Feuchte, unbehandelt	n	Position 1 (Tag 4)		Position 2 (Tag 4)		Position 3 (Tag 11)		Position 4 (Tag 18)	
		1	1	3	3	3	3	3	3
		Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern
Hefen [log KBE/g FM]	∅	6,5	6,1	_B 6,3	4,3	_B 6,6 ^b	_B 5,2 ^a	_B 7,0 ^b	5,4 ^a
	s			0,3	1,4	0,1	0,6	0,0	0,5
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	∅	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
	s			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
pH-Wert	∅	4,5	4,5	4,4	4,5	4,4	4,5	4,4	4,4
	s			0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
Weizen, 28 % Feuchte, mit Konservierungszusatz	n	Position 1 (Tag 4)		Position 2 (Tag 4)		Position 3 (Tag 11)		Position 4 (Tag 18)	
		1	1	3	3	3	3	3	3
		Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern
Hefen [log KBE/g FM]	∅	5,7	5,3	_A 5,7 ^b	3,3 ^a	_A 4,3	_A 3,5	_A 5,8	5,0
	s			0,1	1,7	1,2	0,3	0,8	0,6
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	∅	2,3	2,3	2,3	3,1	4,1	3,0	2,3	2,3
	s			0,0	1,4	1,2	0,7	0,0	0,0
pH-Wert	∅	5,0	5,2	5,0	5,2	5,0	5,2	4,8	5,0
	s			0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1

Tab. A 6: Keimgehalte und pH-Werte von Weizen (21%) im Folienschlauch in Abhängigkeit von Entnahmeposition und -zeitpunkt (2006).

Mittelwertvergleich zwischen den Entnahmepositionen Kern und Rand je Entnahmezeitpunkt (Position 2-4; $\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen hochgestellten Buchstaben gekennzeichnet.

Mittelwertvergleich zwischen den Behandlungsvarianten je Position ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit großen tiefgestellten Buchstaben gekennzeichnet.

Mittelwertvergleich der Entnahmezeitpunkte ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen tiefgestellten Buchstaben gekennzeichnet.

Weizen, 21 % Feuchte, unbehandelt		Position 1 (Tag 4)		Position 2 (Tag 4)		Position 3 (Tag 11)		Position 4 (Tag 18)	
	n	1	1	3	3	3	3	3	3
		Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern
Hefen [log KBE/g FM]	ø	7,0	6,1	_B 6,3 ^a	4,7 ^a _x	_B 7,1 ^b	_B 6,5 ^a _y	_B 7,1	_B 6,9 _z
	s			0,1	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	ø	2,3	2,3	2,3	2,5	2,5	2,3	2,3	2,3
	s			0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
pH-Wert	ø	6,1	6,3	6,1	6,1	6,1	6,1	6,2	6,4
	s			0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0
Weizen, 21 % Feuchte, mit Konser-vierungszusatz		Position 1 (Tag 4)		Position 2 (Tag 4)		Position 3 (Tag 11)		Position 4 (Tag 18)	
	n	1	1	3	3	3	3	3	3
		Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern	Rand	Kern
Hefen [log KBE/g FM]	ø	4,6	2,3	_A 3,2 _x	4,2	_A 4,2 _v	_A 3,9	_A 5,1 ^b	_A 3,9 ^a _z
	s			0,3	1,1	0,6	0,8	0,5	0,4
Schimmelpilze [log KBE/g FM]	ø	5,6	5,6	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
	s			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
pH-Wert	ø	6,0	5,8	5,7	5,7	5,7	5,7	6,0	6,2
	s			0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3

Tab. A 7: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Feuchtgetreidevariante und Entnahmeposition an der Folienschlauchanschnittfläche (n=5).

Mittelwertvergleich je Position zwischen den Getreidevarianten mit ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit großen Buchstaben gekennzeichnet.

Mittelwertvergleich je Entnahmeposition innerhalb jeder Getreidevariante mit ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet.

Stechzylinderposition Getreidevariante		Trockenmassedichte an Entnahmeposition der Folienschlauchanschnittfläche									
		Rand unten		Kern unten		Rand unten		Rand oben		Kern-Mitte	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gerste-31%	MW [kg TM/m ³]	A 450,3 ^{de}	A 480,3 ^{ef}	A 503,2 ^f	A 468,6 ^{def}	A 438,7 ^{bcd}	A 408,5 ^{ab}	A 394,9 ^a	A 410,9 ^{abc}	A 452,4 ^{de}	A 448,3 ^{cde}
	cv [%]	1,7	3,1	2,7	5,7	5,0	6,2	2,5	4,1	3,9	3,4
Gerste-16%	MW [kg TM/m ³]	A 443,4 ^{abc}	A 465,5 ^{bc}	A 462,7 ^{bc}	A 463,1 ^{bc}	A 469,9 ^c	A 449,8 ^{abc}	A 429,2 ^{ab}	A 416,0 ^a	-	-
	cv [%]	3,2	1,4	3,4	3,0	2,5	5,8	4,2	4,8	-	-
Weizen-28%	MW [kg TM/m ³]	B 615,1 ^{bcd}	B 688,4 ^{def}	C 753,9 ^f	C 722,1 ^{ef}	B 621,4 ^{bcd}	B 557,3 ^{abc}	B 527,9 ^{ab}	B 515,1 ^a	B 638,4 ^{cde}	B 648,8 ^{cde}
	cv [%]	9,1	9,7	4,1	4,4	6,9	8,9	4,7	3,6	8,9	8,2
Weizen-21%	MW [kg TM/m ³]	B 594,1 ^{ab}	B 627,5 ^b	B 646,3 ^b	B 628,6 ^b	B 603,4 ^{ab}	B 543,3 ^a	B 525,7 ^a	B 524,4 ^a	B 598,5 ^{ab}	B 593,7 ^{ab}
	cv [%]	8,1	8,8	4,7	6,3	7,9	1,9	4,4	3,2	3,5	0,1

Tab. A 8: Partikelgrößenverteilung der untersuchten Feuchtgetreidevarianten ohne Berücksichtigung der Entnahmeposition am Folienschlauch.

Mittelwertvergleich der Partikelgrößenfraktionen der Getreidevarianten mit ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit großen Buchstaben gekennzeichnet. Mittelwertvergleich der Partikelgrößenfraktionen jeder Getreidevariante mit ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet.
* gequetschter Körnermais im Folienschlauch (Feuchte 35 %, Maack, 2006).

Partikelgröße [%]		Feuchtgetreidevariante				
		G-31	G-16	W-28	W-21	M-35*
	n	42	15	26	23	3
0-2 mm	∅	A 4,0 ^a	B 11,3 ^a	B 10,4 ^a	B 10,3 ^a	C 54,4 ^f
	s	1,7	4,4	2,6	3,3	1,0
2-3 mm	∅	A 5,0 ^a	B 14,3 ^b	BC 16,1 ^b	C 17,6 ^b	D 23,1 ^e
	s	1,8	2,5	2	2,7	0,8
3-4 mm	∅	A 9,4 ^b	B 19,8 ^c	C 26,7 ^d	D 34,2 ^d	A 9,7 ^d
	s	1,6	1,6	2,6	3	0,4
4-5 mm	∅	C 26,4 ^c	B 21,5 ^c	B 18,4 ^c	B 20,5 ^c	A 7,0 ^c
	s	6	2,1	2,4	4,3	0,1
5-6 mm	∅	D 27,9 ^c	C 16,9 ^b	B 9,9 ^a	B 8,5 ^a	A 3,3 ^b
	s	3,9	4,1	1,3	1,1	0,1
> 6 mm	∅	D 27,4 ^c	C 16,2 ^b	C 18,4 ^c	B 9,0 ^a	A 2,5 ^a
	s	7,7	2,8	4,5	2,9	0,3

Tab. A 9: Partikelgrößen von gequetschtem Feuchtgetreide in Abhängigkeit der Entnahmeposition am Folienschlauch.

Mittelwertvergleich je Entnahmeposition zwischen den Getreidevarianten mit ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit kleinen Buchstaben gekennzeichnet.

Mittelwertvergleich je Position innerhalb jeder Getreidevariante mit ($\alpha \leq 0,05$), signifikante Unterschiede sind mit großen Buchstaben gekennzeichnet.

*gequetschter Körnermais im Folienschlauch (Feuchte 35 %, MAACK, 2006).

Entnahmeposition am Schlauch		Rand unten				Kern unten					Rand oben				Kern-Mitte		
Variante		G-31	G-16	W-28	W-21	G-31	G-16	W-28	W-21	M-35	G-31	G-16	W-28	W-21	G-31	W-28	W-21
Partikelgröße [%]	n	8	3	7	6	14	5	7	8	3	14	7	9	6	6	3	3
0-2 mm	Ø	4,8 ^a	15,3 ^c	12,4 ^{bc}	9,8 ^b	4,0 ^a	11,2 ^b	10,4 ^b	11,1 ^b	54,4 ^c	3,7 ^a	9,6 ^b	8,8 ^b	8,1 ^b	3,6 ^a	10,4 ^b	13,5 ^b
	S	2,4	5,4	2,2	4,2	1,5	4,3	3	2,7	1	1,4	3,4	1,2	2,3	1,5	3,0	1,5
2-3 mm	Ø	6,0 ^a	17,6 ^b	15,9 ^b	16,7 ^b	4,9 ^a	14,6 ^b	17,3 ^{bc}	18,7 ^c	23,1 ^d	4,8 ^a	12,7 ^b	15,2 ^c	15,8 ^c	4,5 ^a	16,8 ^b	19,8 ^c
	S	2,7	0,9	1,2	3,5	1,5	1,9	3,0	2,0	0,8	1,5	1,7	1,2	2,3	1,5	1,5	0,5
3-4 mm	Ø	10,5 ^a	21,8 ^b	23,9 ^b	34,9 ^c	9,0 ^a	20,0 ^b	30,0 ^c	32,9 ^c	9,7 ^a	9,2 ^a	18,8 ^b	26,3 ^c	35,5 ^d	9,3 ^a	27 ^b	33,3 ^c
	S	2,6	1,1	1,5	3,7	1,1	1,5	1,3	3,6	0,4	1,2	0,8	1,1	1,5	1,0	0,6	1,5
4-5 mm	Ø	28 ^b	19,8 ^a	16,1 ^a	22,4 ^{ab}	25 ^b	20,9 ^b	19,7 ^b	17,8 ^b	7,0 ^a	25,7 ^b	22,6 ^{ab}	19,1 ^a	23,3 ^{ab}	29,0 ^b	18,6 ^a	18,3 ^a
	S	6,2	1,8	0,9	5,6	6	2,5	3,1	3	0,1	5,7	1,3	0,9	2,9	6,3	3,2	1,8
5-6 mm	Ø	28,1 ^b	12,3 ^a	9,6 ^a	9,0 ^a	26,9 ^d	15,8 ^c	9,5 ^b	8,2 ^b	3,3 ^a	28,4 ^c	19,7 ^b	10,5 ^a	9,0 ^a	28,8 ^b	9,8 ^a	7,5 ^a
	S	4,5	1,2	1,3	1,8	3,9	3,5	1,7	0,3	0,1	4,2	3,1	0,4	0,9	2,9	1,8	0,3
>6 mm	Ø	22,6 ^b	13,3 ^a	22,1 ^b	7,2 ^a	30,3 ^c	17,3 ^b	13,0 ^b	11,2 ^b	2,5 ^a	28,2 ^c	16,6 ^b	20,1 ^b	8,4 ^a	24,9 ^b	17,0 ^{ab}	7,6 ^a
	S	7,2	2,3	3,4	3,3	7,8	3,7	2,6	2,4	0,3	7,2	1,6	3	1,7	6,7	1	1

Tab. A 10: Lagerungsdichten, Verdichtbarkeit und Relaxation verschiedener Feuchtgetreidevarianten vor und nach Verdichtung mit einer Materialprüfmaschine bei 0,2 bzw. 0,38 MPa (n=6).

Getreideart Versuchsjahr	Gerste						Weizen						Mais				
	2005				2006		2005				2006		2006				
Variante	G	G-24-	G-	G-30-	G-31-	G-16-	W-	W-	W-18-	W-	W-	W-	W-	W-	Mais-	Mais-	Mais-
Feuchte [%]	24	0,3	30+	0,3	0,1	0,1	18-	18-	0,3	30+	30+-	30+-	28-	21-	35	35	35
Walzenabstand [mm]	-		-				-	0,3		-	0,3	0,3	0,1	0,1	-	0,4	0,4
*=ganze Körner									**								
**=wiederholte Verdichtung	*		*				*			*		**			*		**
Lagerungsdichte (unverdichtet) [kgTM/m ³]	462	361	465	364	324	348	536	485	(620)	497	374	(595)	424	420	459	389	(564)
s	4,1	3,3	0,6	0,4	0,8	0,4	0,9	1,4	2,5	2,6	1,4	0,8	0,9	0,5	0,7	6,5	3,3
Dichte bei 0,2 MPa [kgTM/m ³]	574	569	588	590	628	518	646	633	660	618	638	679	716	621	535	596	624
s	3	12	11	29	12,8	16,4	4	7	9	12	11	8	16,1	22,1	2	28	27
Anstieg Lagerungsdichte bei 0,2 MPa [%]	24	58	27	62	94	49	21	31	(6)	24	70	(14)	69	48	16	53	(11)
Dichte bei 0,38 MPa [kgTM/m ³]	603	635	620	664	-	-	651	674	683	637	701	723	-	-	566	640	649
s	3	17	14	33	-	-	3	9	9	14	10	11	-	-	2	31	28
Anstieg Lagerungsdichte bei 0,38 MPa [%]	31	76	33	82	-	-	21	39	(10)	28	87	(22)	-	-	23	64	(15)
Dichte nach Relaxation [kgTM/m ³]	-	456	-	465	453	430	-	634	650	-	625	660-	643	568	532	609	626
s	-	14,2	-	12,8	0,3	0,2	-	0,4	3,0	-	0,6	3,5	9,6	0,3	0,0	4,1	4,5
Relaxation [%]	-	28,2	-	29,9	27,9	16,9	-	8,0	4,9	-	15,1	8,7	10,3	8,6	6,0	11,8	3,5
Effektiver Anstieg der Lagerungsdichte:																	
bei 0,20 MPa [%]					39,8	23,6							51,5	35,1			
bei 0,38 MPa [%]		26,3		27,7			30,7	33,9		67,0	76,3				15,8	56,4	60,90

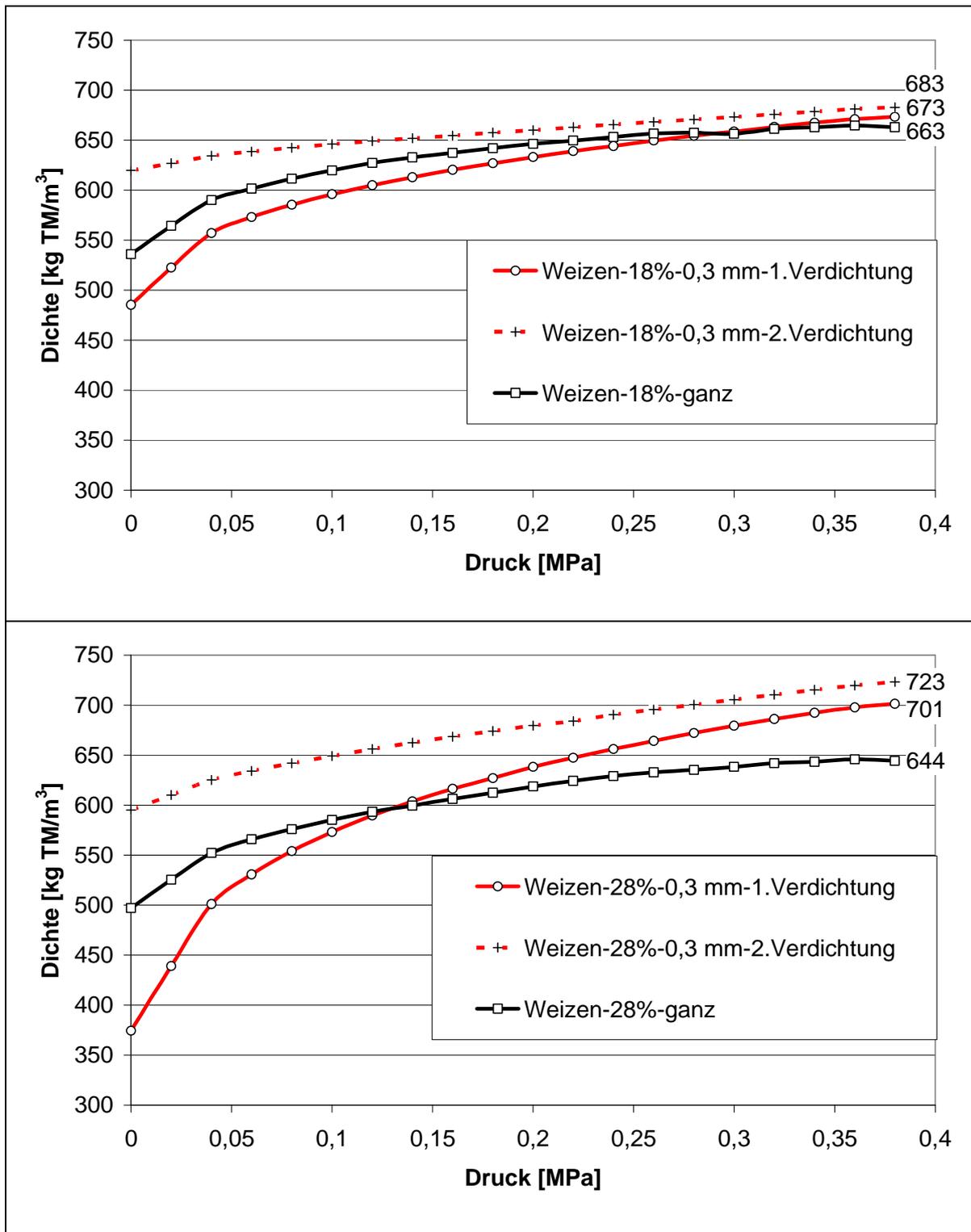


Abb.A 1: Druck-Dichte-Diagramme verschiedener Feuchtweizenvarianten (2005, n=6)