

58

Berichte aus dem TFZ

Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife

Projektpartner:



Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife



Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife

Veronika Schreieder
Dr.-Ing. Peter Emberger
Diana Andrade
Dr. Edgar Remmele

In Zusammenarbeit mit:



Berichte aus dem TFZ 58

Straubing, Oktober 2018

Titel: Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife

Autoren: Veronika Schreieder, Dr.-Ing. Peter Emberger, Dr. Edgar Remmele, Unterkapitel 4.5 und 5.5: Diana Andrade (LfL)

Projektleiter: Dr. Edgar Remmele

Bearbeiter: Veronika Schreieder, Dr.-Ing. Peter Emberger, Mirjana Bubalo Ivanisevic, Jakob Meyer, Thomas Kießlinger, Sebastian Kirner, Diana Andrade (LfL), Johanna Barth (LfL), Vasilis Dandikas (LfL), Dr. Fabian Lichti (LfL)

in Kooperation mit: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft – Institut für Landtechnik und Tierhaltung (LfL-ILT)
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft – Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft (LfL-ITE)
Technische Universität München – Lehrstuhl Biogene Polymere

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen N/15/12 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2018
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werks darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil < 1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de

Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Veronika Schreieder, Dr.-Ing. Peter Emberger, Ulrike Ammer

Verlag: Technologie- und Förderzentrum, Straubing

Erscheinungsort: Straubing

Erscheinungsjahr: 2018

Gestaltung: Veronika Schreieder

**Fotonachweis/
Bildnachweis:** Technologie- und Förderzentrum
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft – Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft (LfL-ITE): Abbildungen Nr.: 28–35; 105

Danksagung

Unser Dank gilt allen voran dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung des Forschungsvorhabens und das entgegengebrachte Vertrauen. Für die stets sehr gute Zusammenarbeit möchten wir Herrn Dr.-Ing. Werner Ortinger und Herrn Andreas Kübler danken.

Dem Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft gilt unser Dank, insbesondere Frau Mariana Schneider und Herrn Georg Rößl, für die gute Zusammenarbeit und für die fachliche Unterstützung bei der Interpretation der Ergebnisse der Futtermittelanalysen sowie Herrn Dr. Manfred Schuster für die Analysen der Futtermittelproben.

Des Weiteren möchten wir uns herzlich beim Lehrstuhl Biogene Polymere des Campus Straubing der TU München, insbesondere bei Herrn Prof. Dr. Cordt Zollfrank für die Zurverfügungstellung des Zugprüfgeräts und Herrn Jörg Dörrstein für die Unterstützung bei der Durchführung der Zugprüfungen, bedanken.

Dem Zweckverband Abfallwirtschaft Straubing Stadt und Land (ZAW-SR), insbesondere Herrn Lummer, danken wir für die stets gute Zusammenarbeit.

Außerdem gilt unser Dank den Firmen Centrotrade Deutschland GmbH, Desoi GmbH, Herbstreith & Fox KG, J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co. KG und PreSens Precision Sensing GmbH für die Überlassung von Funktionsmustern und die technische Unterstützung.

Die Autoren

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis.....	19
1 Einführung und Problemstellung	23
2 Zielsetzung.....	27
3 Stand des Wissens.....	29
3.1 Die Siliertechnik.....	29
3.2 Silierverlauf – biologisch-chemische Grundlagen	32
3.3 Silagemängel.....	33
3.4 Abdeckung von Fahrsilos – Stand der Technik	34
3.5 Beurteilung der Silagequalität.....	35
3.6 Aufspritzbare Abdeckungen auf Basis Nachwachsender Rohstoffe	36
3.7 Ergebnisse aus vorhergehenden Projektphasen	37
3.8 Verfahren zur Aufbringung flüssiger Zwei-Komponenten-Materialien	41
4 Material und Methodik	45
4.1 Bestandteile der Rezeptur	47
4.2 Optimierung des Abdeckmaterials im Labor	49
4.2.1 Gasdurchlässigkeitsprüfung	50
4.2.2 Zugfestigkeit – mechanische Stabilität	51
4.2.3 Säurebeständigkeit	53
4.2.4 Schrumpfungseignung.....	54
4.2.5 Wasseraufnahme und Quellverhalten	55
4.2.6 Temperaturbeständigkeit	56
4.2.7 Verträglichkeit mit Siloanstrichen	57
4.2.8 Witterungsbeständigkeit der Silageabdeckung	58
4.2.9 Viskositätsmessungen der Einzelkomponenten	62
4.2.10 Lagerversuche der zwei Komponenten bei Raumtemperatur	62
4.2.11 Gesamtübersicht der Laborergebnisse	63
4.3 Entwicklung einer geeigneten Applikationstechnik	63
4.4 Bewertung des Silierprozesses unter realen Witterungsbedingungen	64
4.4.1 Silierversuch in Kunststofffässern	65
4.4.2 Rezepturscreening mit Gärgläsern.....	67
4.4.3 Praxistests – Silierversuche mit Miniatursilos	71
4.4.3.1 Miniatursilos aus Beton – Versuchsreihe 1	71
4.4.3.2 Miniatursilos aus Beton – Versuchsreihe 2	76
4.4.3.3 Fahrsilos ohne Silowand – Versuchsreihe 3	77
4.4.4 Gesamtübersicht der praxisnahen Versuche	78
4.5 Kompatibilität des Abdeckmaterials im Prozess der Biogaserzeugung	79

4.5.1	Aktivitäts-, Toxizitäts- und Supplementierungs-Test (ATS-Test)	80
4.5.2	Batch-Gärversuche	82
4.5.3	Durchflussversuche.....	84
4.5.4	Chemische Analyse	88
4.5.5	Statistische Methoden.....	89
4.6	Abbaubarkeit des Materials unter aeroben Bedingungen – Desintegrationsprüfung	89
4.7	Prüfung der möglichen Mitverfütterung des neuen Abdeckmaterials	91
4.8	Wirtschaftlichkeitsabschätzung des neuen Abdeckverfahrens.....	91
4.9	Recherche und Beurteilung alternativer Verwendungsmöglichkeiten.....	91
5	Ergebnisse und Diskussion	93
5.1	Zusammensetzung der Silageabdeckung	93
5.2	Ergebnisse der Materialprüfung im Labor.....	95
5.2.1	Gasdurchlässigkeit.....	96
5.2.2	Zugfestigkeit.....	97
5.2.3	Säurebeständigkeit	100
5.2.4	Schrumpfung des frischen Materials.....	102
5.2.5	Wasseraufnahme und Quellverhalten.....	103
5.2.6	Temperaturbeständigkeit	106
5.2.7	Verträglichkeit mit Siloanstrichen.....	108
5.2.8	Lagerbeständigkeit der Einzelkomponenten bei Raumtemperatur.....	110
5.2.9	Witterungsbeständigkeit.....	112
5.2.9.1	Schimmelresistenz	112
5.2.9.2	Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften	117
5.2.9.3	Gasdurchlässigkeit nach der Bewitterung.....	119
5.2.10	Temperaturabhängige Viskositätsmessung.....	120
5.2.11	Gesamtübersicht der Laborergebnisse	122
5.3	Entwicklung eines Applikationsgeräts	123
5.3.1	Prototyp 1	124
5.3.2	Prototyp 2.....	125
5.3.3	Prototyp 3.....	127
5.3.4	Hinweise zur Entwicklung eines praxistauglichen Applikationsgeräts	133
5.4	Materialtests unter praxisnahen Bedingungen.....	135
5.4.1	Siliversuche mit Silofässern	135
5.4.2	Rezepturscreening mit Gärgläsern unter Bewitterung im Freien.....	142
5.4.3	Siliversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1.....	147
5.4.3.1	Materialapplikation mit Prototyp 2 des Applikationsgeräts	147
5.4.3.2	Monitoring der Miniatursilos während der Lagerzeit	151
5.4.3.3	Bonitur der Miniatursilos.....	158
5.4.4	Siliversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 2.....	169
5.4.4.1	Materialapplikation mit Prototyp 3 des Applikationsgeräts	169
5.4.4.2	Monitoring der Miniatursilos während der Lagerzeit	171
5.4.4.3	Bonitur der Miniatursilos nach zehn Monaten Lagerzeit.....	173
5.4.5	Siliversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3	175
5.4.5.1	Materialapplikation der Freigärhaufen mit Prototyp 3	175
5.4.5.2	Monitoring der Freigärhaufen während der Lagerzeit.....	177
5.4.5.3	Bonitur der Freigärhaufen	180
5.4.6	Gesamtübersicht der praxisnahen Versuche.....	184

5.5	Anaerober Abbau des Abdeckmaterials in Biogasanlagen	185
5.5.1	Stabilität des Biogasbildungsprozesses im ATS-Test	185
5.5.2	Biogaspotenzial und Abbaugrad im Batchtest.....	187
5.5.3	Abbau des Materials im Durchflussversuch	190
5.6	Aerober Abbau der Abdeckung – Desintegrationstest.....	191
5.7	Abschätzung einer möglichen Verfütterbarkeit	192
5.8	Wirtschaftlichkeitsabschätzung.....	194
5.8.1	Materialkosten	197
5.8.2	Arbeitsaufwand	199
5.8.3	Gerätekosten	200
5.8.4	Entsorgungskosten und Verwertungsgutschriften.....	201
5.8.5	Kostenvergleich	202
5.9	Alternative Verwendungsmöglichkeiten	203
Zusammenfassung		205
Abstract		209
Quellenverzeichnis		213
Anhang		219

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Konventionelles Fahrsilo mit Folienabdeckung	23
Abbildung 2:	Ablauf einer Erntekette und Auswahl möglicher Einflussfaktoren auf die Silagequalität [46]	29
Abbildung 3:	Schematische Darstellung des Gärverlaufs im Silo nach PAHLOW und MUCK (2003) [36].....	33
Abbildung 4:	Aufbau einer konventionellen Siloabdeckung [24].....	35
Abbildung 5:	Applikation der Silageabdeckung mit dem Zweikomponenten-Lackiergerät Xtreme TM Mix	42
Abbildung 6:	Applikationsgerät, bestehend aus zwei „Strobot 406 S“-Pumpen (links), Zusammenleitung der zwei Komponenten (Mitte) und Feinputzspritzgerät mit Statikmischereinsatz (rechts)	43
Abbildung 7:	Schematische Darstellung des Entwicklungsprozesses der Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen	47
Abbildung 8:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm unterschiedlicher Rezepturvarianten	52
Abbildung 9:	Eingespannter Prüfkörper im Zugprüfgerät	53
Abbildung 10:	Prüfkörper für Gasdurchlässigkeits- (links) und Zugprüfung (rechts) vor (unten) und nach (oben) der Säurelagerung	54
Abbildung 11:	Lagerung von Prüfkörpern verschiedener Rezepturen in Wasser	56
Abbildung 12:	Betonplatten mit verschiedenen Siloanstrichen und aufgesetzten Rahmen zum Gießen des Abdeckmaterials	58
Abbildung 13:	Prüfkörper zur Prüfung der Witterungsbeständigkeit mit Möglichkeit zur Simulation von Staunässe im unteren Drittel des Prüfkörpers	59
Abbildung 14:	Schematische Darstellung der Außenlagerung verschiedener Rezepturvarianten (K01–K39) mit Blindprobe (K00)	60
Abbildung 15:	Prüfkörper K17 (oben) und K19 (unten) mit verschiedenen Belichtungen fotografiert – links: Auflicht, Mitte: Auflicht und Hinterleuchtung, rechts: nur Hinterleuchtung	61
Abbildung 16:	Silofass von oben: Übergang zum Fassrand mit Silofolie und Klebeband versiegelt	66
Abbildung 17:	Silofässer mit integrierter Temperaturmessung (Fass 1 und 2: Referenz, Fass 3 und 4: Variante A.351 und Fass 5 und 6: Variante 364).....	67
Abbildung 18:	Funktionsweise der nicht invasiven Sauerstoffmessung nach PyroScience GmbH (2016) [38].....	68
Abbildung 19:	Aufgießen von Abdeckmasse auf das Substrat in mit Silolack „Silodon“ vorbehandelten und mit Sauerstoffspots bestückten Gärgläsern	70

Abbildung 20:	Detektierter Sauerstoffgehalt in den Gärgläsern.....	71
Abbildung 21:	Verdichten der Miniatursilos mit einer Grabenwalze.....	73
Abbildung 22:	Aufspritzen der Siloabdeckung auf die Miniatursilos mit einem Applikationsgerät der Firma Desoi GmbH mit einer Spritzlanze.....	73
Abbildung 23:	Positionierung der Sauerstoff- und Temperatursonden im Silo	74
Abbildung 24:	Aufbau der Sauerstoffsonden der ersten Generation	75
Abbildung 25:	Links: Sondenrohr mit auf Plexiglas geklebten O ₂ -Spots und Identifizierungscode eines einzelnen Spots; rechts: Sauerstoffmessung mit Glasfaserleiter in der Sonde.....	75
Abbildung 26:	Skizzierter Aufbau der Sauerstoffsonden der zweiten Generation	76
Abbildung 27:	Miniatursilos der Versuchsreihe 2 mit einer Sauerstoff- (oben) und einer Temperatursonde (unten)	77
Abbildung 28:	Aufbereitung der Siloabdeckungsproben für den ATS- und den Batch-Test.....	80
Abbildung 29:	Schematische Zeichnung des Aufbaus des ATS-Systems (links) und einer Flasche (Fermenter) (rechts)	81
Abbildung 30:	Eingespannte Flaschen mit Schlauch und Schnellkupplungen der ATS-Versuchsanlage	82
Abbildung 31:	Gasführungssystem einer Versuchsvariante mit drei Wiederholungen (links) und die Bestandteile der Batch-Versuchsanlage der LfL (rechts)	83
Abbildung 32:	Stehender Rührkesselfermenter	86
Abbildung 33:	In der Umwelt exponierte und während der Probenaufbereitung bearbeitete Siloabdeckung (links), Probestück im Nylonsäckchen (mittig, rechts), Durchflussversuch.....	87
Abbildung 34:	Exposition der Probe im Säckchen mit Polyethylen-Paketschnur, Durchflussversuch.....	87
Abbildung 35:	Probenentnahme nach 100 Tagen Exposition (links), Waschen der Probensäckchen mit destilliertem Wasser (rechts)	88
Abbildung 36:	Zusammensetzung des Abdeckmaterials favorisierter Varianten der Projektphasen bezogen auf die Frischmasse	93
Abbildung 37:	Zusammensetzung des Abdeckmaterials favorisierter Varianten der Projektphasen bezogen auf die Trockensubstanz	94
Abbildung 38:	Gasdurchlässigkeit und Permeationskoeffizient einer Silofolie aus Polyethylen (PE) und von Probekörpern verschiedener Rezepturen (Mittelwerte mit Standardabweichung) sowie Dicke der Probekörper	97
Abbildung 39:	Bruchdehnung ausgewählter Rezepturvarianten.....	99
Abbildung 40:	Bruchspannung ausgewählter Rezepturvarianten	99

Abbildung 41:	Bruchdehnung ausgewählter Rezepturvarianten vor und nach („-S“) einer Säurelagerung	101
Abbildung 42:	Bruchspannung ausgewählter Rezepturvarianten vor und nach („-S“) einer Säurelagerung	101
Abbildung 43:	Gasdurchlässigkeit und Permeationskoeffizient verschiedener Rezepturvarianten vor und nach („-S“) einer Säurelagerung (Mittelwerte mit Standardabweichung) sowie Dicke der Probekörper ...	102
Abbildung 44:	Relative Masseänderung ausgewählter Rezepturvarianten nach Lagerung in Wasser	105
Abbildung 45:	Relative Volumenänderung ausgewählter Rezepturvarianten nach Lagerung in Wasser	105
Abbildung 46:	Relativer Masseverlust ausgewählter Rezepturvarianten nach Lagerung bei 80 °C	107
Abbildung 47:	Prüfkörper nach sieben Tagen Lagerung bei 80 °C	108
Abbildung 48:	Materialverträglichkeit mit dem Siloanstrich: Silo-quick 100 auf Bitumenbasis – links: Rezeptur A.364 mit Sonnenblumenöl, rechts: Rezeptur A.351 mit Glycerin, Zustand eine Woche nach dem Auftragen der Abdeckmaterialien auf den Betonkörpern mit Siloanstrich	109
Abbildung 49:	Materialunterseite von Prüfkörpern der Rezeptur A.364 nach fünf Monaten Kontakt mit verschiedenen Siloanstrichen	109
Abbildung 50:	Materialunterseite von Prüfkörpern der Rezeptur A.351 nach fünf Monaten Kontakt mit verschiedenen Siloanstrichen	110
Abbildung 51:	Prüfkörper vor Beginn der Lagerung im Freien	112
Abbildung 52:	Prüfkörper nach drei Monaten Lagerung im Freien	113
Abbildung 53:	Prüfkörper nach sechs Monaten Lagerung im Freien	114
Abbildung 54:	Prüfkörper nach 14 Monaten Lagerung im Freien	115
Abbildung 55:	Prüfkörper mit zunehmendem Natriumbenzoatgehalt von K00 (0 %) bis K05 (2,5 %) – Reihe oben von links nach rechts: K00, K01, K02 – Reihe unten von links nach rechts: K03, K04, K05 nach 14 Monaten Lagerdauer	115
Abbildung 56:	Prüfkörper mit zunehmendem Natriumbenzoatgehalt von K00 (0 %) bis K05 (2,5 %) und einem Natriumchloridgehalt von 1,5 % – Reihe oben von links nach rechts: K00, K21, K22 – Reihe unten von links nach rechts: K23, K24, K25 nach 14 Monaten Lagerdauer	116
Abbildung 57:	Prüfkörper zweier unterschiedlicher Rezepturen (P20 und W16) nach jeweils dreimonatiger Bewitterung im Freien – Zeitraum der Lagerung links: Juni bis August, rechts: September bis November	117
Abbildung 58:	Bruchdehnung ausgewählter Rezepturvarianten vor und nach („-AL“) dreimonatiger Lagerung im Freien	118

Abbildung 59:	Bruchdehnung ausgewählter Rezepturvarianten vor und nach („-AL“) dreimonatiger Lagerung im Freien.....	119
Abbildung 60:	Gasdurchlässigkeit der Silageabdeckung vor und nach („-AL“) einer dreimonatigen Lagerung im Freien	120
Abbildung 61:	Dynamische Viskosität der Phasen A und B ausgewählter Rezepturen sowie von Rapsöl bei einer Scherrate von 50 s^{-1}	121
Abbildung 62:	Viskosität und Schubspannung der beiden Komponenten verschiedener Rezepturvarianten bei 20 °C	122
Abbildung 63:	Prototyp 1 – links: Druckbehälter für die Komponenten A und B, rechts: Mischkopf mit zwei Anschlüssen für die Komponenten A und B sowie einem Reinigungsanschluss.....	124
Abbildung 64:	Prototyp 2: Sprühkopf mit Statikmischer, Druckluftzerstäubung und Zwei-Komponenten-Eingang.....	125
Abbildung 65:	Kunststoffmembran im Inneren der Peristaltikpumpe „Preko 200“ nach erstem Applikationsversuch	126
Abbildung 66:	Prototyp 2: Latexkoagulat im Pumpenausgang nach Förderung der Latexkomponente.....	127
Abbildung 67:	Prototyp 3: Aufbau des Applikationsgeräts mit den drei Hauptbaugruppen: a) Vorratsbehälter und Förderung, b) Leitungssystem, c) Mischer und Ausbringung	128
Abbildung 68:	Prototyp 3: Flachstrahldüsen in Fahrtrichtung nach vorne und hinten in einem Winkel von je 45° zur Senkrechten auf den Boden ausgerichtet.....	131
Abbildung 69:	Prototyp 3: Spritzkopf des Applikationsgeräts mit zwei Hohlkegeldüsen, befestigt auf der Führungsschiene über einem Miniatorsilo	132
Abbildung 70:	Applikationssystem zum Spritzen der Silageabdeckung auf einen Freigärhaufen – höhenverstellbares und in der Neigung anpassbares System mit Doppeldüse im Heckaufbau eines Traktors	132
Abbildung 71:	Skizze eines Selbstfahrers mit Applikationsgerät – Seitenansicht.....	134
Abbildung 72:	Skizze eines Selbstfahrers mit Applikationsgerät – Heckansicht.....	134
Abbildung 73:	Silierversuche mit Silofässern – Gleitender Mittelwert der Temperaturverläufe (Mittelungszeitraum 1 Tag) in der Silage ab März 2017	136
Abbildung 74:	Referenzsilofass Nr. 1 – links: oberste Schicht der Silage nach dem Öffnen, rechts: tiefliegende Silage	137
Abbildung 75:	Referenzsilofass Nr. 2 – links: oberste Schicht der Silage nach dem Öffnen, rechts: tiefliegende Silage	137
Abbildung 76:	Silofass Nr. 3, abgedeckt mit Glycerinvariante A.351 – links: Silofass vor dem Öffnen, rechts: Öffnen der Silageabdeckung	138

Abbildung 77: Silofass Nr. 4, abgedeckt mit Glycerinvariante A.351 – links: Silofass vor dem Öffnen, rechts: Entnahme der oberen Silageschicht.....	138
Abbildung 78: Silofass Nr. 5, abgedeckt mit Rezepturvariante A.364 – links: Anschnitt der Silageabdeckung, rechts: Entnahme der oberen Silageschicht.....	139
Abbildung 79: Silofass Nr. 6, abgedeckt mit Rezepturvariante A.364 – links: Silofass vor dem Öffnen, rechts: Silage nach Entnahme der oberen Silageschicht.....	139
Abbildung 80: Gärglasversuche – Luftkanäle im aufgetragenen Material.....	142
Abbildung 81: Gärglasversuche – Gärgashauben der Variante P13 ca. vier Stunden nach dem Ausgießen des Materials.....	143
Abbildung 82: Gärglasversuche – undichtes Gärglas, abgedeckt mit Rezepturvariante N06.....	146
Abbildung 83: Gärglasversuche – Rezepturvariante auf Glycerinbasis (P08) mit sichtbarem Materialschwund und Randablösung.....	146
Abbildung 84: Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – Löcher im Abdeckmaterial, verursacht durch eine fehlerhafte Applikation in den Silos Nr. 4, Nr. 5 und Nr. 6 (von links nach rechts).....	147
Abbildung 85: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur P20 auf Silo Nr. 3.....	148
Abbildung 86: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur K35 auf Silo Nr. 7.....	149
Abbildung 87: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur A.109 auf Silo Nr. 6.....	150
Abbildung 88: Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – Ablösung der Rezepturvariante A.242 von der Silowand nach zwei Wochen nach Silierung.....	152
Abbildung 89: Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erste Schimmelbildung bei Variante A.109 (links) und schimmelnder Ahornsamen auf Variante P20 (rechts) sechs Wochen nach der Silierung.....	153
Abbildung 90: Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erste Risse in der Abdeckung A.109 nach sechs Wochen an heraustretendem Pflanzenmaterial.....	154
Abbildung 91: Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – Schimmelbefall der Variante W10 auf der Nordseite des Silohaufens fünf Monate nach der Silierung.....	154
Abbildung 92: Temperaturverlauf im Siloinneren im Vergleich zur Außentemperatur.....	157

Abbildung 93: Miniatursilos Versuchsreihe 1 – Sauerstoffentwicklung im Silo Nr. 4, abgedeckt mit Variante P20	158
Abbildung 94: Miniatursilos Versuchsreihe 2 – Mischungsverhältnis während der Applikation des Miniatursilos Nr. 7 mit Rezepturvariante W20	170
Abbildung 95: Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 2 – Applikation der Rezepturvariante W20 mit Prototyp 3 des Applikationsgeräts mit Schienenführung der Austragsdüse – Blick von oben	171
Abbildung 96: Miniatursilos Versuchsreihe 2 – Sauerstoffgehalt in den Miniatursilos während 170 Tagen Lagerung	172
Abbildung 97: Miniatursilos Versuchsreihe 2 – Temperaturverlauf in den im Juli angelegten Miniatursilos	173
Abbildung 98: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Aufspritzen der Rezepturvariante W20 mit Prototyp 3 des Applikationsgeräts, in der Höhe und Neigung verstellbarer Spritzbalken im Heckaufbau eines Traktors.....	176
Abbildung 99: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Blick auf die zwei Miniatursilos mit der Silageabdeckung W20 einen Monat nach Versuchsbeginn – hinten im Bild: Referenz mit Folienabdeckung.....	177
Abbildung 100: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Entwicklung des Sauerstoffgehalts im Siloinneren.....	178
Abbildung 101: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Freigärhaufen mit der Silageabdeckung W20 drei Monate nach Versuchsbeginn.....	179
Abbildung 102: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Freigärhaufen mit der Silageabdeckung W20 acht Monate nach Versuchsbeginn.....	179
Abbildung 103: Mittelwert der kumulierten Druckentwicklung im ATS-Test.....	185
Abbildung 104: Boxplot für die vier Siloabdeckmaterialien mit sechs Wiederholungen am Versuchsende. Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Proben im ATS-Test	186
Abbildung 105: Konsistenz der Siloabdeckungsproben nach Batchversuch	187
Abbildung 106: Boxplot für die vier Siloabdeckmaterialien mit drei Wiederholungen im Batchversuch, Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Proben.....	188
Abbildung 107: Kumulierte Biogasausbeute der untersuchten Siloabdeckmaterialien und des Referenzsubstrats im Batch-Test.....	189
Abbildung 108: Abbaugrad der getesteten Siloabdeckungsproben im Durchflussversuch nach 99 Tagen Expositionszeit	191
Abbildung 109: Beispielhaftes Fließschema der Herstellung der Silageabdeckung in der Praxis	194
Abbildung 110: Beispielhaftes Prozessschema Siloabdeckung mit Silofolie und Schutzgitter	195

Abbildung 111: Beispielhaftes Prozessschema Siloabdeckung mit der Silageabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen	196
--	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spannweiten für eine geeignete Dichte von Gras zur Silierung nach der Verdichtung [42]	31
Tabelle 2:	Spannweiten für eine geeignete Dichte von Mais zur Silierung nach der Verdichtung [42]	31
Tabelle 3:	Bewertungsschlüssel 2006 der DLG zur Beurteilung der Eignung der Silage als Futtermittel anhand der Gärqualität [7]	36
Tabelle 4:	Grundrezeptur der Silageabdeckung nach UHL et al. (2011) [50].....	38
Tabelle 5:	Vorzugsrezeptur für die Silageabdeckung nach UHL et al. (2011) [50]	39
Tabelle 6:	Vorzugsrezeptur A.242 nach SIMON et al. (2015) [46]	40
Tabelle 7:	Optimierte Rezeptur A.364 nach EMBERGER und REMMELE (2015) [15]	41
Tabelle 8:	Versuchsmatrix zur Überprüfung der Materialeigenschaften der neuartigen Silageabdeckung	46
Tabelle 9:	Chemische Zusammensetzung der vier Siloabdeckmaterialien und Stöchiometrische Biogasausbeute (YB) nach BUSWELL und MUELLER (1952) [33].....	79
Tabelle 10:	Zusammensetzung der Substratmischung im Durchflussversuch.....	85
Tabelle 11:	Zeitverlauf der organischen Belastung im Reaktor während des Durchflussversuchs	85
Tabelle 12:	Probenverteilung im Durchflussversuch	86
Tabelle 13:	Parameter und Methoden der chemischen Laboranalyse.....	89
Tabelle 14:	Zusammensetzung und Charakterisierung des künstlichen Bioabfalls für die Desintegrationsprüfung.....	90
Tabelle 15:	Zusammensetzung der Rezepturvariante W20	95
Tabelle 16:	Trockenmasse und Rohnährstoffe der Silageabdeckung Rezepturvariante W20	95
Tabelle 17:	Zusammenfassende Bewertung der Labor- und Praxistests ausgewählter Rezepturvarianten	123
Tabelle 18:	Düsenbauart, benötigter Mindestdruck, Durchsatz, Spritzwinkel (theoretischer Spritzwinkel für Wasser/erreichter Spritzwinkel mit dem Abdeckmaterial) und Bewertung der untersuchten Spritzdüsen ...	130
Tabelle 19:	Silivertische Versuche mit Silofässern – ernährungsphysiologische Analyse der Silagen – Teil 1	141
Tabelle 20:	Silivertische Versuche mit Silofässern – ernährungsphysiologische Untersuchung der Silagen – Teil 2	141

Tabelle 21:	Anzahl der Tage bis zu einem detektierten Sauerstoffgehalt von über 1 % im Gärglas.....	144
Tabelle 22:	Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – Ergebnisse der Applikation der Silos.....	151
Tabelle 23:	Ernährungsphysiologische Untersuchung der mit Variante W10 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm	161
Tabelle 24:	Ernährungsphysiologische Untersuchung der mit Variante P20 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm	162
Tabelle 25:	Ernährungsphysiologische Untersuchung der mit Variante K35 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm	163
Tabelle 26:	Ernährungsphysiologische Untersuchung der mit Variante A.109 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm	164
Tabelle 27:	Ernährungsphysiologische Untersuchung der mit Variante A.242 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm	165
Tabelle 28:	Ernährungsphysiologische Untersuchung der konventionell mit Folien abgedeckten Silagen (Referenz) in einer Tiefe von 30 cm	166
Tabelle 29:	Ernährungsphysiologische Untersuchung der oberen 10-cm-Schicht Silage – Teil 1.....	167
Tabelle 30:	Ernährungsphysiologische Untersuchung der oberen 10-cm-Schicht Silage – Teil 2.....	168
Tabelle 31:	Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus der oberen 5 cm Schicht	174
Tabelle 32:	Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus 30 cm Tiefe.....	175
Tabelle 33:	Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus 30 cm Tiefe von Silo 1 und 2 an Probenahmeort A und B..	181
Tabelle 34:	Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus der oberen 5 cm Schicht von Silo 1 und 2 an Probenahmeort A und B.....	182
Tabelle 35:	Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus 30 cm Tiefe und der oberen 5 cm Schicht des Referenzsilos an Probenahmeort A und B.....	183
Tabelle 36:	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse ausgewählter Rezepturvarianten aus den Praxistests	184
Tabelle 37:	Biogas- und Methanausbeute im Batchtest	188
Tabelle 38:	Abbaugrad der Siloabdeckungsmaterialien im Batchversuch.....	190
Tabelle 39:	Materialkosten der Vorzugsrezeptur W20 inklusive Transportkosten der Einzelbestandteile	198

Tabelle 40:	Materialkosten einer konventionellen Siloabdeckung mit Unterzieh-, Silofolie und Schutzgitter – nach einem Angebot eines Folienhändlers vom 19.12.2017	199
Tabelle 41:	Maschinenkosten für den Umbau eines Selbstfahrers	200
Tabelle 42:	Stundensatz einer selbstfahrenden Applikationsmaschine mit Aufbau.....	201
Tabelle 43:	Kosten einer Folienabdeckung für ein 1000-m ² -Silo	202
Tabelle 44:	Kosten einer Silageabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen für ein 1.000-m ² -Silo	203
Tabelle 45:	Alternative Verwendungsmöglichkeiten eines neuartigen Abdeckmaterials auf Basis Nachwachsender Rohstoffe	204

1 Einführung und Problemstellung

In der Landwirtschaft wird Silage häufig als Futtermittel für Nutztiere verwendet oder dient in Biogasanlagen als energiereiches Substrat. Die Konservierung von Wiesen- und Klee-gras, Silomais, Getreide und anderen Nutzpflanzen erfolgt in Deutschland in erster Linie in Fahrsilos, auch Flachsilos genannt. Die Anlagen nehmen, je nach Futter- bzw. Substratbe-darf immer größere Dimensionen an, teils werden Höhen von über zehn Metern erreicht [9]. Abbildung 1 zeigt ein groß dimensioniertes Fahrsilo ohne Seitenwände mit einer konventio-nellen Folienabdeckung und Silosäcken zur Beschwerung.

Die Konservierung des Futtermittels erfolgt bei der Silierung durch Milchsäuregärung, die nur unter anaeroben Bedingungen stattfinden kann. Ein sofortiger, vollständiger und anhal-tender Luftabschluss ist hierfür Grundvoraussetzung und die intensive Säurebildung aus Pflanzenzuckern ist die Basis der Silierung. Des Weiteren sind die Qualität des Substrats und die Verdichtung ausschlaggebend für die spätere Silagequalität. Der gasdichte Ab-schluss wird nach derzeitigem Stand der Technik mit erdölbasierten Kunststofffolien er-reicht, die in bis zu drei Lagen aufgebracht und zusätzlich mit Sandsäcken oder Altreifen beschwert werden müssen. Eine fehlerhafte Abdeckung kann zu Fehlgärung und somit zu einem Verlust des Energiegehalts und zum Befall mit unerwünschten Mikroorganismen füh-ren, was sich durch entstehende Toxine gerade bei der Milchvieh- und Rinderfütterung schädlich auswirken kann. Leistungseinbußen bis hin zu schweren Erkrankungen der Tiere sind mögliche Folgen einer schlechten Gärqualität der verfütterten Silage [9] [5] [34].



Abbildung 1: Konventionelles Fahrsilo mit Folienabdeckung

Eine geeignete Silageabdeckung muss über den Zeitraum von mindestens einem Jahr ei-ner Vielzahl äußerer Einflüsse standhalten. Sie muss beispielsweise über den gesamten

Zeitraum hinweg witterungsbeständig bleiben. Das heißt, sie muss eine sehr gute UV- und Temperaturstabilität besitzen, sodass sie selbst bei hoher Sonneneinstrahlung nicht spröde und rissig wird. Des Weiteren muss sie auch wind- und wasserfest sein. Jahres- und tagesbedingte Temperaturschwankungen dürfen die Eigenschaften des Materials ebenfalls nicht beeinflussen. Die Abdeckung muss zudem auch mechanisch belastbar sein und eine gewisse Elastizität und Reißfestigkeit aufweisen. So muss sie am Anfang des Silierprozesses, wenn sich unter optimalen Bedingungen über die ersten Tage hinweg eine Gärgashaube bildet, ausreichend dehnbar sein, damit keine Risse entstehen. Auch soll sie punktuellen Belastungen standhalten, wie sie beispielsweise durch Hagelschlag entstehen. Sie sollte möglichst unattraktiv auf Tiere wirken, da sie neben dem Betreten durch größere Tiere vor allem durch Anpicken und Anfressen von Vögeln und Nagern beschädigt werden kann. Es können Löcher entstehen, die Luft und Wasser ins Siloinnere eindringen lassen.

Die Abdeckung des Silos mit Folie, wie es bisher gehandhabt wird, stellt sich als arbeitsintensiv und zeitaufwändig dar. Auch für kleine Silos müssen mehrere Beteiligte zusammenarbeiten, um das Silo schnell und gasdicht abzudecken. Das Abdecken und auch das regelmäßige Aufdecken der Silos erfordern das Betreten des Silostocks in mehreren Metern Höhe, was eine potenzielle Unfallgefahr mit sich bringt. Das Risiko beim Freilegen des Silos wird im Winter aufgrund auftretender Schneemassen und Glätte noch verstärkt. Die Silofolien werden nur in seltenen Fällen automatisiert aufgebracht. Da das Abdecken mit viel Aufwand verbunden ist, verzichten manche große Biogasanlagenbetriebe ganz auf das Abdecken mit Folien und setzen auf andere Abdeckmethoden, wie eine Begrünung mit beispielsweise Getreide, und nehmen damit erhebliche Verluste in Kauf [28] [35].

Aber nicht nur aufgrund des hohen Arbeitsaufwands und des Gefährdungsrisikos ist es erstrebenswert, Alternativen für die Abdeckung von Fahrsilos samt geeignetem Verfahren aufzuzeigen. Die Silofolien sind nur begrenzt wiederverwendbar und verursachen große Abfallmengen. Zudem sind sie aus fossilen Rohstoffen hergestellt. So kann es vorkommen, dass Folienreste versehentlich im Tierfutter landen und bei Verzehr dem Tier schaden. Daher ist es erstrebenswert, im Sinne der Nachhaltigkeit einen Ersatz aus nachwachsenden Rohstoffen zu finden, der sich lückenlos in den Stoffkreislauf einfügt und im besten Falle mit der Silage zusammen verfüttert werden kann [48] [35].

Als wichtiges Ergebnis vorausgegangener Arbeiten wurde ein selbsthärtendes Zwei-Komponenten-Material entwickelt und als Gemeinschaftserfindung „Abdeckmaterial für Biomasse und Verfahren zu dessen Herstellung“ patentiert [44]. In ersten realitätsnahen Versuchen mit Test-Siloanlagen wurde dem neuen Material eine grundlegende Praxistauglichkeit zugesprochen. Die neuartige biobasierte Abdeckung konnte allerdings nicht allen Anforderungen für die angestrebte Dauer der Konservierung von mindestens einem Jahr entsprechen. Eine abschließende ökonomische Betrachtung zeigte, dass auch Materialkosten reduziert werden sollen, um die Konkurrenzfähigkeit zur herkömmlichen Silofolie gewährleisten zu können [51].

Daher wurde unter diesen Gesichtspunkten in einem nächsten Schritt die Grundrezeptur im Labor verbessert und als Forschungsergebnis drei favorisierte Rezepturen als Ausgangsla-

ge für eine weitere Produktentwicklung bereitgestellt [47]. Das verbesserte Abdeckmaterial wurde 2016 ebenfalls zum Patent angemeldet [46].

Wie und ob sich diese vermutlich in den Eigenschaften verbesserten Materialien unter praxisnahen Bedingungen bewähren, ist noch nicht geprüft. Ein geeignetes Applikationssystem für die Aufbringung der Materialien ist noch nicht entwickelt. Gegebenenfalls notwendige Abstimmungen zwischen Rezeptur und Applikationssystem sind noch erforderlich.

Folgende offene Fragestellungen sind für die Beurteilung der Praxistauglichkeit des Abdeckmaterials zu beantworten:

- Einfluss auf den Silierprozess und die Materialverträglichkeit mit Siloanstrichen,
- Einfluss auf die qualitätserhaltende Lagerung der Silage,
- Bewertung der Kompatibilität mit Biogasanlagen bzw. Vergärbarkeit in Biogasanlagen,
- Abschätzung der Eignung des Materials zur Mitverfütterung,
- biologische Abbaubarkeit im Boden bzw. in der Kompostmiete,
- ökonomische Bewertung des Abdeckmaterials in Verbindung mit dem Gesamtverfahren der Silierung,
- alternative Verwendungsmöglichkeiten des Materials.

2 Zielsetzung

Die bereits patentierten und im Labor weiterentwickelten Rezepturen für eine Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen aus der vorhergehenden Projektphase sollen in Freilandversuchen unter praxisnahen Bedingungen getestet werden, um den Einfluss auf den Silierprozess und die Silagelagerung zu untersuchen. Daneben soll auch ein Konzept für eine geeignete Applikationstechnik für die neuen Rezepturen erarbeitet und geprüft werden. Des Weiteren sollen die Kompostierbarkeit, das Verhalten in Biogasanlagen und eine mögliche Mitverfütterung der Abdeckung untersucht werden.

Ziel ist es, eine aufspritzbare, umweltfreundliche und selbsthaftende Siloabdeckung für Fahrsilos aus nachwachsenden Rohstoffen in die Praxisreife zu überführen. Die alternative Siloabdeckung soll konventionelle Kunststofffolien auf Erdölbasis ersetzen. Das Spritzverfahren senkt den Arbeitsaufwand beim Siloabdecken und die Unfallgefahr beim Ab- und Aufdecken der Silage wird stark reduziert.

Die Eigenhaftung des Materials am Substrat und an der Silowand ermöglicht einen gasdichten Abschluss ohne eine zusätzliche Beschwerung mit Altreifen oder Sandsäcken. Die Abdeckung soll zusammen mit der Silage entnommen und in Biogasanlagen eingesetzt werden, wobei der Biogasprozess keinesfalls negativ beeinflusst werden darf. Auch eine gute Zersetzung unter aeroben Bedingungen ist erstrebenswert und im besten Fall soll das Material mit dem Substrat an Tiere verfüttert werden können. Durch die Rückführung der neuen Abdeckung in den Stoffkreislauf fällt im Gegensatz zu einer konventionellen Silofolie kein Abfall an, der kostenintensiv entsorgt werden muss.

Ziel dieser Arbeit ist es, das patentierte Material aus vorangegangenen Arbeiten auf ihre Tauglichkeit hin zu prüfen und bei Bedarf zu modifizieren, sodass ein praxisreifes Produkt bereitgestellt werden kann. Das Hauptaugenmerk liegt dabei vor allem auf der Erhöhung der Langzeitstabilität und der Verringerung der Schrumpfungseigung des Materials. Es soll eine hohe Silagequalität über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr sichergestellt werden. Dementsprechend muss das Material witterungsbeständig sein, um den Umwelteinflüssen standzuhalten, sodass ein luftdichter Abschluss des Silostocks gewährleistet werden kann. Ohne ausreichende Gasdichtigkeit der Abdeckung kann die Milchsäuregärung nicht ausreichend stattfinden und damit auch keine verlustarme Konservierung.

Die weiterentwickelten Rezepturen sind in einem ersten Schritt in Labortests anhand chemischer und physikalischer Parameter zu bewerten und die Materialien sind auf Gasdurchlässigkeit, Säurebeständigkeit und Alterungsverhalten sowie Reißfestigkeit und Dehnbarkeit zu überprüfen. Die Herausforderung der Materialentwicklung liegt in der Vereinbarkeit der benötigten multifunktionalen Eigenschaften des umweltfreundlichen Materials.

Aufbauend auf die Laborversuche sollen verschiedene Praxistests im Freien durchgeführt werden, um eine Praxistauglichkeit des Materials zu prüfen. In diesem Rahmen soll auch ein Prototyp eines Applikationsgeräts entwickelt werden, um das reaktive Zwei-Komponenten-Material auch im größeren Maßstab zu mischen und aufzuspritzen.

Um außerdem der Anforderung der Mitverfütterung des Abdeckmaterials gerecht zu werden, sollen für die Rezeptur lediglich ernährungsphysiologisch unbedenkliche Rohstoffe verwendet werden. Ob die Abdeckmasse letztendlich für die Tierernährung geeignet ist, soll ebenfalls geprüft werden.

Anhand von Literaturstudium, Expertengesprächen und ersten Voruntersuchungen sollen auch weitere aussichtsreiche Einsatzfelder des Abdeckmaterials identifiziert werden. Abschließend soll eine ökonomische Bewertung des neuartigen und verbesserten Abdeckverfahrens durchgeführt und Hinweise zur möglichen Praxiseinführung erstellt werden.

3 Stand des Wissens

Grundlage für die Weiterentwicklung des neuen Abdeckmaterials und dessen Handhabung sind fundierte Kenntnisse zum Silierprozess von Futterpflanzen und der herkömmlichen Abdecktechnik. Der Stand der Technik zur Konservierung des Ernteguts in Flachsiloanlagen, zum Silierverlauf, zur Silagequalität und deren Beurteilung sind nachfolgend zusammengefasst. Auch werden andere spritzfähige Abdeckmaterialien, ebenfalls aus nachwachsenden Rohstoffen, kurz beschrieben. Des Weiteren werden Verfahren zur Applikation von Mehrkomponentensystemen vorgestellt.

3.1 Die Siliertechnik

Mit einer einwandfreien und hochwertigen Silage soll ganzjährig Futter für Nutztiere bereitgestellt oder eine hohe Methanausbeute bei der Fermentation in Biogasanlagen sichergestellt werden. Daher ist es wichtig, die Lagerfähigkeit und Haltbarkeit des Ernteguts über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten. Die Qualität der Silage wird von vielen Faktoren entlang des gesamten Silierprozesses beeinflusst, wie Abbildung 2 illustriert.

Die Siliereignung der Ausgangsmaterialien ist neben der Pflanzenart und -sorte auch abhängig von biologischen Faktoren, wie dem Besatz mit Schadkeimen und Milchsäurebakterien, physikalischen Eigenschaften, wie dem Trockenmassegehalt, Häcksellänge und Verdichtbarkeit, sowie von der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials. Wichtige Parameter sind hier der Anteil vergärbare Kohlenhydrate, der Rohproteingehalt und die Pufferkapazität des Pflanzenmaterials. Teilweise sind diese Einflüsse nicht steuerbar. Durch den richtigen Erntezeitpunkt und geeignete Erntetechnik sowie eine zügige und ausreichende Verdichtung und Abdeckung des Silos können jedoch bestmögliche Bedingungen geschaffen werden, um Fehlgärungen zu vermeiden [9].

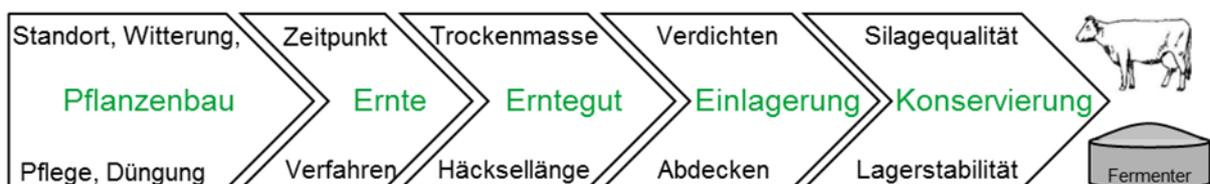


Abbildung 2: Ablauf einer Erntekette und Auswahl möglicher Einflussfaktoren auf die Silagequalität [47]

Je nach Betrieb, Standort und klimatischen Bedingungen sind in der Pflanzenproduktion passende Saat-, Pflege- und Düngemaßnahmen auszuwählen und auf die Pflanzen und deren Entwicklung anzupassen, um eine möglichst ertragreiche Ernte zu erhalten.

Im Anschluss an das Mähen oder Häckseln wird das Pflanzenmaterial aufbereitet und mit optimalem Trockensubstanzgehalt zwischen 28 % und 40 % (je nach Substrat) und

physiologischem Reifezustand bei idealer Länge (6 mm bis 10 mm: je trockener und älter, desto kürzer) im Silostock eingelagert. Bei Bedarf können Siliermittel, wie beispielsweise Propionsäure zur schnellen Absenkung des pH-Werts der Silage, zugegeben werden.

Das Erntegut wird meist punktuell auf das Silo gekippt und anschließend maschinell möglichst gleichmäßig verteilt. Hierzu kommen vor allem Radlader oder Großschlepper zum Einsatz. Auch werden zum Verteilen und Verdichten immer öfter Raupenfahrzeuge, wie umgebaute Pistenraupen, verwendet. Das Substrat soll möglichst zügig und gleichmäßig in Schichtdicken bis maximal 30 cm verteilt und durch die Fahrzeuge ausreichend verdichtet werden. Die ideale Verdichtung ist vom Substrat und der Trockenmasse abhängig. Tabelle 1 und Tabelle 2 geben Richtwerte zur Verdichtung der häufigsten Substratarten Silomais und Gras wieder. Bei unzureichender Verdichtung gelangt beim Anschnitt des Silostocks Luft schneller und tiefer ins Siloinnere, was eine unerwünschte Nacherwärmung und Schimmelbildung zur Folge hat. Eine Nacherwärmung zieht in der Regel hohe Trockenmasse- und Energieverluste mit sich. Bei einer unzureichenden Verdichtung ist die Lagerstabilität der Silage oft stark herabgesetzt [42] [23].

Der Silostock muss so bemessen sein, dass der Mindestvorschub 1,5 m pro Woche im Winter und 2,5 m im Sommer beträgt. Vorteilhaft ist eine gleichmäßige Wölbung des Silostocks, um Folien und Netze flächig auflegen zu können. Das luftdichte Abdecken der Silomiete ist für die angestrebte Milchsäuregärung ohne Fehlgärung notwendig. Die gesamte Ertekette sollte in möglichst kurzer Zeit abgeschlossen sein, denn je schneller nach der Befüllung das Silo abgedeckt wird, desto besser sind die Gärbedingungen und geringer das Risiko von Nacherwärmung und Schimmelbefall. Für eine qualitätsgerechte und effiziente Ernte und Einlagerung bleibt also nur ein sehr enges verfügbares Zeitfenster.

Das Silo ist erst zu öffnen, wenn die Milchsäuregärung abgeschlossen ist und sich ein entsprechend niedriger pH-Wert (abhängig von der Trockenmasse) eingestellt hat. Die Mindestgärdauer beträgt sechs Wochen. Empfohlen wird eine erste Öffnung nach zehn bis zwölf Wochen, da mit zunehmender Gärdauer die Lagerstabilität der Silage steigt [9].

Tabelle 1: Spannweiten für eine geeignete Dichte von Gras zur Silierung nach der Verdichtung [42]

TM in %	Dichte in kg TM/m ³	Dichte in kg FM/m ³
20	155–165	775–825
25	170–180	680–720
30	190–200	633–667
35	205–215	585–615
40	220–230	550–575
45	240–250	533–555
50	255–270	510–540
55	275–290	500–530

TM: Trockenmasse
FM: Frischmasse

Tabelle 2: Spannweiten für eine geeignete Dichte von Mais zur Silierung nach der Verdichtung [42]

TM in %	Dichte in kg TM/m ³	Dichte in kg FM/m ³
27	200–215	740–800
28	210–225	750–805
29	220–230	760–790
30	230–240	767–800
31	235–245	760–790
32	240–255	750–795
33	250–265	760–800
34	255–270	750–795
35	260–275	740–785
36	265–280	725–780
37	270–285	730–770
38	275–290	725–765
39	280–295	720–755
40	285–300	715–750

TM: Trockenmasse
FM: Frischmasse

3.2 Silierverlauf – biologisch-chemische Grundlagen

Ziel der Futtermittelkonservierung ist es, den Energiegehalt des Futters über einen längeren Zeitraum hinweg zu erhalten. Bei der Milchsäuregärung wandeln Milchsäurebakterien (MSB) unter anaeroben Bedingungen pflanzliche Kohlenhydrate in organische Säuren um, in erster Linie Milchsäure. Durch den Umwandlungsprozess und die Entstehung der Gärsäure sinkt der pH-Wert im Substrat und die meisten Enzyme werden dadurch inaktiviert. Dieser Prozess läuft unter geeigneten Bedingungen bei Sauerstoffausschluss spontan ab. Dazu müssen genug siliertaugliche Milchsäurebakterien, mindestens 100.000 MSB/g Silage im Substrat vorhanden sein. Zudem muss ausreichender vergärbare Zucker vorhanden sein. Hefen, Schimmelpilze und weitere Mikroorganismen sind sogenannte Gärschädlinge, die mit den Milchsäurebakterien konkurrieren. Ihr Wachstum ist in der aeroben Vorphase aufgrund des restlichen Sauerstoffs noch begünstigt, wird aber während des Gärprozesses gehemmt. Außerdem gilt: Je mehr Milchsäure entsteht, desto niedriger ist der pH-Wert und desto geringer sind Nährstoffverluste. Zur Erhöhung der Keimdichte und zur Verbesserung des Gärverlaufs stehen unterschiedliche Silierzusätze, wie beispielsweise Milchsäurebakterienstämme, Salze und Säuren, zur Verfügung.

Die Silierung läuft in vier Phasen ab, die in Abbildung 3 schematisch dargestellt sind. Sie beginnt mit der aeroben Phase, bei der in den ersten Stunden der Silierung Restsauerstoff veratmet wird. In dieser Phase gewinnen die aeroben Pilze und Bakterien an Energie und können sich unerwünscht vermehren. Eine Massevermehrung aerober Mikroorganismen ist stets mit einer Erwärmung und Verlusten verbunden. Daher ist es wichtig, die aerobe Phase durch einen möglichst schnellen luftdichten Abschluss und ausreichende Verdichtung, um Restsauerstoff im Substrat zu verdrängen, einzuschränken.

Ist der Sauerstoff verbraucht, beginnt die Hauptgärphase. Innerhalb weniger Tage stirbt das Pflanzenmaterial ab. Dadurch senkt sich der Futterstock etwas ab und Gärgas (CO_2 , N_2 und NO_x) entsteht und bildet eine Gashaube unter der Silofolie. Diese kennzeichnet eine gute Abdeckung und darf nicht zerstört werden. Die Zellinhaltsstoffe werden nun für die Mikroorganismen verfügbar gemacht. Die erwünschten Milchsäurebakterien beginnen mit ihren Stoffwechselfvorgängen und senken den pH-Wert. Durch das saure Milieu sterben jetzt auch schädliche fakultativ anaerobe Bakterien wie Clostridien und Enterobakterien ab. Zusätzlich hemmen die Gärsäuren die Aktivität Eiweiß abbauender Enzyme, was unter anderem die Bildung von Ammoniak verhindert. Hefen halten dem niedrigen pH-Wert stand und verweilen in einem Ruhestadium. Die Hauptgärung dauert, je nach Futtermittelart, zwischen sechs und zehn Wochen; danach nimmt die Intensität des Fermentationsprozesses ab. Diese Phase darf keinesfalls gestört werden.

In der darauffolgenden Lagerphase sind nur noch sehr säuretolerante Enzyme aktiv. Sie stellen laufend leicht vergärbare Kohlenhydrate zur Verfügung. Dadurch können bei längerer Lagerdauer Zuckerverluste ausgeglichen werden. Der Großteil der Milchsäurebakterien stirbt nun ab, es verbleibt nur noch ein Tausendstel der gebildeten Maximalpopulation in der Silage. Diese Phase ist sehr stabil und kann theoretisch bei idealen Bedin-

gungen und genügend Gärsubstrat beliebig lange dauern. Wichtig ist auch in diesem Stadium, dass kein Sauerstoffzutritt durch Undichtigkeiten stattfindet.

In der letzten Phase, der Entnahmephase, wird die Silage an der Anschnittfläche Sauerstoff ausgesetzt. Dabei ist eine ausreichende Verdichtung beim Anlegen des Silos ausschlaggebend. Bei einer gut verdichteten Silage beschränkt sich der Sauerstoffeintrag in den Silostock auf ca. 1 m hinter der Anschnittfläche. Bei einer Sauerstoffkonzentration von 0,5 % bis 1 % werden im Ruhestand verbliebene unerwünschte Mikroorganismen, wie Hefen und Schimmelpilze, wieder angeregt. Bei der Entnahme ist auf einen ausreichenden Vorschub zu achten sowie darauf, dass der Anschnitt möglichst gerade, ohne Auflockerungen des Silagehaufwerks erfolgt [9] [36].

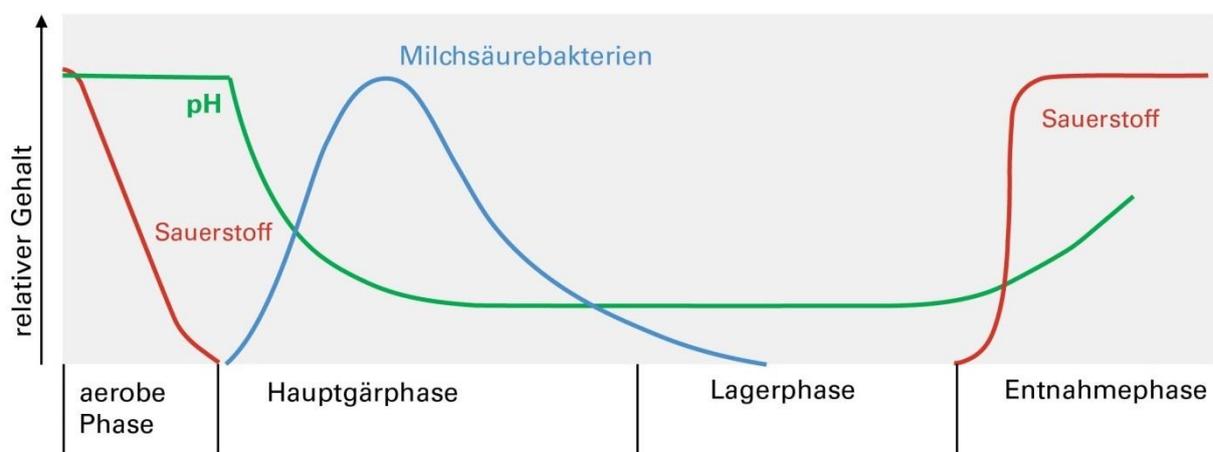


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Gärverlaufs im Silo nach PAHLOW und MUCK (2003) [36]

3.3 Silagemängel

Werden die ersten drei Phasen des Gärverlaufs gestört, kommt es zu Silagemängeln. Diese können durch Verfahrensfehler oder durch schwer vergärbare Material verursacht sein.

Fehlgärungen können beispielsweise auftreten, wenn feuchtes Siliergut zu wenige vergärbare Kohlenhydrate enthält oder untaugliche Milchsäurebakterien die Kohlenhydrate nur ungenügend verwerten können. In beiden Fällen fällt der pH-Wert nur sehr langsam und für eine Konservierung nicht tief genug ab. Ist das Substrat zudem noch mit Clostridien verschmutzt, wird die gebildete Milchsäure zur stark riechenden Buttersäure umgewandelt. Abhängig vom Nitratgehalt geschieht dies mit einer zwischengeschalteten Essigsäurebildung oder auf direktem Wege. Fehlgärungen können andauern, bis sämtliche Milchsäure verbraucht ist. Bei weiterem pH-Anstieg verursachen weitere Clostridienarten einen Eiweißabbau, der als Abfallprodukt oft Ammoniak entstehen lässt. Die Folgen einer Fehlgärung sind, je nach Ausmaß, Trockenmasse- und Energieverluste bis hin zum völligen Verderb der Silage.

Fehlgärungen können auch in trockenen Silagen auftreten. Das kann durch einen Nitratmangel des Ausgangsmaterials verursacht werden. Vor allem in den ersten Tagen der Silierung hat das Nitrat eine hemmende Wirkung auf Buttersäure bildende Bakterien. Ist zu wenig Nitrat enthalten, beispielsweise durch unzureichende Düngung, entstehen in den ersten Tagen der Silierung sowohl Milchsäure als auch Buttersäure bis sich ein genügend niedriger pH-Wert eingestellt hat und die schädlichen Clostridien durch die Milchsäure gehemmt werden. Solche Silagen enthalten neben der Milchsäure auch einen merklichen Buttersäureanteil.

Die Nacherwärmung kann auftreten, wenn Luft in den Silostock eindringt oder das Silo nicht schnell genug abgedichtet wird. Hefen können sich rasch vermehren und stellen ab einem Besatz von 100.000 Hefen pro Gramm Silage ein Problem für die Qualität dar. Bei weiterem oder erneutem Luftzutritt kann die Population sprunghaft auf das Tausendfache ansteigen und verursacht durch deren Abbau der Gärsäuren erhebliche Futterverluste und eine Erwärmung. Eine Erwärmung um 15 K gegenüber der Umgebungstemperatur verursacht einen täglichen mittleren TM-Abbau von 3,5 %. Meist ist die Nacherwärmung verbunden mit Schimmelwachstum [9].

3.4 Abdeckung von Fahrsilos – Stand der Technik

In SIMON et al. (2015) [47] sind die verschiedenen gängigen Silofolientypen bereits ausführlich beschrieben, daher folgt hier nur ein kurzer Überblick der gängigsten Abdeckungen. Folien zur Siloabdeckung bestehen in erster Linie aus Polyethylen mit niedriger Dichte (PE-LD) und werden je nach Dicke und spezifischem Gewicht typisiert.

Die Unterziehfolie, auch Saugfolie genannt, ist mit ca. 40 µm die dünnste aller Silofolien. Sie wird direkt auf das Substrat gelegt und haftet aufgrund ihrer geringen Schichtdicke und hohen Elastizität direkt an der Silage trotz aller Unebenheiten an. Sie wird in der Regel nur einmal verwendet und kostet derzeit 0,08 €/m² bis 0,10 €/m².

Die „normale“ Silofolie ist mit 120 µm bis 200 µm wesentlich dicker als die Unterziehfolie und wird in der Regel auf diese gelegt, meist über den Silorand hinaus, damit kein Wasser am Silorand eindringen kann. Diese Folie ist robuster und stellt eine zusätzliche Gasbarriere dar. Sie kostet derzeit je nach Qualität und Dicke 0,20 €/m² bis 0,40 €/m² und kann im darauffolgenden Jahr als Zweitfolie anstatt einer Gewebefolie auf die neue Silofolie eingesetzt werden. Eine Wiederverwendung als Silofolie zum Gasabschluss ist ausgeschlossen.

Randfolien werden an die Seitenwände des Silos gelegt, um hier eine größere Dichtigkeit gegenüber Wasser und Sauerstoff zu erreichen. Sie kann gegebenenfalls wiederverwendet werden. Preis und Stärke der Folien sind analog zu den „normalen“ Silofolien.

Multisilo- und Gewebefolien sind etwa 500 µm dick und können mehrmals verwendet werden. Sie sind robuster und mechanisch belastbar. Jedoch ist bei der Verwendung solch schwerer Folien eine Unterziehfolie notwendig. Die Kosten sind mit 1,70 €/m² bis 1,90 €/m² für Multisilofolie und 5,40 €/m² bis 5,50 €/m² für Gewebefolie um ein Vielfaches

höher als bei herkömmlichen Silofolien. Durch die höhere Masse der Folien ist eine Beschwerung nicht unbedingt notwendig.

Zum Schutz vor Beschädigungen durch mechanische Belastungen und zum Windschutz der Folien werden Schutzgitter und -gewebe oder Kunststoffvliese aufgebracht. Die Kosten liegen bei ungefähr 2,50 €/m².

Die Befestigung der Folien erfolgt durch Beschwerung mit kies- oder sandgefüllten Silosäcken oder Altreifen. Die Silosäcke werden entlang der Seitenwände angebracht und in regelmäßigen Abständen zusätzliche Querbarrieren geschaffen. Auch kann die Folie mit Spanngurten oder wassergefüllten Schläuchen befestigt werden. Abbildung 4 zeigt die häufigste Form der Siloabdeckung, bestehend aus Unterzieh- und Silofolie, versehen mit einem Schutzgitter und beschwert mit Sandsäcken. Beim Aufziehen der Folienbahnen werden diese ca. 2 m überlappt, um einen besseren Luftabschluss zu erreichen. Silofolienkleber können zusätzlich zur Verbesserung der Randabdichtung verwendet werden. Kleinere, beispielsweise von Tieren verursachte Schäden können mit Klebebändern repariert werden. Bei größeren Schäden ist das Silo erneut großflächig abzudecken [34] [9].

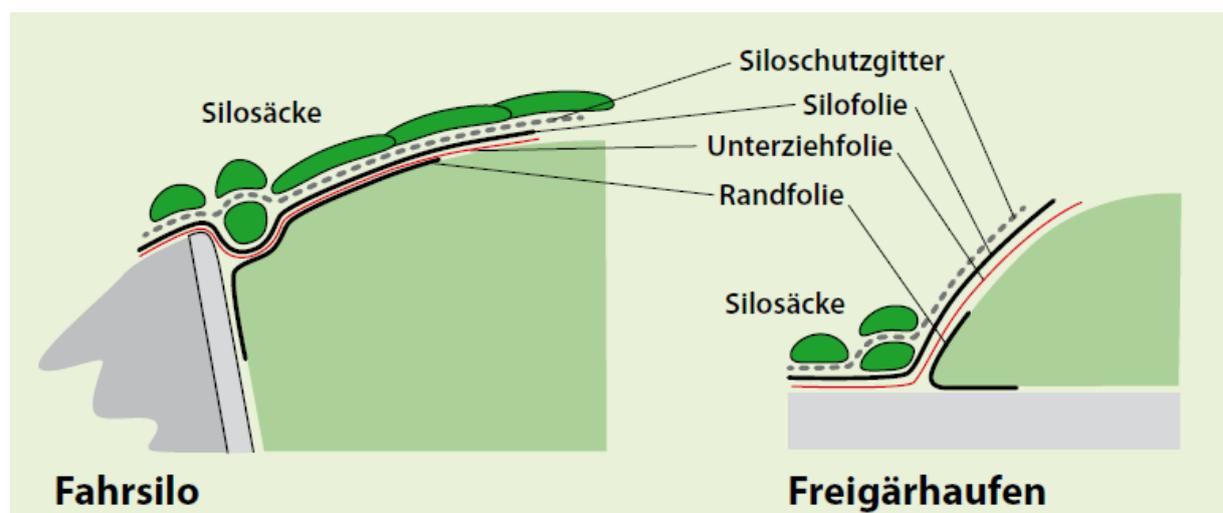


Abbildung 4: Aufbau einer konventionellen Siloabdeckung [26]

3.5 Beurteilung der Silagequalität

Die Qualität der Silage kann bei der Entnahme durch Experten in einem ersten Schritt hinsichtlich Geruch, Haptik und Farbe beurteilt werden. Analytisch bestimmbare Kriterien sind Trockenmasse, pH-Wert, der Gehalt an Rohnährstoffen und Gärssäuren sowie der Alkoholgehalt und der Anteil von Ammoniak am Gesamtstickstoffgehalt. Fehler beim Silieren wirken sich auf diese Qualitätskriterien aus und werden durch die chemische Analytik aufgezeigt [5].

Die Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V. (DLG) hat Richtlinien zur Futtermittelanalyse von Silagen erstellt, um die Qualität objektiv beurteilen zu können. Anhand der Parameter pH-Wert, Milch-, Essig-, Propion- und Buttersäure sowie dem Ammoniak-Stickstoffanteil am Gesamtstickstoffgehalt ($\text{NH}_3\text{-N}$) wird das Gärfutter beurteilt. Auch der Alkoholgehalt einer Silage wird als Qualitätskriterium herangezogen. Die Silage kann zudem auch auf mikrobiologische Kennwerte hin untersucht werden [9].

Die DLG hat für die entscheidenden Qualitätsmerkmale Grenzwerte für die Eignung als Futtermittel bestimmt und hierzu den in Tabelle 3 dargestellten DLG-Schlüssel 2006 definiert. Im besten Falle können 100 Punkte erreicht werden. Ab einer Punktzahl von 51 und schlechter sollte die Silage aufgrund der schlechten Qualität nicht mehr verfüttert werden [8].

Tabelle 3: Bewertungsschlüssel 2006 der DLG zur Beurteilung der Eignung der Silage als Futtermittel anhand der Gärqualität [9]

Gesamtpunktzahl	Gärqualität	
	Note	Urteil
100–90	1	sehr gut
89–72	2	gut
71–52	3	verbesserungsbedürftig
51–30	4	schlecht
< 30	5	sehr schlecht

3.6 Aufspritzbare Abdeckungen auf Basis Nachwachsender Rohstoffe

Die Nachfrage an biologisch abbaubaren Abdeckmaterialien aus Nachwachsenden Rohstoffen ist groß. Daher gibt es viele Forschungsbestrebungen auf diesem Gebiet. Je nach späterem Verwendungszweck wird dieses Thema sehr vielfältig behandelt. SIMON et al. (2015) haben bereits auf entsprechende Forschungsvorhaben hingewiesen. Eine an der Fachhochschule Kiel entwickelte Abdeckung basiert auf nicht modifiziertem Stärkematerial aus Mais, Weizen oder Gerste und Fruchtwachsen [47]. Mittels Extrusion soll der Stärkeschaum auf das Silo aufgetragen werden. Erste Praxistests verliefen bereits vielversprechend [39] [40].

In Frankreich wird derzeit eine aufspritzbare Siloabdeckung entwickelt, die bis zu 80 % aus Algen besteht. Die Abdeckung wird in Schichtdicken von 3 cm bis 4 cm aufspritzt und soll nach dem Gebrauch mit der Silage verfütterbar sein. Erste Praxistests wurden bereits durchgeführt [37].

Ein von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. gefördertes Gemeinschaftsprojekt beschäftigte sich mit einer biologisch abbaubaren und sprühfähigen Folie auf Basis Nachwachsender Rohstoffe im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturpflanzenbau. Verschiedene Substanzgruppen wurden von den Projektpartnern überprüft. So wurde an Mulchfolien auf Basis von Gelatine, Hydroxycellulose, Xanthan, Chitosan und Stärke geforscht. Am vielversprechendsten erwiesen sich Materialmischungen auf Basis von Xanthan mit Chitosan (zwei Polysaccharide) oder mit Hydroxyethylcellulose (Cellulosederivat). Die durch Polysaccharide hergestellten Folien sollen bezüglich der Beständigkeitsdauer gezielt einstellbar sein [29] [24] [22] [49]. In einem Folgevorhaben sollen im Labor die optischen Eigenschaften der Folien weiterentwickelt und Freilandversuche durchgeführt werden.

Auch in anderen Industriezweigen wird nach biologisch abbaubaren Folien geforscht. Ein Beispiel aus der Verpackungsindustrie ist die Entwicklung und Charakterisierung von Schutzfolien für Fahrzeuge. Hauptbestandteil des Materials ist das Protein Kollagen, das chemisch mit Glyoxal vernetzt wurde. Die faserhaltige Kollagenmasse lässt sich auf die Fahrzeuge aufsprühen und nach Gebrauch durch wasserbasierte warme Lösungen wieder abwaschen [48].

3.7 Ergebnisse aus vorhergehenden Projektphasen

In einer ersten Projektphase wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP) eine erste Rezeptur für eine Silageabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen entwickelt. Es handelt sich um ein reaktives Zwei-Komponenten-Material, das vor Ort zusammengemischt wird und nach dem Aufspritzen direkt auf der Silooberfläche aushärtet. Die Grundrezeptur in Tabelle 4 zeigt das Zwei-Komponenten-Material, bestehend aus einer öligen Phase A und einer wässrigen Phase B [43]. Auf die Gemeinschaftserfindung von TFZ und FEP „Abdeckmaterial für Biomasse und Verfahren zu dessen Herstellung“ wurde ein Patent (EP 1 998 955 B1) erteilt [44].

Tabelle 4: Grundrezeptur der Silageabdeckung nach UHL et al. (2011) [51]

Komponente	Bestandteile	Masseanteil in %	Eigenschaft
A	Natriumphosphat	0,32	Verzögerer
	Silikagel	0,73	Wasseradsorbens
	Natriumalginat	0,73	Geliermittel
	Calciumsulfat	0,97	Gelierhilfsmittel
	Kieselgur	5,32	Füllstoff
	Kreide	5,32	Füllstoff
	Rapsöl	32,64	Natürlicher Rohstoff
	Zinkoxid	0,81	Konservierungsmittel
B	Naturlatexlösung (60 %)	20,64	Bindemittel
	Struktol	0,08	Stabilisierer
	Wasser	32,25	Lösemittel
	KOH-Lösung (20 %)	0,19	Verzögerer

In einer zweiten Projektphase wurde dieses Material in Kooperation mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft – Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft (LfL-ITE) auf Praxistauglichkeit getestet. Die grundsätzliche Praxistauglichkeit des Verfahrens wurde an zwei verschiedenen Standorten an Freiland-Siloanlagen erprobt. Zur Applikation des Materials wurde ein Feinputzspritzgerät gewählt. Als Hauptvorteile haben sich neben dem geringeren Arbeitsaufwand auch das geringe Unfallrisiko und die geringe Windanfälligkeit der Abdeckung herausgestellt. Weiterer Optimierungsbedarf der Silageabdeckung bestand jedoch hinsichtlich der Langzeitstabilität des Materials, der Materialkosten und der Lebensmitteltauglichkeit einiger Rezepturbestandteile im Hinblick auf eine mögliche Verfütterung der Abdeckung. Zudem war die Handhabung der beiden Komponenten aufgrund der Klebrigkeit und Viskositätsunterschiede schwierig. Daher wurden bereits in diesem Projekt erste Rezepturverbesserungen versucht. In Tabelle 5 ist die resultierende Vorzugsrezeptur dieses Forschungsvorhabens dargestellt [51].

Tabelle 5: Vorzugsrezeptur für die Silageabdeckung nach UHL et al. (2011) [51]

Komponente	Bestandteil	Masseanteil in %	Eigenschaft
A	Natriumphosphat	0,32	Verzögerer
	Silikagel	0,72	Wasseradsorbens
	Natriumalginat	0,72	Geliermittel
	Calciumsulfat	0,96	Gelierhilfsmittel
	Kieselgur	5,28	Füllstoff
	Kreide	5,28	Füllstoff
	Rapsöl	32,38	Natürlicher Rohstoff
	Fasern ARBOCEL R bzw. FT400	0,80	Füllstoff
	Zinkoxid	0,80	Konservierungsmittel
B	Naturlatexlösung (60 %)	20,48	Bindemittel
	Struktol	0,08	Stabilisierer
	Wasser	31,99	Lösemittel
	KOH-Lösung (20 %)	0,19	Verzögerer

Aufgrund der noch nicht zufriedenstellenden Eigenschaften der Abdeckung wurde im April 2014 das Folgevorhaben „Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis nachwachsender Rohstoffe“ gestartet. Ziel dieser Arbeit war es, die vorliegende Rezeptur aus den vorangegangenen Projektphasen weiter zu optimieren. Schwerpunkt war dabei, die Langzeitstabilität der Abdeckung zu verbessern, um eine hohe Silagequalität über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr sicherzustellen. Dabei mussten zunächst Prüfverfahren zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit und Zugfestigkeit angepasst werden, da die etablierten Methoden zur Beurteilung konventioneller Silofolien für elastisches Material nicht anwendbar sind. Lagerungsversuche mit einzelnen Probekörpern verschiedener Rezepturen zeigten, dass nach 14 Monaten äußerlich kaum Befall von Schimmel oder andere Zersetzungserscheinungen erkennbar waren und somit eine verbesserte Langzeitstabilität zu erwarten ist. Durchgeführte Untersuchungen zur Gasdurchlässigkeit und Reißfestigkeit lassen zudem auf verbesserte Materialeigenschaften der weiterentwickelten Rezepturen schließen. Weiterhin konnten Rezepturkomponenten ersetzt werden, die hinsichtlich ihrer Eignung als Futtermittel bedenklich waren. Bei der weiterentwickelten Abdeckung handelt es sich um eine Zwei-Komponenten-Mischung, die im Wesentlichen aus Sonnenblumenöl und einer Naturkautschuk-Dispersion (Latex) besteht. Weitere Bestandteile der Rezeptur sind Natriumalginat, Natriumbenzoat und Cellulosefasern. Tabelle 6 zeigt eine der drei Vorzugsrezepturen der Projektphase. Neben der Rezeptur A.242 zeigte sich vor allem eine Variante (A.109) als sehr vielversprechend, bei der eine 30%ige Propionsäure nach dem Zusammenmischen der zwei Komponenten auf die Materialoberfläche gesprüht wird. Die Propionsäure wird als alternatives Konservierungsmittel anstatt Natriumbenzoat verwendet [47]. Variante A.109 zeichnet sich durch eine äußerst gute Gasdichtigkeit aus. Die dritte favorisierte Variante A.237 enthält im Vergleich

zu den beiden anderen Rezepturen längere Cellulosefasern als Füllstoff und erreicht dadurch die besten mechanischen Eigenschaften der getesteten Materialien. Das optimierte Material wurde zum Patent angemeldet (WO 2016/155708 A1) [46].

Tabelle 6: Vorzugsrezeptur A.242 nach SIMON et al. (2015) [47]

Komponente	Bestandteil	phr	Masseanteil in %	Eigenschaft
B	Latex	100	11,0	Bindemittel
	Wasser	500	55,7	Lösemittel
	Natriumbenzoat	5	0,6	Konservierungsmittel
	BC 200	15	1,7	Füllstoff
A	Sonnenblumenöl	250	27,9	Weichmacher
	Na ₃ PO ₄	4	0,4	Verzögerer
	Natriumalginat	10	1,1	Geliermittel
	CaSO ₄	12	1,4	Gelierhilfsmittel

Die Masseverhältnisse der Vorzugsrezeptur A.242 werden neben den Masseprozent auch in phr (*parts per hundred rubber*) relativ zu Latex (100 phr) angegeben. Der Anteil an Latex bezieht sich in dieser Rezeptur auf den Reinstoff. In den Rezepturen aus früheren Arbeiten ist der prozentuale Latexanteil auf die verwendete Latex-Wasser-Dispersion bezogen. Entsprechend sind bei der Herstellung die angegebene Wassermenge und die tatsächliche Latex-Dispersion-Einwaage mit 60 %igem Reinstoffgehalt und dementsprechend 40 % Wasseranteil zu verrechnen.

In dieser Projektphase wurde getestet, wie sich die Materialeigenschaften von wiederholt hergestellten Prüfkörpern auf Basis der Vorzugsrezepturen reproduzieren lassen. Der Fokus lag dabei auf der Gasdurchlässigkeit und der Witterungsbeständigkeit. Es wurden Vorarbeiten zur Prüfung der Gasdurchlässigkeit unter realitätsnahen Bedingungen und zur Applikation der Abdeckung im Technikumsmaßstab geleistet. In diesem Rahmen wurde die Rezeptur hinsichtlich der Verarbeitbarkeit weiter optimiert. Der Verzögerer wird in der wässrigen Phase gelöst und sein Gehalt gleichzeitig reduziert. Zusätzlich werden die Cellulosefasern in die ölige Phase gegeben, um das Sedimentieren der Fasern gegenüber der wässrigen Lösung zu verzögern. Rezepturvariante A.364, dargestellt in Tabelle 7, ist das Ergebnis der Weiterentwicklung des Materials. Außerdem wurde eine Variante zusammengestellt, bei der das Sonnenblumenöl durch kostengünstigeres Glycerin als Basis für Phase A ersetzt wird (Variante A.351) [17].

Tabelle 7: Optimierte Rezeptur A.364 nach EMBERGER und REMMELE (2015) [17]

Komponente	Bestandteil	pgr	Masseanteil in %	Eigenschaft
B	Latex	100	11,1	Bindemittel
	Wasser	500	55,9	Lösemittel
	Natriumbenzoat	5	0,6	Konservierungsmittel
	Natriumphosphat	2	0,2	Verzögerer
A	Sonnenblumenöl	250	27,9	Weichmacher
	BC 200	15	1,7	Füllstoff
	Natriumalginat	10	1,1	Gelierzusatz
	Calciumsulfat	12	1,4	Gelierzusatz

3.8 Verfahren zur Aufbringung flüssiger Zwei-Komponenten-Materialien

Bereits in vorangegangenen Arbeiten von UHL et al. (2011) [51] werden verschiedene Verfahren zur Mischung und Applikation beschrieben und getestet. Für die Aufbringung von Zwei-Komponenten-Lacken gibt es bereits einige Applikationsmodelle mit individuell einstellbaren Mischungsverhältnissen. Das Lackiergerät Xtreme™ Mix der Firma GRACO N.V., wie es in Abbildung 5 zu sehen ist, wurde bereits mit der neuartigen Silageabdeckung getestet. Die Komponenten werden mit Kolbenpumpen aus zwei separaten Vorratsbehältern gefördert. Das Mischungsverhältnis ist hier beliebig von 0,1:1 bis 10,0:1 einstellbar. Die Komponenten werden dabei mit einem Fördervolumen von 0,95 l/min bis 11,4 l/min gefördert. Die Zerstäubung des Materials an der Spritzpistole erfolgt ohne zusätzliche Druckluftzufuhr allein durch den Förderdruck. Es handelt sich somit um ein „Airless-Spritzgerät“. Das Gerät kann zur Reinigung mit einer Lösung gespült werden [25].

Die Spritzversuche zeigten ein sehr gleichmäßiges Sprühbild und eine gute Dosiergenauigkeit. Zudem ist die Handhabung des Geräts sehr bedienerfreundlich. Jedoch ist das Gerät sehr empfindlich gegenüber Feststoffteilchen im Material und der hohe Luftdruckbedarf stellt für die Praxis ein Problem dar, da die benötigte Druckluftmenge nicht durch eine konventionelle Luftdruckanlage, wie sie auf modernen Schleppern zu finden ist, bereitgestellt werden kann [51].



Abbildung 5: Applikation der Silageabdeckung mit dem Zweikomponenten-Lackiergerät Xtreme™ Mix

Eine Applikationstechnik aus dem Bauwesen wurde in der vorangegangenen Projektphase ebenfalls getestet. Es handelt sich hierbei um ein aus Einzelgeräten kombiniertes Applikationsgerät, bestehend aus Mörtelpumpen (Strobot 406 S) mit je einem Vorratsbehälter und Exzentrerschneckenpumpen zur Förderung der zwei Komponenten. Als Auftragsgerät wurde ein Feinputzspritzgerät mit Statikmischereinsatz verwendet. Abbildung 6 zeigt die wesentlichen Bauteile dieses Prototyps. Bei den Applikationstests konnten die Dosiergenauigkeit und somit das angestrebte Mischungsverhältnis der beiden Komponenten nicht erreicht werden (1:0,99 anstatt 1:1,26). In den Schneckenpumpen entwickelten sich in der wässrigen Latexkomponente Koagulate aufgrund hoher Scherkräfte in den Pumpen. Jedoch war die Förderleistung, vor allem der sehr zähen Ölkomponente, gut. Auch das Mischergebnis und der Energieverbrauch waren zufriedenstellend. Die Anschaffungskosten sind geringer als für das Lackiergerät [51].



Abbildung 6: Applikationsgerät, bestehend aus zwei „Strobot 406 S“-Pumpen (links), Zusammenleitung der zwei Komponenten (Mitte) und Feinputzspritzgerät mit Statikmischereinsatz (rechts)

4 Material und Methodik

Die Anforderungen an eine Silageabdeckung sind sehr vielfältig. Damit die Silageabdeckung weiterentwickelt werden und Praxisreife erreichen kann, müssen die Anforderungen und die daraus resultierenden Materialeigenschaften möglichst umfangreich analysiert werden. Tabelle 8 veranschaulicht, in welchem Rahmen die Materialeigenschaften für ein praxisreifes Produkt untersucht werden können.

Wesentliche Eigenschaften, beispielsweise Gasdurchlässigkeit oder Reißfestigkeit des Materials, können mittels Laborversuchen getestet werden. Doch können hier Einflussfaktoren, wie die UV-Stabilität und der Einfluss der Witterung, auch extremer Wetterlagen, nicht ausreichend simuliert werden. Hierfür müssen Tests im Freien durchgeführt werden. Die Versuche im Freien untergliedern sich in drei Bereiche. Mit Lagerungsversuchen von Prüfkörpern im Freien können deren UV-Stabilität, Witterungsbeständigkeit, Langlebigkeit und Schimmelresistenz untersucht und im Anschluss weitere Materialprüfungen im Labor zur Zugfestigkeits- und Gasdurchlässigkeit durchgeführt werden. Mit Gärglasversuchen wird unter anderem der Einfluss der Silage auf das Material getestet. Die Gärgläser werden ebenfalls im Freien gelagert und decken, wie Tabelle 8 zeigt, bereits einen Großteil der benötigten Eigenschaften ab. Jedoch ist hier z. B. die Haftung des Materials an der Silowand nur eingeschränkt messbar. Die Versuche mit Miniatursilos geben bereits genauere Hinweise auf eine mögliche Praxisreife. Ziel dieser noch näher an die Praxis angelehnten Versuche ist es, möglichst viele der erforderlichen Eigenschaften gleichzeitig und in deren Abhängigkeit zu testen.

Tabelle 8: Versuchsmatrix zur Überprüfung der Materialeigenschaften der neuartigen Silageabdeckung

Materialeigenschaft	Labor	Versuche im Freien		
		Lagerung Prüfkörper	Miniatur- silos	Gärgläser
Gasdurchlässigkeit	+	o	o/+	o/+
Reißfestigkeit und Elastizität	+	o	+	+
Säureresistenz	+	o	+	+
Temperaturbeständigkeit	+	o/+	+	+
Quellverhalten	+	o	+	+
Schrumpfungseigung	+	o	+	+
Materialverträglichkeit	+	o	+	+
UV-Stabilität	o	+	+	+
Haftung an der Silowand	o	o	+	o/+
Schimmelresistenz	o	+	+	+
Abwehr von Tierfraß (z. B. Vögel)	o	o	+	o
Witterungsbeständigkeit	o	+	+	+
Langlebigkeit	o	o/+	+	+
Biologische Abbaubarkeit	+	o	o	o
Verfütterbarkeit	+	o	o	o

+ = für die Prüfung geeignet, o/+ = mit Einschränkung geeignet, o = nicht geeignet

Die Weiterentwicklung des Materials zur Praxistauglichkeit durchläuft mehrere aufeinander aufbauende Entwicklungsschleifen, die bei einer negativen Bewertung des Materials immer wieder eine weitere Optimierung der vorhandenen Rezepturen veranlassen. Die drei Schleifen bauen aufeinander auf und haben einen aufsteigenden Zeithorizont. Die Materialprüfungen im Labor dauern wenige Wochen, während die Materialprüfung mit Gärgläsern bereits einige Monate beansprucht. Die Praxistests mit Miniatursilos schließlich sind mit über einem Jahr veranschlagt. Dementsprechend kann auf diese nachgestellten Entwicklungsschleifen nur mit Verzögerung reagiert werden. Abbildung 7 veranschaulicht diesen komplexen Prozess in Form eines Entscheidungsbaums.

Der erste Optimierungskreislauf wird im Labormaßstab durchgeführt. Grundlage sind qualitäts- und verfahrenstechnische Untersuchungen des Materials. Hierbei werden die einzelnen Materialeigenschaften separat voneinander unter Laborbedingungen in Anlehnung an bestehende Normen geprüft. Die Prüfmethode und die Herstellung der Prüfkörper werden dabei ebenfalls überarbeitet und angepasst. Bei dieser Art der Materialtests wird jeweils eine Materialeigenschaft isoliert und unabhängig von anderen Materialeigenschaften unter spezifischen Einflüssen getestet.

Um das Material weiter in Richtung Praxisreife zu entwickeln, findet eine Optimierung der Rezepturbestandteile und -anteile auf Grundlage von Praxistests in zwei Schritten statt. In einem Rezepturscreening werden vielversprechende Mischungen zur Abdeckung von Silage in Gärgläsern mit einem Volumen von einem Liter getestet, dabei wird im Gegensatz zu vorhergehenden Projektphasen das flüssige Material direkt auf das Substrat aufgebracht und drei Monate im Freien gelagert. Parallel dazu werden Prüfkörper jeweils drei Monate im Freien bewittert und weiter im Labor untersucht. Die besten Rezepturen werden in einem nächsten Schritt mit Miniatursilos über ein Jahr getestet. Aufgebracht wird das Material mit Applikationsgeräten, die in Unterkapitel 4.3 beschrieben werden. Hier werden möglichst viele Eigenschaften, die das Material später in der Praxisanwendung charakterisieren, über ein Jahr hinweg geprüft. Auch gewonnene Erkenntnisse durch die Applikation im Scale-up veranlassen Rezepturanpassungen, die wieder zu Materialprüfungen im Labor führen. So ist die zu entwickelnde Applikationstechnik dem Material anzupassen, doch kann Problemen in der Applikation auch durch eine Rezepturoptimierung entgegengewirkt werden.

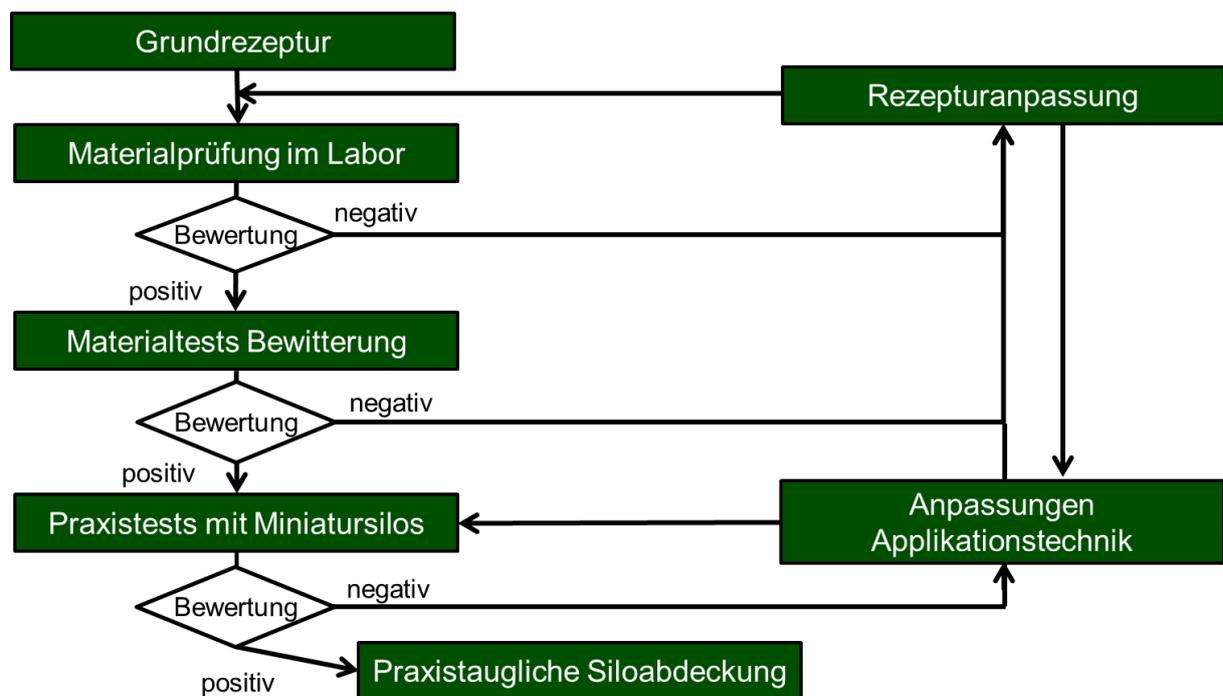


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Entwicklungsprozesses der Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen

4.1 Bestandteile der Rezeptur

Aufbauend auf den vorangegangenen Forschungsarbeiten wurden weitere Rezepturbestandteile getestet. Primäres Ziel der Rezepturanpassungen ist es, die Schrumpfungseigenschaft des Materials zu verringern. Hierzu werden alternative Füllstoffe, Geliermittel und Feuchthaltemittel untersucht. Im Folgenden erfolgt eine kurze Beschreibung der getesteten Substanzen, die neu in die Rezeptur eingebracht werden.

Pektin

Als alternatives Geliermittel zu Natriumalginat wird ein niederverestertes amidiertes Pektin getestet (Pektin Amid AF 020). Es wird aus Äpfeln gewonnen und findet Verwendung bei der Herstellung brennwertreduzierter Konfitüren. Zudem benötigt es zum Gelieren im Gegensatz zu anderen Pektinarten kein stark saures Milieu. Des Weiteren zeichnet es sich durch ein hohes Wasserbindungsvermögen und eine geringe Synäreseneigung aus, d. h. eine geringe Neigung, gebundenes Wasser im Gel wieder abzugeben (Phasentrennung). Darüber hinaus benötigt es zur Gelierung keine Erwärmung. Wie bei Alginat ist die Anwesenheit von Calciumionen zur Gelierung erforderlich. Hier reichen jedoch geringe Mengen aus, weshalb auch der Anteil an Calciumsulfat in der Rezeptur reduziert werden kann. Als Reaktionsverzögerer der Gelierung können Chloride, wie beispielsweise Natriumchlorid, eingesetzt werden [27].

Glycerin

Glycerin wurde bereits in der vorhergehenden Projektphase in Masseanteilen bis zu 2 % als Emulgator und Weichmacher verwendet. Auch kann es aus Gründen des Frostschutzes zugesetzt werden. Als preiswertes Futtermittel wird es in den neueren Rezepturen mit höheren Masseanteilen bis zu 40 % als Alternative zu Pflanzenöl in Phase A getestet. Das Glycerin wird zudem auch der wässrigen Phase B hinzugegeben, um die Viskosität zu erhöhen und so die Viskositäten der beiden Komponenten anzugleichen [1]. Das Glycerin soll die Silageabdeckung auch bei Minustemperaturen elastisch halten und dient auch als Frostschutz.

Natriumchlorid

Natriumchlorid wird in Zusammenhang mit Pektin als Reaktionsverzögerer eingesetzt. Gleichzeitig führt es bei höheren Konzentrationen zu einer schlagartigen Vernetzung der Kautschukdispersion. Diese Reaktion überlagert das Gelieren und das preiswerte Salz kann so, je nach Konzentration, für die Einstellung der Topfzeit genutzt werden. Zudem wirken höhere Konzentrationen ab 2 % unterstützend bei der Konservierung. In der Lebensmitteltechnologie wird Kochsalz u. a. zur Konservierung von Fettemulsionen verwendet [31].

Aktivkohle

Der hochporöse Kohlenstoff soll als funktioneller Füllstoff verwendet werden. In der Latexindustrie wird Kohlepulver als UV-Schutz eingesetzt. Die UV-stabilisierende Wirkung ist auch bei der Silageabdeckung erstrebenswert. Zudem können durch die Aktivkohle unangenehme Gerüche adsorbiert werden, es ist futtermitteltechnisch unbedenklich und wird in Form von Kohletabletten sogar zum Entgiften von Tieren eingesetzt. Die Aktivkohle kann aus nachwachsenden Rohstoffen, wie Holz oder Olivenkerne, hergestellt werden. Schon in geringen Masseanteilen färbt das Aktivkohlepulver die Abdeckung schwarz. Die schwarzgefärbte Abdeckung erwärmt sich bei Sonneneinstrahlung stärker als helle Abdeckungen. Doch hat die farbbedingte Erwärmung einer Siloabdeckung keine qualitätsmindernde Wirkung auf die Silage [34]. Aktivkohle ist nicht quellfähig, daher wird hier ein positiver Effekt auf die Schrumpfungseigenschaften im Vergleich zu Cellulosefasern erwartet.

Aerosil

380F

Aerosil 380F ist eine hydrophile pyrogene Kieselsäure und soll als alternativer Füllstoff zu den Cellulosefasern dienen. Sie wird nach HACCP-Richtlinien erstellt und ist somit lebensmitteltechnisch unbedenklich. Sie hat adsorbierende Eigenschaften und setzt sich in Flüssigkeiten nur langsam ab.

Chitosan

Chitosan mittlerer molarer Masse wird als Ölbinder getestet. Es soll die Klebrigkeit der Abdeckung vermindern. Zusätzlich kann Chitosan im sauren Milieu als Biozid eingesetzt werden. Für biozide Eigenschaften sollen niedermolekulare Chitosane besser geeignet sein.

Tannine

Tannine sind eine Gruppe sekundärer Pflanzenstoffe und werden als pflanzliche Gerbstoffe bezeichnet. Catechin, ein nicht hydrolysierbares Tannin, zeichnet sich beispielsweise durch seine antimikrobielle Wirkung aus. Als Rezepturbestandteil wird Tanninsäure, eine sehr schwache Säure, verwendet, um den pH-Wert in der Abdeckmasse zu senken und somit für Konservierungsmittel und die Gelierung bessere Bedingungen zu schaffen bzw. sie zu unterstützen [4].

D-Sorbitol, Sorbit

Sorbit wird aufgrund seiner hygroskopischen Eigenschaften als Feuchthaltemittel verwendet. Es wird in der Verordnung (EU) Nr. 1129/2011 der Kommission vom 11. November 2011 als Lebensmittelzusatzstoff geführt (E 420) [19].

Superabsorber

Hierbei handelt es sich um ein Copolymer aus Acrylsäure und Natriumacrylat. Es kann das bis zu 200-Fache seiner Eigenmasse an Wasser binden und findet Verwendung in der Windelherstellung. Durch die Verwendung von Superabsorber wird eine bessere und stärkere Bindung des verwendeten Wassers in der Abdeckung angestrebt.

4.2 Optimierung des Abdeckmaterials im Labor

Zunächst werden Eigenschaften des Abdeckmaterials analysiert und gezielt verändert. Dabei werden neue Rezepturbestandteile getestet und aufeinander abgestimmt. Die Zusammensetzung der im Bericht vorkommenden Rezepturen kann den Anhängen 1 und 2 entnommen werden. Es werden stets die Handhabung der zwei Komponenten und das fertig ausgehärtete Material bewertet. Sind die Änderungen aufgrund Optik und Haptik vielversprechend, so werden diese Rezepturen im größeren Maßstab und Prüfkörper für Analysen hergestellt. Die Prüfkörper sollen möglichst homogen und von gleicher Dicke sein, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Daher wurde zur Herstellung der Prüfkörper ein spezieller Rahmen mit den Abmessungen 37 x 71 cm entwickelt, der es ermöglicht, das Material nach dem Aufgießen mit einem Raketel eben abziehen, sodass das Material eine einheitliche Schichtdicke von 8 mm aufweist. Nach einer Trocknungszeit von mindestens zehn Tagen werden aus dem Material Prüfkörper für Gasdurchläs-

sigkeitsprüfung, Zugprüfung, Wasseraufnahme und Temperaturbeständigkeit gestanz. Außerdem werden ausgehärtete Materialien aus dem Rahmen zur Bewitterung im Freien verwendet. Je nach Ausprägung des Schrumpfungsverhaltens der getesteten Rezepturvariante beim Aushärten variiert die verbleibende Materialdicke der Prüfkörper zwischen 4 mm und 8 mm. Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit der Abdeckvarianten nicht zu vermeiden. Zudem ist es ein Optimierungsziel, die Schrumpfungseigung der Abdeckung zu minimieren.

Im Labor werden vor und parallel zu den Praxistests verschiedene analytische Verfahren herangezogen, um die Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen zu testen. Da die Abdeckung in der Praxis eine Vielzahl an Materialanforderungen erfüllen muss, wird nach Möglichkeit jede Anforderung einzeln betrachtet, um anschließend Rückschlüsse auf die Tauglichkeit des Materials ziehen zu können und gezielt Eigenschaften zu verbessern.

Geeignete Prüfverfahren müssen dem entwickelten Material angepasst werden, da die zur Prüfung und Beurteilung von Silofolien gängigen normierten Methoden für weichelastisches Material mit einer Schichtdicke von mehreren Millimetern nicht abgewandelt anwendbar sind [11] [13] [41]. Für jede vielversprechende Variante des Abdeckmaterials werden bis zu zehn verschiedene Analysen durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden.

4.2.1 Gasdurchlässigkeitsprüfung

In der vorhergehenden Projektphase wurde ein spezielles Prüfverfahren zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit in Anlehnung an DIN 53380 Teil 2 [13] für das elastische und sehr weiche Abdeckmaterial entwickelt. SIMON et al. (2015) [47] beschreiben den ausführlichen Aufbau der Apparatur und die Durchführung der Gasdurchlässigkeitsprüfung. Daher werden nachfolgend nur kurz Apparatur und Vorgehen erklärt. Für die Messungen stehen zwei baugleiche Apparaturen zur Verfügung.

Die Apparaturen bestehen aus einem abgeschlossenen Zwei-Kammer-System, in dessen Mitte ein runder Prüfkörper mit einem Durchmesser von 10 cm eingelegt wird. Nach dem Einspannen des Prüfkörpers wird die gesamte Apparatur evakuiert. Anschließend wird die obere Kammer mit Sauerstoff (Volumenstrom 0,1 l/min) gespült. Die obere Kammer hat nun Umgebungsdruck (ca. 980 mbar), während in der unteren Kammer anfänglich noch ein Absolutdruck von 15 mbar bis 20 mbar herrscht. In Abhängigkeit von der Gasdurchlässigkeit des Prüfkörpers permeiert Sauerstoff durch den Prüfkörper in die untere Kammer und führt dort zu einem Druckanstieg. Durch die Geschwindigkeit des Druckanstiegs lässt sich auf die Gasdurchlässigkeit des Prüfkörpers schließen.

Neben der neuartigen Siloabdeckung wurde auch die Gasdurchlässigkeit herkömmlicher Silofolie gemessen, um Vergleiche ziehen zu können und die Funktionalität des Messaufbaus zu prüfen. Die in Apparatur 1 ermittelte Gasdurchlässigkeit der Referenzsilofolie beträgt $917,5 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar}$ und die in Apparatur 2 bestimmte $943,9 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \text{ d bar}$.

Mit einer Abweichung von $\pm 2\%$ um den Mittelwert kann von einer guten Vergleichbarkeit der Apparaturen ausgegangen werden.

Im Vergleich zu dem Verfahren der DLG zum Test der Silofolien wird bei diesem Prüfverfahren mit einem höheren Druckunterschied zwischen beiden Kammern gemessen. Anstatt 0,2 bar herrscht hier der in DIN 53380 vorgegebene Druckunterschied von ca. 1 bar. Aufgrund der fünffach höheren Druckdifferenz sind die Ergebnisse zur Gasdurchlässigkeit ebenfalls um den Faktor fünf höher als die in DLG-Prüfberichten dokumentierten Werte.

Das unterschiedliche Schrumpfungsverhalten der Siloabdeckungsvarianten bedingt variable Schichtdicken der Prüfkörper, die das Ergebnis der Gasdurchlässigkeit beeinflussen. Daher wird der von der Schichtdicke unabhängige Permeationskoeffizient zum Vergleich der unterschiedlichen Rezepturvarianten herangezogen. Er berechnet sich nach der Formel (4.1) aus der Gasdurchlässigkeit und Materialstärke des Prüfkörpers.

$$P = q \cdot h \quad (4.1)$$

Wobei:

P = Permeationskoeffizient

q = Gasdurchlässigkeit

h = Materialstärke

Zum Vergleich der Messwerte werden statistische Methoden, wie der Tukey- und der Levene-Test durchgeführt. Die Tests geben an, ob sich die Mittelwerte bzw. die Varianzen der Messungen verschiedener Rezepturen signifikant unterscheiden.

4.2.2 Zugfestigkeit – mechanische Stabilität

Die Untersuchung der Zugeigenschaften ist ebenfalls bei SIMON et al. (2015) beschrieben [47]. Die Prüfung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 527-3 mit einer Universalprüfmaschine (smarTens 010, Karg Industrietechnik, Krailling, Deutschland) [11].

Bestimmt werden die Reißfestigkeit (auch Bruchspannung) σ_b , d. h. der maximale Krafteintrag bis zum Zerreißen der Probe, und die Reißdehnung (auch Bruchdehnung) ε_b , also die Längenausdehnung des Materials bei angelegter Zugkraft. Beides wird in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm wie in Abbildung 8 dargestellt.

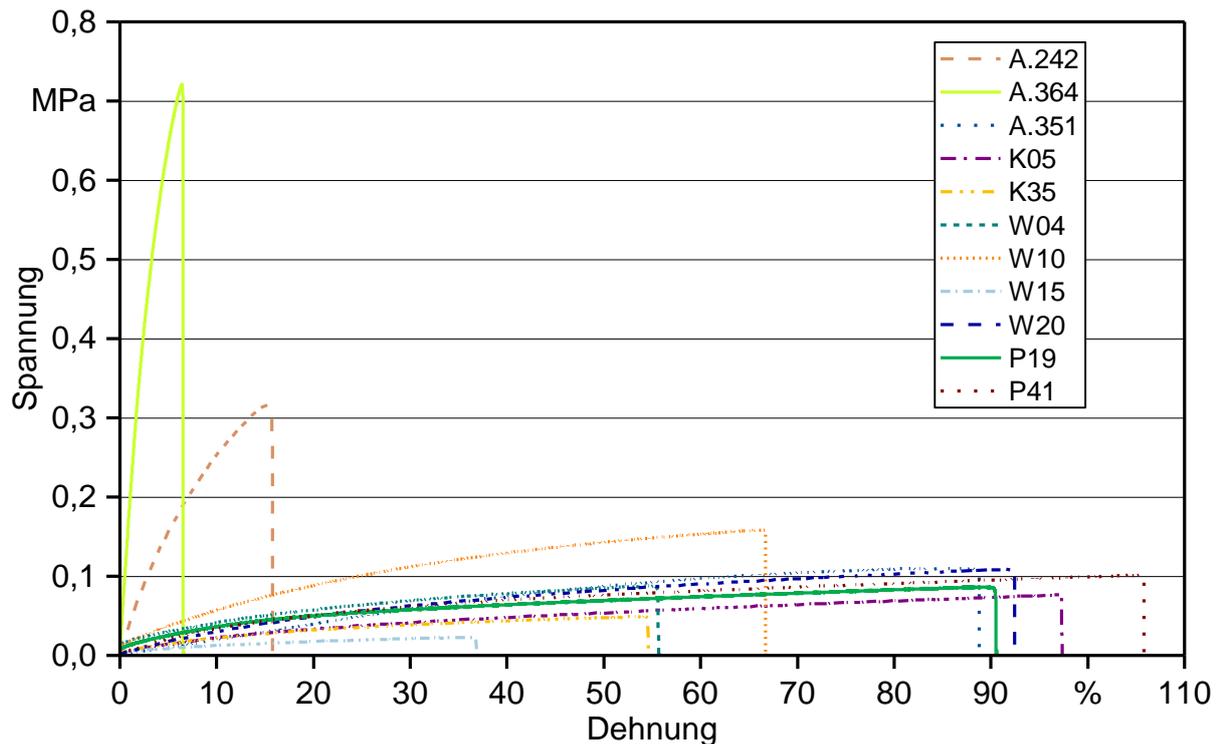


Abbildung 8: Spannungs-Dehnungs-Diagramm unterschiedlicher Rezepturvarianten

Zur Bestimmung dieser Kenngrößen werden die Prüfkörper, wie in Abbildung 9 zu sehen, möglichst mittig und gerade in die Prüfmaschine eingespannt und mit konstanter Geschwindigkeit (1 mm/s) bis zum Materialversagen gedehnt. In repräsentativen Zugversuchen werden drei bis elf Probekörper einer Rezeptur gemessen, es handelt sich hierbei um echte Wiederholungen. Die Standardabweichungen der Kenngrößen werden dabei direkt von der unterschiedlichen Beschaffenheit der Werkstoffe beeinflusst und dürfen daher nicht vernachlässigt werden. Für eine gute Reproduzierbarkeit der Messungen sind daher mindestens drei, idealerweise fünf Wiederholungen notwendig, die möglichst weniger als 15 % voneinander abweichen. Die genauen Abmessungen der Prüfkörper werden vor jeder Messung mit einer Mikrometerschraube mit einer Genauigkeit von 0,01 mm bestimmt, wie in SIMON et al. (2015) beschrieben.



Abbildung 9: *Eingespannter Prüfkörper im Zugprüfgerät*

4.2.3 Säurebeständigkeit

Eine Abdeckung für Silage muss eine ausreichende Säurebeständigkeit aufweisen, da sich bei einer guten Silierung schon nach wenigen Tagen ein pH-Wert von ca. pH 4 einstellt und über Monate hinweg die Silage in diesem sauren Milieu verbleibt. Daher werden die verschiedenen Rezepturen in Anlehnung an das DLG-Prüfverfahren für Silofolien auf Säurebeständigkeit getestet. Dazu werden Prüfkörper für die Zugfestigkeits- und Gasdurchlässigkeitsprüfung zehn Tage in einem Säurebad gelagert. Das Säurebad beinhaltet eine der Gärsäure nachempfundene Mischsäure, bestehend aus 3 % Milchsäure, 1,5 % Propionsäure und 0,5 % Buttersäure. Täglich werden die Prüfkörper im Bad gewendet, damit eine gleichmäßige Beanspruchung des Materials gewährleistet ist. Abbildung 10 zeigt die Prüfkörper vor und nach der Säurelagerung. Nach einer Trocknungszeit von mindestens zehn Tagen werden Gasdurchlässigkeitsprüfungen und Zugversuche durchgeführt. Die im Säurebad behandelten Prüfkörper werden durch ein der Bezeichnung der Rezeptur nachgestelltes „S“ gekennzeichnet. Nach DLG-SignumTest für Silofolien soll sich die Reißfestigkeit des Materials nicht mehr als 10 % und die Bruchdehnung nicht mehr als 15 % verschlechtern [9] [41] [45].

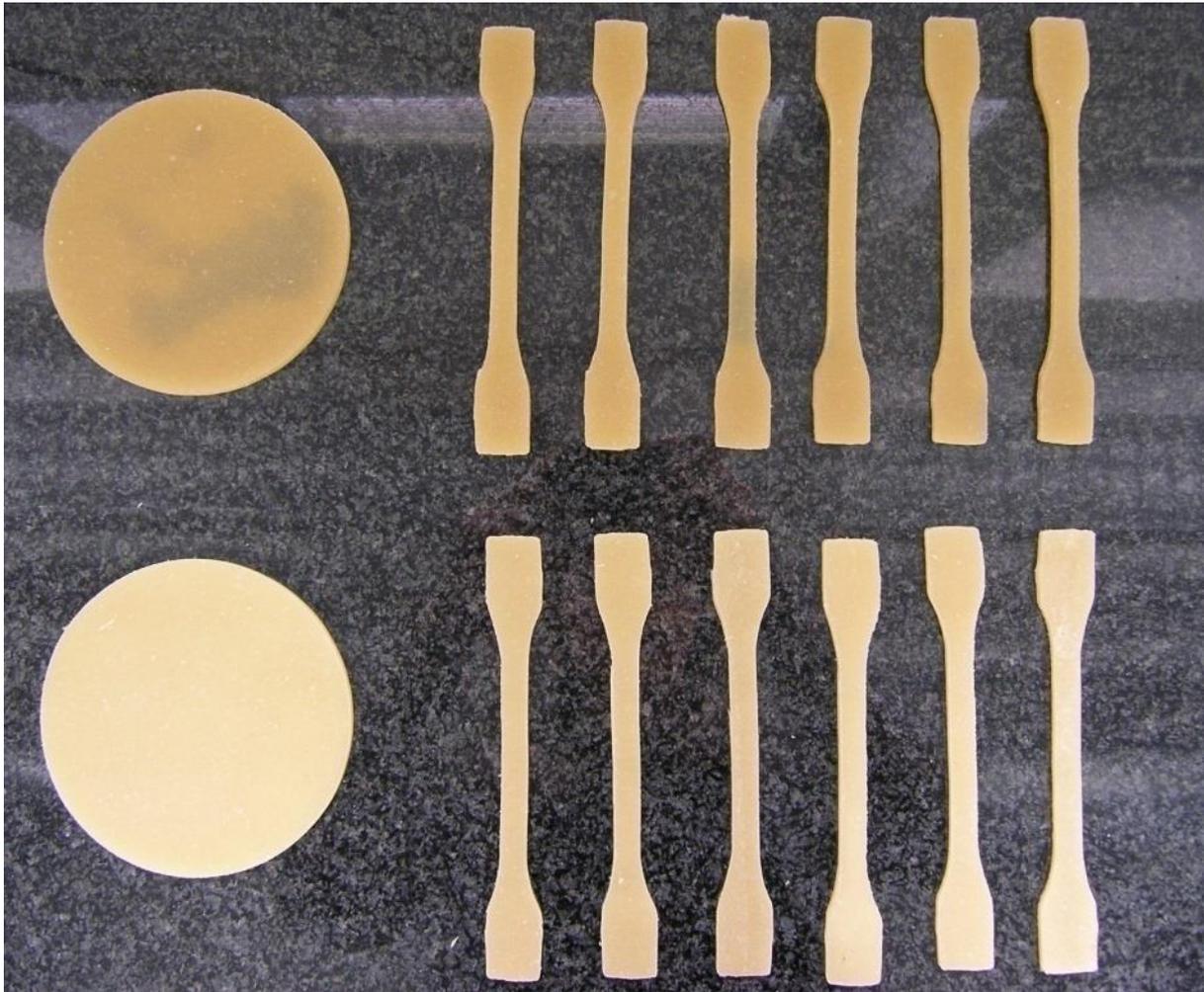


Abbildung 10: Prüfkörper für Gasdurchlässigkeits- (links) und Zugprüfung (rechts) vor (unten) und nach (oben) der Säurelagerung

4.2.4 Schrumpfungsneigung

In vorangegangenen Arbeiten traten auch bei den weiterentwickelten Rezepturen der letzten Projektphase immer wieder Probleme mit stark geschrumpften Prüfkörpern auf. Daher werden zusätzlich Untersuchungen zum Schrumpfungsverhalten bei Raumtemperatur im Labor durchgeführt. Dazu wird der Masseverlust von insgesamt 80 Rezepturvarianten nach dem Ausgießen in Petrischalen mit einem Durchmesser von 17 cm über mindestens zwei Wochen hinweg gravimetrisch bestimmt. Die Ergebnisse werden mit den Rezepturbestandteilen verglichen, um mögliche Ursachen für das Schrumpfungsverhalten der Silageabdeckung zu identifizieren und zu minimieren.

Um abschätzen zu können, inwieweit der Masseverlust auch einen Volumen-, bzw. Oberflächenschwund erzeugt, werden auch Maßänderungen über drei Wochen hinweg erfasst. Dazu wird das Material, sobald es ausgehärtet ist, vom Glasrand der Petrischalen gelöst, damit es sich gegebenenfalls zusammenziehen kann. Aufgrund der unterschiedlichen Topfzeiten der verschiedenen Rezepturen, der unterschiedlichen Haftung und Klebrigkeit des Materials am Glasboden der Petrischale sowie der geringfügig unter-

schiedlichen Materialdicke der Prüfkörper kann diese Untersuchung nur eine Abschätzung für das tatsächliche Schrumpfungsverhalten sein. Die runden Prüfkörper aus den Petrischalen werden zur Messung des Durchmessers auf eine Schablone mit Millimetergitter gelegt.

4.2.5 Wasseraufnahme und Quellverhalten

Mit einem Prüfverfahren in Anlehnung an DIN EN ISO 62 [14] wird die Wasseraufnahme von Siloabdeckungsmaterial aus nachwachsenden Rohstoffen bei Raumtemperatur (23 °C) geprüft. Für die Untersuchung wird vollständig ausgehärtetes Abdeckmaterial verwendet (Trocknung der Prüfkörper mindestens zehn Tage bei Raumtemperatur) und jeweils Dreifachwerte ermittelt.

Für die Prüfung werden mit einem speziell angefertigten Werkzeug rechteckige Prüfkörper ausgestochen (60 mm × 35 mm). Die Dicke bzw. Höhe der Prüfkörper beträgt je nach Schrumpfungsneigung des Materials 5 mm bis 8 mm. Die genauen Abmessungen werden mit einem Messschieber ($\pm 0,1$ mm) und die Masse vor Versuchsbeginn auf einer Oberschalenwaage ($\pm 0,01$ g) bestimmt. Durch die variablen Materialdicken unterscheidet sich das Volumen der Prüfkörper, was einen möglichen Einfluss auf die Wasseraufnahme hat. Daher sind bei diesem Prüfverfahren direkte Vergleiche bei den ermittelten Ergebnissen nur bedingt möglich. Die Wasserabsorption des Materials wird zuerst gravimetrisch bestimmt und anschließend die Volumenänderung, also das Quellverhalten, ermittelt.

Die Prüfkörper werden, wie Abbildung 11 zeigt, in mit vollentsalztem Wasser (VE-Wasser) gefüllten Bechergläsern bei Raumtemperatur gelagert, sodass das Material zur Gänze mit Wasser bedeckt ist. Die Bechergläser werden mit Uhrgläsern abgedeckt und regelmäßig der Füllstand des Wassers im Glas kontrolliert und bei Bedarf nachgefüllt. Nach verschiedenen Lagerzeiten (24 h, 48 h, 72 h, 7 d) werden die Prüfkörper zurückgewogen und deren Länge, Höhe und Breite bestimmt. Dazu werden die Prüfkörper mit einer Pinzette entnommen und mit leichtem Druck abgetrocknet. Zu jedem Messzeitpunkt wird auch der pH-Wert des Wassers (mittels pH-Meter) gemessen und farbliche Änderungen und Trübungen dokumentiert.



Abbildung 11: Lagerung von Prüfkörpern verschiedener Rezepturen in Wasser

Berechnet werden die prozentuale Volumenzunahme und die prozentuale Massenzunahme. Beobachtungen bezüglich wasserlöslicher Bestandteile werden dokumentiert.

Die relative Masseänderung x_m errechnet sich nach der Formel (4.2) mit der Masse des Prüfkörpers vor (m_1) und nach (m_2) dem Eintauchen. Die relative Volumenänderung x_V wird analog zu Formel (4.2) mit dem Volumen vor (V_1) und nach (V_2) dem Eintauchen bestimmt.

$$x_m = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \quad (4.2)$$

Wobei:

x_m = relative Masseänderung

m_1 = Masse vor Eintauchen in Wasser

m_2 = Masse nach Eintauchen in Wasser

$$x_V = \frac{(V_2 - V_1)}{V_1} \quad (4.3)$$

Wobei:

x_V = relative Volumenänderung

V_1 = Volumen vor Eintauchen in Wasser

V_2 = Volumen nach Eintauchen in Wasser

4.2.6 Temperaturbeständigkeit

Da die Siloabdeckung in den Sommermonaten bei direkter Sonneneinstrahlung hohen Temperaturen standhalten muss, wird vorab die Temperaturbeständigkeit bei 80 °C in Anlehnung an die DLG-Prüfmethode [41] zur Untersuchung von Silofolien getestet. Die Prüfung wird abweichend vom DLG-Prüfverfahren von einer Stunde auf eine Woche ausgedehnt, um hier bessere Abschätzungen hinsichtlich Witterungsbeständigkeit im Sommer unter extremen Bedingungen geben zu können.

Jeweils drei Prüfkörper werden mit einem Stanzwerkzeug in gleicher Weise wie zur Prüfung der Wasseraufnahme hergestellt und deren Masse und Volumen bestimmt. Die Prüfkörper werden bei 80 °C im Trockenschrank gelagert. Durch die hohe Temperatur werden die Prüfkörper zum Teil klebrig und Öl kann austreten. Daher werden die Testkörper auf zuvor tarierte Aluschälchen gelegt. Sie werden nach verschiedenen Lagerzeiten (0,5 h, 1 h, 24 h, 48 h, 72 h, 7 d) zurückgewogen und erneut vermessen. Anschließend werden die prozentuale Volumen- sowie die prozentuale Masseabnahme berechnet.

4.2.7 Verträglichkeit mit Siloanstrichen

Die Materialverträglichkeit der neuartigen Abdeckung mit gängigen Siloanstrichen ist ein Beurteilungskriterium für die spätere Praxistauglichkeit. Es werden verschiedene am Markt erhältliche Siloanstriche, wie in Abbildung 12 von links nach rechts zu sehen, untersucht:

- **Silo-quick 100:** Bitumen-Siloanstrich (Zill GmbH & Co. KG, Lauingen, Deutschland),
- **Silopox:** Zweikomponenten-Epoxi-Beschichtung (Knuchel Farben SA, Wiedlisbach, Schweiz),
- **IRSA Silodon Spezial:** Siloanstrich auf Polyurethanbasis (IRSA Lackfabrik Irmgard Sallinger GmbH, Memmingen, Deutschland),
- **Sandroplast Universal:** Anstrich auf modifizierter Acryl-Polymerbasis (Sandroplast SANDROCK GmbH, Wuppertal, Deutschland),
- **Silosil:** Siloanstrich auf Wasserglasbasis (Knuchel Farben SA, Wiedlisbach, Schweiz)

Dazu werden Betonplatten (30 cm × 30 cm) mit den Anstrichen behandelt. Auf jede Testfläche wird mithilfe eines 1 cm hohen Rahmens Abdeckungsmaterial aufgegossen. Das Material wird nach dem Aushärten regelmäßig begutachtet. Die ausgehärtete Abdeckung wird dazu etwas angehoben und Verfärbungen oder Schimmelbildung zwischen Siloanstrich und Abdeckmaterial sowie Ablösungen des Anstrichs vom Beton dokumentiert. Gelagert werden die Prüfkörper sechs Monate unter Dach, geschützt vor direkter Sonneneinstrahlung und Wettereinflüssen. Der Lagerraum ist jedoch nicht klimatisiert, so dass im Sommer Temperaturen um die 30 °C erreicht werden können.



Abbildung 12: Betonplatten mit verschiedenen Silanstrichen und aufgesetzten Rahmen zum Gießen des Abdeckmaterials

4.2.8 Witterungsbeständigkeit der Silageabdeckung

Konservierungsmitteltest

Zur Prüfung geeigneter Konservierungsmittel und deren Dosierung für eine ausreichende Witterungsbeständigkeit der Silageabdeckung werden Prüfkörper mit einem Durchmesser von 17 cm hergestellt und einer 14-monatigen Bewitterung im Freien ausgesetzt. Befestigt werden diese mit einem Nylonfaden auf einem mit einem Nylonnetz bespannten Rahmen. Die untere Seite der Prüfkörper wird, wie Abbildung 13 zeigt, nach oben gebogen, sodass Wasser bei Regen oder Tauwetter nicht abfließen kann und so eine Stauwässer simuliert wird, wie sie auch auf Silos auftreten kann. Stehendes Wasser kann Ausgangspunkt für Bakterienbefall oder Schimmel sein, die das Abdeckmaterial negativ beeinflussen. Das Stauwasser soll daher eine zusätzliche Beanspruchung sein, um die Wirksamkeit der Konservierungsmittel in der Abdeckung zu prüfen.

Der Prüfkörperrahmen wird nach Süden ausgerichtet und in einem 60°-Winkel zum Boden schräggestellt. Alle Prüflinge sind so in gleichem Maße der Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Damit eine mögliche Manipulation der Prüflinge durch Mensch und Tier ausgeschlossen wird, befindet sich der Versuchsaufbau in einem abgesperrten Schutzbereich, der mit einem Vogelnetz überspannt ist. Optisch wahrnehmbare Veränderungen werden fotografisch dokumentiert. Beginn der Bewitterung ist der 06.06.2016, mehrmals wöchentlich wird der Versuchsaufbau kontrolliert und dokumentiert.



Abbildung 13: Prüfkörper zur Prüfung der Witterungsbeständigkeit mit Möglichkeit zur Simulation von Staunässe im unteren Drittel des Prüfkörpers

Im vorangegangenen Forschungsvorhaben hat sich Natriumbenzoat als Konservierungsmittel bereits als geeignet herausgestellt [47]. In dieser Versuchsreihe werden nun verschiedene Masseanteile von Natriumbenzoat im Material getestet. Zusätzlich werden auch andere Konservierungsstrategien und Kombinationen von Konservierungsmitteln geprüft. Als Basisrezeptur dient Rezepturvariante P20, die mit verschiedenen Konservierungsmittelgehalten modifiziert wurde. Insgesamt werden 39 verschiedene Rezepturen mit unterschiedlichen Konservierungsmittelgehalten getestet (K01–K39). Als Vergleich dient eine Nullprobe ohne Konservierungsmittel (K00). Abbildung 14 zeigt die Anordnung der Prüfkörper auf dem Prüfkörperahmen. Von oben nach unten steigt der Gehalt an Konservierungsmittel in der Rezeptur an. Die genauen Rezepturzusammensetzungen sind dem Anhang zu entnehmen.

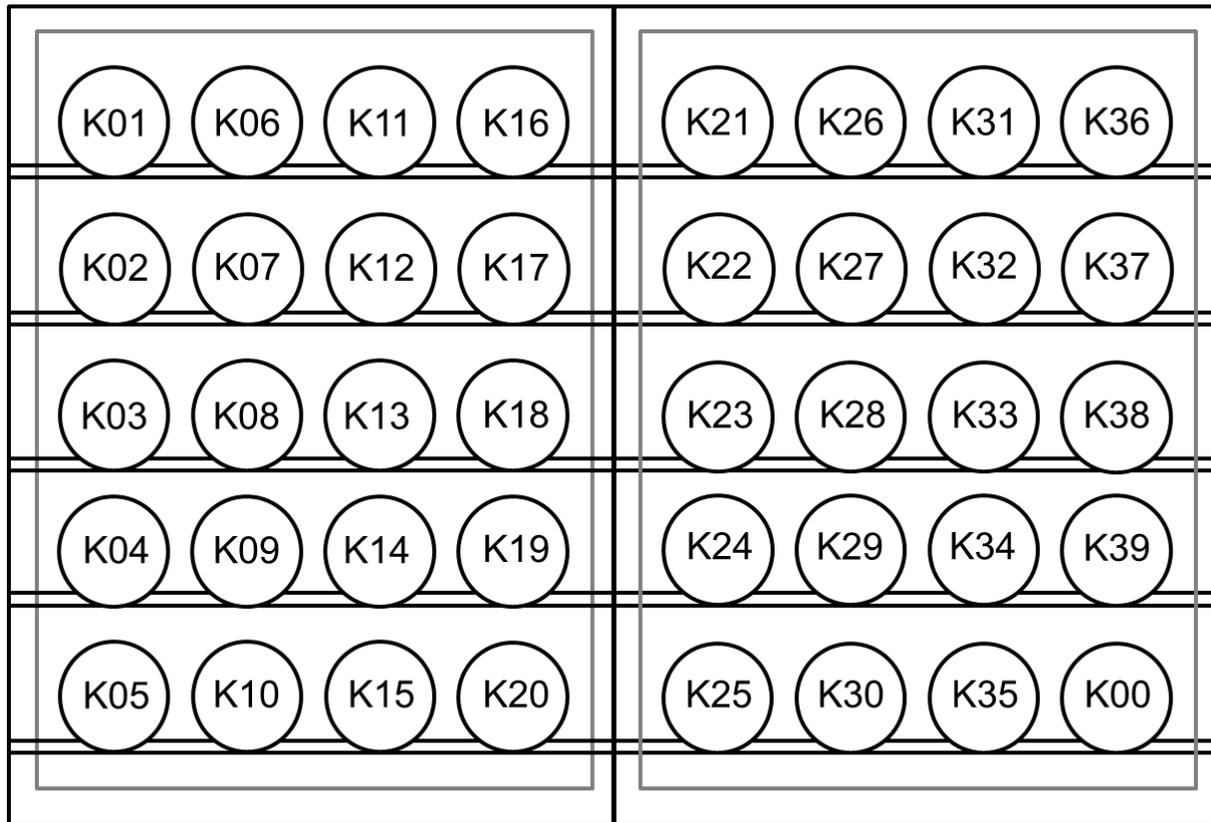


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Außenlagerung verschiedener Rezepturvarianten (K01–K39) mit Blindprobe (K00)

Nach der Bewitterung im Freien werden die Prüfkörper vom Rahmen entfernt und einzeln abfotografiert. Die Abdeckmaterialien sind durch die Bewitterung stark nachgedunkelt und es ist schwierig zu beurteilen, ob und in welchem Maße sich Schimmel an der Oberfläche gebildet hat. Daher werden die Prüfkörper von unten durchleuchtet und mit unterschiedlichen Belichtungen abfotografiert. So können befallene Stellen, die verbleibenden Schichtdicken und sonstige Materialveränderungen der Prüfkörper besser bewertet und miteinander verglichen werden. Es werden jeweils Vorder- und Rückseite der Prüfkörper fotografiert. Insgesamt werden 244 Fotos der 40 Prüfkörper miteinander verglichen und bewertet. Abbildung 15 zeigt den Effekt der Hinterleuchtung der Prüfkörper.

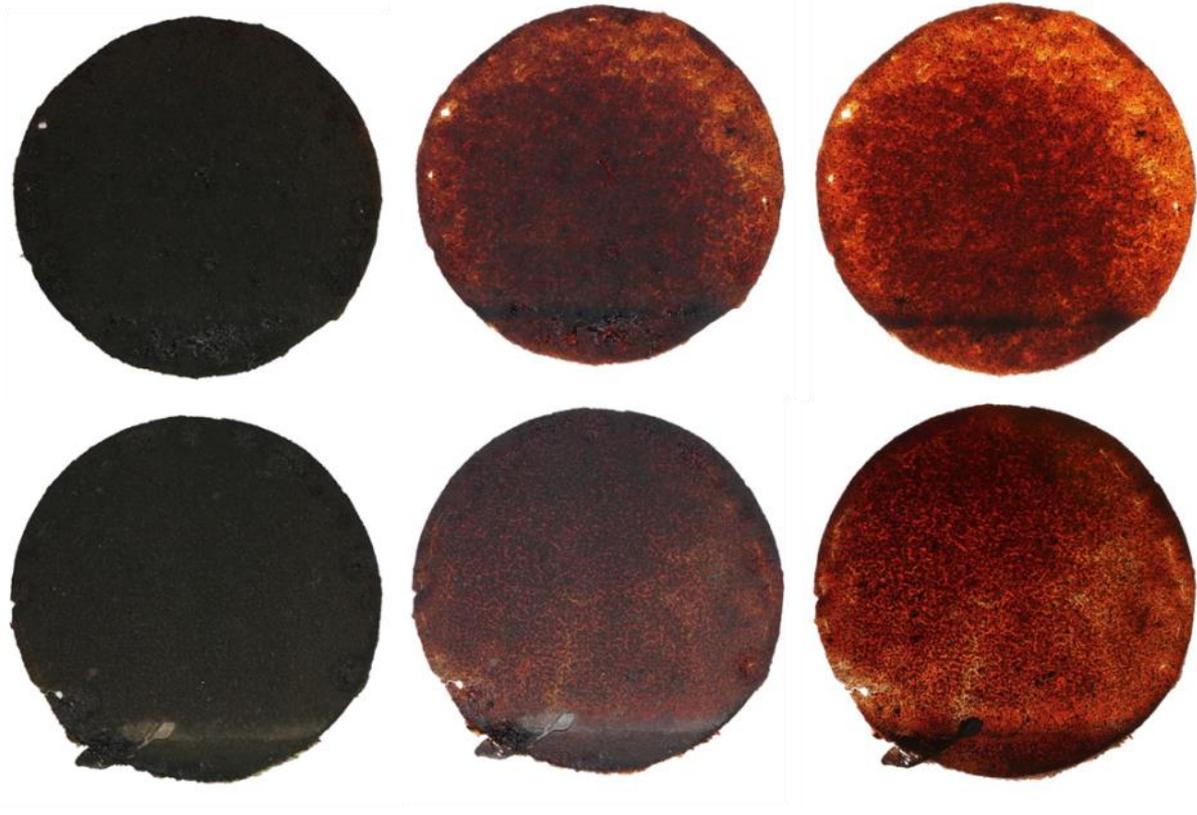


Abbildung 15: Prüfkörper K17 (oben) und K19 (unten) mit verschiedenen Belichtungen fotografiert – links: Auflicht, Mitte: Auflicht und Hinterleuchtung, rechts: nur Hinterleuchtung

Natürliche Bewitterung von Prüfkörpern für Gasdurchlässigkeits- und Zugfestigkeitsprüfung

Ein weiterer Aspekt der Witterungsbeständigkeit von Materialien ist der Erhalt der qualitätsbestimmenden Eigenschaften über den Einsatzzeitraum. So sollen sich die Gasdichtheit und die mechanischen Eigenschaften der Silageabdeckung durch den Einfluss von Sonneneinstrahlung, Temperatur und Niederschlag nicht wesentlich verschlechtern. Daher werden Prüfkörper für Gasdurchlässigkeitsprüfungen und Zugversuche nach drei Monaten Lagerung im Freien untersucht. Hierbei hat es sich in Vorversuchen bewährt, die Prüfkörper nach der Lagerung größerer Materialproben durchzustanzen. Die fertigen Prüfkörper zeigen durch die Lagerung im Freien eine geringere Homogenität als das Ausgangsmaterial, was sich auf die Reproduzierbarkeit der Analysen auswirkt. Die Startzeit der Bewitterung und die allgemeine Wetterlage im Versuchszeitraum haben einen wesentlichen Einfluss auf die Materialveränderungen. Zur besseren Vergleichbarkeit werden im Ergebnisteil nur Ergebnisse von September bis Mai gelagerten Prüfkörpern gegenübergestellt. Die Prüfkörper der Bewitterungsversuche werden durch ein der Bezeichnung der Rezeptur nachgestelltes „AL“ für „Außenlagerung“ gekennzeichnet.

4.2.9 Viskositätsmessungen der Einzelkomponenten

Um die beiden flüssigen Komponenten mit einem Applikationsgerät fördern, mischen und gleichmäßig aufspritzen zu können, ist es erforderlich, die beiden Einzelkomponenten auf deren Verarbeitbarkeit zu untersuchen. Dazu werden Daten zur dynamischen Viskosität der Einzelkomponenten erhoben. Die zwei Komponenten der Abdeckung werden mit einem Rotationsviskosimeter (Typ PHYSICA MCR101 der Firma Anton Paar) mit einem zylindrischen Prüfkörper mit kegelförmiger Spitze gemessen. Es werden zum einen Messungen bei 20 °C und unterschiedlichen Scherraten $\dot{\gamma}$ von 0,1 s⁻¹ bis 100 s⁻¹ und zum anderen Messungen bei einer konstanten Scherrate von 50 s⁻¹ und variabler Temperatur von 15 °C bis 50 °C durchgeführt. Vor Messbeginn wird die Prüflüssigkeit auf 15 °C temperiert, anschließend wird zur Messung die Temperatur um 1 K pro Minute erhöht. Die dynamische Viskosität und die Schubspannung verschiedener Rezepturen werden bestimmt und der Einfluss verschiedener Rezepturvarianten auf das Fließverhalten der Komponenten untersucht.

4.2.10 Lagerversuche der zwei Komponenten bei Raumtemperatur

Die Lagerstabilität der vorgemischten Komponenten A und B wird für fünf Rezepturvarianten der Silageabdeckung (A.109, A.242, K35, P20, W10) untersucht. Die genannten Rezepturvarianten werden auch in der Versuchsreihe 1 auf Miniatursilos geprüft. Der Praxistest wird in Abschnitt 4.4.3.1 beschrieben. Geprüft wird, wie lange die zwei Komponenten bei Raumtemperatur haltbar sind und inwieweit sich eine längere Lagerung auf die Eigenschaften der Silageabdeckung auswirkt.

Die beiden Komponenten jeder Rezepturvariante werden jeweils in fünf 1-l-HDPE-Flaschen und 180-ml-PE-Dosen abgefüllt und luftdicht verschlossen. Latex benötigt für eine längere Lagerstabilität einen ausreichend hohen pH-Wert, doch die Rezepturen der Silageabdeckung bewirken eine Verdünnung des mit Ammoniak stabilisierten Latex in Komponente B. Die in Variante K35 enthaltene Tanninsäure befindet sich ebenfalls in der wässrigen Latexphase und senkt dort den pH-Wert. Deswegen wird zusätzlich für jede Variante noch eine Komponente B ohne Wasser und Variante K35 ohne Tanninsäure vorbereitet. Das Wasser und die Tanninsäure werden erst beim Test nach neun Monaten zugegeben.

Im Abstand von sechs Wochen werden abwechselnd die 180 ml PE-Dosen und die 1 l HDPE-Flaschen geöffnet und die Beschaffenheit der Komponenten beurteilt. Dabei werden vor allem die Entstehung von Koagulaten in Komponente B, Verfärbungen, Schimmelbildung und sonstige Veränderungen dokumentiert. Im nächsten Schritt werden die zwei Komponenten aufgerührt und im richtigen Mischungsverhältnis gemischt. Ausgegossen wird das Material auf einen Prüfkörperrahmen. Sowohl das Verhalten im flüssigen Zustand, das Gelierverhalten als auch die Eigenschaften des ausgehärteten Materials werden im Vergleich zu der frisch hergestellten Abdeckung bewertet. Aus dem Prüfkörperrahmen werden anschließend Prüfkörper für Zugprüfung und Gasdurchlässigkeit hergestellt und gemessen.

4.2.11 Gesamtübersicht der Laborergebnisse

Die qualitätsbestimmenden Eigenschaften des Abdeckmaterials werden beispielhaft für fünf Rezepturvarianten qualitativ zusammengefasst und dargestellt. Die ausgewählten Varianten sind zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Entwicklungszeitraums entstanden und sollen einen Abriss der Rezepturenentwicklung darstellen. Variante A.242 wird als Ausgangsrezeptur der Entwicklungsarbeiten betrachtet. Des Weiteren werden chronologisch geordnet von den Varianten A.351, P20, W10 und W20 die am Ende der Arbeit favorisierten Rezepturen einander gegenübergestellt.

4.3 Entwicklung einer geeigneten Applikationstechnik

In einem ersten Schritt wird eine Marktrecherche durchgeführt, um technische Lösungen für ein geeignetes Applikationsgerät zu finden. Die Recherche erstreckt sich dabei über verschiedene Anwendungsbereiche. So werden unter anderem Applikationskonzepte der Farb- und Lackindustrie, des Baugewerbes, der Injektionstechnik und der Landtechnik herangezogen. Diese Lösungsansätze werden einander gegenübergestellt und bewertet. Die Vielversprechendsten werden getestet.

Im Laufe des Forschungsvorhabens werden mehrere Prototypen entwickelt und getestet. Gleich zu Beginn der Projektbearbeitung wird eine druckluftunterstützte Trichterspritze mit einem Fassungsvermögen von drei Litern verwendet, um erste Praxistests durchzuführen. Die zwei Komponenten der Silageabdeckung werden vorab zusammengemischt und anschließend in den Vorratsbehälter der Spritze gegeben. Der Austragsdruck an der 6-mm-Vollkegeldüse wird, je nach Rezeptur, zwischen 0,8 bar und 2,0 bar variiert.

Ein erster Prototyp des Applikationsgeräts wurde auf Basis der Erfahrungen der vorangehenden Projektphasen entwickelt. Dabei stellten sich Exzentrerschneckenpumpen als ungeeignet heraus. Allgemein ist die Latexkomponente sehr problematisch in der Förderung, da hier größere Scherkräfte vermieden werden müssen. Beim Auftreten größerer Scherkräfte entstehen Koagulate, die schnell zu Verstopfungen führen. Daneben waren die sehr unterschiedlichen Viskositäten der Komponenten der ersten Ausgangsrezeptur bezüglich der gleichmäßigen Förderung und der Mischung problematisch. Zudem haben Vorversuche gezeigt, dass die Silageabdeckung unmittelbar vor dem Aufspritzen gemischt werden muss, damit das Material nicht schon im Applikationsgerät reagiert. Daher wird bei der Entwicklung des ersten Prototyps der Fokus auf eine schonende Förderung und eine schnelle Mischung mit einem großen Austragsquerschnitt gelegt, damit auch entstehende Koagulate ausgebracht werden können.

Parallel dazu wird ein System der Firma Desoi GmbH auf seine Tauglichkeit für die Applikation untersucht und in der in Abschnitt 4.4.3.1 beschriebenen Versuchsreihe 1 der Silierversuche mit Miniatursilos verwendet. Dieser Hersteller bietet mit der Preko 200 ein Fördergerät an, das für spritzbaren Zwei-Komponenten-Mörtel oder Fliesenkleber konzipiert ist und eine leichte Handhabung verspricht. Durch einen Frequenzumrichter und Druckeinstellung können die gewünschte Fördermenge und der gewünschte Druck indi-

viduell eingestellt werden. Zur Förderung werden anstatt Schnecken- oder Kolbenpumpen Peristaltikpumpen verwendet, die sich durch besonders materialschonende Förderung, ähnlich einer Schlauchquetschpumpe, auszeichnen [7].

Für die in Abschnitt 4.4.3.2 dargestellte Versuchsreihe 2 wird erneut ein selbstkonzipiertes Gerät benutzt. Bei diesem Gerät werden alle bisher gewonnenen Erkenntnisse berücksichtigt. Hierfür wurden vorab verschiedene Düsen getestet, um die für die Abdeckung geeignetste Ausbringung zu identifizieren. Auch werden Statikmischer verschiedener Länge und Durchmesser getestet. Ein Entwicklungsziel des Prototyps 3 ist, den Aufspritzwinkel, den Abstand zum Substrat und die Schichtdicke des Materials kontrolliert und konstant zu halten. Die vorangegangenen Applikationsgeräte erforderten eine Führung der Spritzlanze per Hand. Der neue Prototyp soll mehr an eine mögliche Ausbringung in der Praxis angelehnt sein und für Versuchsreihe 2 auf einem Schienensystem über das Silo geführt werden. In Versuchsreihe 3 wird der Prototyp nochmals weiterentwickelt und zum einen an die Ausbringung größerer Materialmengen (um den Faktor 10 erhöht) angepasst und zum anderen ein Spritzbalken konstruiert, der im Heckaufbau an einem Traktor bei geringer Geschwindigkeit über das Silo bewegt werden kann. Versuchsreihe 3 wird in Abschnitt 4.4.3.3 genau beschrieben.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse sollen Hinweise für die mögliche Ausführung eines praxistauglichen Applikationsgeräts erarbeitet werden.

4.4 Bewertung des Silierprozesses unter realen Witterungsbedingungen

Mit Laboranalysen können die auf Seite 46 in Tabelle 8 aufgelisteten Materialeigenschaften isoliert und unabhängig von anderen Einflüssen betrachtet werden. Diese Analysen können jedoch nur Abschätzungen für ein späteres Verhalten im Freien geben, da die Abhängigkeiten verschiedener Materialeigenschaften voneinander nicht ausreichend getestet werden können. Wie sich beispielsweise UV-Strahlung, Starkregen oder Frost in Kombination mit der Säureeinwirkung der Silage auswirken, kann nur in Praxistests überprüft werden. Auch der Wechsel der Jahreszeiten und somit die stark wechselnden Umwelteinflüsse können im Labor nicht ausreichend simuliert werden. Daher müssen realitätsnahe Praxisversuche konzipiert werden, die durch lange Laufzeiten bis zu einem Jahr diese Umwelteinflüsse abbilden können. Auch ist nicht jedes Jahr bezüglich Niederschlägen und Temperaturen gleich, daher müssen Versuche in mehreren Jahren angelegt werden, um eine Praxisreife valide zu belegen.

Ende 2015 wurde ein erster Langzeitversuch mit zwei Vorzugs-Rezepturen gestartet. Dieser dient, neben der Prüfung der Materialien, auch zur Erprobung der Analytik während des gesamten Zeitraums. Im darauffolgenden Jahr wurden weitere Langzeitversuche gestartet und die Überwachung der Versuche laufend optimiert.

Die Analytik der Silagequalität erfolgt im Analyselabor der Landesanstalt für Landwirtschaft Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft (LfL-ITE). Bestimmt werden die Rohnährstoffe der Silage: Rohfaser, -protein, -fett und -asche sowie die Trockenmasse

des Gärfutters. Des Weiteren werden die Protein- und Energiewerte bestimmt sowie die wichtigsten Gärparameter, die Gärsäuren (MS, ES, PS und BS) und der pH-Wert. Auch der Ammoniak-Stickstoff-Anteil am Gesamtstickstoffgehalt ($\text{NH}_3\text{-N}$) und der Alkoholgehalt werden analysiert. Die Gärparameter und der pH-Wert werden nach dem DLG-Schlüssel 2006 ausgewertet und beurteilt.

Das Ausgangsmaterial der Versuchsreihe 3 wird zusätzlich beim Tiergesundheitsdienst Bayern e. V. auf Gesamtkeimzahl (aerobe, mesophile Bakterien) exklusive Milchsäurebakterien, Schimmelpilze und Hefen hin untersucht. Ebenfalls werden die Rohnährstoffe im Analyselabor der LfL-ITE untersucht. Durch die genaue Kenntnis des Ausgangsmaterials kann die entstandene Silagequalität bei Versuchsende besser bewertet werden.

4.4.1 Silierversuch in Kunststofffässern

Ein erster Silierversuch mit Kunststofffässern soll die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der im Labor weiterentwickelten Materialien auf Basis der Rezepturen A.364 und A.351 der vorangegangenen Projektphase nachweisen. Zudem wird eine kontinuierliche Temperaturmessung im Fassinneren als ein möglicher Indikator zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Siloabdeckung erprobt. Bei Fehlgärungen steigt die Temperatur im Silo stark an. So sollen auftretende Undichtigkeiten durch einen erfassten Temperaturanstieg sichtbar gemacht werden. Eine mögliche Ablösung der Abdeckung von der Silowand soll bei diesem Versuch noch ausgeklammert werden.

Für diesen Silierversuch werden sechs $0,3\text{-m}^3$ -Kunststofffässer mit gehäckseltem Mais (TM = 33,8 %) befüllt. Verdichtet wird durch Niederstampfen des Substrats. Im Durchschnitt wird die Silage auf 245 kg TM/m^3 verdichtet und liegt damit knapp unter dem Orientierungsbereich von 250 kg TM/m^3 bis 265 kg TM/m^3 [42].

Jedes Silofass wird in der Silomitte, ca. 15 cm unter der Abdeckung, mit einem Thermoelement mittig im Substrat ausgestattet. Das Kabel des Thermoelements ist entlang der Fasswand geführt und mit Silofolie und Klebeband abgedichtet nach außen geleitet. An jedem Fass wird außen ein Datalogger für die Temperatureaufzeichnung angebracht. Somit ist eine automatische Temperaturerfassung des Siloinneren über die gesamte Versuchslaufzeit gegeben. Bei diesem Versuch sollen Quereinflüsse durch eine eventuell unzureichende Randhaftung und die Schrumpfungseignung der Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen durch einen speziellen Randübergang ausgeschlossen werden. Dazu wird, wie Abbildung 16 zeigt, eine rund ausgeschnittene Silofolie an die Fasswand aufgeklebt.



Abbildung 16: Silofass von oben: Übergang zum Fassrand mit Silofolie und Klebeband versiegelt

Anschließend werden die Fässer mit je 5 kg Abdeckmaterial versiegelt, was einer durchschnittlichen Materialdicken von 1,5 cm entspricht. Für die Applikation wird eine Spritzpistole verwendet, in der die fertig gemischte Rezeptur eingefüllt wird. Nach dem Aufspritzen und Aushärten der Abdeckung wird der Rand durch mit Sand befüllte Kunststoffschläuche beschwert. Getestet werden Rezeptur A.364, beschrieben in Tabelle 7 auf Seite 41 und Rezepturvariante A.531, die sich einzig durch die Verwendung von Glycerin anstatt Sonnenblumenöl von Variante A.364 unterscheidet. Von jeder Rezepturvariante werden zwei Fässer angefertigt. Zusätzlich werden zwei Referenzfässer mit den gängigen drei Schichten Silofolie abgedeckt. Die Fässer werden im Freien, wie Abbildung 17 zeigt, in speziellen Halterungen schräg gelagert, damit Regenwasser ablaufen kann.

Die Fässer Nr. 1 und Nr. 2 sind mit konventioneller Silofolie abgedeckt und dienen als Referenzen. Fass Nr. 2 wurde im März 2016, nach 177 Tagen Lagerzeit, absichtlich mit einem spitzen Gegenstand manipuliert, um zu überprüfen, ob eine eventuell stattfindende Nacherwärmung aufgrund von Fehlgärung durch Lufteintrag mit der integrierten Temperaturmessung nachgewiesen werden kann. Es wurde ein ca. 3 mm großes Loch in die Mitte der Abdeckung gestochen. Die Fässer Nr. 3 und Nr. 4 sind mit Variante A.351 abgedeckt. Die Fässer Nr. 5 und Nr. 6 sind mit der Ansatzvariante A.364 versiegelt.

Die Fässer werden zehn Monate im Freien gelagert, anschließend wird die Silage beprobt und der Zustand der Abdeckung bewertet. Jedem Miniaturesilo wird in ca. 15 cm bis 20 cm Tiefe eine Silageprobe entnommen und Roh Nährstoffe und Gärparameter im Labor für Futtermittelanalytik der Landesanstalt für Landwirtschaft bestimmt. Weitere Proben wurden zur TM-Bestimmung direkt unter der ersten Probenahmeschicht entnommen und dazu 24 h bei 105 °C im Trockenschrank gelagert.



Abbildung 17: Silofässer mit integrierter Temperaturmessung (Fass 1 und 2: Referenz, Fass 3 und 4: Variante A.351 und Fass 5 und 6: Variante 364)

4.4.2 Rezepturscreening mit Gärgläsern

Um eine möglichst große Anzahl vielversprechender Rezepturvarianten auf eine mögliche Praxistauglichkeit zu testen, werden im Juni und Juli 2016 Versuche mit Laborsilogläsern mit einem Volumen von 1 l durchgeführt.

Präparierung der Gärgläser – integrierte Sauerstoffmessung

Ziel dieses Versuchsaufbaus ist es, einen möglichen Sauerstoffeintrag in die Gläser messbar zu machen. Dazu werden die Gärgläser vor der Befüllung mit Sauerstoffsensordots an der Innenseite der Glaswand bestückt. Die Indikatordots werden mit einem säurebeständigen Silikonkleber 3 cm unterhalb des Glasrands befestigt. Durch eine semipermeable Membran kann freier Sauerstoff in den flachen Spot eindringen. Je nach Sauerstoffgehalt im Glasinneren zeigt der angebrachte Indikatordot eine konzentrationsabhängige Infrarot-Lumineszenz. Mittels tragbaren Sauerstofftransmitters (Fibox 4 Trace, PreSens Precision Sensing GmbH, Regensburg, Deutschland) kann der Spot optisch ausgelesen werden. Der Transmitter sendet ein Rotlichtsignal durch ein Glasfaserkabel an den Spot. Je nach Sauerstoffgehalt sendet der Sensorspot ein Infrarotsignal an den Detektor zurück. Die Funktionsweise ist in Abbildung 18 schematisch dargestellt. Die Spots wurden vorab bei PreSens Precision Sensing GmbH kalibriert. Auf diese Wei-

se kann nun der Sauerstoffgehalt von außen auf nicht invasive Art gemessen werden [38]. Für die Versuchsreihen 1 und 2 der Silierversuche mit Miniatursilos werden Sensor-spots vom Typ PSt6 (Messbereich 0,002 % bis 5,000 %, Genauigkeit ± 1 ppb oder ± 3 % vom Messbereich) verwendet, im Bereich über 5 % nimmt die Genauigkeit ab. In Versuchsreihe 3 kommen Spots vom Typ PSt3 (Messbereich 0 % bis 100 %, Genauigkeit $\pm 0,05$ % O_2 bei einem Messwert von 0,2 % O_2) zur Anwendung, da sich der größere Messbereich während der Versuche als vorteilhaft herausstellte.

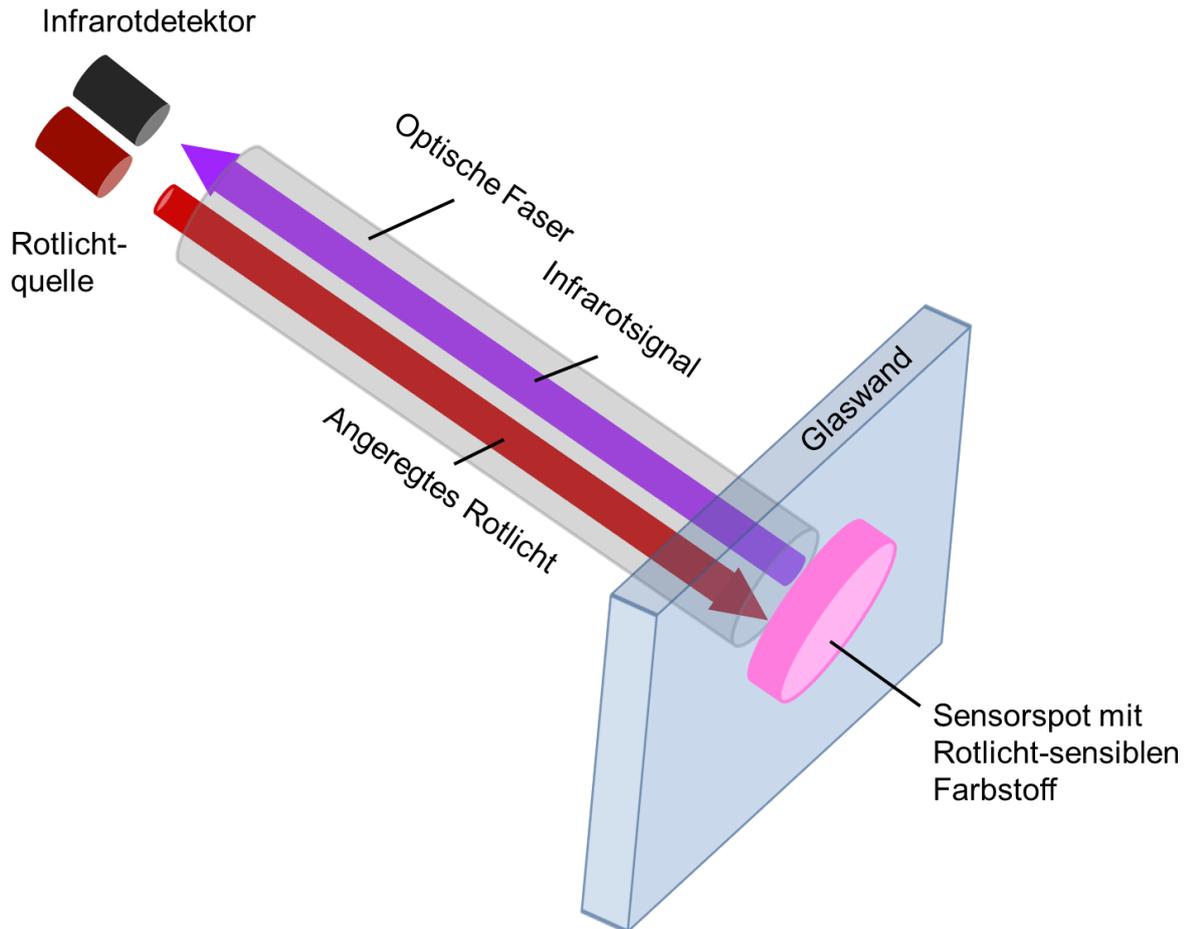


Abbildung 18: Funktionsweise der nicht invasiven Sauerstoffmessung nach PyroScience GmbH (2016) [38]

Zusätzlich werden in drei Gläsern auch Spots in 6 cm und 9 cm Tiefe angebracht. Diese Gläser sollen den Tiefeneffekt sichtbar machen. Es wird untersucht, wie lange es dauert, bis Sauerstoff von oben durch das Substrat diffundiert. Jedes Glas wird zudem mit dem auf dem Markt erhältlichen Silolack „Silodon“ am oberen Glasrand beschichtet, sodass die Abdeckung nicht an der Glaswand haftet, sondern hier auch die Randhaftung auf einer gängigen Silobeschichtung getestet werden kann. Die Beschichtung reicht über den Glasrand und endet im Glasinneren ca. 1 cm über dem Sensor spot.

Befüllen und Abdecken der Gläser

Als Ausgangsmaterial für die Silierversuche wird Wiesengras vom zweiten Schnitt mit dem Laborhäcksler zerkleinert. Das Gras wird einen Tag vor dem Silieren am Vormittag gemäht und bis zum nächsten Tag ca. 10:30 Uhr bei Sonne und leichtem Wind auf etwa 30 % Trockenmasse angewelkt. Da sich der Versuchsaufbau über zwei Tage erstreckt, wird die Hälfte des gehäckselten Grasses in der Kühlkammer bei 4 °C gelagert und am folgenden Tag verarbeitet.

Jedes Gärglas wird mit 770 g Frischmasse (FM) befüllt und mit Stempelpressen verdichtet. Die Gläser werden bis ca. 0,5 cm unter den Glasrand befüllt. Daraus ergibt sich eine Verdichtung von 770 kg FM/m³. Die Glasränder werden vor dem Aufbringen der flüssigen Abdeckung gereinigt, damit sich das Abdeckmaterial möglichst gut am Rand festsetzen kann.

Insgesamt werden 14 verschiedene Rezepturen getestet (K05, K20, K21, K35, P08, P13, P31, P20, W04, W10, W13, W15, N06, A.242). Von jeder Rezeptur werden 200 g vorbereitet und in flüssiger Form auf drei Gläser gleichmäßig verteilt, sodass der Glasrand vollständig mit der Abdeckung überzogen ist. Dabei ergeben sich Materialdicken von ca. 5 mm. Die Materialdicke nimmt, bedingt durch die gewölbte Oberfläche des verdichteten Substrats, von innen nach außen etwas zu. Da die Abdeckung direkt auf das Gras aufgebracht wird, treten durch einzelne nach oben stehende Blätter und Stängel Stellen auf, die nur eine Materialdicke von 1 mm bis 2 mm aufweisen. Abbildung 19 zeigt das Aufgießen der Silageabdeckung auf die vorbereiteten Gärgläser.



Abbildung 19: Aufgießen von Abdeckmasse auf das Substrat in mit Silolack „Silodon“ vorbehandelten und mit Sauerstoffspots bestückten Gärgläsern

Die Gläser werden im Freien in speziell angefertigten Ummantelungen gelagert. Diese schützen das Substrat und die Spots vor UV-Licht. Die Abdeckungen hingegen sind der Witterung ohne Beschattung ausgesetzt. Ein Vogelnetz ist über den gesamten Außenlagerbereich gespannt, damit eine Zerstörung der Abdeckung durch Tiere ausgeschlossen werden kann. Bis zu 94 Tage werden die Gläser im Freien gelagert, bei Undichtigkeiten und somit erhöhten Sauerstoffgehalten im Glasinneren wird der Einzelversuch abgebrochen.

Da sich einige Abdeckungsvarianten schon nach wenigen Tagen vom Rand der Gläser lösen und somit undicht werden, wird der Versuch mit drei Rezepturen (A.242, P20, W10) wiederholt, in diesem Fall mit Gras aus dem dritten Schnitt und einer Trockenmasse von 33 %. Verdichtet wird erneut bis zu ca. 5 mm unterhalb des Glasrands. Die Füllmenge der Gläser beträgt 700 g und somit wird eine Verdichtung von 700 kg FM/m³ erreicht.

Überwachung der Gärgläser

An jedem Werktag werden die Sauerstoffgehalte in den Gärgläsern gemessen und die Ergebnisse mit optischen Veränderungen der Abdeckung und des Glasinhalts verglichen. Ein Sauerstoffgehalt unter 1 % im Inneren der Gläser wird als anaerob betrachtet. Die Silage in den Gläsern, die nach Ablauf der 94 Tage keinen wesentlichen Sauerstoffgehalt im Inneren aufweisen, wird anschließend hinsichtlich der gängigen Gärparameter

untersucht. Als Referenzen dienen Gläser, die mit Glasdeckel und Gummiabdichtung verschlossen wurden. Abbildung 20 zeigt beispielhaft die Entwicklung des Sauerstoffgehalts in ausgewählten Gläsern.

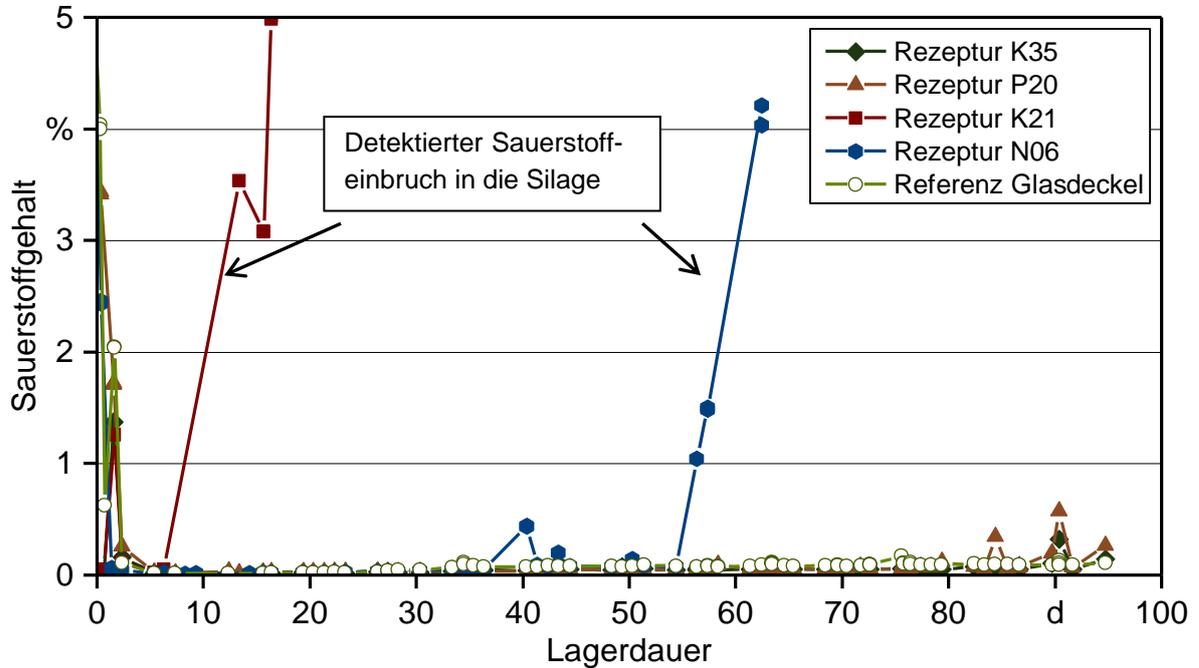


Abbildung 20: Detektierter Sauerstoffgehalt in den Gärgläsern

4.4.3 Praxistests – Silierversuche mit Miniatursilos

Zur Erprobung der Praxistauglichkeit der Silageabdeckung und deren Aufbringung mittels Applikationsgerät werden verschiedene Versuchsreihen mit Miniatursilos und Freigärhaufen durchgeführt.

4.4.3.1 Miniatursilos aus Beton – Versuchsreihe 1

Ende September 2016 werden Versuche für die längerfristige Silagelagerung mit 2 m² großen Miniatur-Fahrsilos mit Mais als Substrat angelegt und mit insgesamt fünf Rezepturvarianten des Abdeckmaterials verschlossen (A.109, A.242, K35, P20, W10). Mit jeder Rezepturvariante werden zwei Silos angefertigt. Zusätzlich werden zwei Referenzsilos mit herkömmlicher Folienabdeckung angelegt. Getestet werden zwei der favorisierten Rezepturen der vorhergehenden Projektphase: Variante A.242 und Variante A.109, die nach dem Auftragen noch mit Propionsäure besprüht wird. Durch die Behandlung mit Propionsäure erreichte diese Variante ein sehr gutes Ergebnis bei der Gasdurchlässigkeitsprüfung. Des Weiteren werden eine wasserreduzierte Variante (W10) und eine Variante mit Pektin als Geliermittel (P20) aufgetragen. Das fünfte Testmaterial (K35) zeichnet sich durch das schnelle Aushärten nach der Applikation aus: K35 reagiert innerhalb von Sekunden nach dem Zusammenmischen durch einen gesenkten pH-Wert der Mi-

schung. Zudem wird bei dieser Variante Aktivkohle als Füllstoff verwendet und auf Cellulosefasern verzichtet. Im parallel laufenden Versuch zur Konservierungsmittelwirksamkeit (Abschnitt 5.2.9.1) zeigt das Material keine Schimmelbildung und im Gegensatz zu den meisten anderen Varianten auch keine klebrige Oberfläche.

Der Silomais (Sorte Farmgigant) wird am Versuchstag geerntet. Die Trockenmasse des Maises beträgt 38 %. Die Miniatursilos werden zum Verdichten hintereinander mit einem Abstand von 50 cm aufgestellt. Mit der Grabenwalze (WACKER NEUSON, Typ RT 82-SC) mit einem Betriebsgewicht von 1.473 kg wird die Reihe Silos, wie Abbildung 21 zeigt, in einer Fahrt verdichtet. Bei der Befüllung wird darauf geachtet, dass das Substrat möglichst gleichmäßig verteilt und Schichtdicken von 10 cm bis 15 cm eingehalten werden. Der Zwischenraum der Silos wird ebenfalls mit Mais aufgefüllt, sodass die Walze in der Fahrt nicht gehindert wird. Nach jeder neuen Befüllung fährt die Walze zweimal mittig und einmal an jeder Seitenwand mit 20 m/min die Silos ab. Die Ränder werden zusätzlich noch durch Stampfen verdichtet.

Bei der Befüllung wird vor allem in der Mitte des Silos Substrat aufgeschüttet, um einen Silohaufen mit einer Höhe von 50 cm zu erreichen. Nach dem Aufbringen der letzten Schicht wird abschließend durch sechs weitere Überfahrten mit der Grabenwalze abschließend verdichtet. Danach werden die Silos auseinandergestellt und zu einem konvexen Haufwerk mit einem Rechen abgeschabt, um 5 cm bis 10 cm am Rand des Silobodens wieder freizulegen. Jedes Silo ist dann in etwa mit 420 kg Maissubstrat befüllt.

Die Randflächen des Silobodens werden gesäubert, damit das aufzuspritzende Material gut an der Silowand und am Siloboden haften kann. Zum Schluss werden Sauerstoff- und Temperatursonden seitlich ins Silo eingebracht und die Silos mit dem jeweiligen Abdeckmaterial bespritzt. Für die Applikation wird ein Gerät der Firma Desoi GmbH verwendet, das unter 5.3.2 genauer beschrieben wird. Die zwei Komponenten der Silageabdeckung werden vorab aufgerührt und kurz vor der Applikation auf das Silo in die Vorratsbehälter des Applikationsgeräts gegeben. Während des Spritzvorgangs wird im Sekundentakt die Masse der beiden Komponenten automatisch erfasst und das aktuelle Mischungsverhältnis berechnet. Die Förderpumpen der beiden Komponenten können per Hand entsprechend reguliert werden. Die Aufbringung des Materials erfolgt, wie Abbildung 22 zeigt, manuell mit einer Spritzlanze.

Nachbesserungen an der Silageabdeckung werden nach sechs Monaten Lagerung im Freien mit Rezepturvariante P34 durchgeführt. Die Bereiche zwischen Wand und gealtertem Abdeckmaterial werden mit der neuen Variante versiegelt. Hierfür wird kein Applikationsgerät verwendet. Das Abdeckmaterial wird im Labor zusammengemischt und per Hand gegossen.

Die Miniatursilos werden nach dem Aufbringen der Silageabdeckung im Freien unbeschattet in Nord-Süd-Richtung aufgestellt. Zwei Wildtierkameras mit Bewegungssensor werden zur Überwachung des Versuchsaufbaus angebracht, um eventuelle Manipulationen der Siloabdeckungen durch Mensch und Tier während der Versuchslaufzeit zu erfassen.



Abbildung 21: Verdichten der Miniaturesilos mit einer Grabenwalze



Abbildung 22: Aufspritzen der Siloabdeckung auf die Miniaturesilos mit einem Applikationsgerät der Firma Desoi GmbH mit einer Spritzlanze

Sauerstoffmessung in den Miniatursilos

Als Indikator für eine ungestörte Gärung wird der Sauerstoffgehalt in allen Silos analog zur Methode bei den Gärglasversuchen gemessen und so ein eventueller Sauerstoffzutritt ins Substrat detektiert. Jedes Silo wird seitlich mit drei Sauerstoffsonden ausgestattet, wie in Abbildung 23 dargestellt, die sich auf folgenden Positionen befinden:

- „Oben“: in der Silomitte direkt unter der Siloabdeckung ($h = 47 \text{ cm}$, $b = 50 \text{ cm}$, $l = 100 \text{ cm}$)
- „Mitte“: in der Silomitte, 10 cm unter der oberen Messsonde ($h = 37 \text{ cm}$, $b = 50 \text{ cm}$, $l = 100 \text{ cm}$)
- „Wand“: an der Innenseite der Silowand ($h = 42 \text{ cm}$, $b = 0 \text{ cm}$, $l = 100 \text{ cm}$)

Zwischen den beiden in der Silomitte eingebrachten Sauerstoffsonden befindet sich ein Thermoelement ($h = 42 \text{ cm}$, $b = 50 \text{ cm}$, $l = 90 \text{ cm}$) mit Datalogger, das alle 15 min die Temperatur im Siloinneren aufzeichnet.

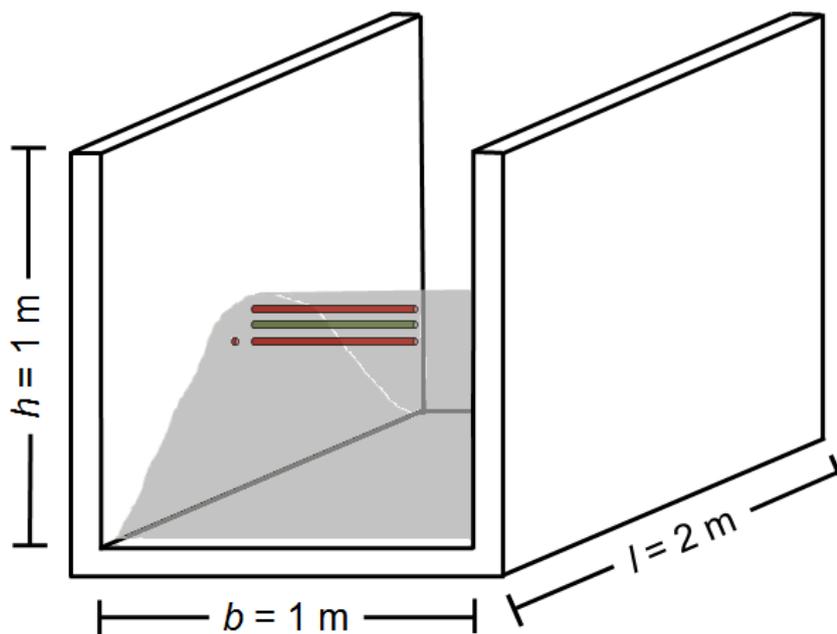


Abbildung 23: Positionierung der Sauerstoff- und Temperatursonden im Silo

Die Sauerstoffsonden sind aus VE-Stahlrohren mit einem Innendurchmesser von 6 mm gefertigt. Am Ende jedes Rohrs werden die Sauerstoffspots angebracht. Dazu wird jedes Stahlrohr ca. 1 cm tief mit einer Fräse auf 8 mm Innendurchmesser erweitert. Als Trägermaterial für den Sensorspot wird extrudiertes Plexiglas[®] verwendet. Es gilt als sehr bruchsicher, alterungs- und witterungsbeständig. Die Spots werden mit säureresistentem Silikonkleber befestigt. Anschließend werden die runden, 4 mm dicken und im Durchmesser 7 mm großen Plättchen mit ebenfalls säureresistentem Silikonkleber in die VE-Stahlrohre eingebracht und luftdicht verklebt. Abbildung 24 zeigt eine schematische Dar-

stellung der Messsonde. Diese ist so konstruiert, dass die optische Faser des Sauerstofftransmitters durch das VE-Stahlrohr von außen bis in die Mitte des Silos eingeführt und durch die Plexiglasscheibe der Sauerstoffspot im Inneren ausgelesen werden kann. Täglich wird von Montag bis Freitag der Sauerstoffgehalt im Siloinneren und an der Silowand gemessen, wie Abbildung 25 zeigt.



Abbildung 24: Aufbau der Sauerstoffsonden der ersten Generation



Abbildung 25: Links: Sondenrohr mit auf Plexiglas geklebten O₂-Spots und Identifizierungscode eines einzelnen Spots; rechts: Sauerstoffmessung mit Glasfaserleiter in der Sonde

Durch die extremen Tieftemperaturen bis zu -15 °C im Versuchsjahr 2016/2017 lösen sich die Verklebungen der Sauerstoffspots im Inneren der Sonde. Dadurch gelangt Sauerstoff in das Innere der Miniatursilos. Die Sonden werden schnellstmöglich an den Tagen, an denen die Undichtigkeiten bemerkt werden, versiegelt und im Nachgang mit einem außen an das Rohr befestigten Sauerstoffspot versehen. Hierfür wird erneut der Sensorspot auf eine Plexiglasscheibe geklebt und diese mit einer Swagelok-Verbindung, auf einem Schlauch, der über das Sondenrohr gestülpt wird, angebracht. Alle Bauteile

werden im Anschluss zusätzlich noch von außen mit einem wetterbeständigen Acrylkleber versiegelt. Die Anbringung der Außensonde ist in Abbildung 26 skizziert.

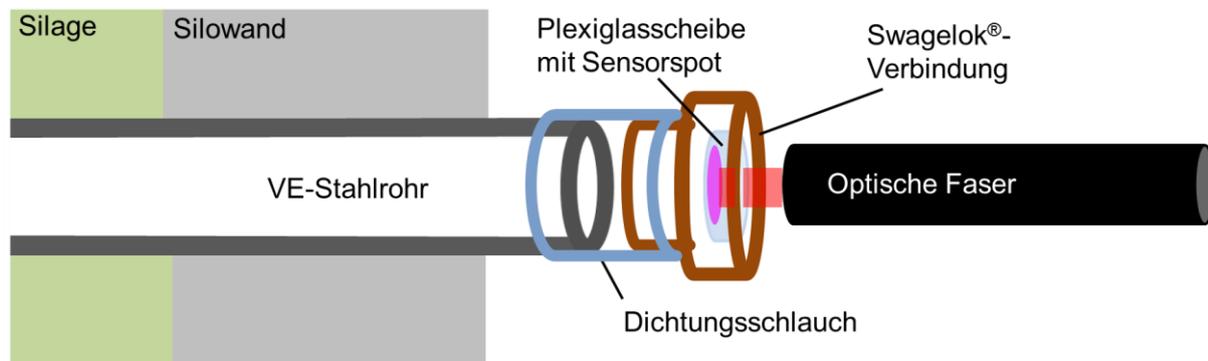


Abbildung 26: Skizzierter Aufbau der Sauerstoffsonden der zweiten Generation

4.4.3.2 Miniatursilos aus Beton – Versuchsreihe 2

Im Juni 2017 wird eine zweite Versuchsreihe mit Miniatursilos gestartet. Es werden vier Miniatursilos analog zu Versuchsreihe 1 verwendet. Die Silowände werden unterschiedlich vorbehandelt, um den Einfluss des Silolacks auf die Randhaftung der Abdeckmasse zu untersuchen. Je ein Silo wird mit dem Silolack „IRSA Silodon Spezial“ und „Silopox“ beschichtet. Bei einem weiteren Silo wird der Silolack mit Sand aufgeraut. Dazu werden die Silowände zuerst mit dem Lack „IRSA Silodon Spezial“ behandelt und auf dem feuchten Lack eine dünne Sandschicht aufgetragen.

Die Silos werden mit Weizen-Ganzpflanzen-Häckselgut als Substrat befüllt und wie in Versuchsreihe 1, jedoch mit zwei zusätzlichen Überfahrten je Verdichtungseinheit, mit der Grabenwalze verdichtet. Die Trockenmasse des Ausgangssubstrats beträgt 41,2 %. Als Referenz wird ein Silo mit Unterzieh-, Rand- und Silofolie abgedeckt.

In den vier Silos wird, wie in Abbildung 27 dargestellt, je eine Messsonde ca. 10 cm unter der Abdeckung zur Temperaturerfassung ($h = 37$ cm, $b = 50$ cm, $l = 100$ cm) und darüber, ca. 5 cm unter der Silageabdeckung eine Messstelle für die Sauerstoffmessung ($h = 42$ cm, $b = 50$ cm, $l = 100$ cm) angebracht. Aufgrund der Erfahrungen mit den Sauerstoffsonden aus Versuchsreihe 1 werden die Sensorspots nun außen an der Silowand befestigt. Auch hier wird täglich von Montag bis Freitag der Sauerstoffgehalt unter der Silageabdeckung gemessen. Wie bei Versuchsreihe 1 sind auch bei dieser Testreihe zwei Wildtierkameras mit Bewegungssensor zur Überwachung angebracht.

Bei diesem Versuch wird nur eine Rezepturvariante getestet, die u. a. auf die Anforderungen des verwendeten Applikationsgeräts abgestimmt ist. Variante W20 zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sie innerhalb einer Minute aushärtet und somit weniger Abdeckmaterial von den stark abfallenden Flanken des Silohaufens abläuft. Die Abdeckung wird in mehreren 40-kg-Ansätzen vorbereitet und während des Spritzvorgangs in das Applikationsgerät nachgefüllt.

Neben der Erprobung verschiedener Silobeschichtungen zum Einfluss auf die Randhaftung des Abdeckmaterials dient dieser Praxistest in erster Linie der Erprobung des neu konzipierten Applikationsgeräts, das unter 5.3.2 genauer beschrieben wird. Ziel der Applikation ist es, ein gleichmäßigeres Spritzergebnis mit einer fehlerfreien Auftragung der Abdeckung zu erreichen und auch die Silowand ausreichend zu benetzen. Zudem sollen die Schwankungen im Mischungsverhältnis der Komponenten verringert werden, da sich diese wesentlich auf die Qualität des Materials auswirken.

Aufgetragen wird die Silageabdeckung mit einer Exzenter-Hohlkegeldüse, deren Spritzwinkel 90° beträgt und die als kleinsten inneren Durchmesser 3,2 mm aufweist. Die Düse wird auf einem Schlitten befestigt, der auf einer über das Silo führenden Schiene geleitet wird. Die Schiene ist der Form des Silagehaufens angepasst und verläuft ca. 30 cm über dem Substrat. Aufgetragen wird die Silageabdeckung in mehreren Überfahrten der Düse mit einem Überlappungsbereich von 200 % immer senkrecht zur Substratoberfläche. Der Schlitten wird dabei von Hand geführt. Ziel ist es, das Material möglichst gleichmäßig aufzutragen, sodass einheitliche Schichtdicken resultieren.

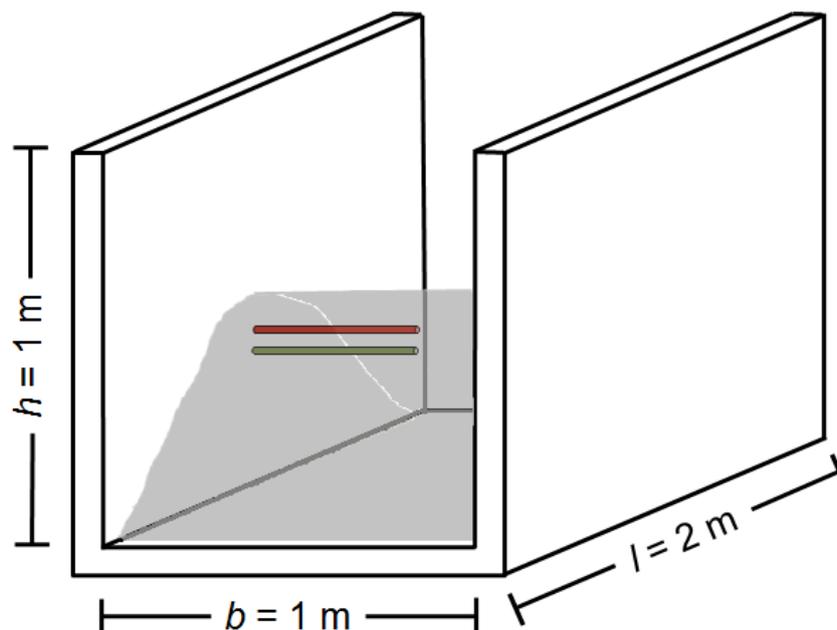


Abbildung 27: Miniatursilos der Versuchsreihe 2 mit einer Sauerstoff- (oben) und einer Temperatursonde (unten)

Für die Bonitur der Silagequalität werden mittig aus dem Silo Proben aus der ersten 5 cm Schicht direkt unter der Abdeckung und aus 30 cm Tiefe entnommen.

4.4.3.3 Fahrsilos ohne Silowand – Versuchsreihe 3

In einem dem Vorhaben abschließenden Praxistest werden im Oktober 2017 drei Freigärhaufen mit je 3 m × 4 m Grundfläche aus Maishäckselgut angelegt. Ziel des Versuchs

ist es, zwei Silos mit je 12 m² Grundfläche in einem Spritzgang gleichmäßig und kontrolliert mit der favorisierten Rezeptur W20 abzudecken. In diesem Falle wird ein mobiles Applikationsgerät, das mit einem Spritzbalken an einem Traktor mit Variogetriebe geführt wird, verwendet. Der genaue Aufbau dieses Applikationsgeräts wird unter 5.3.2 beschrieben.

Verdichtet wird nach jeder frisch aufgetragenen Silomaisschicht von ca. 10 cm bis 20 cm mit einem Radlader durch mehrere Längs- und Querüberfahrten der Haufen. Das Ausgangssubstrat wird in diesem Versuch vorab mikrobiologisch und auf Rohnährstoffe hin untersucht, um den später erreichten Gärerfolg besser bewerten zu können. Die Proben werden als repräsentative Mischproben genommen, sofort gekühlt und am selben Tag ins Analyselabor gegeben. Insgesamt wird eine Verdichtung von ca. 550 kg FM/m³ erreicht und damit der Idealwert von 750 kg FM/m³ bis 795 kg FM/m³ bei einer Trockenmasse von 34,4 % verfehlt.

In jedes Silo werden ein Temperaturfühler und eine Sauerstoffsonde analog zu vorhergehenden Versuchen integriert. Eingebracht sind die Sensoren an der Mitte der Längsseite in Bodennähe. Der Messfühler und das Sensorrohr reichen 50 cm in das Siloinnere. In einem Intervall von 15 min wird die Temperatur im Siloinneren aufgezeichnet und täglich von Montag bis Freitag der Sauerstoffgehalt im Silo gemessen.

Auf zwei Miniatursilos wird die Rezeptur W20, die bereits in Versuchsreihe 2 verwendet wurde, aufgespritzt. Diese Rezeptur hat sich durch die gute Handhabung und das schnelle Aushärten für die Praxistests bewährt. Die Silos sollen in einem Arbeitsgang ohne Unterbrechung gespritzt werden. Daher müssen für die Berechnung der Materialmenge auch Übergangsbereiche einkalkuliert werden. An jeder Längsseite muss zusätzlich 0,5 m für einen guten Bodenabschluss und an der Querseite jeweils 0,7 m, bedingt durch den Überlappungsbereich der zwei schräggestellten Flachstrahldüsen, bespritzt werden. Die auszubringende Masse wird mit einer Schichtdicke von 8 mm berechnet und zusätzlich 10 % für Materialverlust durch Rückstände im Applikationsgerät und anfängliches Einstellen des Mischungsverhältnisses einkalkuliert. Für den Praxistest werden insgesamt 410 kg Material vorbereitet. Ein dritter Freigärhaufen wird als Referenz mit Unterzieh- und Silofolie abgedeckt und mit Silosäcken beschwert.

Für die Bonitur der Silagequalität werden pro Freigärhaufen 4 Silageproben entnommen. Für die Entnahme werden zwei Probenahmeorte A und B festgelegt, die sich jeweils in Längsrichtung auf der Mittelachse der Freigärhaufen in einem Abstand von zwei Metern ausgehend von der Mitte befinden. Je Probenahmeort wird eine Probe direkt aus der ersten 5 cm Schicht und darunter aus 30 cm Tiefe entnommen.

4.4.4 Gesamtübersicht der praxisnahen Versuche

Die Ergebnisse der praxisnahen Versuche werden zusammenfassend am Beispiel der vier Rezepturvarianten, die bereits bei der Gesamtübersicht der Laborergebnisse herangezogen werden, dargestellt. Die fünf ausgewählten Varianten (A.242, A.351, P20, W10 und W20) wurden in chronologischer Reihenfolge entwickelt. Der Entwicklungszeitraum

deckt den gesamten Zeitrahmen des Forschungsvorhabens ab. Variante W20 ist die zuletzt entwickelte Variante, daher fehlt bei ihrer Bewertung beispielsweise das Ergebnis des Screenings mit Gärgläsern.

Die Applikation der Varianten wird anhand der Tests mit Prototyp 3 bewertet.

4.5 Kompatibilität des Abdeckmaterials im Prozess der Biogasfermentation

Autorin dieses Unterkapitels: Diana Andrade

Die dem Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL-ILT) zur Verfügung gestellten Proben weisen für die Aktivitäts-, Toxizitäts- und Supplementierungs-Analyse (ATS-Analyse), Batch-Analyse und die Durchflussversuche unterschiedliche Strukturen auf. Das Probenmaterial für die ATS- und Batch-Analyse wurde im Labor hergestellt (Rohproben) und nicht den natürlichen Elementen ausgesetzt. Die Struktur weist sich durch eine sehr gleichmäßige und eher schwammartige Beschaffenheit aus. Die Proben für die Durchflussversuche wurden drei Monate bzw. fünf Monate der Umwelt exponiert und somit Regen, Temperaturwechseln, Sonne und Wind ausgesetzt (Umweltproben). Die Haptik des Materials ist nach der dreimonatigen Expositionszeit eher klebrig und weist keine schwammartige Beschaffenheit mehr auf. Deshalb gestaltet sich die Einbringung der Umweltproben als etwas schwierig. Die Zusammensetzungen der getesteten Rezepturvarianten sind der Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung der vier Siloabdeckmaterialien und Stöchiometrische Biogasausbeute (YB) nach BUSWELL und MUELLER (1952) [6]

Parameter	Einheit	K28	P20	P37	W16	YB l/kg oTS*
Natriumbenzoat	% TS	1,36	1,30	2,80	2,04	/
Natriumchlorid	% TS	3,40	–	–	–	/
Rapsöl	% oTS	56,4	58,0	57,7	58,1	1428
Glycerin	% oTS	10,3	7,91	7,87	7,91	730
D-Sorbitol	% oTS	3,08	3,17	3,15	3,16	738
Latex	% oTS	25,6	26,4	26,3	26,4	965
Pektin	% oTS	1,54	1,32	1,31	1,32	693
Cellulosefasern	% oTS	3,08	3,17	3,67	3,16	829
Maximale YB*	l/kg oTS	1.187	1.200	1.198	1.200	/

* Stöchiometrische Biogasausbeute nach Buswell und Mueller

TS = Trockensubstanz, oTS = organische Trockensubstanz

Bei Betrachtung der Zusammensetzung des Probenmaterials wird festgestellt, dass die Rohproben die Konservierungsstoffe Natriumbenzoat und Natriumchlorid beinhalten, welche eine mögliche Hemmung im anaeroben Abbauprozess verursachen können. Zur Untersuchung der Hemmwirkung werden ausgewählte Rohproben ohne Umwelteinflüsse in ATS-Test und Batch-Test untersucht. Insgesamt gilt es, vier Materialien bzw. vier verschiedene Rezepturen eines Stoffgemischs zu beurteilen.

Teilstücke der Siloabdeckmaterialien ohne Umwelteinflüsse werden mittels einer Papierschnidemaschine in Quadrate mit einer Fläche von ca. 1 cm², wie in Abbildung 28 zu sehen, geschnitten. Anschließend wird die Masse von jeweils fünf zufällig ausgewählten Probestücken aufgenommen und rechnerisch der Mittelwert gebildet.

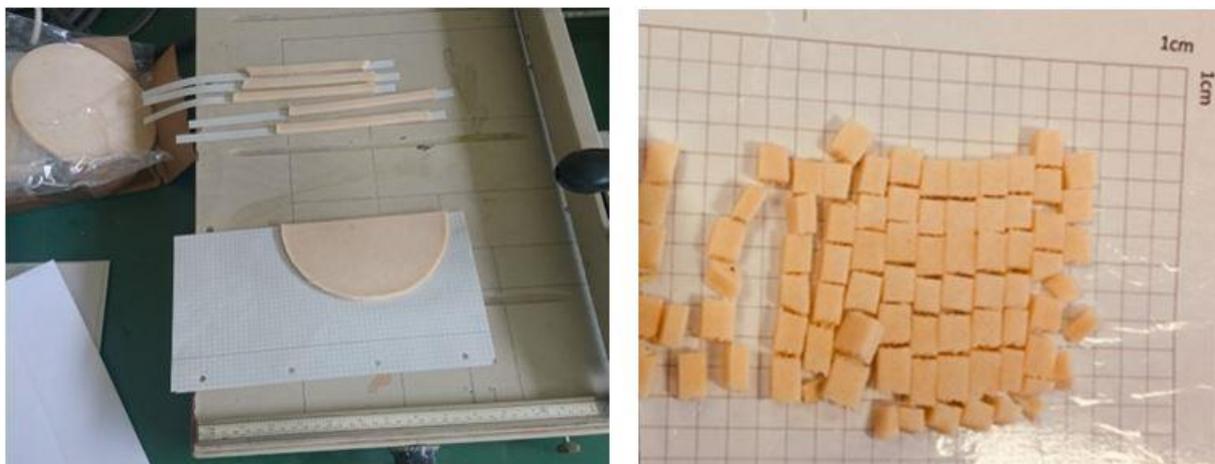


Abbildung 28: Aufbereitung der Siloabdeckungsproben für den ATS- und den Batch-Test

Für die Bestimmung des TS-Gehalts (Trockensubstanzgehalt) werden je zwei Teilstücke des Siloabdeckungsmaterials entnommen und zuerst bei 105 °C für 96 h in einem Trockenschrank getrocknet. Da die Struktur des Materials wegen der Temperatur zerstört wird und das Rapsöl aus dem Material austritt, wird die TS-Bestimmung nochmals bei 80 °C für 72 h durchgeführt. Die Temperatur für die TS-Bestimmung der Proben wird angepasst, um Verluste bei der Analytik zu minimieren. Trotz der Temperatursenkung bei der TS-Bestimmung kann keine Abweichung des TS-Gehalts festgestellt werden.

4.5.1 Aktivitäts-, Toxizitäts- und Supplementierungs-Test (ATS-Test)

Die ATS-Anlage setzt sich aus den Fermentern (250-ml-Flaschen), Drucktransmittern und dem Wasserbad, in dem die Temperatur in einem Bereich von 25 °C bis 70 °C \pm 0,02 °C konstant eingestellt werden kann, dargestellt in Abbildung 29, zusammen. Der Aufbau ermöglicht es, maximal 33 Flaschen im regelbaren Intervall- oder Dauerbetrieb in einer variabel einstellbaren Geschwindigkeit zu schwenken. Am eigens entwickelten Flaschenaufsatz sind bei jeder Flasche ein Absolut-Drucktransmitter (ATM/N, STS, Sirnach,

CH) sowie ein Luer-Hahn mit aufgeschraubter Injektionskappe zur Entnahme von Gasproben angebracht. Der Absolut-Drucktransmitter ermöglicht eine kontinuierliche quantitative Erfassung der Biogasproduktion anhand des Drucks. Mithilfe der Software LabVIEW (LabVIEW 8.6, National Instruments, Austin, USA) wird die Druckentwicklung in den einzelnen Flaschen, Raumtemperatur und Temperaturen im Wasserbad jeweils über einen Zeitraum von zehn Minuten gemittelt, aufgezeichnet und gespeichert. Da der Messbereich der Absolut-Drucktransmitter sowie der Maximaldruck in den Batchflaschen nur bis zu einem absoluten Druck von 2,25 bar reichen, muss der Druck hin und wieder aus den Flaschen mittels des Luer-Hahns abgelassen werden.

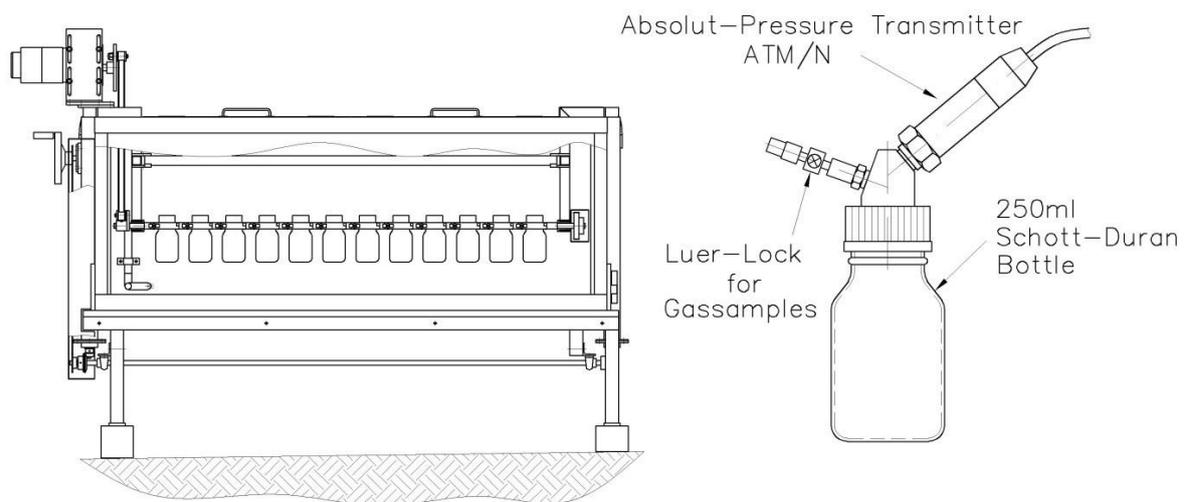


Abbildung 29: Schematische Zeichnung des Aufbaus des ATS-Systems (links) und einer Flasche (Fermenter) (rechts)

Die zu beprobenden Siloabdeckmaterialien werden im Zuge der Probenaufbereitung zuerst in Quadrate einer Fläche von 1 cm² geschnitten und vor der Befüllung nochmals zerkleinert auf 5 mm bis 1 mm, damit ein optimaler Aufschluss und dadurch die mikrobiologische Verwertbarkeit gewährleistet sind. Eine Messstelle besteht aus drei Fermentern (technische Wiederholung) und jede Variante wird auf zwei Messstellen (analytische Wiederholung) untersucht. Insgesamt werden sechs Fermenter pro Variante, wie in Abbildung 30 zu sehen, benutzt. Zusätzlich werden zwei Messstellen mit Nullproben (sechs Fermenter) sowie eine mit einer positiven Kontrolle (drei Fermenter) angesetzt. In jede der Flaschen werden 100 g Inokulum, 50 g destilliertes Wasser und die entsprechende Menge Siloabdeckung eingebracht. Die ursprünglich gewünschte einzubringende Menge Siloabdeckmaterial wurde anfangs auf 1 % der Frischmasse des Inokulums festgelegt. Nach der Berechnung der Siloabdeckmaterialmenge pro Flasche wurde erkennbar, dass das oTS-Mischungsverhältnis zwischen dem Probenmaterial und dem Inokulum aufgrund der Unterschiede in den TS-Werten der Probenmaterialien zwischen 0,53 und 0,67 schwankt. Deshalb wurde ein Mittelwert für das oTS-Mischungsverhältnis zwischen dem Probenmaterial und dem Inokulum gebildet. Der Mittelwert liegt bei 0,6. Dieser Wert liegt über dem empfohlenen Wert der Richtlinie VDI 4630 (2016) von 0,5

[52]. Trotzdem ist das ausgewählte Mischungsverhältnis im ATS-Test geeignet, da die eventuellen Hemmungseffekte der Inhaltsstoffe von den getesteten Siloabdeckungsproben deutlicher ersichtlich werden.

Als Inokulum wird frischer, gesiebter Inhalt aus anteilig 80 % Gülle und 20 % NawaRo eines dauergerührten Fermenters mit einem Volumen von 70 l und einer Raumbelastung von $1,5 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ verwendet.

Saccharose und Rapsöl werden für die Kontrolle gewählt, da Rapsöl einer der Hauptbestandteile der Rezepturen ist und Saccharose eine Referenz zu den auch großteilig enthaltenen Kohlenhydraten darstellt.

Im Anschluss an die Befüllung wird der Kopfraum der Flaschen dreifach mit Stickstoff gespült, um den Lufteintrag zu minimieren, die Probenflaschen verschlossen sowie der Absolutdruck auf etwa 1,1 bar eingestellt und in die Haltevorrichtungen des Wasserbads eingespannt. Die Inkubationszeit beträgt 14 Tage bei einer mittleren Temperatur von $38 \text{ }^\circ\text{C}$.

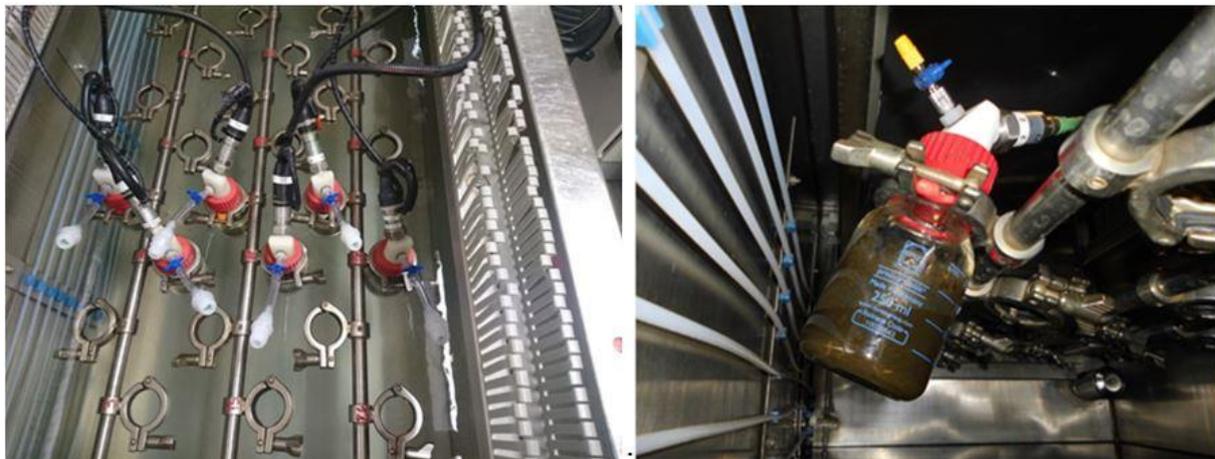


Abbildung 30: Eingespannte Flaschen mit Schlauch und Schnellkupplungen der ATS-Versuchsanlage

4.5.2 Batch-Gärversuche

Eine Batch-Versuchsanlage, dargestellt in Abbildung 31, besteht aus einem Inkubator, zwölf Fermentern, zwölf Gaszählern und einem Gasanalysesystem. Die Batch-Fermenter haben ein Gesamtvolumen von 2 l und ein Arbeitsvolumen von ca. 1,4 l. Die Fermenter wurden mit 400 ml destilliertem Wasser, 1000 g FM Inokulum und 20 g FM Siloabdeckungsmaterial befüllt. Das Verhältnis der organischen Trockenmasse der Probe zur organischen Trockenmasse des Inokulums beträgt $0,5 \pm 0,1$. Die Inkubatoren haben eine Betriebstemperatur von $38 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Zwei Kontrollproben werden angesetzt, um die biologische Aktivität des Inokulums zu überprüfen. Mikrokristalline Cellulose und eine definierte Probe getrockneten Ganzpflanzenmaises dienen als Referenzsubstrate, das Inokulum als Blindwert.

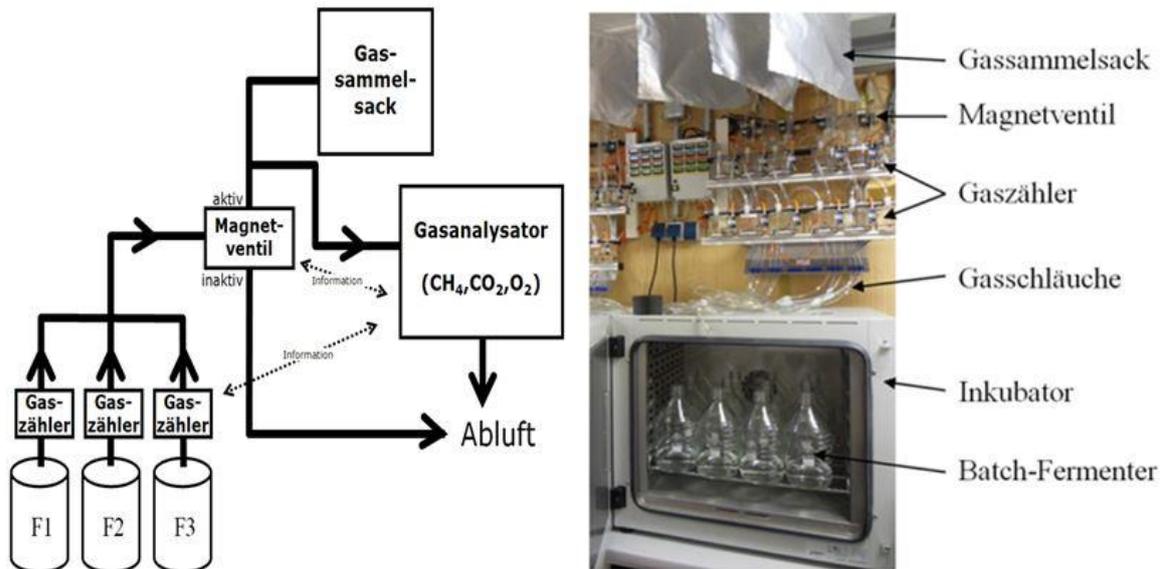


Abbildung 31: Gasführungssystem einer Versuchsvariante mit drei Wiederholungen (links) und die Bestandteile der Batch-Versuchsanlage der LfL (rechts)

Das produzierte Biogas wird über Gaszähler (Ritter Apparatebau GmbH, Bochum, Deutschland) mit einer Genauigkeit von $\pm 3\%$ erfasst. Die Messungen werden online aufgezeichnet und die Daten stündlich gespeichert.

Das produzierte Biogas aller drei Wiederholungen einer Probe wird in einem Gassack gesammelt. Für jeden Gassack findet automatisch nach 1,5 l produziertem Gas, d. h. etwa 0,5 l Gas pro Fermenter, eine Gasanalyse statt. Während des Versuchs werden im Durchschnitt je Dreifachwiederholung einer Probe 33 Gasanalysen erfasst. Die Gasanalyse erfolgt mittels Infrarotsensor für den Methan- und Kohlendioxyd Gehalt, über einen elektrochemischen Sensor wurde der Sauerstoffgehalt (Awite Bioenergie GmbH, Langenbach, Deutschland) erfasst. Die Anlage ist vollautomatisch gesteuert. Zusätzlich werden stündlich Luftdruck und Raumtemperatur aufgezeichnet. Die Biogas- und Methan- ausbeute wird in Normlitern (trockenes Gas bei 273,15 K und 1013,25 mbar) je Kilogramm organische Trockensubstanz (l/kg oTS) berechnet.

Ein definiertes Inokulum gleicher Herkunft ist für den Batch-Gärversuch von entscheidender Bedeutung, da es die mikrobielle Gemeinschaft und folglich die biologische Abbaubarkeit eines Substrats stark beeinflussen kann. Der Impfschlamm für die Batch-Gärversuche stammt aus einer Pilotbiogasanlage, die zur Vorhaltung einer standardisierten Biozönose seit Jahren unter gleichen Bedingungen geführt und täglich beschickt wird. Das Arbeitsvolumen beträgt $2,5\text{ m}^3$ und wird unter „steady-state“-Bedingungen betrieben. Der Variationskoeffizient der Methanproduktivität von fünf Tagen ist kontinuierlich niedriger als 10 %. Basierend auf dem oTS-Gehalt wird der Fermenter mit 80 % Rindergülle und 20 % einer Milchvieh-Futtermischung bei einer Raumbelastung von $3,0\text{ kg oTS}/(\text{m}^3\text{ d})$ gefüttert. Die Versuchstemperatur beträgt $38\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ und die hydraulische Verweilzeit 19 Tage.

4.5.3 Durchflussversuche

Die zu testenden Siloabdeckproben, welche Umwelteinflüssen wie Sonne, Regen und Temperaturunterschieden ausgesetzt waren, sollen in einem kontinuierlichen Durchflussversuch mittels der „in-sacco“-Methode eingebracht werden.

Bei den zwölf Biogasreaktoren mit Nutzvolumina von je 28 l, in welche die Keimträger mit den eingebrachten Probestücken der Siloabdeckmaterialien in Nylonsäcken eingehängt werden, handelt es sich um einstufige Rührkesselanlagen, dargestellt in Abbildung 32, die über eine automatisierte Erfassung und Analyse der Biogasmengen und deren Qualität (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2 und H_2S) verfügen (Awite Bioenergie GmbH, Langenbach, Deutschland). Es werden in jedes Keimträgerrohr jeweils zwei Probestücke eingehängt, die Verteilung ist der Tabelle 12 zu entnehmen.

Die Keimträgerrohre werden einmal wöchentlich entnommen, da eine Füllstandsmessung der Fermenter vorgenommen wird. Die Abbaubarkeit und die Abbaurate der biologisch abbaubaren Siloabdeckmaterialien werden mittels des Masseverlusts der Probestücke bezogen auf die Trocken- und Frischmasse ermittelt. Hierzu werden die befüllten Nylonsäckchen im Trockenschrank bei 60 °C über einen Zeitraum von etwa 96 h getrocknet und anschließend gewogen. Die Fermenter werden während der geplanten Expositionszeit von 99 Tagen (von Versuchstag 208 bis 307) in einem täglichen Turnus beschickt. In der folgenden Tabelle 10 befindet sich die Zusammenstellung der Substratmischung für den Durchflussversuch und in Tabelle 11 die Darstellung des Zeitverlaufs der organischen Belastung im Reaktor während des Versuchs. Die kontinuierlichen Durchflussversuche liefen im Rahmen des Projekts „Verfahrenstechnische Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von Zuckerrüben als Spitzenlast-Substrat in Biogasanlagen“ Förderkennzeichen BE/16/02.

Tabelle 10: Zusammensetzung der Substratmischung im Durchflussversuch

Fermenter	Anteil als Prozent der gesamten zugeführten organischen Masse bei der Beschickung			
	Maissilage	Grassilage	Zuckerrübensilage	Rindergülle
1	81,0	19,0	–	–
2	81,0	19,0	–	–
3	76,5	18,0	5,5	–
4	76,5	18,0	5,5	–
5	73,7	17,2	9,1	–
6	73,7	17,2	9,1	–
7	62,0	14,5	15,5	8,0
8	62,0	14,5	15,5	8,0
9	77,0	17,5	5,5	–
10	77,0	17,5	5,5	–
11	62,0	14,5	15,5	8,0
12	62,0	14,5	15,5	8,0

Tabelle 11: Zeitverlauf der organischen Belastung im Reaktor während des Durchflussversuchs

Versuchstag		Raumbelastung in $\text{kg oTS} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$
von	bis	
208	228	2,0
229	250	2,5
251	277	3,0
278	307	3,5

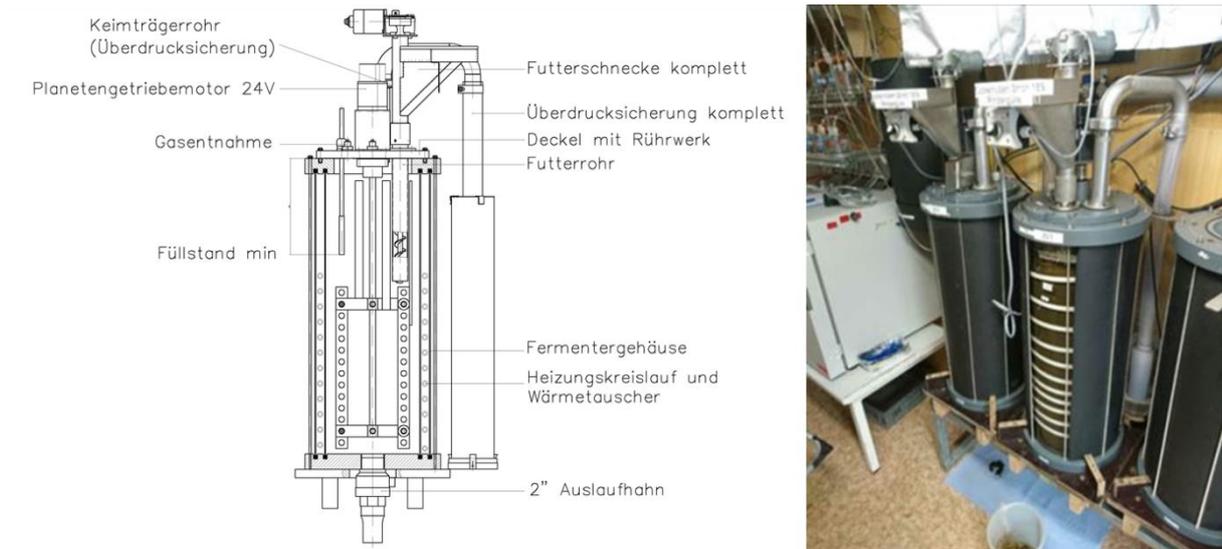


Abbildung 32: Stehender Rührkesselfermenter

Tabelle 12: Probenverteilung im Durchflussversuch

Fermenter Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Probeposition oben im Fermenter	W16	P20	P20	P20*	K28	P37	P20	P20*	K28	W16	W16	P37
Probeposition unten im Fermenter	P37	K28	P20*	P20	P37	W16	P20*	P20	K28	P37	K28	W16

* Proben wurden vorab fünf Monate im Freien gelagert

Für die Versuche in den Durchflussfermentern werden die Proben, wie in Abbildung 33 zu sehen, mittels einer Lochstanze zugeschnitten, um anschließend in einem Nylon-säckchen mit 50 µm Porengröße eingeschweißt zu werden. Auch ist bei dem mittigen Bild in Abbildung 33 zu erkennen, dass die Einbringung teilweise aufgrund sehr klebrigen Materials schwierig ist und das enthaltene Öl bereits das Säckchen benetzt. Alle Bestandteile des Probensäckchens werden einzeln und gemeinsam erfasst und anschließend getrocknet.



Abbildung 33: *In der Umwelt exponierte und während der Probenaufbereitung bearbeitete Siloabdeckung (links), Probestück im Nylonsäckchen (mittig, rechts), Durchflussversuch*

Die Säckchen werden, wie in Abbildung 34 zu sehen, mit Polyethylen-Paketschnur in den Keimträgerrohren befestigt (jeweils zwei Proben pro Keimträger) und diese verschraubt. Anschließend werden sie im trockenen Zustand am Versuchstag 208 in die Fermenter gehängt und verbleiben dort.

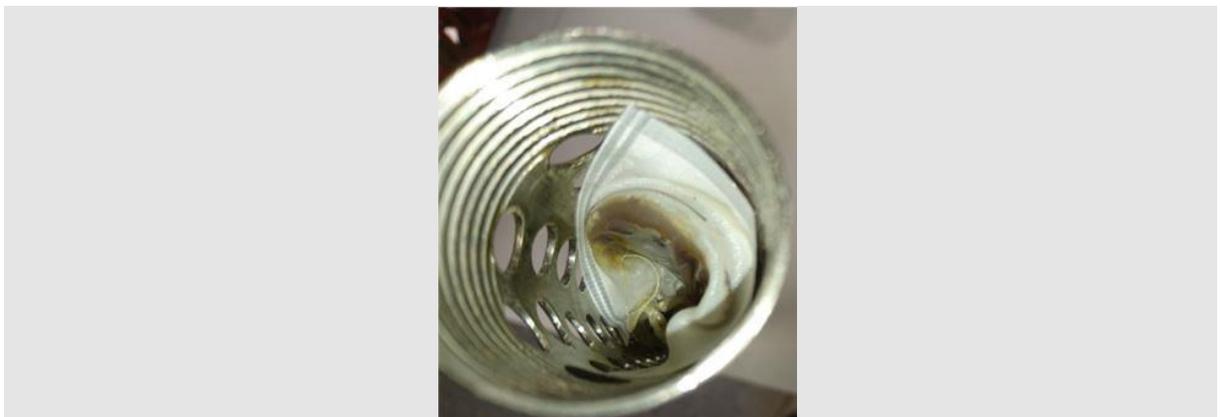


Abbildung 34: *Exposition der Probe im Säckchen mit Polyethylen-Paketschnur, Durchflussversuch*

Am Versuchstag 307 werden die exponierten Proben wieder aus den Fermentern und den Keimträgerrohren entnommen und aufbereitet. Dazu werden die Proben jeweils mit den Säckchen und der Schnur gewogen, mit ca. 200 ml destilliertem Wasser gespült, wieder gewogen und anschließend bei 60 °C für etwa 96 h im Wärmeschrank getrocknet, um die Trockensubstanz bestimmen zu können. Die Säckchen werden nicht aufgeschnitten, da bereits der Batch-Versuch zeigte, dass das Probenmaterial nach dem Bio-

gasprozess sehr mürbe sein kann und es beim Aufschneiden zu Verlusten kommen könnte, was eine Verfälschung der Daten zur Folge haben könnte. Abbildung 35 zeigt die Probenentnahme und die Reinigung der Probensäckchen am Ende des Versuchs.



Abbildung 35: Probenentnahme nach 100 Tagen Exposition (links), Waschen der Probensäckchen mit destilliertem Wasser (rechts)

4.5.4 Chemische Analyse

Zur Beschreibung der verwendeten Substrate und Gärreste kommen physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden zum Einsatz, die der angewandten Abwasseranalytik und Methoden zur Futtermittelanalytik entstammen. In Tabelle 13 sind die Methoden zusammengefasst, welche durch die LfL-Labore der Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen (AQU) durchgeführt werden.

Tabelle 13: Parameter und Methoden der chemischen Laboranalyse

Parameter	Methode	Enthalten in	Kurzbeschreibung
TS	DIN 12880 DIN 38414-S2	Handbuch der Bodenuntersuchung, Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung	Trocknung bei 105 °C (± 2 °C) bis zur Gewichtskonstanz
oTM	DIN 12879 DIN 38414-S3	Handbuch der Bodenuntersuchung, Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung	Veraschung der TS bei 550 °C, TS – Asche = oTM
pH	DIN 38404-C5 DIN 12176	Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung	Elektrode
TAC	DIN 38409 H7	Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung	Titration
FOS/TAC		Nordmann (1977)	Titration
FFS-GC	Hausmethode, verändert nach Methode der SCHMACK BIOGAS AG		Gaschromatograf
NH ₄ ⁺	verändert nach DIN 38406 E5-2	Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung	Wasserdampfdestillation, anschließende Titration

4.5.5 Statistische Methoden

Um signifikante Unterschiede im Biogasertrag zwischen den Siloabdeckmaterialien feststellen zu können, werden einfaktorielle Varianzanalysen (ANOVA) durchgeführt. ANOVA zeigt lediglich auf, ob überhaupt ein signifikanter Unterschied besteht. Wird ein signifikanter Unterschied festgestellt, wird anschließend der Tukey-Test verwendet, um genau feststellen zu können, zwischen welchen Siloabdeckmaterialien die Unterschiede bestehen. Es wird ein Konfidenzintervall von 95 % gewählt (Signifikanzniveau 5 %).

4.6 Abbaubarkeit des Materials unter aeroben Bedingungen – Desintegrationsprüfung

Inwiefern die Silageabdeckung unter aeroben Bedingungen biologisch abbaubar ist, wird durch eine Desintegrationsprüfung mit Komposter im Technikumsmaßstab überprüft. Die Prüfung erfolgt nach DIN EN 13432:2000-12 „Verpackungen – Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau – Prüf-

schema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen“ [10]. Die Temperaturführung im Komposter erfolgt in Anlehnung an ISO 16929:2013-04 [15]. Durchgeführt wird die Prüfung von der ISEGA Forschungs- und Untersuchungsgesellschaft mbH, ein von der DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH anerkanntes Prüflaboratorium für Kompostierbarkeitsprüfungen.

Es werden zwei unterschiedlich gealterte Materialien der Rezeptur K04 getestet. Die Rezeptur unterscheidet sich von der favorisierten Variante W20 lediglich durch die Verwendung von Pektin anstatt Natriumalginats und einen um ca. 1 % geringeren Gehalt an Calciumsulfat. Die Materialien wurden 14 und fünf Monate im Freien in einem 60°-Winkel schräggestellt in Südausrichtung unbeschattet gelagert, damit Wasser gut abfließen kann. Aus den gealterten Materialien wurden je zwei quadratische Prüfkörper mit 10 cm Kantenlänge ausgestanzt. Die Schichtdicke der gealterten Prüfkörper unterscheidet sich wesentlich. Nach fünf Monaten hat die ursprünglich auf 8 mm im Prüfkörper ausgegossene Siloabdeckung noch eine Schichtdicke von 5 mm. Die 14 Monate gealterten Prüfkörper weisen noch eine Dicke von 3 mm auf.

Das Probematerial wird zusammen mit künstlichem Bioabfall einer festgelegten Zusammensetzung, die in Tabelle 14 dargestellt ist, in einen Thermokomposter eingebracht. Der spontan eintretende Kompostierungsprozess wird durch die Messung von Temperatur, Sauerstoff, Feuchte und pH nach ISO 10390 [12] überwacht. Nach dem Ablauf von zwölf Wochen wird die Desintegration des Materials durch Aussieben quantifiziert. Hierfür wird ein Sieb mit einer Maschenweite von 2 mm verwendet. Die im Sieb verbleibenden Rückstände werden gereinigt, getrocknet und gravimetrisch erfasst. Als Ergebnis des Tests wird der Rückstand der Trockenmasse in Prozent angegeben.

Tabelle 14: Zusammensetzung und Charakterisierung des künstlichen Bioabfalls für die Desintegrationsprüfung

<i>Bestandteile des Bioabfalls in % FM</i>	
Gemüse, Obst	62,5
Reifer Kompost	8
Luzerne, Heu, Getreide	6
Rindenmulch	23,5
<i>Weitere Parameter</i>	
Wassergehalt (DIN 38414 S2) in % FM	63
Gesamtgewicht in kg FM	103
pH (ISO 10390)	5,58

4.7 Prüfung der möglichen Mitverfütterung des neuen Abdeckmaterials

Eine mögliche Verwertung der Silageabdeckung als Futtermittel, beigemischt in der Silage, wird durch die Normenkommission Einzelfuttermittel des Zentralausschusses der Deutschen Landwirtschaft bewertet. Hier wurde ein Antrag auf Aufnahme eines Einzelfuttermittels in die Positivliste gestellt.

Für den Antrag werden vorab alle Bestandteile der Silageabdeckung dahingehend untersucht, ob sie bereits als Einzelfuttermittel gelistet [18] oder als Futtermittelzusatzstoff nach Verordnung EG 1831/2003 zugelassen sind [20]. Zudem wird ein mögliches Prozessschema des Herstellungsprozesses der Abdeckung in der Praxis erstellt. Die Silageabdeckung soll idealerweise später in der Praxis zusammen mit der Silage entnommen und mit ihr vermengt verwertet werden.

4.8 Wirtschaftlichkeitsabschätzung des neuen Abdeckverfahrens

Um die Wirtschaftlichkeit des neuartigen Abdeckverfahrens abschätzen zu können, wird jeweils der Gesamtprozess mit einer konventionellen Folienabdeckung verglichen. In einem ersten Schritt werden die Materialkosten inklusive Lieferung eines herkömmlichen Abdeckverfahrens mit Unterzieh-, Silofolie und Schutzgitter mit Sandsackbeschwerung und die der aufspritzbaren Siloabdeckung miteinander verglichen. Hierfür werden Marktpreise der jeweils benötigten Materialien erhoben. Für die Lieferkosten wird ein zentral gelegener Standort in Bayern angenommen.

In einem nächsten Schritt werden die anfallenden Arbeitskosten zur Aufbringung, zu Arbeiten während der Nutzungsdauer aufsummiert und bilanziert. Die Gerätekosten werden ebenfalls berücksichtigt. Für das neue Abdecksystem werden Kosten für einen Umbau eines Selbstfahrers veranschlagt.

In einem dritten und letzten Schritt werden alle anfallenden Kosten für die Entsorgung nach der Nutzung des Abdeckmaterials bzw. Gutschriften für dessen Verwertung bilanziert. Die Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen soll mit der Silage in der Biogasanlage verwertet werden. Daher wird der durch die Vergärung der Silage gewonnene Energieertrag als Gutschrift von den bisherigen Kosten subtrahiert. Abschließend werden beide Gesamtverfahren als Ganzes einander gegenübergestellt.

4.9 Recherche und Beurteilung alternativer Verwendungsmöglichkeiten

Parallel zu den Entwicklungsarbeiten der Silageabdeckung wird nach alternativen Verwendungen des Abdeckmaterials gesucht. Dazu werden Ideen und Bedarf in diversen Bereichen der Landwirtschaft gesammelt. Die Verwendung der Abdeckung für Unkrautunterdrückung und Verdunstungsschutz wurde in einem Tastversuch gemeinsam mit der Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) getestet. Weitere Verwendungsmöglichkeiten werden durch Literaturrecherche und Expertengespräche identifiziert.

5 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Vorhabens dargestellt und zusammenfassend diskutiert. Zur vereinfachten Lesbarkeit werden für die Rezepturen Abkürzungen verwendet, die genaue Zusammensetzung kann dem Anhang entnommen werden.

5.1 Zusammensetzung der Silageabdeckung

Die Zusammensetzung der Rezepturen wird in Abhängigkeit der Analyseergebnisse und Praxistests laufend modifiziert. Insgesamt wurden im Rahmen dieses Projekts über 150 neue Rezepturvarianten getestet. Ein erstes Ziel der weiteren Materialentwicklung ist es, den Lösemittelanteil (Wasseranteil) in der Rezeptur zu reduzieren, um die Schrumpfungseigenschaft des Materials zu minimieren. Abbildung 36 zeigt zur Veranschaulichung der Zusammensetzungsänderung eine Auswahl favorisierter Rezepturen der aktuellen und vorhergehenden Projektphasen. Durch den reduzierten Wassergehalt steigt der Anteil an Latex in der frischen Abdeckung. Bezogen auf die Trockensubstanz verbleibt der Latexanteil, vergleichbar mit den vorhergehenden Projektphasen, bei 20 % bis 25 %. Abbildung 37 zeigt die Zusammensetzung der Materialien bezogen auf die Trockensubstanz.

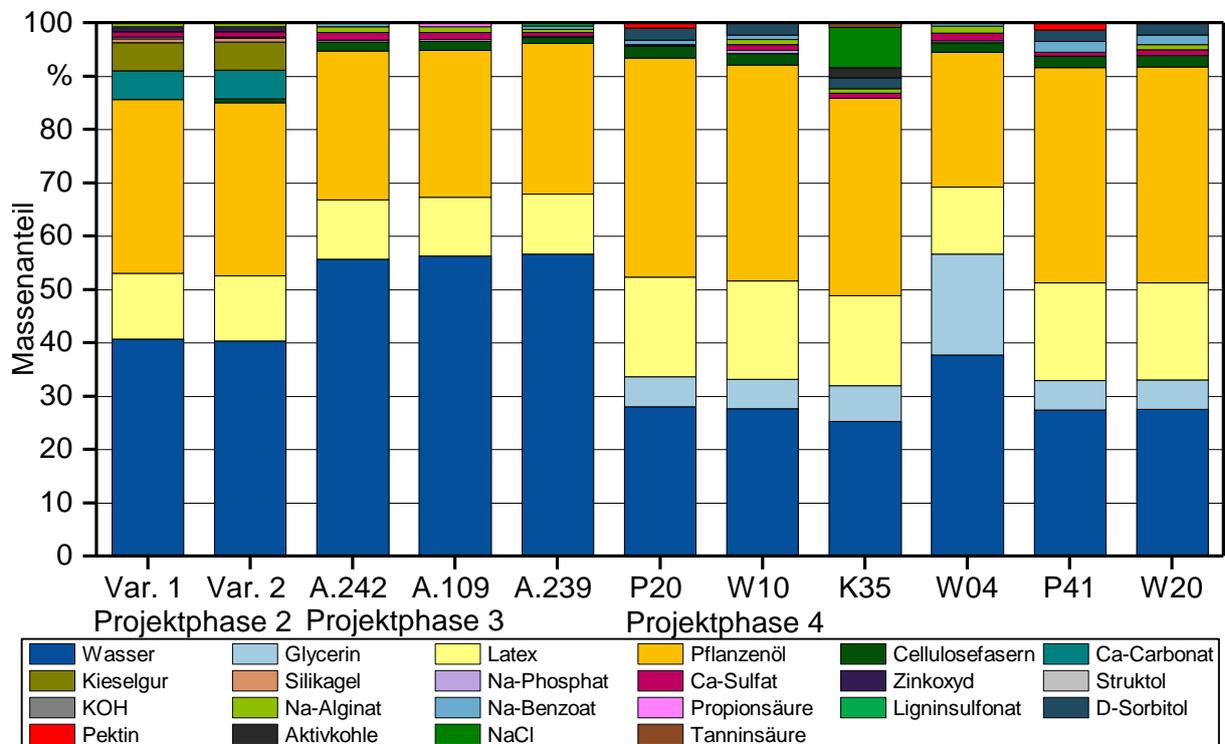


Abbildung 36: Zusammensetzung des Abdeckmaterials favorisierter Varianten der Projektphasen bezogen auf die Frischmasse

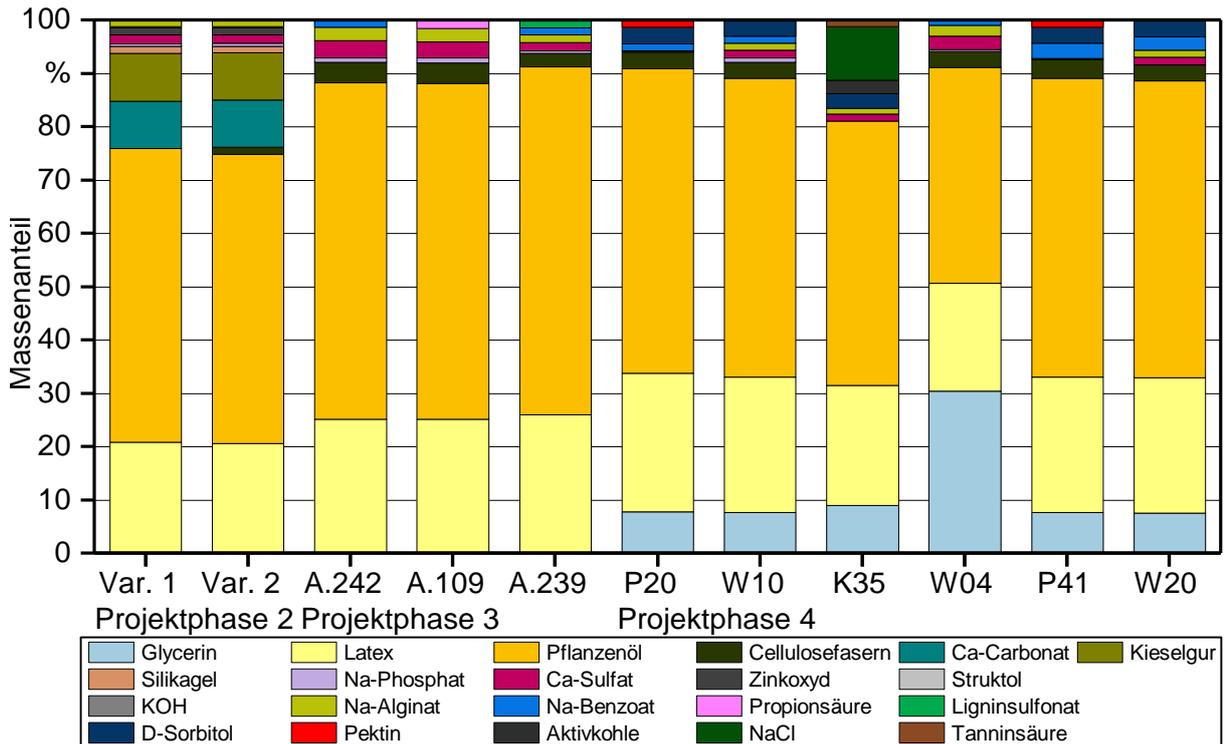


Abbildung 37: Zusammensetzung des Abdeckmaterials favorisierter Varianten der Projektphasen bezogen auf die Trockensubstanz

Als Pflanzenöl wird bei den aktuellen Rezepturen wieder Rapsöl anstelle von Sonnenblumenöl verwendet, da die Eigenschaften beider Öle als Basis von Phase A nahezu gleich sind und Rapsöl preiswerter ist. Dadurch können die Kosten der Abdeckung etwas gesenkt werden. Es ist auch denkbar, das Rapsöl durch kostengünstigeres Sojaöl zu ersetzen. Erste Laborversuche mit Sojaöl wurden bereits durchgeführt und Prüfkörper hergestellt. Zudem wurden zum Teil neue Stoffe, wie z. B. Pektin, Aktivkohle, Chitosan und Natriumchlorid in die Rezepturen aufgenommen, um die Funktionalität zu verbessern. Des Weiteren wird in den neuen Rezepturen Glycerin zugegeben, um die Elastizität zu erhöhen und einen Frostschutz sowie eine Viskositätserhöhung der wässrigen Komponente B zu bewirken. Sorbit als Zusatzstoff bewirkt bei Zugabe in Komponente B ein ebenmäßigeres Erscheinungsbild des Abdeckmaterials und das gut lösliche Alditol scheint einen positiven Effekt auf die Schrumpfungseignung des Abdeckmaterials zu haben.

Als Ergebnis der Laborversuche und der Materialtests unter praxisnahen Bedingungen des ersten Versuchsjahrs wurde eine Rezeptur entwickelt, die auch auf die Anforderungen des eigens entwickelten Applikationsgeräts angepasst ist. Die genaue Zusammensetzung der Variante W20 ist in Tabelle 15 dargestellt. Eine im Labor hergestellte Probe der Silageabdeckung wird im Futtermittellabor auf ihre Rohnährstoffe hin untersucht. Diese Analyse dient als Basis zur Berechnung der möglichen Biogasausbeute und der sich daraus ergebenden Erlöse bei der späteren Verwertung des Abdeckmaterials. Die in Tabelle 16 dargestellten Analyseergebnisse bestätigen das nahezu vollständige Ver-

flüchtigen des Wassers bei trockener Lagerung bei Raumtemperatur. Die Cellulosefasern konnten mit dem für Futtermittel gängigen Analyseverfahren nur in Spuren nachgewiesen werden. Anstatt der 3 % konnten nur 0,1 % Rohfaser in der Trockenmasse nachgewiesen werden. Auch wird der in der Abdeckung enthaltene Latex von den Analysen nicht erfasst.

Tabelle 15: Zusammensetzung der Rezepturvariante W20

Komponente	Bestandteil	Anteil in phr	Masseanteil in % FM	Eigenschaft
A	Rapsöl	220	40,37	Basis
	Natriumalginat	5	0,92	Geliermittel
	Cellulosefasern (BC200)	12	2,20	Füllstoff
	CaSO ₄	6	1,10	Gelierhilfsmittel
B	Latex	100	18,35	Bindemittel
	Wasser	150	27,52	Lösemittel
	Natriumbenzoat	10	1,83	Konservierungsmittel
	Sorbit	12	2,20	Feuchthaltemittel
	Glycerin	30	5,50	Weichmacher

phr = parts per hundred rubber, FM = Frischmasse

Tabelle 16: Trockenmasse und Rohnährstoffe der Silageabdeckung Rezepturvariante W20

Parameter	Masseanteil in %
Trockenmasse bez. auf FM	97,9
Rohasche (XA) bez. auf TM	2,7
Rohprotein (XP) bez. auf TM	13,9
Rohfaser (XF) bez. auf TM	0,1
Rohfett (XL) bez. auf TM	54,0

FM = Frischmasse, TM = Trockenmasse

5.2 Ergebnisse der Materialprüfung im Labor

Laboranalysen bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung der Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen. Es werden bis zu zehn verschiedene Untersuchungen bei vielversprechenden Rezepturvarianten durchgeführt.

5.2.1 Gasdurchlässigkeit

Die Ergebnisse der Gasdurchlässigkeitsprüfung ausgewählter Rezepturen im Vergleich zu einer Polyethylenfolie (PE-Folie) sind in Abbildung 38 dargestellt. Die Mittelwerte der Gasdurchlässigkeit liegen bei der verfahrenstechnisch optimierten Variante A.364 mit einem Wert von etwa $1000 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ im Bereich der PE-Folie mit einer Dicke von etwa 0,15 mm und unterscheiden sich nicht signifikant.

Variante A.351, die sich von der Rezeptur A.242 durch die Verwendung von Glycerin anstatt Sonnenblumenöls in Komponente A unterscheidet, erreicht mit $26 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ die geringste Gasdurchlässigkeit aller Rezepturvarianten und liegt mit einem Permeationskoeffizienten von $0,1 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ im Bereich des Permeationskoeffizienten der konventionellen Silofolie. Bei dieser Rezeptur sind folglich nur sehr dünne Schichtdicken notwendig, um einen guten Sauerstoffabschluss zu gewährleisten. Die Substitution des Sonnenblumenöls durch Glycerin bewirkt die verbesserte Materialeigenschaft. In späteren Silierversuchen in Silofässern wird bei dieser Variante eine nicht ausreichende Witterungsbeständigkeit festgestellt. Die Versuchsergebnisse sind unter 5.4.1 nachzulesen.

Die nach der Herstellung mit Propionsäure abgespritzte Variante A.109 erreicht ebenfalls sehr gute Werte in der Gasdurchlässigkeit und erreicht einen Permeationskoeffizienten in Höhe von etwa $1 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$. Doch die geringe verbleibende Schichtdicke nach der zehntägigen Trocknung des Prüfkörpers von 3,5 mm lässt ein starkes Schrumpfen in der Praxis vermuten. Die weiteren Eigenschaften dieser Rezeptur werden aufgrund der guten Ergebnisse der Gasdurchlässigkeitsprüfung im Praxisversuch „Versuchsreihe 1“ auf Miniatursilos getestet, die Ergebnisse dieses Tests sind unter 5.4.3 zu finden.

Auch die Varianten mit Natriumchlorid zur Unterstützung des Konservierungsmittels und mit Pektin als Geliermittel (N06, K21, K22) zeigen eine niedrigere Gasdurchlässigkeit als die PE-Folie. Bei Variante K21 werden 0,75 % Natriumbenzoat und 1,5 % Natriumchlorid in der Frischmasse zur Konservierung verwendet, der Natriumbenzoatgehalt ist bei K22 mit einem Anteil von 1,0 % höher, ansonsten ist die Zusammensetzung der Varianten identisch.

Der Permeationskoeffizient konnte im Laufe der Materialentwicklung durch Feinabstimmung der Bestandteile von $3 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ auf $2 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ gesenkt werden. Dies bedeutet, dass eine geringere Materialdicke benötigt wird, um eine vergleichbare Gasdichtigkeit zur PE-Folie zu erreichen.

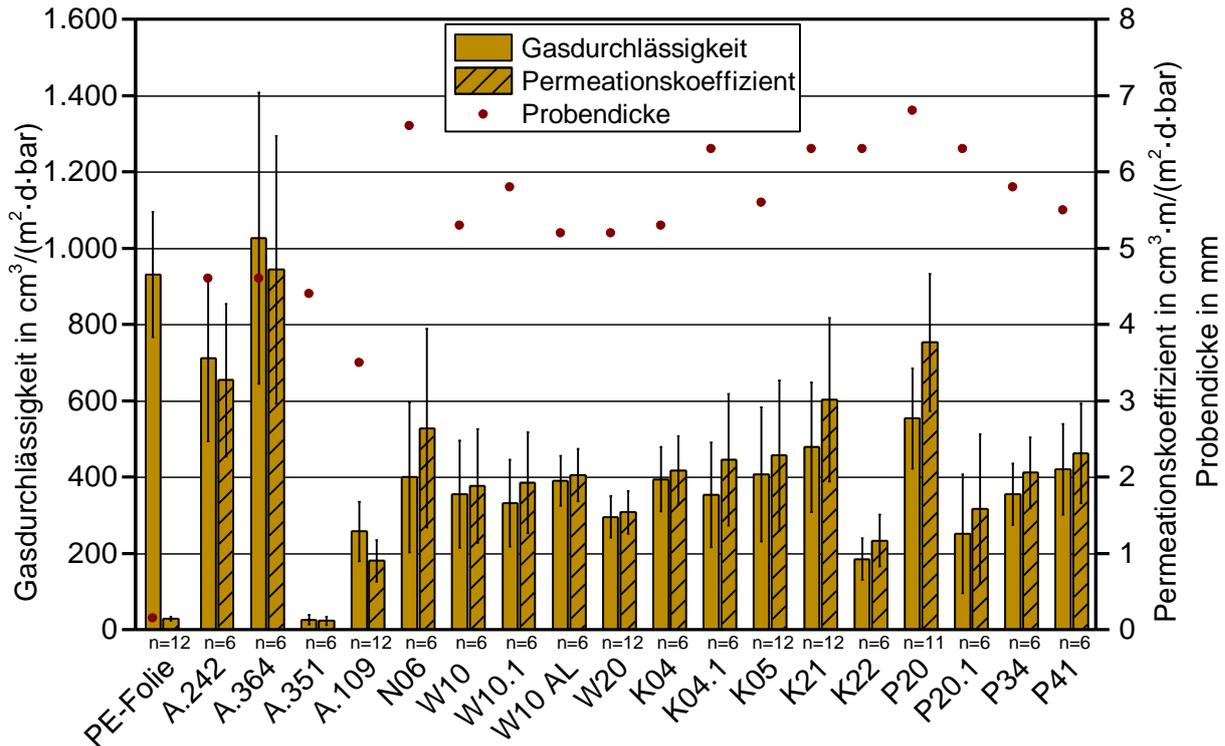


Abbildung 38: Gasdurchlässigkeit und Permeationskoeffizient einer Silofolie aus Polyethylen (PE) und von Probekörpern verschiedener Rezepturen (Mittelwerte mit Standardabweichung) sowie Dicke der Probekörper

5.2.2 Zugfestigkeit

Die Silageabdeckung muss in der Praxis mechanischen Beanspruchungen, wie der Ausdehnung bei der Bildung einer Gärgashaube auf dem Silo oder der Absenkung des Silostocks standhalten. Im Idealfall soll die Silageabdeckung betretbar sein. Daher ist es Ziel der Materialentwicklung, die mechanischen Eigenschaften des Abdeckmaterials zu verbessern. Vor allem die Elastizität, also die Bruchdehnung des Materials soll möglichst hoch sein und gesteigert werden. Doch auch die Kraft, die benötigt wird, um das Material zu zerreißen (Bruchspannung), soll sich nicht verschlechtern.

Die Ergebnisse der Zugfestigkeitsprüfung fallen bei den getesteten Rezepturvarianten sehr unterschiedlich aus. Rezeptur A.242 erreicht eine Bruchdehnung von 13 %, die durch die weitere Optimierung der einzelnen Bestandteile bei Variante A.364 noch weiter sinkt. Durch das Lösen von Na_3PO_4 in der wässrigen Latexkomponente und das Zugabe des Füllstoffs in die Ölkomponente wird die Elastizität des ausgehärteten Materials verringert und die Bruchspannung erhöht. Abbildung 39 gibt einen Überblick über die Dehnbarkeit verschiedener Rezepturen. Im Laufe der Rezepturentwicklung konnte die Bruchdehnung auf Werte von ca. 90 % (W20) und 100 % (P41) gesteigert werden.

Die Elastizität der Abdeckmaterialien steigt mit der Wasserreduzierung, je nach Zugabe von Zusatzstoffen und deren Masseanteilen. So wirken sich nach bisherigen Erkenntnissen beispielsweise eine Erhöhung des Natriumbenzoatgehalts (K05) sowie eine Zugabe

von Natriumchlorid (K21, K22, N06, K35) positiv auf die Elastizität aus. Die Elastizität der Abdeckung, also die Bruchdehnung kann ebenso durch den Einsatz von Glycerin anstatt Pflanzenöls als Basis für Phase A um ein Vielfaches erhöht werden (A.351 und P19). Dabei fällt die Bruchspannung auf ca. 0,1 MPa ab.

Der Einfluss der Cellulosefasern in der Silageabdeckung wird ebenfalls untersucht. Hierfür werden die Rezepturen W10, P20 und K04 ohne den Füllstoff hergestellt. Diese Varianten werden mit einer „1“ hinter dem Rezepturnamen gekennzeichnet (z. B. P20.1). Durch das Weglassen der Cellulosefasern kann keine eindeutige Verbesserung oder Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Bei Rezeptur W10 vermindert sich die Elastizität im Mittel von 69 % auf 58 %. P20 zeigt hingegen durch das Weglassen der Fasern eine höhere Elastizität und bei K04 ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Hier streuen die Messergebnisse von K04.1 allerdings mehr als bei der Originalrezeptur. Die Bruchspannungen der Varianten ohne den Füllstoff liegen jedoch bei allen drei Rezepturen etwas unter den Werten der Varianten mit Cellulosefasern. Abbildung 40 zeigt die gemessenen Bruchspannungen der verschiedenen Rezepturen.

Die Messwerte der Bruchspannung streuen bei Variante A.364 stark, was auf inhomogenes Material hinweist. Durch eine Reduzierung des Wasseranteils im frischen Material werden durchweg niedrige Bruchspannungen von $\leq 0,2$ MPa erreicht (alle Varianten mit Ausnahme von A.242, A.351 und A.364). Sowohl die wasserreduzierten Varianten mit Alginat als Geliermittel (W--) als auch die Varianten mit Pektin (P--, K05–K21) zeigen dieses Verhalten.

Die Prüfkörper der Varianten P12, P13 und P20 sind aufgrund des Lufteintrags durch den Laborrührer bei der Herstellung im Labor sehr schaumig und enthalten viele kleine Luftbläschen, die die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen. Die mit Statikmischer homogenisierten Materialien zeigen bei Applikationsversuchen keinen Lufteinchluss in diesem Ausmaß. Damit die bei der Herstellung im Labor entstehenden Luftblasen aus den Prüfkörpern entfernt werden können, muss ein Verfahren zur Entgasung entwickelt werden. Mit herkömmlichen Exsikkatoren mit Vakuumanschluss konnte dies bisher nicht erreicht werden, da die zusammengemischten Komponenten hierfür zu schnell andicken. Eine alternative Zugabe von Reaktionsverzögerern würde die späteren Eigenschaften des Materials beeinträchtigen. Für die Praxis wird ein schnell härtendes Material angestrebt. Für zukünftige Versuche mit Prüfkörpern im Labormaßstab wird empfohlen, ein Applikationsgerät im Labormaßstab zu entwickeln, in dem die Homogenisierung der beiden Komponenten mithilfe eines Statikmischers und die Aufbringung mit einem praxisnahen Flüssigkeitsdruck und Flachstrahldüse erfolgt.

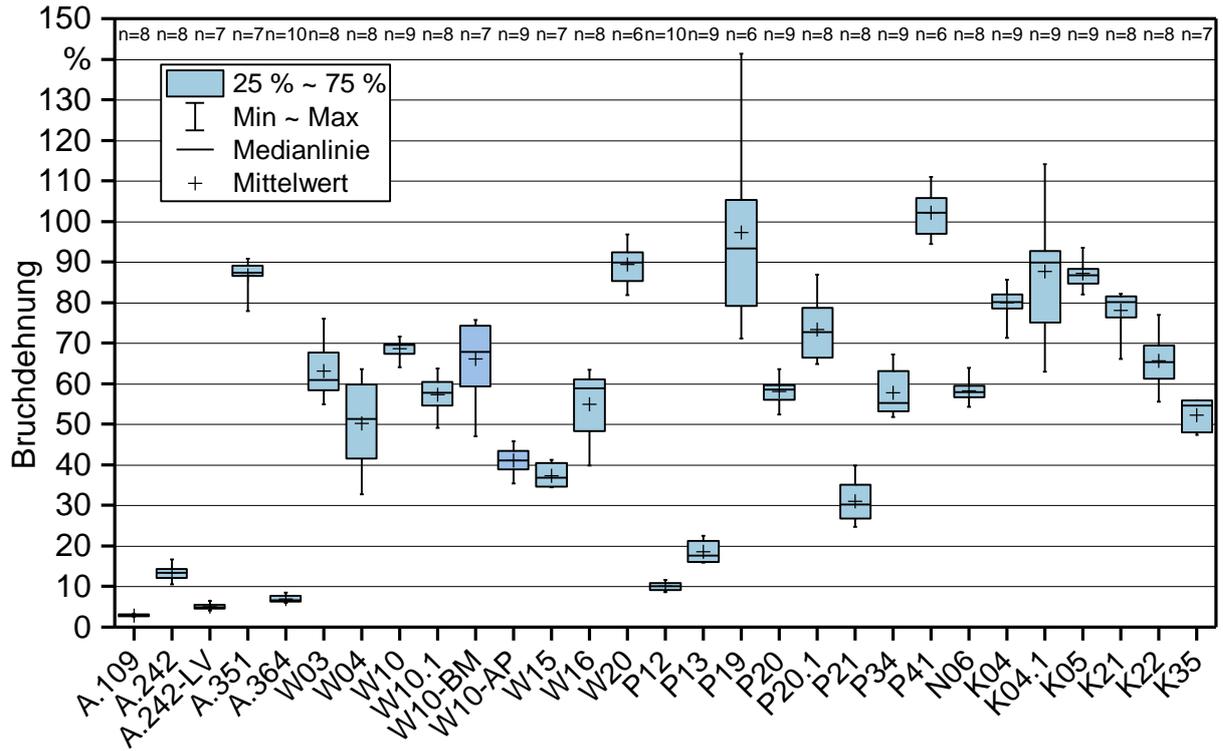


Abbildung 39: Bruchdehnung ausgewählter Rezepturvarianten

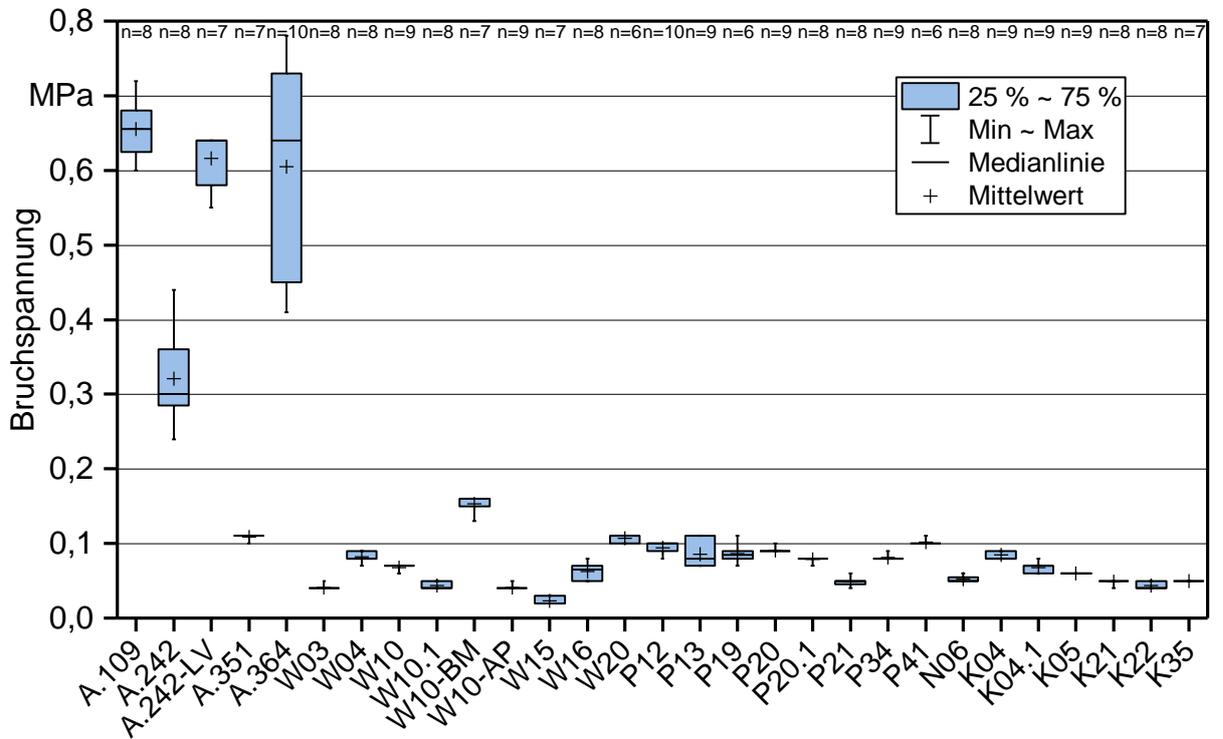


Abbildung 40: Bruchspannung ausgewählter Rezepturvarianten

5.2.3 Säurebeständigkeit

Die im Silierprozess entstehenden Säuren wirken sich bei Kontakt mit dem Abdeckmaterial sowohl auf die mechanischen Eigenschaften als auch auf die Gasdurchlässigkeit des Materials aus. Die Eigenschaften der Silageabdeckung sollen sich durch den Kontakt mit organischer Säure nicht wesentlich verschlechtern.

Einfluss der Säurelagerung auf die mechanischen Eigenschaften des Materials

Die Auswirkung der Säurelagerung auf die Elastizität des Materials fällt je nach Rezepturvariante sehr unterschiedlich aus. Einige Rezepturvarianten, wie A.242, A.364, W15 und P34, zeigen eine Reduktion der Elastizität von weniger als 15 % des erreichten Werts vor der Säurelagerung. Somit haben diese den Zielwert der DLG zur Prüfung von Silofolien erreicht [41]. Jedoch ist zu bemerken, dass es sich hierbei um Varianten handelt, die teils nur eine geringe Elastizität vor der Säurelagerung hatten. Die Varianten A.351 und K05 zeigen einen starken Rückgang in der Elastizität. Doch ist die Bruchdehnung mit über 40 % nach der Säurelagerung noch höher als die der sich wenig verändernden Varianten. Abbildung 41 gibt einen Überblick einiger getesteter Rezepturvarianten vor und nach der Säurelagerung. Die Prüfkörper nach der Säurelagerung sind durch den Zusatz „S“ gekennzeichnet. Für eine genaue Rückführung des Materialverhaltens auf einzelne Rezepturbestandteile müssen noch weitere Tests durchgeführt werden.

P34 und N06 erfahren durch die Säurelagerung eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Die Bruchdehnung erhöht sich bei beiden Varianten geringfügig und erreicht Werte über 60 % und auch die Bruchspannung, wie in Abbildung 42 zu sehen, wurde gesteigert. P34 ist mit einer Bruchspannung von über 0,1 MPa nach der Säurelagerung die vielversprechendste der getesteten Varianten in Bezug auf die Säurebeständigkeit.

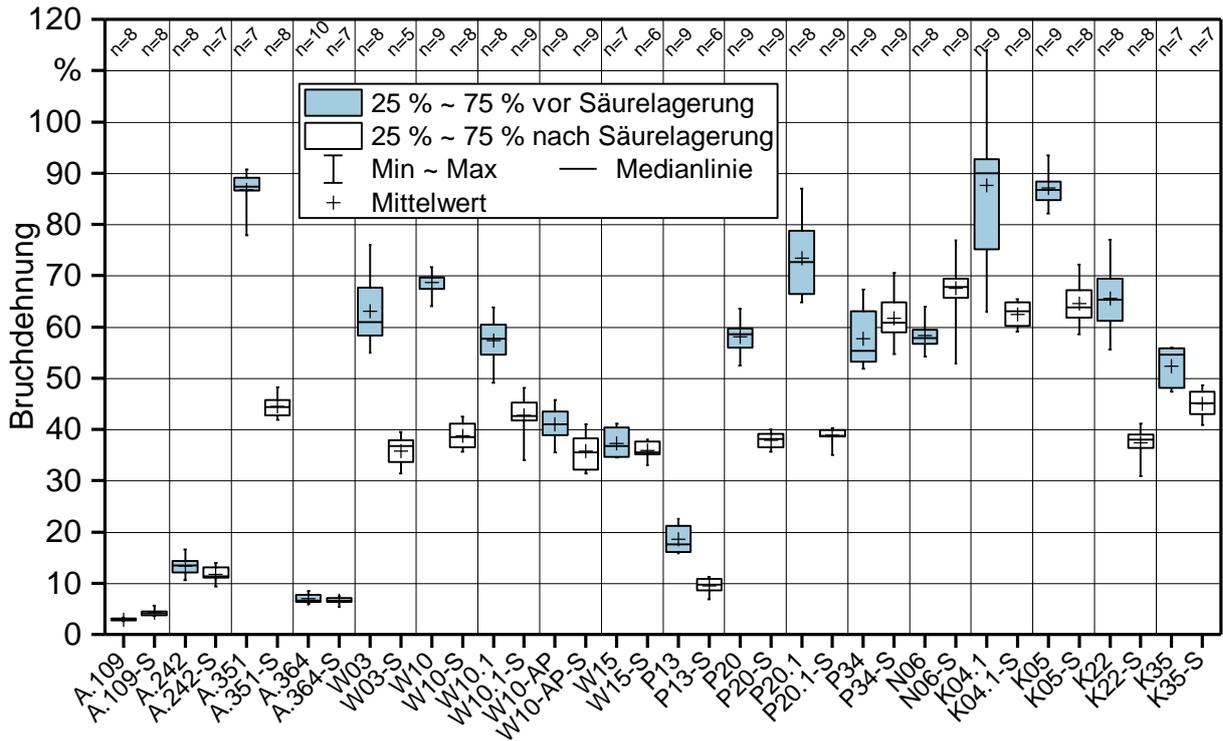


Abbildung 41: Bruchdehnung ausgewählter Rezepturvarianten vor und nach („-S“) einer Säurelagerung

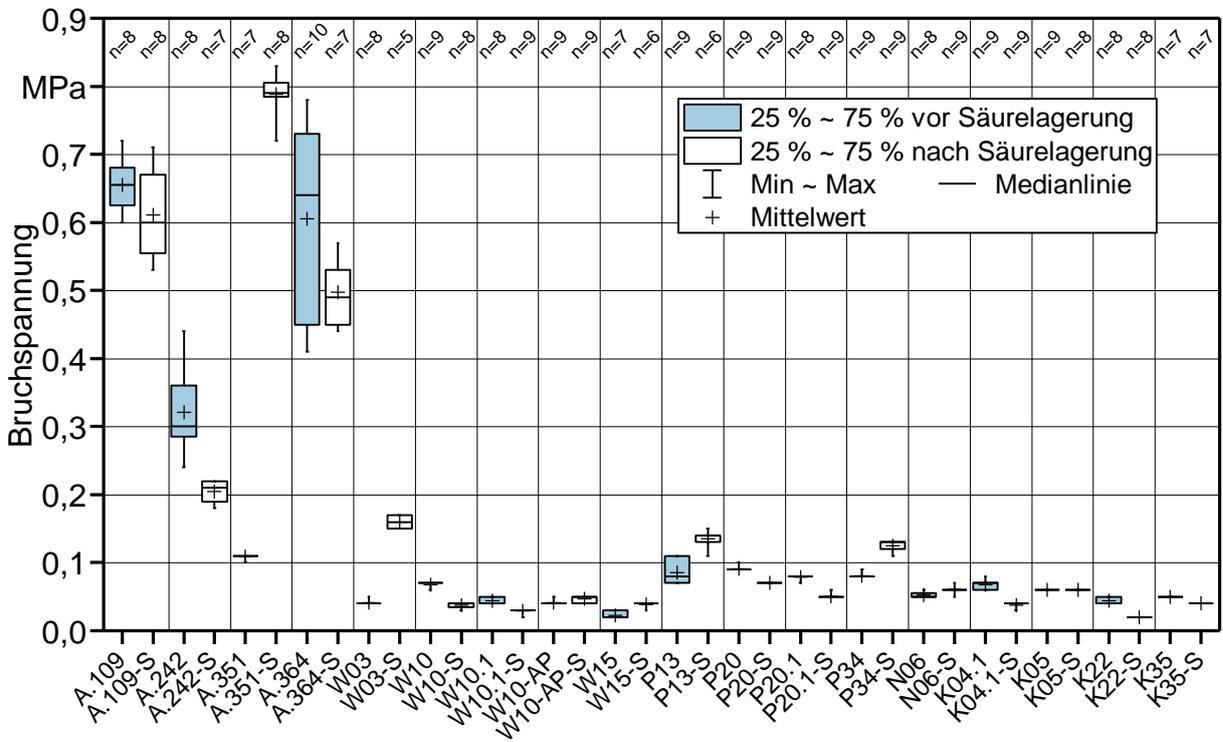


Abbildung 42: Bruchspannung ausgewählter Rezepturvarianten vor und nach („-S“) einer Säurelagerung

Einfluss der Säurelagerung auf die Gasdurchlässigkeit

Abbildung 43 zeigt, wie sich die Säurelagerung verschiedener Rezepturen auf die Gasdurchlässigkeit auswirkt. Zum Vergleich werden die Messergebnisse ausgewählter Rezepturvarianten jeweils unbehandelt und nach der Säurebehandlung einander gegenübergestellt. Auch hier werden im Säurebad gelagerte Prüfkörper mit einem der Rezepturbezeichnung nachgestellten „S“ gekennzeichnet.

Die Gasdurchlässigkeit der Variante A.364 wird durch die Säurelagerung wesentlich verringert. Variante W10 hingegen zeigt nach der Säurebehandlung einen starken Anstieg der Gasdurchlässigkeit und der Permeationskoeffizient steigt von ca. $2 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ auf $4 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ an. Bei den restlichen Rezepturen kann kein signifikanter Unterschied des Messergebnisses vor und nach der Lagerung im Säurebad festgestellt werden.

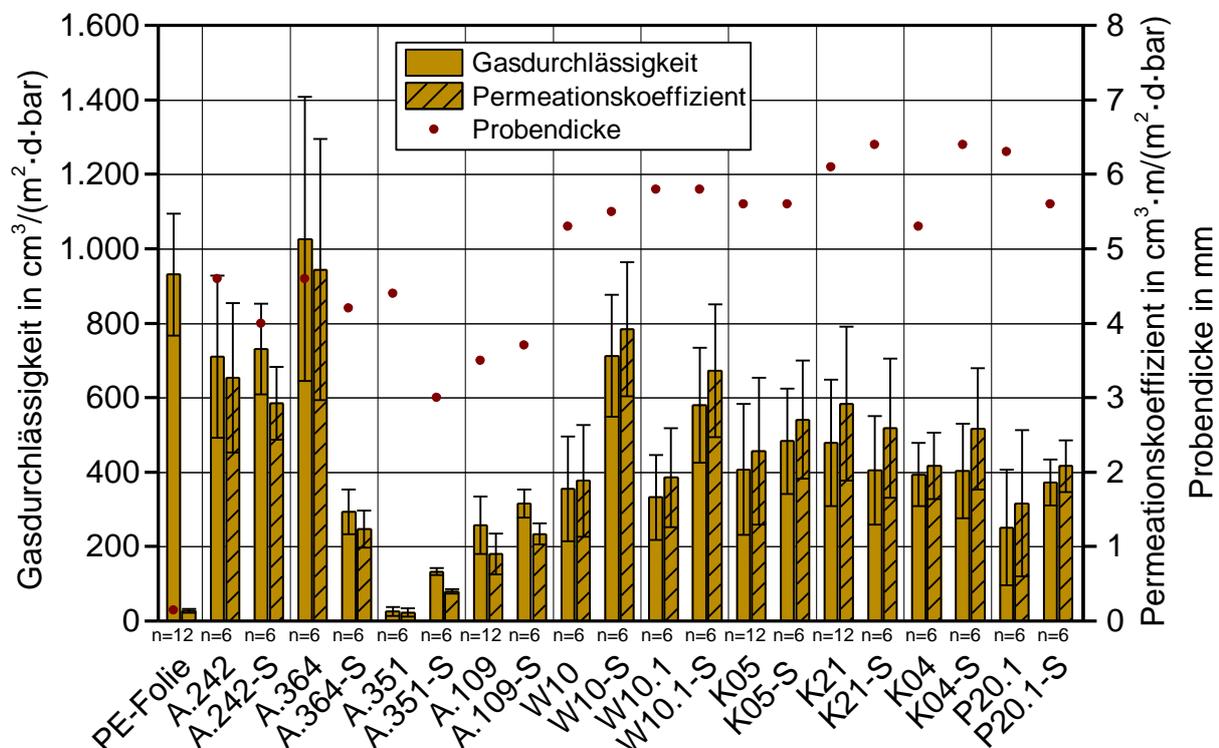


Abbildung 43: Gasdurchlässigkeit und Permeationskoeffizient verschiedener Rezepturvarianten vor und nach („-S“) einer Säurelagerung (Mittelwerte mit Standardabweichung) sowie Dicke der Probekörper

5.2.4 Schrumpfung des frischen Materials

Für die Untersuchung der Schrumpfungseigenschaften werden mehr als 40 verschiedene Rezepturen mit verschiedenen Wasseranteilen, Geliermitteln und Füllstoffen geprüft.

Alle Rezepturen erfahren in den ersten Tagen nach dem Zusammenmischen den größten Masseverlust. Nach sieben bis zehn Tagen ist nahezu eine Massekonstanz erreicht. Beim Abgleich des auftretenden Masseverlusts mit den Masseanteilen verschiedener

Rezepturbestandteile fällt auf, dass der Verlust in etwa dem Gehalt an Wasser entspricht. Das Wasser wird durch die Geliermittel und das polymere Netzwerk des Naturkautschuks nicht am Verdunsten gehindert. Der Masseverlust der Variante A.242 aus vorhergehender Projektphase beträgt nach zwei Wochen 56 %, was dem Wassergehalt der Rezeptur entspricht. In optimierten Rezepturvarianten wird der Wassergehalt so weit wie möglich reduziert, um die Schrumpfung zu minimieren. Wasser, das in Phase B als Lösemittel und später beim Zusammenmischen der beiden Komponenten zur Gelierung benötigt wird, kann jedoch nicht wesentlich unter 30 % Masseanteil gesenkt werden. Somit kann der Masseverlust lediglich von 56 % auf minimal ca. 30 % bezogen auf die Frischmasse reduziert werden.

Rezepturanpassungen mit Superabsorber und sonstigen Feuchthaltemitteln können das Austrocknen der Prüfkörper bei Raumtemperatur nicht verhindern. Daher ist eine Reduktion des Wassers in der Rezeptur die einzige Möglichkeit, dem Masseverlust entgegenzuwirken.

Wie sich die Abdeckmasse beim Austrocknen zusammenzieht, also inwieweit die Prüfkörper bezüglich ihrer Fläche schrumpfen, wird ebenfalls untersucht. Hier kann ein positiver Effekt durch die Zugabe von Sorbit und Glycerin erzielt werden. Das Schrumpfungsverhalten kann durch die Optimierung der Rezeptur um ca. 80 % im Vergleich zur Ausgangsrezeptur reduziert werden.

5.2.5 Wasseraufnahme und Quellverhalten

Da jede Volumenänderung des Abdeckmaterials auf den Silos zu Undichtigkeiten führen kann, ist das Quellverhalten eine entscheidende Materialeigenschaft. Insgesamt werden 24 verschiedene Rezepturvarianten getestet. Abbildung 44 zeigt beispielhaft die Wasseraufnahme 15 unterschiedlicher Materialien. Die Wasseraufnahme der getesteten Rezepturen unterscheidet sich stark und bewirkt je nach Materialbeschaffenheit eine entsprechende Volumenänderung.

Einige der Varianten haben nach einer Woche Wasserlagerung 35 % bis zu über 50 % ihrer ursprünglichen Masse aufgenommen. Dieses Verhalten zeigen vor allem sehr schaumige Prüfkörper, wie die der Varianten P37 und W15, die als Füllstoff längere Cellulosefasern (FT400) als die bisher verwendeten BC200 enthalten. Auch Rezeptur A.242 nimmt nach einer Woche Wasserlagerung 39 % ihrer ursprünglichen Masse an Wasser auf. Diese Variante ist allerdings nicht schaumig und enthält die kürzeren Cellulosefasern BC200. Eine mögliche Ursache für das Quellverhalten ist der im Vergleich zu den übrigen getesteten Varianten erhöhte Gehalt an Natriumalginat in der Trockenmasse.

Um den Einfluss der Cellulosefasern auf das Quellverhalten zu überprüfen, werden verschiedene Rezepturen jeweils mit und ohne Füllstoff getestet. Die Varianten ohne Füllstoff sind mit einer nachgestellten „1“ gekennzeichnet. Es ist festzustellen, dass sich die Wasseraufnahme durch das Weglassen dieses Füllstoffs um mindestens 20 % gegenüber der Rezeptur mit Füllstoff reduziert. Bei Variante K04 kann die Wasseraufnahme durch die Reduktion der Cellulosefasern um etwa ein Drittel gesenkt werden. K04.1

nimmt nach einer Woche ca. 27 % der Ausgangsmasse an Wasser auf, die ursprüngliche Rezeptur (K04) hingegen ca. 40 %.

Doch haben auch der Natriumbenzoatgehalt und weitere Zusatzstoffe wie Natriumchlorid einen entscheidenden Einfluss auf die Wasseraufnahme. Diese Beeinflussung ist in der Regel nicht linear und im Wesentlichen auch von der Kombination der Zusatzstoffe und deren genauen Gehaltseinstellungen abhängig. Im Laufe der Rezepturoptimierung kann die Wasseraufnahme auf weniger als 22 % gesenkt werden. Variante N06 erreicht mit 11 % den niedrigsten Wert. Der sehr hohe Salzgehalt von ca. 7 % in der Rezeptur hat einen positiven Effekt auf die Materialeigenschaft.

Einige Rezepturen werden auch nach drei Monaten Bewitterung getestet. Diese zeigen durchweg eine niedrigere Wasseraufnahme als die frischen Prüfkörper.

Neben der Massezunahme wird über den Versuchszeitraum hinweg auch die Volumenzunahme der Prüfkörper gemessen und somit das Quellverhalten der Silageabdeckung erfasst. Abbildung 45 zeigt die zur Masseänderung zugehörige Volumenänderung der getesteten Prüfkörper. Die Prüfkörper quellen stärker auf, je mehr Wasser sie aufnehmen. Schaumige Prüfkörper, wie P37, nehmen zwar viel Wasser auf, quellen aber im Verhältnis nicht so stark wie kompakte Prüfkörper. Auch hier zeigen die Varianten W15, K04 und A.242 eine sehr ausgeprägte Quellung mit Werten von über 40 % des Ausgangsvolumens nach einer Woche Lagerzeit.

Variante N06 und einige im Freien gelagerte Prüfkörper, wie P16-AL und P20-AL, zeigen das geringste Quellverhalten mit Werten von unter 20 % Volumenzunahme nach einer Woche Wasserlagerung. Die Rezepturen W16 und W20 erreichen hier ebenfalls, für die zur Quellung neigende Silageabdeckung, sehr gute Werte von unter 20 %. Im Vergleich zu Rezeptur A.242 konnte das Quellverhalten durch Optimierung der Rezeptur um 50 % reduziert werden.

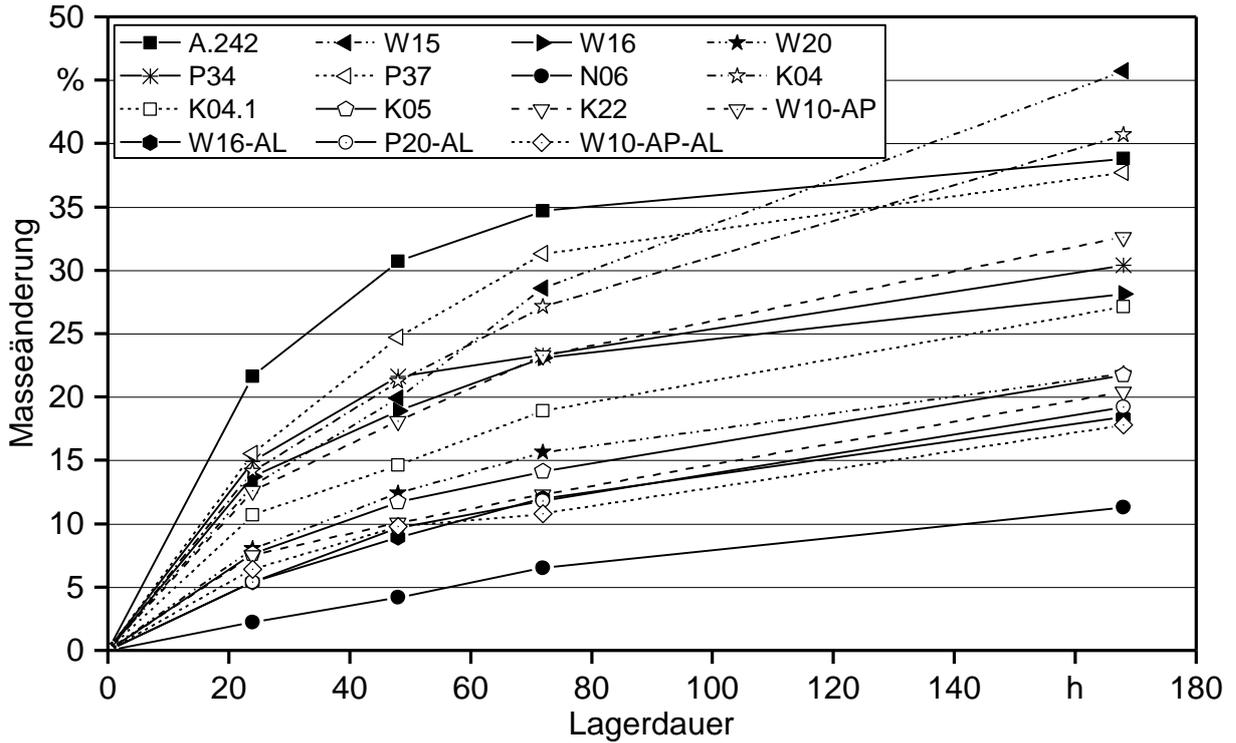


Abbildung 44: Relative Masseänderung ausgewählter Rezepturvarianten nach Lagerung in Wasser

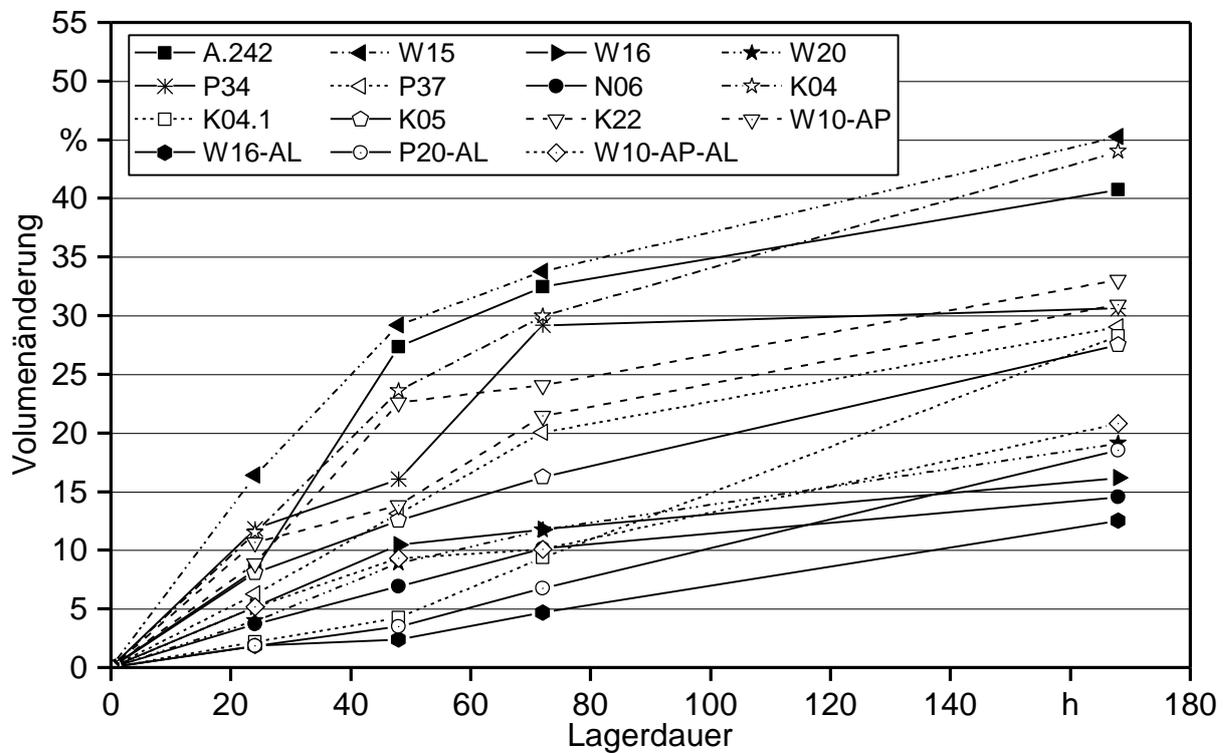


Abbildung 45: Relative Volumenänderung ausgewählter Rezepturvarianten nach Lagerung in Wasser

5.2.6 Temperaturbeständigkeit

Nach 30 min Lagerung bei 80 °C, der geforderten Lagerzeit nach DIN 53377 [16], treten bei den meisten der getesteten Rezepturvarianten noch keine messbaren Volumenänderungen auf und sie entsprechen somit den Anforderungen dieser Norm. Ausnahmen sind die Varianten A.351, N06 und W15. Die Prüfkörper dieser Rezepturen verlieren bereits nach 30 min Warmlagerung über 2 % ihrer ursprünglichen Masse und sind daher für die Praxisanwendung voraussichtlich nicht ausreichend hitzebeständig.

Um die Hitzeresistenz der Silageabdeckung besser abschätzen zu können, wird die Lagerdauer auf sieben Tage ausgeweitet und jeweils nach 24 h, 48 h und 72 h Masse und Volumen der Prüfkörper bestimmt. Die Volumenbestimmung ist aufgrund der Klebrigkeit mancher Varianten nach 24 h nicht mehr möglich, daher werden nur die Ergebnisse nach 0,5 h und 1 h analog zum DLG-Prüfverfahren ausgewertet.

In Abbildung 46 ist der relative Masseverlust über die gesamte Versuchslaufzeit abgebildet. Die Varianten W15 und N06 verlieren durch die Lagerung bei 80 °C über 15 % ihrer ursprünglichen Masse. Variante A.351 (nicht in Abbildung 37 dargestellt) unterliegt sogar einem Masseverlust von über 40 %. Die besten Ergebnisse erzielen Materialien der Rezepturen P20, P20.1 (= P20 ohne Cellulosefasern), W16 (eine Vorgängerrezeptur der favorisierten Variante W20), K04 und W10 AP AL (Variante W10, mit einer frühen Version des Applikationsgeräts „Modulbau mit Düsenführung“ hergestellt und drei Monate im Freien gelagert). Diese Materialien verlieren nach sieben Tagen Lagerung bei 80 °C weniger als 5 % ihrer ursprünglichen Masse. Die restlichen Varianten verlieren nach sieben Tagen Warmlagerung 5 % bis 10 % der Ausgangsmasse.

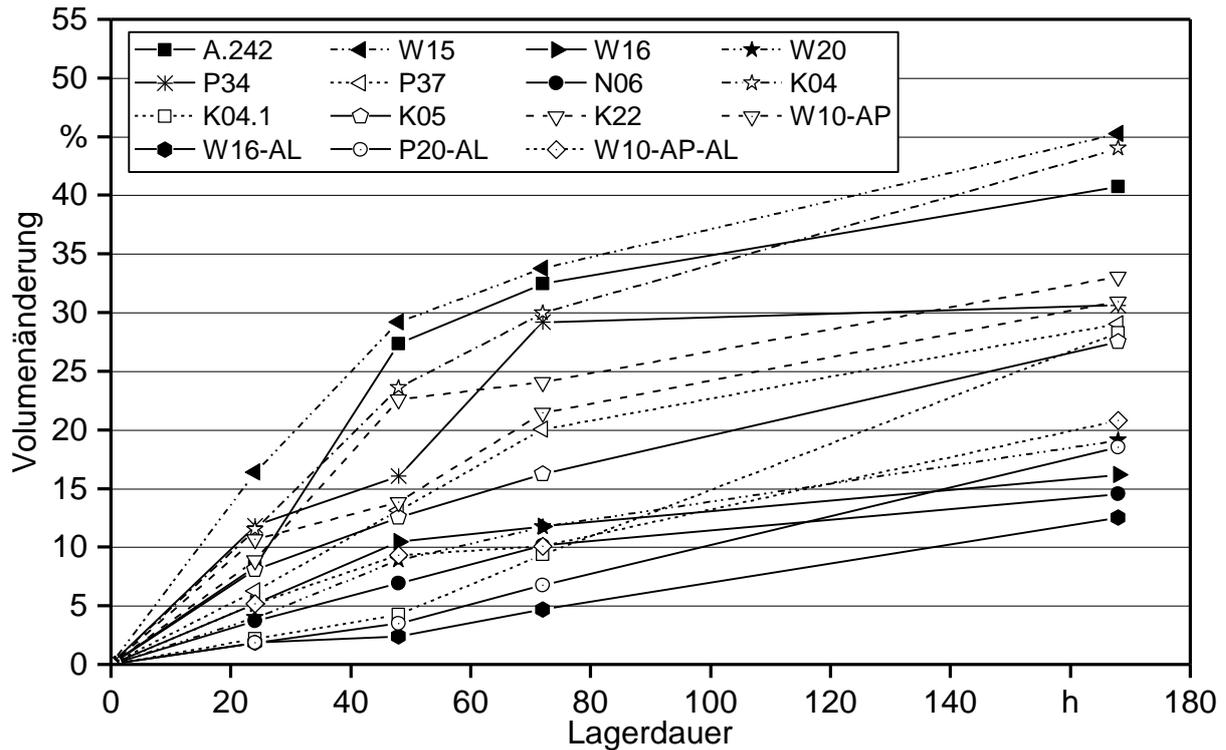


Abbildung 46: Relativer Masseverlust ausgewählter Rezepturvarianten nach Lagerung bei 80 °C

Der ausgedehnte Warmlagerungstest zeigt, dass, mit Ausnahme von A.351, selbst nach drei Tagen Lagerung die Abdeckmaterialien eine Volumenänderung unter 10 % aufweisen. Dies lässt auf eine gute Temperaturbeständigkeit der Abdeckmaterialien schließen. Durch längere Hitzeeinwirkung dunkeln viele Rezepturvarianten nach und werden klebrig. Nach drei Tagen Lagerdauer bei 80 °C tritt bei einigen Varianten (W15, K04, K05 und N06) Öl aus und manche zerfließen (K22), sodass das Volumen der Prüfkörper nicht mehr bestimmt werden kann. Abbildung 47 zeigt Prüfkörper nach einer Woche Warmlagerung. Die anfänglich hellgelben Prüfkörper sind stark nachgedunkelt und bei Variante K04 hat sich Öl aus dem Material abgesondert.



Abbildung 47: Prüfkörper nach sieben Tagen Lagerung bei 80 °C

5.2.7 Verträglichkeit mit Siloanstrichen

Die zwei getesteten Rezepturvarianten zeigen deutliche Unterschiede bei der Materialverträglichkeit mit verschiedenen Siloanstrichen. Die Varianten unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung einzig durch die gewählte Basis für Komponente A. Bei Rezeptur A.364 wird als Basis Sonnenblumenöl verwendet, während Glycerin der Hauptbestandteil der Komponente A der Variante A.351 ist.

Nach acht Tagen wird nach dem Ablösen vom Rahmen jeweils eine Ecke der Prüflinge leicht angehoben und die Wechselwirkungen der Materialien mit den Siloanstrichen kontrolliert. Abbildung 48 zeigt rechts die Glycerin-Variante A.351 auf der mit Bitumen behandelten Unterlage mit ersten Verfärbungen. Die Rezeptur A.364 links im Bild ist bereits komplett geschwärzt. Zu diesem Zeitpunkt ist noch kein Schimmelbefall erkennbar.

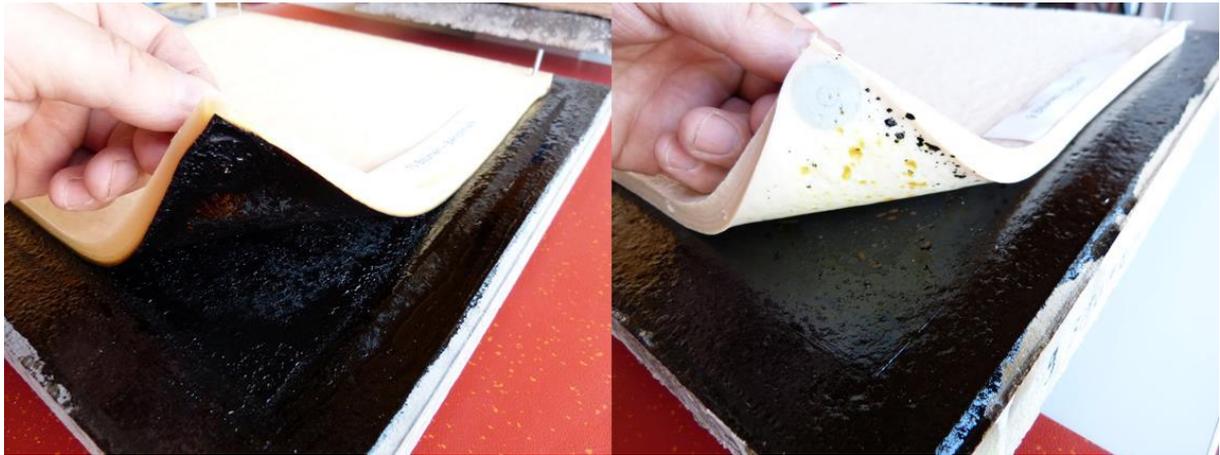


Abbildung 48: Materialverträglichkeit mit dem Siloanstrich: Silo-quick 100 auf Bitumenbasis – links: Rezeptur A.364 mit Sonnenblumenöl, rechts: Rezeptur A.351 mit Glycerin, Zustand eine Woche nach dem Auftragen der Abdeckmaterialien auf den Betonkörpern mit Siloanstrich

Nach vier Wochen hat sich bei Rezepturvariante A.364 erster Schimmel zwischen Siloanstrich und Abdeckung bei dem Bitumenanstrich und dem Anstrich „Sandroplast Universal“ gebildet. Das Abdeckmaterial ist aufgrund der großen Schichtdicke nach vier Wochen nur an der Oberfläche und am Rand getrocknet, an der Unterseite ist die Abdeckung noch sehr hell und weich.

Nach fünf Monaten hat sich der Schimmel auf den bereits befallenen Prüfkörpern weiter ausgebreitet. Neu gebildet hat sich ein Weißschimmelfleck mit ca. 0,5 cm Durchmesser zwischen der Abdeckmasse und dem Silolack „Silodon“. In Abbildung 49 sind die umgedrehten Prüfkörper der Rezepturvariante A.364 am Ende der Versuchszeit nach vier Monaten auf den jeweiligen Siloanstrichen zu sehen.



Abbildung 49: Materialunterseite von Prüfkörpern der Rezeptur A.364 nach fünf Monaten Kontakt mit verschiedenen Siloanstrichen

Bei Rezepturvariante A.351 wird anstatt Sonnenblumenöls Glycerin als Basis für Komponente A verwendet. Hier hat sich auf keinem der Prüfkörper Schimmel gebildet. Die bereits nach wenigen Tagen entstandenen braunen Verfärbungen an der Kontaktfläche zum Bitumenanstrich bleiben die einzig erkennbare Veränderung. Abbildung 50 zeigt die

den Siloanstrichen zugewandte Seite der Prüfkörper vier Monate nach Versuchsstart auf den getesteten Siloanstrichen.

Auffallend bei beiden Rezepturen ist, dass sich nach einiger Zeit ein öliger Film an der Oberfläche der Abdeckung bildet. Dieser kann sich auch negativ auf die Randhaftung zur Silowand auswirken. Bitumen als Anstrich ist für keine der zwei Varianten geeignet: zum einen, weil hier die Abdeckung nur locker auf der Unterlage aufliegt und sich kaum anhaftet, zum anderen bildet sich bei der sonnenblumenölbasierten Rezeptur schnell Schimmel und das Pflanzenöl löst den Bitumenanstrich. Die glycerinbasierte Variante zeigt Verfärbungen. Außerdem ist die Sonnenblumenöl-Variante im Vergleich zu der Glycerin-Variante bei den Anstrichen Sandroplast und Silodon schimmelfälliger.



Abbildung 50: Materialunterseite von Prüfkörpern der Rezeptur A.351 nach fünf Monaten Kontakt mit verschiedenen Siloanstrichen

Diese Materialverträglichkeitsuntersuchungen lassen sich voraussichtlich auch auf die weiteren entwickelten Rezepturen übertragen, da Pflanzenöl als ein Hauptbestandteil nicht verträglich mit gängigen Bitumenanstrichen ist.

5.2.8 Lagerbeständigkeit der Einzelkomponenten bei Raumtemperatur

Fünf Rezepturvarianten werden über ein Jahr hinweg auf die Lagerstabilität der Einzelkomponenten hin untersucht. Dazu werden im Abstand von sechs Wochen die jeweiligen Komponenten zuerst vorab auf Veränderungen, wie die Bildung von Koagulaten, untersucht und anschließend zusammengemischt. Hierbei werden Änderungen bei der Reaktionszeit und dem fertig ausgehärteten Material erfasst. Es werden Auffälligkeiten festgehalten, die bei allen Varianten komponentenspezifisch auftreten.

Komponente A – Ölphase

Bei allen Ölkomponenten setzen sich nach wenigen Stunden die unlöslichen Feststoffe ab und ein Bodensatz bildet sich. Nach Wochen und Monaten wird dieser immer fester und auch schwieriger aufzurühren. Damit die Komponente gut dispergiert wird, ist mindestens eine Stunde Rührzeit erforderlich, wobei zu beachten ist, dass die Rührgeschwindigkeit des Laborrührers bei Komponenten mit Cellulosefasern nicht über 700 rpm erhöht werden sollte, da die Cellulosefasern sonst aufquellen und ein scherkraftbedingter Viskositätsanstieg erfolgt.

Komponente B – Latexphase

Je höher der Wassergehalt der Latexphase, desto schneller bilden sich bei der Lagerung Koagulate. Nach drei Monaten bildet sich bei allen Varianten eine rahmartige Schicht, die jedoch wieder gut aufgerührt werden kann.

Es ist möglich, die vorgemischten Latexkomponenten auch ohne Wasseranteil aufzubewahren und erst beim Aufrühren zuzumischen. Hierdurch kann das Lagervolumen stark reduziert werden. Jedoch dickt die Komponente stark an und neigt zum Austrocknen, wenn sie Cellulosefasern enthält, wie es bei den Rezepturen A.242 und A.109 der Fall ist.

Besonderheiten der getesteten Rezepturen

Die Rezeptur K35, bei der Tanninsäure zur Erhöhung des pH-Werts in Komponente B gegeben wurde, hat bereits nach drei Monaten Lagerung nach dem Öffnen der 1-l-Flasche einen stark modrigen Geruch. Das Mischen der zwei Komponenten ist nicht mehr ausreichend möglich. Die Phasen trennen sich während des Rührvorgangs wieder auf und dadurch härtet die Masse auch nicht zufriedenstellend aus. Wie zu erwarten war, ist eine Absenkung des pH-Werts durch Tanninsäure für eine Lagerstabilität der Latexphase ungünstig. Diese Rezeptur kann also nur wenige Wochen zwischengelagert werden. Nach sechs Wochen bei Raumtemperatur gibt es noch keine Beeinträchtigung der Materialeigenschaften.

Die Rezeptur P20, eine wasserreduzierte Variante mit Pektin als Geliermittel und Cellulosefasern in Komponente A, lässt sich auch nach einem Jahr Lagerung noch gut mischen und ausgießen. Das ausgehärtete Material unterscheidet sich jedoch von der frisch angerührten Abdeckmasse. Das Material ist weicher und ist weniger reißfest, erst nach drei Wochen erreicht die Abdeckung die gewohnte Haptik und das Aussehen der aus frischen Komponenten hergestellten Variante. W10 zeigt ein ähnliches Lagerverhalten wie P20. Bei beiden Varianten entstehen nach neun Monaten erste kleine Koagulate in der Latexphase.

Variante A.242 zeigt bereits nach drei Monaten Lagerung ein beschleunigtes Reaktionsverhalten. Die Abdeckmasse härtet schneller aus, es sind kleine Koagulate in der Masse zu erkennen und das ausgehärtete Material ist wesentlich härter und spröder als das frisch zusammengemischte Material. Je länger die Lagerzeit, desto größer und zahlreicher werden die Koagulate in Komponente B. Variante A.109 verhält sich im Wesentlichen wie A.242.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es möglich ist, vorgemischte Komponenten über längere Zeit bei Raumtemperatur zu lagern, doch nach drei Monaten beeinträchtigt die Lagerzeit bereits die Eigenschaften der Abdeckung und erste Koagulate in der Latexphase entstehen. Daher sollten die Komponenten bei längeren Standzeiten zumindest gekühlt gelagert und nach Möglichkeit möglichst schnell aufgebraucht werden. Wichtig ist vor allem auch der schnelle und luftdichte Verschluss bei der Einlagerung.

5.2.9 Witterungsbeständigkeit

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Schimmelresistenz, zum Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften sowie zur Gasdurchlässigkeit nach Lagerung der Silageabdeckung im Freien dargestellt, um Rückschlüsse auf die Witterungsbeständigkeit zu ziehen.

5.2.9.1 Schimmelresistenz

Bereits vier Stunden nach Beginn der Lagerung der Prüfkörper im Freien, bei einer Temperatur von 26 °C und einer Luftfeuchte von 80 %, ist ein Ausschwitzen von Öl bei einigen Prüfkörpern zu erkennen. Die Prüfkörper werden durch den Einfluss der Sonneneinstrahlung klebrig. Auffällig ist hierbei, dass die Klebrigkeit mit dem Gehalt an Natriumbenzoat ansteigt. Prüfkörper K15 mit Aktivkohle als Füllstoff und einem Natriumbenzoatgehalt von 2,5 % schwitzt am stärksten Öl aus. Hingegen weisen K34–K36, die ebenfalls Aktivkohle enthalten, trotz des warmen und sonnigen Wetters keine Klebrigkeit auf. Als Konservierungsmittel ist diesen Varianten über 7 % Natriumchlorid und Tanninsäure zugesetzt. Alle Rezepturen mit Tanninsäure als Säureregulator und Chitosan (K16–K20) schwitzen auffallend weniger als die restlichen Prüfkörper. Abbildung 51 zeigt die Prüfkörper auf dem Rahmen vor Beginn der Lagerung im Freien.



Abbildung 51: Prüfkörper vor Beginn der Lagerung im Freien

Drei Monate nach Beginn des Lagerversuchs ist bei den meisten der Prüfkörper keine Schimmelbildung erkennbar. Erster Schimmel bildet sich auf der Blindprobe K00 und leichte Schwarzfärbungen sind auch in der Prüfkörperreihe mit Chitosan und Tanninsäure zu erkennen (K16–K19). Abbildung 52 zeigt die zwei Prüfkörper, an denen als Erstes Schimmel angesetzt hat. Die Aufnahmen wurden in den frühen Morgenstunden angefertigt, da zu dieser Zeit die Silageabdeckung durch die hohe Luftfeuchtigkeit und das Anhaften von Tau hell gefärbt ist. Dies ermöglicht die Überprüfung der sonst schwarz gefärbten Prüfkörper, da hier vor allem Schwarzsimmel sehr schwer zu erkennen ist.

Abbildung 52 zeigt auch einen Prüfkörper mit Aktivkohle als Füllstoff (K14), hell gefärbt durch die Feuchtigkeit. Hier ist keine Schimmelbildung erkennbar. Insekten sowie durch Wind verwehte Blätter oder Samen haben sich auf den meisten Prüfkörpern festgesetzt. Wie erwartet beginnt die Schimmelbildung an den Stellen mit Staunässe. Auf den unbehandelten Holzleisten, die zur Anhebung der unteren Seite der Prüfkörper am Rahmen angebracht sind, bildet sich ebenfalls ein schwarzer Schleier von Schimmelpilzen.

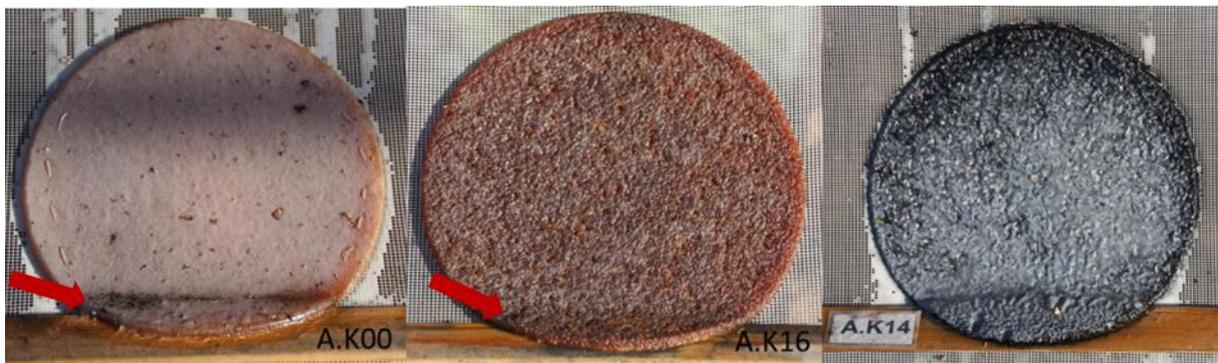


Abbildung 52: Prüfkörper nach drei Monaten Lagerung im Freien

Nach fünf Monaten Bewitterung sind auf den Prüfkörpern mit einem niedrigeren Gehalt an Konservierungsmittel von $\leq 1,5\%$ Natriumbenzoat (K00–K03 und K37–K39) Schwarzsimmel am Rand und auf dem unteren Bereich der Prüfkörper zu sehen. Auch durch das zusätzlich enthaltene NaCl kann der Schimmelbildung bei geringeren Gehalten an Natriumbenzoat nicht entgegengewirkt werden (K21–K30). Die Prüfkörper mit Natriumchlorid und einem erhöhten Gehalt an Natriumbenzoat werden stark durch Regen ausgewaschen und weisen nur noch sehr geringe Schichtdicken auf.

Abbildung 53 zeigt die Prüfkörper nach sechs Monaten Lagerung im Freien. Die Prüfkörper mit Natriumbenzoatgehalten $\geq 2\%$ sind nach wie vor schimmelfrei (K04, K05, K09, K10). Geringere Masseanteile an Konservierungsmittel sind nicht ausreichend, um eine Schimmelbildung zu verhindern. Die Varianten mit Aktivkohle als Füllstoff lassen ebenfalls keinen Schimmel erkennen. Neben Natriumbenzoat mit mindestens 2% Masseanteil scheint auch eine Kombination von Natriumchlorid, Tanninsäure und Aktivkohle für die Konservierung geeignet zu sein (K34–K36). Des Weiteren ist zu erkennen, dass Natriumchlorid keine verstärkende Wirkung auf das Natriumbenzoat hat und auch in größeren Mengen in der Abdeckung ohne zusätzliches Biozid einer Schimmelbildung nicht entgegenwirken kann (K21–K30).

Das Holz des Prüfkörperrahmens ist inzwischen nahezu komplett mit Schimmel überzogen, dem Anschein nach handelt es sich hierbei um Bläuepilze. An Stellen nahe den Prüfkörpern, vor allem in den unteren Reihen mit höheren Biozidgehalten, treten Bereiche auf, die gänzlich unversehrt sind. Bei genauerer Betrachtung ist festzustellen, dass durch Auswaschungen der Abdeckmaterialien das Holz direkt unter dem Prüfkörper im-

prägniert und somit die konservierende Wirkung des Abdeckmaterials auf das Holz übertragen wurde.



Abbildung 53: Prüfkörper nach sechs Monaten Lagerung im Freien

Nach 14 Monaten wird die Bewitterung im Freien abgebrochen und der Versuch abschließend ausgewertet. Die meisten der Prüfkörper sind stark nachgedunkelt und mit einem schwarzen Schleier überzogen. Abbildung 54 zeigt die Prüfkörper am Ende des Lagerungszeitraums. Mit Ausnahme der ersten senkrechten Reihe (K01–K05) sind die Materialien mit bloßem Auge schlecht zu unterscheiden. Inwieweit die äußerst dunklen Prüfkörper auch mit Schimmel überzogen sind, kann schlecht bewertet werden. Daher werden alle Prüfkörper vom Rahmen entfernt und mithilfe einer Hinterleuchtung überprüft. Die Durchleuchtung der Prüfkörper lässt gut erkennen, inwieweit die verschiedenen Konservierungsstrategien erfolgreich sind und welche Konzentrationen im Material benötigt werden, um eine gute Schimmelresistenz gewährleisten zu können. Abbildung 55 zeigt die Gegenüberstellung der Prüfkörper K00 bis K05. Hier steigt der Natriumbenzoatgehalt von 0 % (K00) auf 2,5 % (K05) an. Erst ein Gehalt ab 1,5 % (K03) lässt einen positiven Effekt des Konservierungsmittels erkennen. Auf Prüfkörper K03 hat ein Ahornsaamen eine Schimmelspur hinterlassen. Bei den Prüfkörpern K04 und K05 begrenzt sich der Schimmel auf den Bereich, an dem sich Wasser aufstauen konnte. Die größeren schwarzen Punkte auf den Prüfkörpern sind anhaftende Insekten.



Abbildung 54: Prüfkörper nach 14 Monaten Lagerung im Freien



Abbildung 55: Prüfkörper mit zunehmendem Natriumbenzoatgehalt von K00 (0 %) bis K05 (2,5 %) – Reihe oben von links nach rechts: K00, K01, K02 – Reihe unten von links nach rechts: K03, K04, K05 nach 14 Monaten Lagerdauer

Nach 14 Monaten im Freien sind ansonsten alle Prüfkörper mit Schimmel überzogen. In Reihe K21 bis K25 wurde der Effekt von einer zusätzlichen Natriumchloridzugabe auf das Material untersucht. Die Prüfkörper enthalten analog zu K01 bis K05 0,25 % bis 2,5 % Natriumbenzoat. Sie sind an ihrer Unterseite sehr klebrig und können nicht vom Netz entfernt werden. Je höher der Natriumbenzoatgehalt, desto dünner ist der verbleibende Prüfkörper, ein Großteil der Abdeckung wurde ausgewaschen. Auf Abbildung 56 ist im Vergleich zur Blindprobe deutlich erkennbar, dass sich bei den Prüfkörpern mit Natriumchlorid und Natriumbenzoat in Kombination sogar mehr Schimmel angesammelt hat. In Kombination mit Natriumchlorid kann Natriumbenzoat seine konservierende Wirkung nicht entfalten. Auch in Kombination mit Tanninsäure (K06–K10) kann ein Natriumbenzoatgehalt von 2,5 % einer Schimmelbildung nicht entgegenwirken.

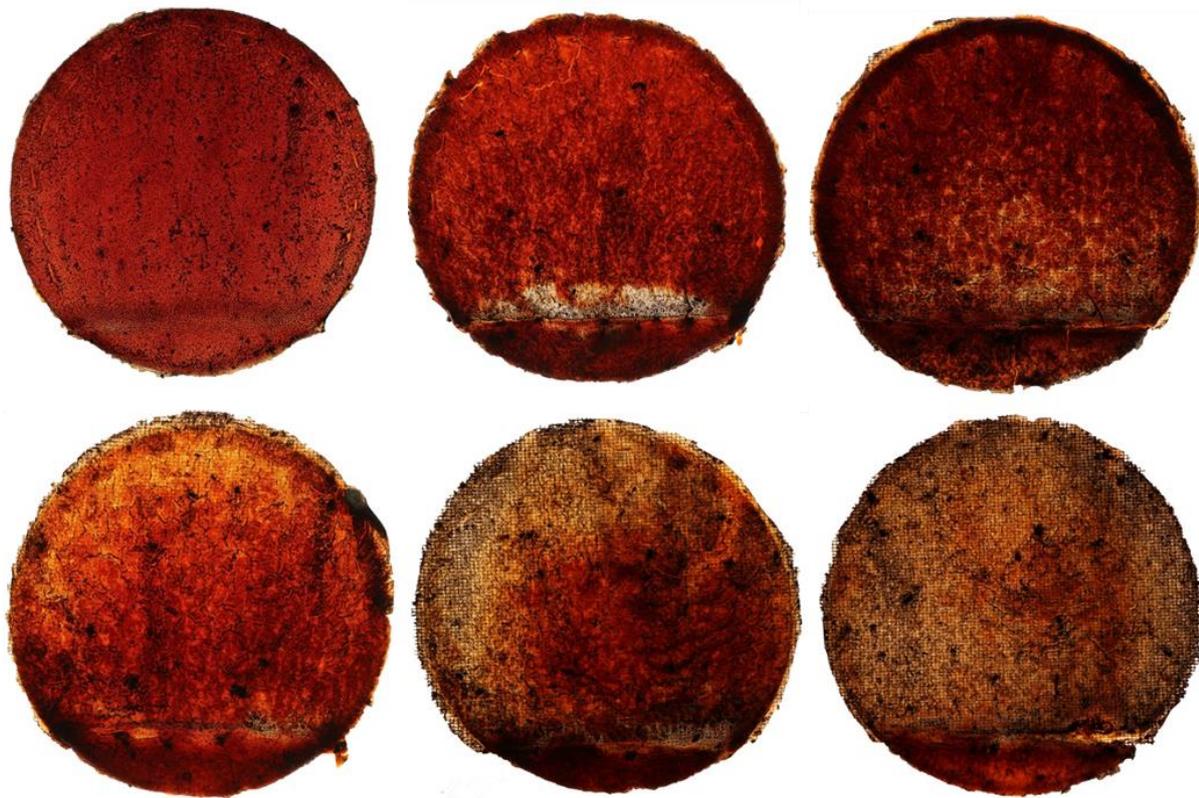


Abbildung 56: Prüfkörper mit zunehmendem Natriumbenzoatgehalt von K00 (0 %) bis K05 (2,5 %) und einem Natriumchloridgehalt von 1,5 % – Reihe oben von links nach rechts: K00, K21, K22 – Reihe unten von links nach rechts: K23, K24, K25 nach 14 Monaten Lagerdauer

Der Witterungsversuch zeigt, dass zur Vermeidung von Schimmel auf dem Abdeckmaterial ein Natriumbenzoatgehalt von mindestens 1,5 % notwendig ist. Chitosan, Tanninsäure und Natriumchlorid haben keinen positiven Effekt auf die Schimmelresistenz der Silageabdeckung.

5.2.9.2 Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften

Nach drei Monaten Bewitterung werden Zugprüfungen mit gealtertem Abdeckmaterial durchgeführt. Zu welcher Jahreszeit die Bewitterung stattfindet, hat einen erheblichen Einfluss auf die Materialeigenschaften. Material, das beispielsweise im Zeitraum September bis einschließlich Mai bewittert wird, ist nach drei Monaten an der Oberfläche klebrig und an der Unterseite im Vergleich zu frischem Material nahezu unverändert und nur leicht klebrig. Die Prüfkörper, die in den Sommermonaten im Freien gelagert werden, bilden eine harte, trockene Haut an der Oberfläche und die Unterseite ist sehr klebrig und schwierig vom Prüfkörperrahmen zu entfernen. Auch farblich unterscheiden sich die unterschiedlich bewitterten Prüfkörper stark. Abbildung 57 zeigt Prüfkörper derselben Rezeptur, einmal im Sommer von Juni bis August und von September bis November bewittert. In den Sommermonaten dunkelt die Silageabdeckung unter starker Sonneneinstrahlung stark nach. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden nur die Ergebnisse der Prüfkörper miteinander verglichen, die im Zeitraum September bis Mai bewittert wurden.



Abbildung 57: Prüfkörper zweier unterschiedlicher Rezepturen (P20 und W16) nach jeweils dreimonatiger Bewitterung im Freien – Zeitraum der Lagerung links: Juni bis August, rechts: September bis November

Die Prüfkörper weisen nach der Lagerung eine gleichbleibende oder wie bei Rezeptur P20, W16 und W20 eine wesentlich höhere Bruchdehnung als das frische Material auf. Abbildung 58 zeigt die Bruchdehnungen ausgewählter Rezepturvarianten jeweils vor und nach der Bewitterung. Die im Freien gelagerten Prüfkörper werden durch die zusätzliche Bezeichnung „AL“ für Außenlagerung gekennzeichnet. Die Rezepturvarianten W16, W20 und P41 sind im Mittel nach dreimonatiger Lagerung im Freien über 100 % dehnbar und erreichen somit die besten Werte der getesteten Varianten.

Die Bruchspannung dieser drei Rezepturen sinkt allerdings auf Werte unter 0,05 MPa, was einer Verminderung um ca. 50 % entspricht. Wie in Abbildung 59 zu erkennen ist, sind die Werte der restlichen Varianten nahezu gleichbleibend. Rezeptur W10 weist einen Anstieg in der Bruchspannung auf und ist somit die einzige Variante, die durch die Bewitterung im Freien sowohl eine höhere Dehnbarkeit als auch Bruchspannung aufweist.

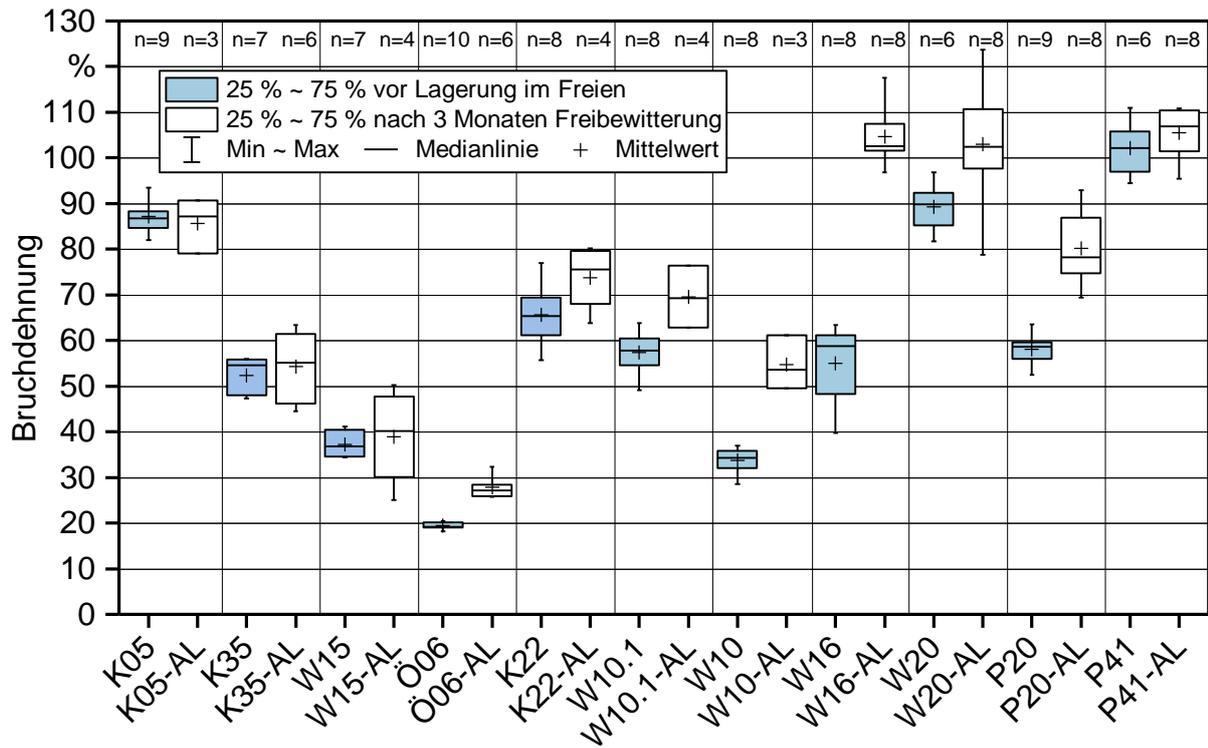


Abbildung 58: Bruchdehnung ausgewählter Rezepturvarianten vor und nach („-AL“) dreimonatiger Lagerung im Freien

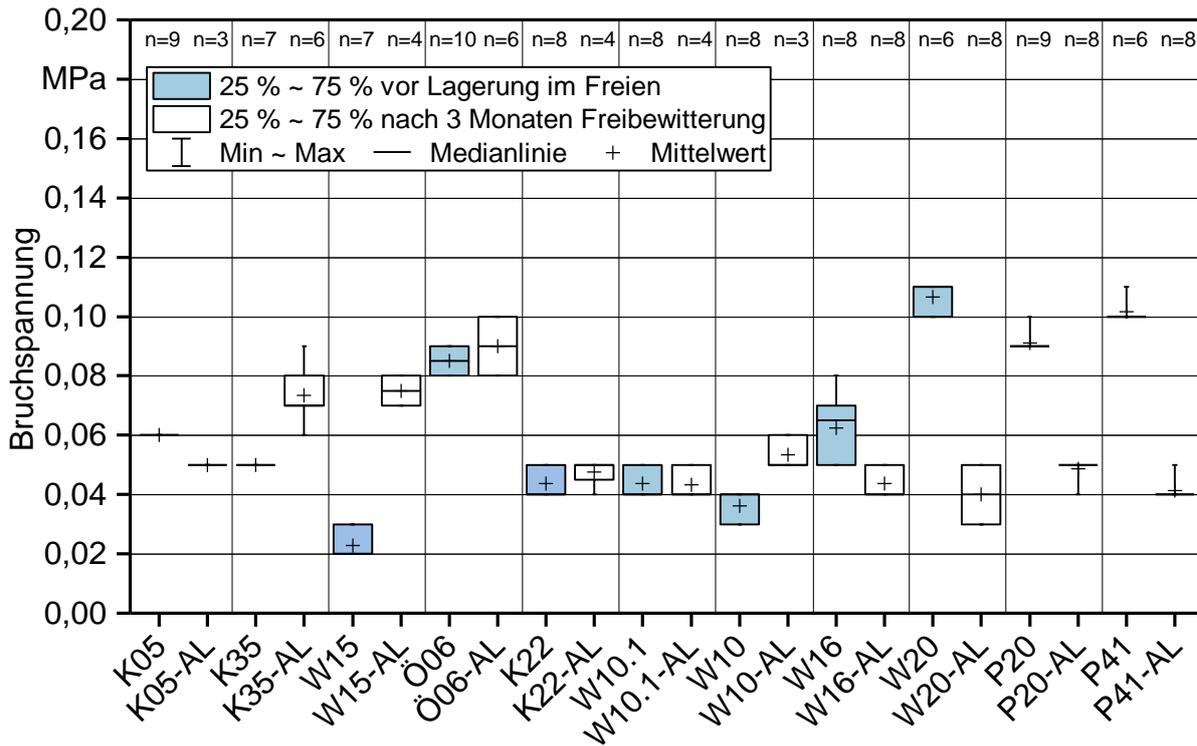


Abbildung 59: Bruchdehnung ausgewählter Rezepturvarianten vor und nach („-AL“) dreimonatiger Lagerung im Freien

5.2.9.3 Gasdurchlässigkeit nach der Bewitterung

Die Gasdurchlässigkeit der Variante Ö06, bei der als Pflanzenöl Sojaöl und als Geliermittel Alginat verwendet wird, kann von den frisch hergestellten Prüfkörpern nicht gemessen werden. Die Prüfkörper sind im frischen Zustand sehr schaumig und weisen viele Luft einschlüsse auf, die zu Undichtigkeiten führen. Nach dreimonatiger Lagerung im Freien (Ö06-AL) hat sich das Material aufgrund der Sonneneinstrahlung so verdichtet, dass eine mittlere Gasdurchlässigkeit von 212 cm³/(m² d bar) erreicht wird. Der Permeationskoeffizient ist mit 1,0 cm³ m/(m² d bar) im Vergleich zu Variante A.242 von SIMON et al. (2015) [47] um das Dreifache geringer. Auch K21 wird durch die Bewitterung wesentlich gasdichter und erreicht sogar einen Permeationskoeffizienten unter 1 cm³ m/(m² d bar). Zu bemerken ist hierbei auch, dass sich die Probendicke von 6,2 mm durch die in diesem Falle fünfmonatige Lagerung nicht geändert hat, also hier durch die Bewitterung kein Materialschwund entsteht. Durch die längere Lagerungszeit von März bis Juli war das Material auch den hohen Temperaturen im Sommer ausgesetzt. Nach einer anfänglichen Klebrigkeit hat sich an der Oberfläche ein spröder, trockener Film gebildet, der dem Anschein nach im Wesentlichen zu dem guten Analyseergebnis beiträgt. Die Prüfkörper der im Frühjahr und Herbst drei Monate bewitterten Prüfkörper sind sehr klebrig und daher sehr schwierig zu messen. Die Gasdurchlässigkeit ändert sich hier im Falle von Variante W10 nicht wesentlich.

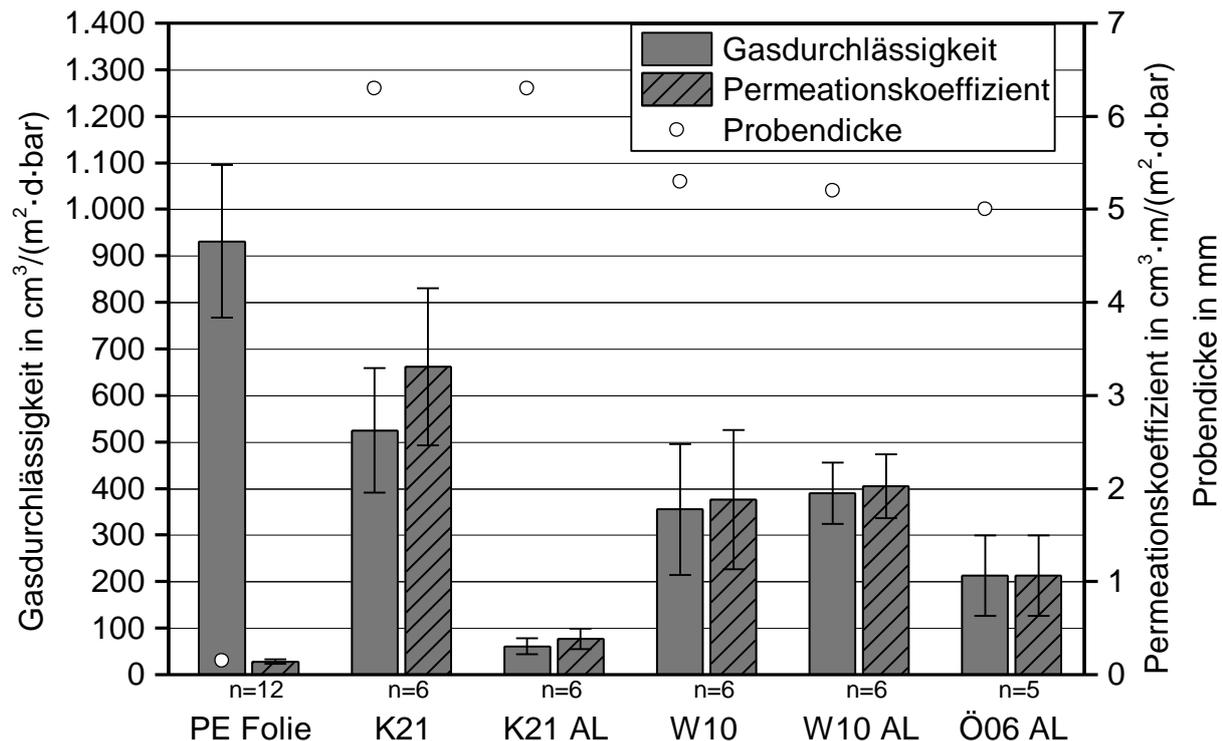


Abbildung 60: Gasdurchlässigkeit der Silageabdeckung vor und nach („-AL“) einer dreimonatigen Lagerung im Freien

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die Gasdichtigkeit des Materials durch die Lagerung im Freien im Vergleich zu der des frischen Materials nicht verschlechtert, sich bei schaumigen Abdeckvarianten sogar wesentlich verbessert.

5.2.10 Temperaturabhängige Viskositätsmessung

Für die Entwicklung eines Applikationsgeräts ist es wichtig, möglichst genaue Kenntnisse über das zu fördernde Fluid zu haben. Bei den zwei Komponenten der Silageabdeckung handelt es sich um zwei Flüssigkeiten, die miteinander reagieren und aushärten. Hierbei ist zum einen die temperaturabhängige Viskosität für die spätere Aufbringung wichtig. Es gilt allgemein, dass sich in der Viskosität ähnliche Substanzen leichter mischen lassen als Fluide mit sehr unterschiedlichen Viskositäten und temperaturabhängigem Viskositätsverhalten. Daneben wird auch der Einfluss der Scherkraft auf das Fließverhalten der zwei Komponenten ermittelt.

Die dynamische Viskosität der Komponente auf Rapsölbasis (Phase A) ist, wie in Abbildung 61 zu sehen, bei allen untersuchten Rezepturen stark von der Temperatur abhängig. Der Füllstoff hat einen entscheidenden Einfluss auf das Viskositätsverhalten. Die beiden Rezepturen P20 und W10 enthalten in ihrer Ölkomponente Cellulosefasern. Bei 15 °C weisen die Komponenten eine Viskosität von über 0,25 Pa s auf. Die Viskosität fällt bei steigender Temperatur stark ab und beträgt bei 30 °C noch etwa 0,13 Pa s. Ohne die Cellulosefasern als Füllstoff (P20.1) verringert sich die Viskosität um ein Vielfa-

ches und ist nur geringfügig höher als die Viskosität von Rapsöl. Durch den Einsatz von Aktivkohle als alternativer Füllstoff kann die Viskosität gegenüber den Cellulosefasern stark herabgesetzt werden.

Die wässrigen Kautschukdispersionen (Komponente B) der verschiedenen Rezepturen zeigen alle eine ähnlich niedrige Viskosität und nahezu keine Temperaturabhängigkeit. Daher liegt das Optimierungspotenzial in der Ölkomponente A.

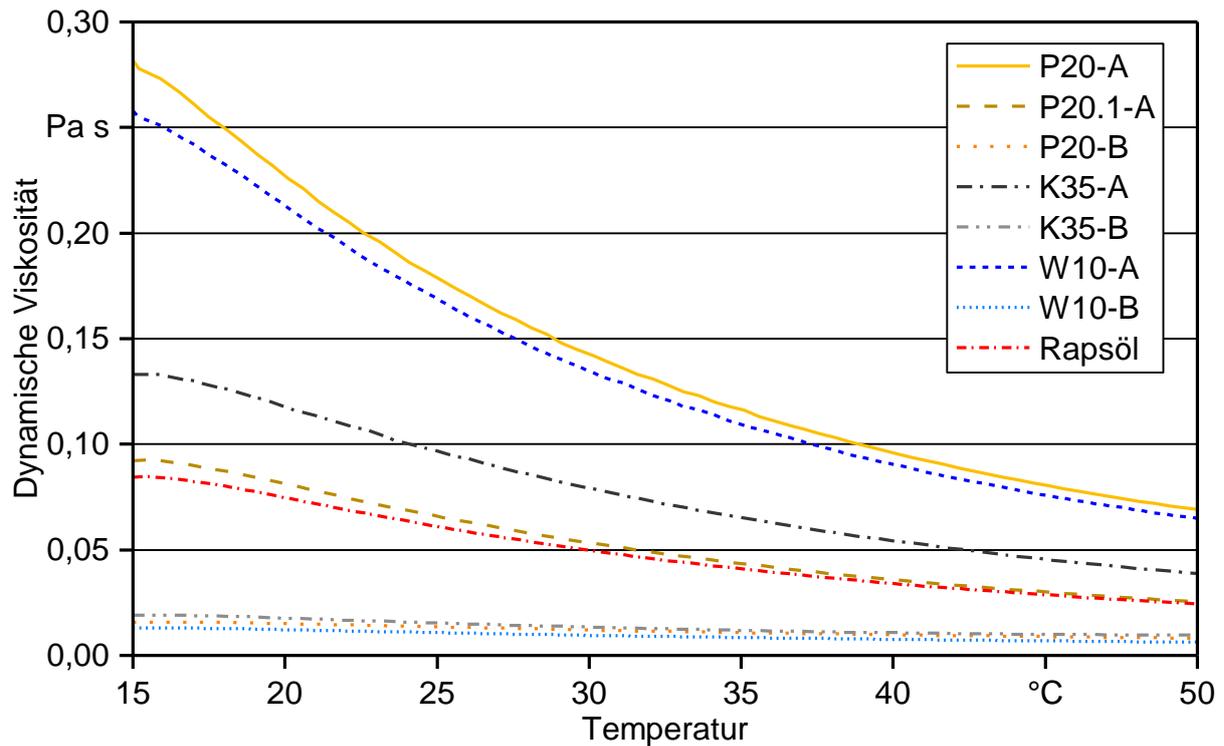


Abbildung 61: Dynamische Viskosität der Phasen A und B ausgewählter Rezepturen sowie von Rapsöl bei einer Scherrate von 50 s^{-1}

Die Cellulosefasern nehmen maßgeblich Einfluss auf das Viskositätsverhalten der Phase A und stellen aufgrund der starken Viskositätserhöhung der Ölkomponente bei niedrigen Temperaturen eine große Herausforderung dar. Um das Verhalten besser einschätzen und beeinflussen zu können, werden auch scherkraftabhängige Viskositätsmessungen durchgeführt. Bei Variante A.242 befinden sich die Cellulosefasern in der wässrigen Komponente B, bei den Varianten P20 und W10 jeweils in Komponente A. Auch hier ist in der Öl-Phase (A) eine starke Änderung der Viskosität durch die Zugabe der Cellulose in das Öl festzustellen. Bei niedrigen Scherraten steigt die dynamische Viskosität an. A.242 erfährt durch die Änderung der Scherkraft keine Veränderung der Viskosität.

Ein Vergleich der wässrigen Phasen ergibt, dass durch die Zugabe der Cellulosefasern die dynamische Viskosität, wie es bei Variante A.242 der Fall ist, bis zu einer Scherrate von 30 s^{-1} stark abnimmt, dann jedoch wieder ansteigt. Nach der Messung haben sich in der Latexphase viele kleine Koagulate gebildet und die Cellulosefasern sind sichtlich

aufgequollen, was zu dem Anstieg der Viskosität geführt hat. Im Vergleich mit Latexkomponenten ohne Cellulosefasern (P20 und W10) sind eindeutige Unterschiede im Materialverhalten festzustellen. Die Viskosität der Komponente B der Varianten P20 und W10 fällt bei steigender Scherrate nur leicht ab und es hier sind auch nach der Messung keine Koagulate erkennbar.

Folglich ist es für eine bessere Handhabung des Materials vorzuziehen, die Cellulosefasern in die Ölkomponente B zu geben und für die Applikation Temperaturen über 20 °C anzustreben.

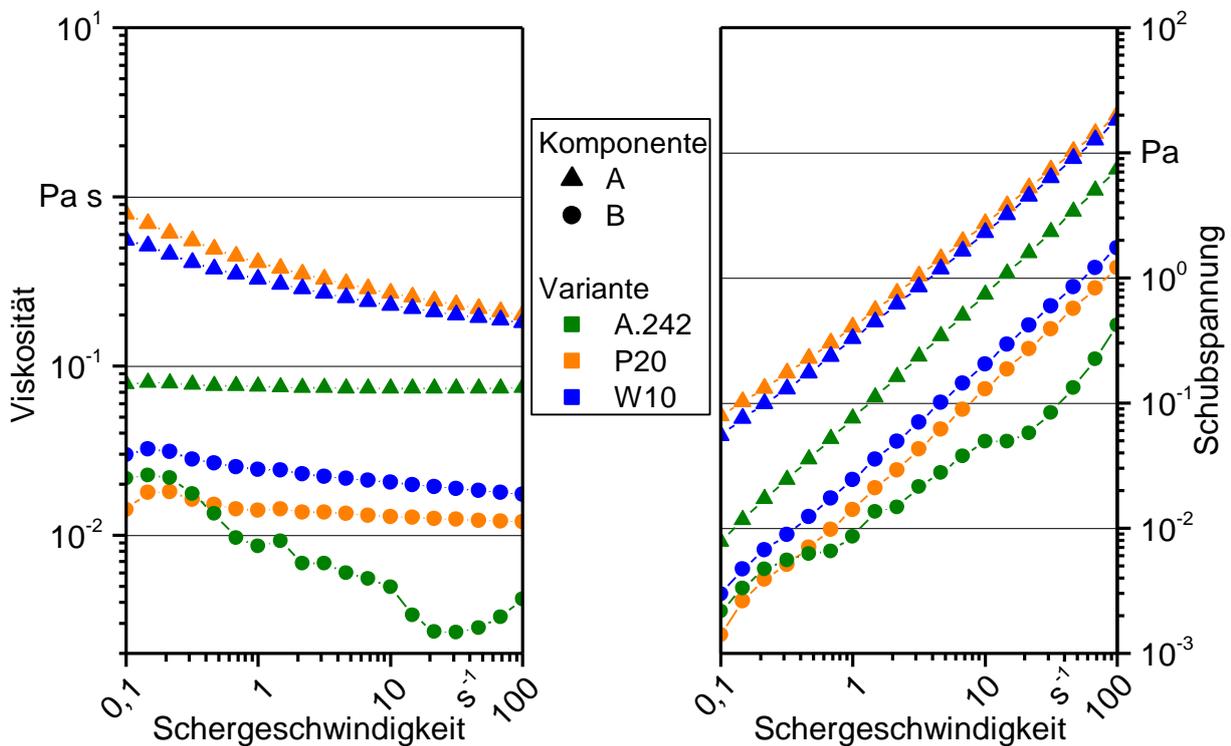


Abbildung 62: Viskosität und Schubspannung der beiden Komponenten verschiedener Rezepturvarianten bei 20 °C

5.2.11 Gesamtübersicht der Laborergebnisse

Die Ergebnisse der qualitätsbestimmenden Analysen des Abdeckmaterials werden in Tabelle 17 beispielhaft für fünf Rezepturvarianten zusammengefasst und dargestellt.

Die Gasdurchlässigkeit der Variante A.242 ist im Vergleich zu anderen Varianten des Forschungsvorhabens mit einem Permeationskoeffizienten von 3,2 cm³ m/(m² d bar) in einem für die Silageabdeckung verbesserungswürdigen Bereich und wird daher rückwirkend als „mangelhaft“ bewertet. Variante A.351 erreicht mit 0,1 cm³ m/(m² d bar) einen sehr guten Wert. Je besser die Gasdichtigkeit des Materials ist, desto geringer muss die Materialdicke später auf dem Silo sein.

Die Dehnbarkeit der Variante A.242 wird mit ca. 13 % als mangelhaft bewertet. Im Laufe der Rezepturentwicklung konnte die Dehnbarkeit auf über 100 % (P41) gesteigert werden. Variante W 20 erreicht einen guten Wert von 90 %. Einhergehend mit der Erhöhung der Elastizität ist ein Rückgang der Reißfestigkeit des Materials zu verzeichnen. Gegen Ende der Entwicklungsarbeiten konnte die Reißfestigkeit bei Variante W20 wieder etwas verbessert werden.

Durch eine Säurebehandlung verschlechtern sich die Materialeigenschaften der Varianten P20 und W10, wobei beispielsweise deren Dehnbarkeit auch nach der Säurelagerung noch besser ist als die der Variante A.242 vor der Säurelagerung.

Schrumpfungseigung und Quellverhalten des Materials konnten während der Materialentwicklung wesentlich verbessert werden. Die Temperaturbeständigkeit ist am Ende der Materialentwicklung im Labor in einem befriedigenden Bereich.

Mit Variante W20 konnte eine Rezeptur entwickelt werden, die in keinem der bisher durchgeführten Materialtests eine mangelhafte oder ungenügende Bewertung erreicht. In den Eigenschaften Gasdichtigkeit, Dehnbarkeit, Schrumpfungseigung, Quellverhalten und Witterungsbeständigkeit wird das Material als „gut“ bewertet. Es hat somit von allen bisher entwickelten Materialien das größte Potenzial, auch in den Praxisversuchen gute Ergebnisse zu erzielen.

Tabelle 17: Zusammenfassende Bewertung der Labor- und Praxistests ausgewählter Rezepturvarianten

Prüfung	A.242	A.351	P20	W10	W20
Gasdichtigkeit	–	++	–	+	+
Dehnbarkeit	--	o	o	o	+
Reißfestigkeit	+	o	--	–	o
Säurebeständigkeit	o	o	–	–	x
Schrumpfungseigung	–	--	+	o	+
Quellverhalten	--	+	–	--	+
Temperaturbeständigkeit	+	--	++	–	o
Witterungsbeständigkeit	o	--	+	o	+

++ = sehr gut, + = gut, o = befriedigend, – = mangelhaft, -- = ungenügend

x = Test konnte bisher noch nicht durchgeführt werden

5.3 Entwicklung eines Applikationsgeräts

Für die Applikation der Silageabdeckung auf Basis nachwachsender Rohstoffe werden im Laufe des Forschungsvorhabens drei Prototypen entwickelt, die im Folgenden beschrieben werden.

5.3.1 Prototyp 1

Ein erster Prototyp eines Applikationsgeräts für die Abdeckung wird auf Grundlage der Erkenntnisse zur Applikation der vorhergehenden Projektphase von UHL et al. (2011) [51] entwickelt. Da die Förderung der Komponenten mit den getesteten Pumpen immer wieder zu Verstopfungen führte, wird eine pneumatische Förderung der Komponenten bevorzugt. Dazu werden zwei zylindrische, verschließbare Vorratsbehälter für die beiden Komponenten der Abdeckung konzipiert. Die Größen der Behälter sind dem Mischungsverhältnis der drei favorisierten Rezepturen der vorhergehenden Projektphase von 1:2 angepasst. Diese in Abbildung 63 dargestellten Behälter können unter Druck gesetzt werden und ermöglichen so eine schonende Förderung der Komponenten. Mittels Druckregelung kann die Förderrate der Komponenten eingestellt werden, um das gewünschte Mischungsverhältnis zu erhalten. Zusammengeführt werden die Einzelkomponenten an einer Düse, die eine konische Einwellen-Mischschnecke enthält. Durch den Förderdruck wird das durch die Schnecke homogenisierte Gemisch ausgespritzt. Die sogenannte Mischdüse ist rechts in Abbildung 63 dargestellt.



Abbildung 63: Prototyp 1 – links: Druckbehälter für die Komponenten A und B, rechts: Mischkopf mit zwei Anschlüssen für die Komponenten A und B sowie einem Reinigungsanschluss

Bei ersten Sprühversuchen zeigt das Gerät eine grundsätzliche Tauglichkeit. Der Mischkopf des Prototyps mit einer motorbetriebenen Schnecke ist jedoch sehr schwer und somit in der Handhabung umständlich. Doch ist das Prinzip der Vermischung der zwei

Komponenten unmittelbar vor der Ausbringung vielversprechend und sollte weiterverfolgt werden.

Durch die schonende Förderung entstehen bei der Latex enthaltenden Komponente keine Koagulate, wie sie bei Pumpen mit zu hohen Scherkräften auftreten. Da in den flüssigen Komponenten Füllstoffe und weitere ungelöste Bestandteile enthalten sind, müssen in den Druckbehältern Rührwerke angebracht werden, um ein Absetzen dieser Bestandteile und dadurch mögliche Verstopfungen zu verhindern. Außerdem ist die Reinigung der geschlossenen Behälter sehr aufwändig.

5.3.2 Prototyp 2

Ein zweiter Prototyp für das Applikationsgerät wird zusammen mit der Firma Desoi GmbH entwickelt und getestet. Das Gerät wird zur Applikation der Abdeckung auf die Minitatursilos 2016 verwendet. Die Ergebnisse der Applikation werden unter 5.4.3 erläutert. Das Applikationsgerät setzt sich aus zwei Vorratsbehältern, zwei Pumpen, einer Mischeinheit mit einem Statikmischereinsatz und einer Düse, durch die das Material mit Druckluft ausgetragen wird, zusammen.

In die integrierten trichterförmigen Vorratsbehälter mit 50 l Volumen können die Komponenten jeweils problemlos eingefüllt werden. Auch hier sedimentieren bei längeren Standzeiten die unlöslichen Bestandteile des Abdeckmaterials, da ein integriertes Rührwerk fehlt. Zusammengeführt werden die zwei Komponenten in einem Sprühkopf, der in Abbildung 64 dargestellt ist. Als Mischelement dient ein Statikmischereinsatz mit 1,6 cm Durchmesser. Mit einem Luftdruck von 1 bar wird das Gemisch aus der Düse befördert.



Abbildung 64: Prototyp 2: Sprühkopf mit Statikmischer, Druckluftzerstäubung und Zwei-Komponenten-Eingang

In einem ersten Versuch werden die zwei Komponenten mit Schneckenpumpen gefördert (Schneckenpumpe SP 20). Schon nach wenigen Sekunden bilden sich durch die hohen Scherkräfte Koagulate in der wässrigen Latex-Komponente, die das Gerät verstopfen. Daher wird eine besonders materialschonende Pumpe für weitere Versuche gewählt. Die Peristaltikpumpe „Preko 200“ fördert das Material schonend zwischen zwei Scheiben, die mit Kunststoffmembranen versehen sind. Sie findet in der Praxis Verwendung beim Aufbringen von Ein- und Zwei-Komponenten-Dichtschlämmen, Zementleim und -suspensionen, sowie Injektionsmörtel [7]. Abbildung 65 zeigt die geöffnete Pumpe nach einem ersten Applikationstest. Die Peristaltikpumpen lassen sich einfach regeln und somit ist ein genaues Einstellen des gewünschten Mischungsverhältnisses möglich. Dieses Gerät ist grundsätzlich geeignet, die Abdeckung zu mischen und aufzusprühen, doch treten bei der Förderung der zwei Komponenten, u. a. durch die auftretende Pulsation der Pumpen, große Schwankungen im Mischungsverhältnis auf.

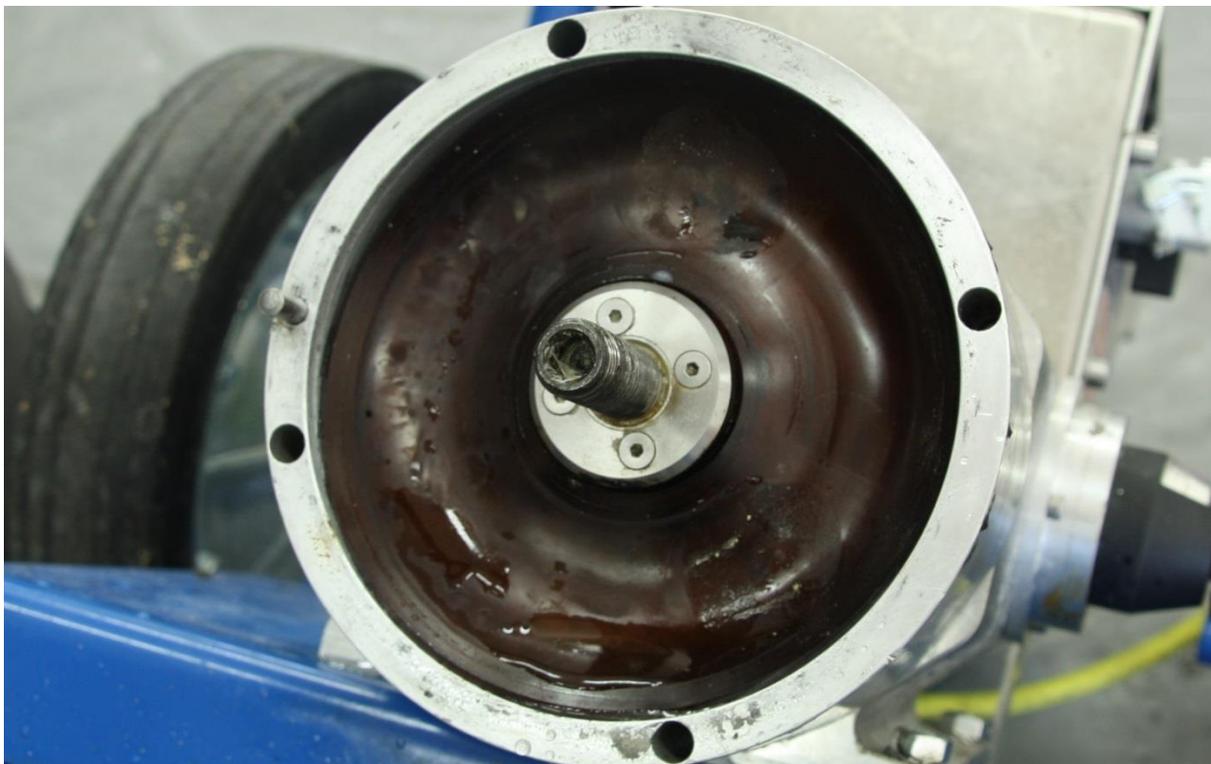


Abbildung 65: Kunststoffmembran im Inneren der Peristaltikpumpe „Preko 200“ nach erstem Applikationsversuch

Mit diesem Applikationsgerät ist das Auftragen der Abdeckung zunächst ohne Störungen möglich. Nach längerem Betrieb aber treten Verstopfungen vor dem Statikmischer im T-Stück beim Zusammenführen der zwei Komponenten auf. Vor allem die als Füllstoff verwendeten Cellulosefasern verursachen die Verstopfungen. Schwachstellen in der Leitungsführung, beispielsweise am Pumpenausgang, gilt es noch zu verbessern. Abbildung 66 zeigt ein im Pumpenausgang festgesetztes Latexkoagulat nach dem Applizieren von etwa 200 kg des Abdeckmaterials auf acht Miniatursilos. Auch im trichterförmigen

Vorratsbehälter bildet sich bei der Latexkomponente ein dünner Latexfilm. Trotz konsequenter Reinigung vor jedem neuen Befüllen ist nicht zu verhindern, dass sich kleine Koagulate ablösen (bis zu 3 mm) und durch den Einlauf in die Pumpe gelangen. Die kleinen Koagulate können sich anschließend an Engstellen in der weiteren Leitungsführung festsetzen und so zu größeren Verstopfungen führen. Nach längerer Applikationszeit entsteht auch an der Kunststoffmembran der Peristaltikpumpe ein größeres Latexkoagulat. Bei allen Tests mit dem Applikationsgerät kommt es zu keinen Verstopfungen im Statikmischer.



Abbildung 66: Prototyp 2: Latexkoagulat im Pumpenausgang nach Förderung der Latexkomponente

5.3.3 Prototyp 3

Auf Basis der gesammelten Erfahrungen wird 2017 ein weiteres Applikationsgerät entwickelt. Der Aufbau zeichnet sich durch seine Modulbauweise mit GEKA®-Schnellkuppungen aus. So können eventuell auftretende Verstopfungen im System schnell behoben und das Gerät zügig den gewünschten Anforderungen verschiedener Spritzttests angepasst werden. Abbildung 67 zeigt die Basis des Applikationsgeräts mit den wesentlichen Baugruppen, die im Laufe der verschiedenen Praxistests entsprechend modifiziert werden. Das Gerät besteht aus drei Gruppen, die im Folgenden erklärt werden.

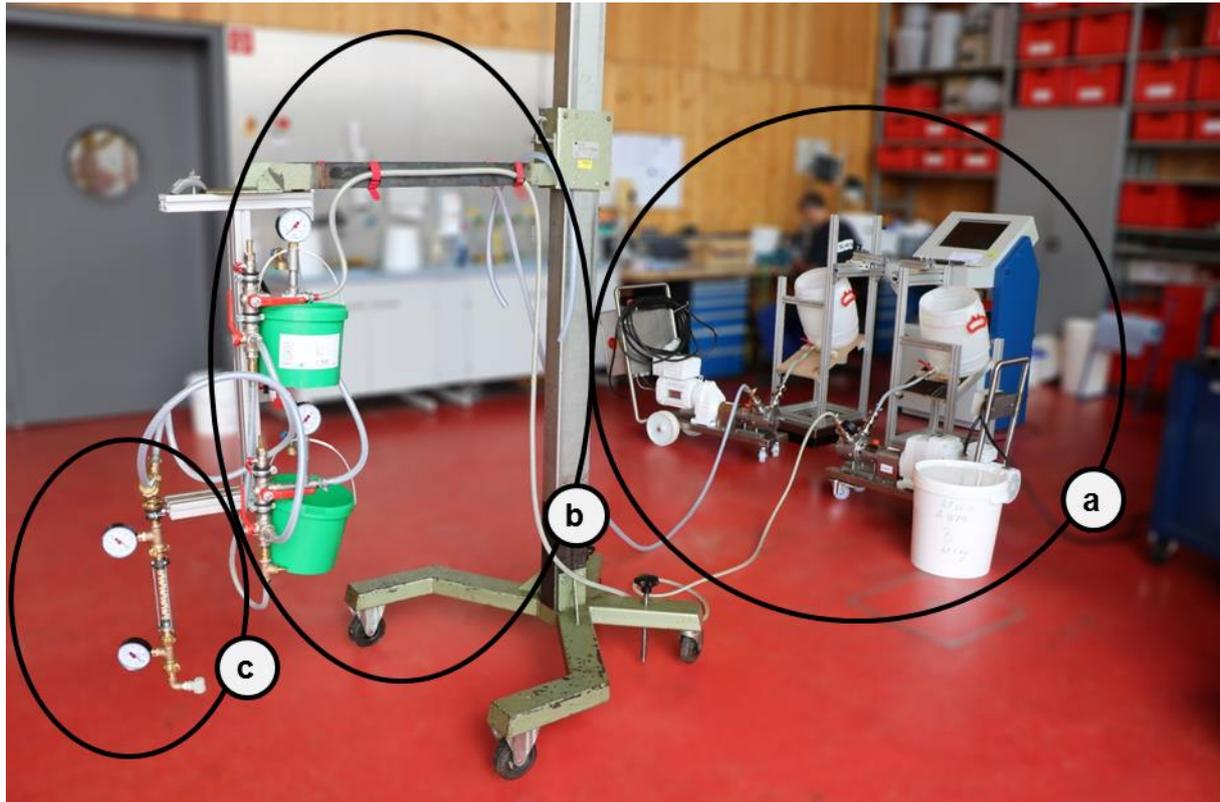


Abbildung 67: Prototyp 3: Aufbau des Applikationsgeräts mit den drei Hauptbaugruppen: a) Vorratsbehälter und Förderung, b) Leitungssystem, c) Mischer und Ausbringung

a) Vorratsbehälter und Förderung

Bei Spritzversuchen bis zu 60 kg werden als Vorratsbehälter für die Komponenten A und B zwei 50-l-Fässer mit Auslauf nach unten schräggestellt. Für die großen Flachgärhau- fen werden zwei 300-l-Fässer verwendet. Die Behälter sind mit einer Rührvorrichtung versehen. So können die Komponenten im Applikationsgerät angemischt und bei längeren Applikationen durch langsames und kontinuierliches Rühren nicht gelöste Bestand- teile in Schwebelage gehalten werden.

Die Vorratsbehälter befinden sich auf Plattformwaagen, die im Sekundenintervall die Masseänderung der beiden Behälter aufzeichnen. Die Daten werden mit dem Computer erfasst, das aktuelle Mischungsverhältnis wird kontinuierlich berechnet und am Bild- schirm im 10-s-Intervall angezeigt.

Zur Förderung der beiden Komponenten dienen zwei Sinuspumpen (Firma Maso, Typ SPS-1): Diese Pumpenbauart zeichnet sich durch eine besonders schonende Förderung von Flüssigkeiten aus. Beide Pumpen können manuell geregelt und somit das Mi- schungsverhältnis auch während der Applikation korrigiert werden.

b) Leitungssystem

Die Durchmesser der Leitungen bis zur Mischeinheit sind den unterschiedlichen Viskosi- täten der zwei Flüssigkeiten angepasst. Für die Förderung der niedrigviskosen Kompo-

nente B wird ein Schlauch mit Innendurchmesser von 1,0 cm, für die höherviskose Komponente A ein Schlauch mit einem Durchmesser von 1,3 cm verwendet. Entlang des Leitungssystems sind Manometer angebracht, damit Druckverluste im System erfasst werden können. In jeder Leitung ist ein Überdruckventil angebracht, das bei 10 bar Druck ablässt.

Durch ein integriertes Druckluftventil in beiden Leitungen kann das System nach der Applikation mit Druckluft gereinigt und so Materialreste aus dem Spritzkopf geblasen werden.

c) Mischer und Ausbringung

Der Spritzkopf des Applikationsgeräts besteht aus einer Y-Verbindung, in der das Material zusammengeführt wird, einem Statikmischer und der Austragsdüse. Es können nach dem Mischelement auch mehrere Düsen parallel angebracht werden. Durch die Modulbauweise mit Quickverschlüssen können Statikmischer und Düsen schnell getauscht werden. Der Durchmesser des Statikmischereinsatzes muss dem Durchfluss entsprechend angepasst werden. Bei Versuchen mit einer Düse wird ein Mischelement mit 1 cm Durchmesser verwendet, bei Versuchen mit zwei Düsen ein Statikmischer mit 2 cm Durchmesser. Es werden verschiedene Düsentypen getestet, dabei haben sich Flachstrahldüsen im Vergleich zu Voll- und Hohlkegeldüsen als besonders geeignet erwiesen. Die Flachstrahldüse wies ein besonders homogenes und stabiles Spritzbild auf, auch bei Schwankungen des Mischungsverhältnisses der Komponenten. Aufgrund des größeren Spritzwinkels wird die Flachstrahldüse mit 120° Spritzwinkel als besonders vorteilhaft bewertet, da im Vergleich zu Düsen mit kleineren Spitzwinkeln eine umfassendere Benetzung der rauen Silageoberfläche erwartet wird. Die Ergebnisse des Düsentests sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Düsenbauart, benötigter Mindestdruck, Durchsatz, Spritzwinkel (theoretischer Spritzwinkel für Wasser/erreichter Spritzwinkel mit dem Abdeckmaterial) und Bewertung der untersuchten Spritzdüsen

Düsenbauart, kleinste Engstelle	Druck ¹⁾ in bar	Durchsatz in kg/min	Spritzwinkel ²⁾	Beobachtungen	Bewertung
Axial-Vollkegel, 3,15 mm	0,5	3,8	90°/20°	Kein stabiles Spritzbild, Druck an der Düse nicht erreicht, Mischungsverhältnis nicht erreicht	Nicht geeignet
Axial-Vollkegel, 3,7 mm	0,5	5,6	60°/20°	Kein stabiles Spritzbild, Druck an der Düse nicht erreicht, Mischungsverhältnis nicht erreicht	Nicht geeignet
Hohlkegel ohne Dralleinsatz, 1,5 mm	1,0	1,1	60°/45°	Kein stabiles Spritzbild, Düse verstopfungsanfällig, Mischungsverhältnis nicht erreicht	Nicht geeignet
Hohlkegel ohne Dralleinsatz, 3,2 mm	1,0	5,6	90°/90°	Gleichmäßiges Spritzbild, Schwankungen im Mischungsverhältnis beeinträchtigen Spritzbild	Potenziell geeignet
Hohlkegel ohne Dralleinsatz, 4,3 mm	1,0	6,0	90°/90°	Gleichmäßiges Spritzbild, Schwankungen im Mischungsverhältnis beeinträchtigen Spritzbild	Potenziell geeignet
Flachstrahl, 3,0 mm	1,0	7,0	60°/40°	Gleichmäßiges Spritzbild, Spritzbild nahezu unabhängig von Schwankungen im Mischungsverhältnis	Gut geeignet
Flachstrahl, 2,0 mm	2,0	8,0	120°/110°	Gleichmäßiges Spritzbild, Spritzbild nahezu unabhängig von Schwankungen im Mischungsverhältnis	Sehr gut geeignet

¹⁾ benötigter Mindestdruck, ²⁾ theoretischer Spritzwinkel für Wasser/erreichter Spritzwinkel mit dem Abdeckmaterial

Für die Applikation der Versuchsreihe 3 auf Freigärhaufen werden zwei Flachstrahldüsen parallel geschaltet. Eine Düse wird im 45°-Winkel zur Senkrechten auf den Boden in Fahrtrichtung, die zweite in entgegengesetzter Richtung befestigt. Durch den schrägen Austrittswinkel der beiden Düsen soll die raue Oberfläche des Silohaufens gleichmäßig benetzt werden. In Abbildung 68 sind die beiden Düsen im Applikationsversuch zu sehen.

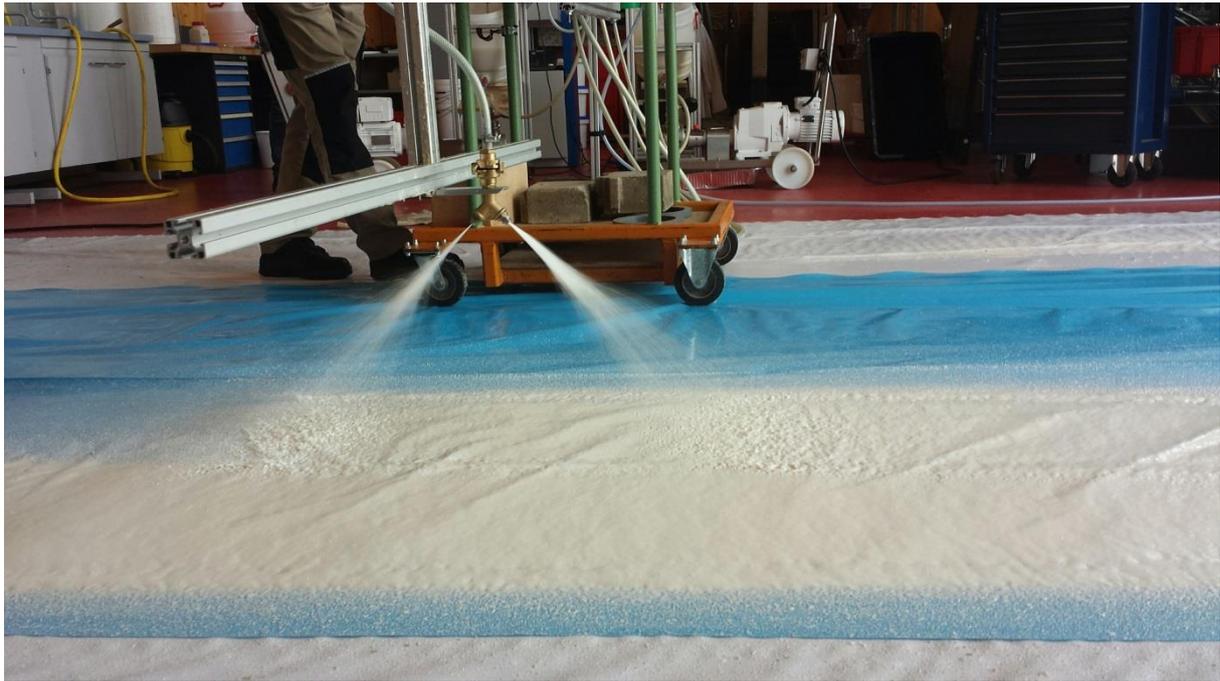


Abbildung 68: Prototyp 3: Flachstrahldüsen in Fahrtrichtung nach vorne und hinten in einem Winkel von je 45° zur Senkrechten auf den Boden ausgerichtet

Befestigung des Spritzkopfs

Damit der Spritzkopf während der Applikation optimal auf die konvexen Miniaturhilos ausgerichtet ist, wird er zur kontrollierten Führung auf einem Träger befestigt. Zur Applikation der Miniaturhilos in Versuchsreihe 2 (Abschnitt 5.4.4) wird er hierzu auf einem Schlitten fixiert, der mit Rollen auf einer Schiene läuft, die etwa 30 cm über dem Silohaufen befestigt ist. Abbildung 69 zeigt die Schiene, die möglichst exakt der Geometrie des Silagehaufens angepasst ist, um an jeder Stelle des Haufens eine 90° -Ausrichtung des Sprühkopfs zur Silageoberfläche zu gewährleisten. Bei der Applikation auf die Freigärhaufen der Versuchsreihe 3 (Abschnitt 5.4.5) ist der Spritzkopf an einem Balken am Traktor befestigt, der durch die Heckhydraulik des Traktors höhenverstellbar und manuell seitlich verschiebbar ist. Zusätzlich ist hier ein Gelenk integriert, mit dem der Winkel der Düsenausrichtung nachjustiert werden kann. Zur Höhenkontrolle ist unter der Düse ein flexibler Abstandhalter eingebaut. Abbildung 70 zeigt die Düsenführung während der Applikation auf die zwei Freigärhaufen 2017.



Abbildung 69: Prototyp 3: Spritzkopf des Applikationsgeräts mit zwei Hohlkegeldüsen, befestigt auf der Führungsschiene über einem Miniatursilos



Abbildung 70: Applikationssystem zum Spritzen der Silageabdeckung auf einen Freigärhaufen – höhenverstellbares und in der Neigung anpassbares System mit Doppeldüse im Heckaufbau eines Traktors

5.3.4 Hinweise zur Entwicklung eines praxistauglichen Applikationsgeräts

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse muss ein praxistaugliches Applikationsgerät folgende Anforderungen erfüllen:

- getrennte Bevorratung der zwei Materialkomponenten, um eine unbeabsichtigte Reaktion zu unterbinden,
- Mischeinrichtung, um die Feststoffe in den scherempfindlichen Materialkomponenten bei der Bevorratung in Schwebe zu halten,
- Pumpen zur Förderung und Druckerzeugung, die für scherempfindlichen Suspensionen geeignet sind,
- Mischeinrichtung, um die Komponenten für eine optimale Reaktion zu vermischen (bei den durchgeführten Versuchen haben sich Statikmischer bewährt),
- Austragsdüsen, um das Material auf der Silageoberfläche auszubringen,
- automatisches Reinigungssystem, um bei Stillstand die Abschnitte unmittelbar vor der Zusammenführung der Komponenten spülen zu können und ein Festwerden des Abdeckmaterials im Austragsystem zu verhindern,
- Steuer- und Regelsystem für alle Komponenten, um gewünschte Mischungsverhältnisse, Austragsmengen und Reinigungsprozesse einstellen zu können,
- Trägerfahrzeug, das zum Befahren von Silagehaufen geeignet ist und dessen Fahrgeschwindigkeit in Verbindung mit dem Steuer- und Regelsystem an die gewünschten Austragsmengen angepasst werden kann.

Bei der konstruktiven Ausführung sollte bei allen Bauteilen, die mit den Materialkomponenten in Berührung kommen, auf eine gute Zugänglichkeit und leichte Reinigungsmöglichkeit geachtet werden.

In Abbildung 71 und Abbildung 72 sind Skizzen einer möglichen Ausführung einer selbstfahrenden Arbeitsmaschine als Applikationsgerät dargestellt. Auch andere Trägerfahrzeuge, wie beispielsweise Pistenraupen, die auch beim Silieren eingesetzt werden, sind möglich. Das gesamte Applikationsgerät ist in Modulbauweise ausgeführt und soll einfach vom Trägerfahrzeug abgenommen werden können, sodass dieses auch für andere Zwecke verwendet werden kann.

In den Skizzen sind die Vorratsbehälter der beiden Materialkomponenten mit Rührwerken ausgestattet, damit die Komponenten homogenisiert werden können und die unlöslichen Stoffe in Komponente A in Schwebe bleiben. Über regelbare Förderpumpen werden die Komponenten im gewünschten Mischungsverhältnis zum Spritzbalken gefördert. Am Spritzbalken befinden sich mehrere hydraulisch parallel geschaltete Spritzlanzen. Die beiden Komponenten werden an den Spritzlanzen zusammengeführt und mittels Statikmischer homogenisiert. Die Mischung tritt anschließend über zwei hydraulisch parallel geschaltete Flachstrahldüsen aus. Die Düsen sind im Winkel von je 45° zur Senk-

rechten zum Boden hin und gegen Fahrtrichtung ausgerichtet. Durch die beiden unterschiedlichen Spritzrichtungen soll das Material besser auf der rauen Silooberfläche verteilt werden.

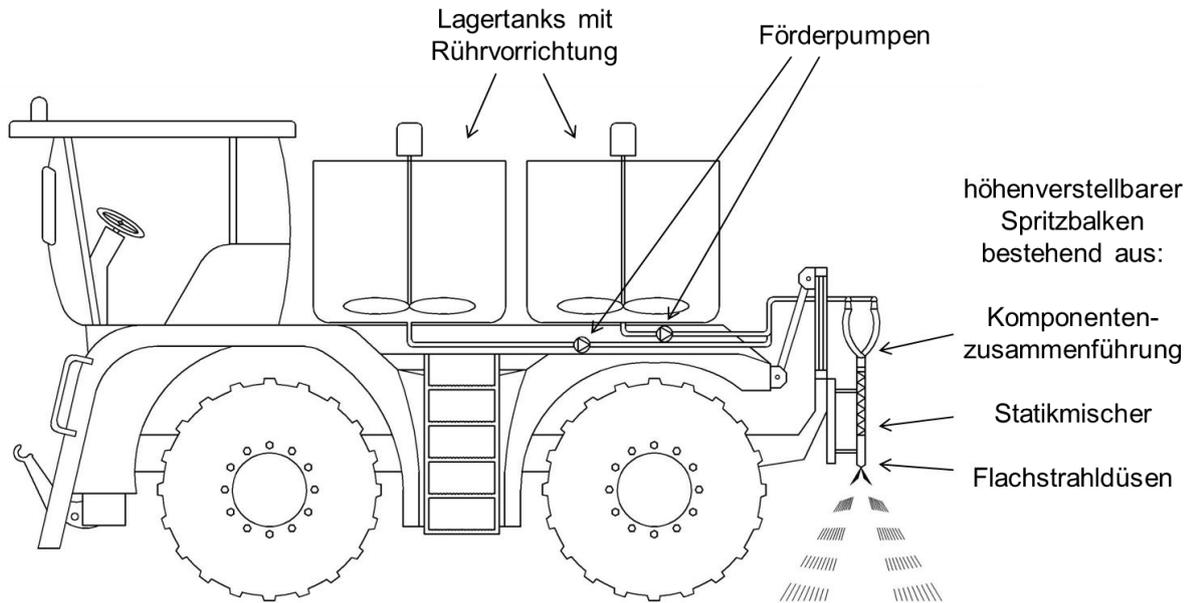


Abbildung 71: Skizze eines Selbstfahrers mit Applikationsgerät – Seitenansicht

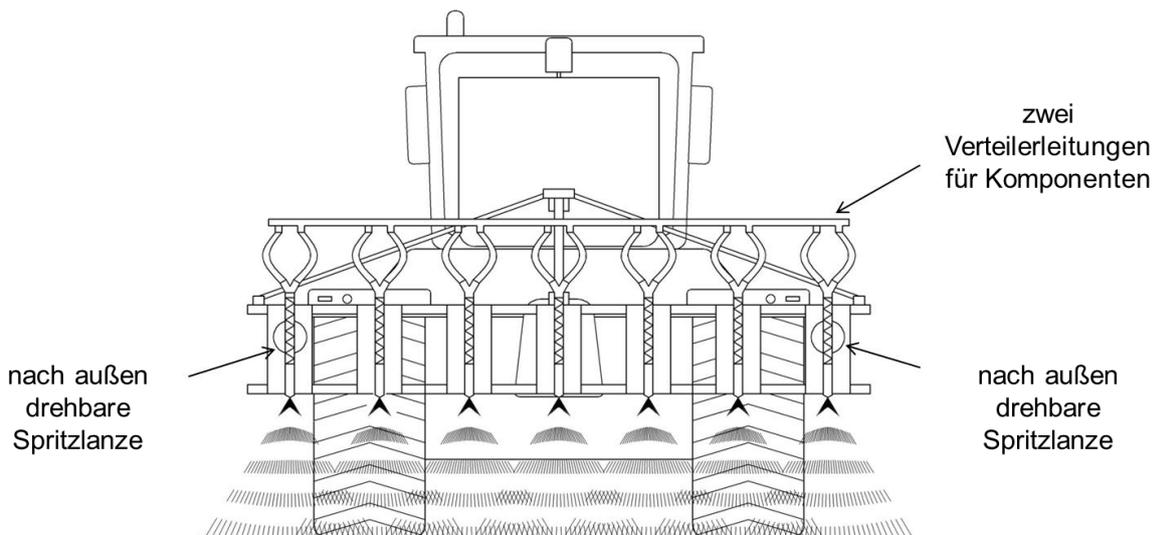


Abbildung 72: Skizze eines Selbstfahrers mit Applikationsgerät – Heckansicht

Um das Abdeckmaterial auf verschiedene Arten von Silagehaufen aufzubringen, sind in der Skizze die äußeren Spritzlanzen drehbar ausgeführt. Daneben sollen mindestens jeweils die äußeren Spritzlanzen einzeln und die inneren Spritzlanzen im Ganzen abschaltbar sein. Dadurch sollen zum Beispiel Wandanschlüsse in Einzelfahrten vor der flächigen Aufbringung des Abdeckmaterials abgedichtet werden können.

Der Spritzbalken mit den darauf montierten Spritzlanzen ist höhenverstellbar ausgeführt und gegebenenfalls mittels einer Distanzmessung ausgestattet, um einen weitgehend gleichmäßigen Abstand zwischen Spritzlanze und Silageoberfläche einstellen zu können.

Die Reinigung der Spritzlanzen soll durch Leerblasen mit Druckluft nach dem Abschalten der Spritzlanzen erfolgen. Dadurch soll ein Festwerden des Gemischs in der Spritzlanze vermieden werden.

Einer der wichtigsten Bestandteile eines praxistauglichen Applikationsgeräts ist das Steuer- und Regelsystem. Dies hat die Aufgabe, alle einzelnen Systembauteile, inklusive des Trägerfahrzeugs, so anzusteuern und zu regeln, dass letztlich die gewünschte Schichtdicke des Abdeckmaterials gleichmäßig auf den Silagehaufen aufgetragen wird.

5.4 Materialtests unter praxisnahen Bedingungen

Die vielversprechendsten Abdeckmaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe werden unter möglichst praxisnahen Bedingungen anhand von Silierversuchen im Freien weiter untersucht.

5.4.1 Silierversuche mit Silofässern

Im September 2016 werden erste Silierversuche mit zwei zum damaligen Zeitpunkt favorisierten Rezepturen gestartet und zehn Monate im Freien gelagert. Abbildung 73 stellt die Temperaturverläufe der Silos in den letzten vier Monaten dar. Die Temperaturmessung zeigt ab Ende März einen leichten Temperaturanstieg der Silage mit der Glycerin-Variante A.351 (Silos Nr. 3 und Nr. 4) als Abdeckung. Die Folienabdeckung des Referenzsilos Nr. 2 wurde im März 2017 absichtlich beschädigt, um einen unerwünschten Sauerstoffzutritt zu simulieren und dessen Auswirkungen auf die Silagetemperatur zu erfassen. Die Temperatur in der Silage ist durch diese Manipulation im Vergleich zu den anderen Silofässern nicht angestiegen. Die Beschädigung der Folienabdeckung war wohl zu geringfügig, um zu einer merklichen Fehlgärung und somit zu einer Nacherwärmung zu führen. Daraus folgt, dass kleinere Beschädigungen der Silageabdeckung nicht zu einem deutlichen Temperaturanstieg in der Silage führen. Damit ist die Temperaturerfassung nur bedingt zur Überwachung des Zustands der Silagequalität geeignet.

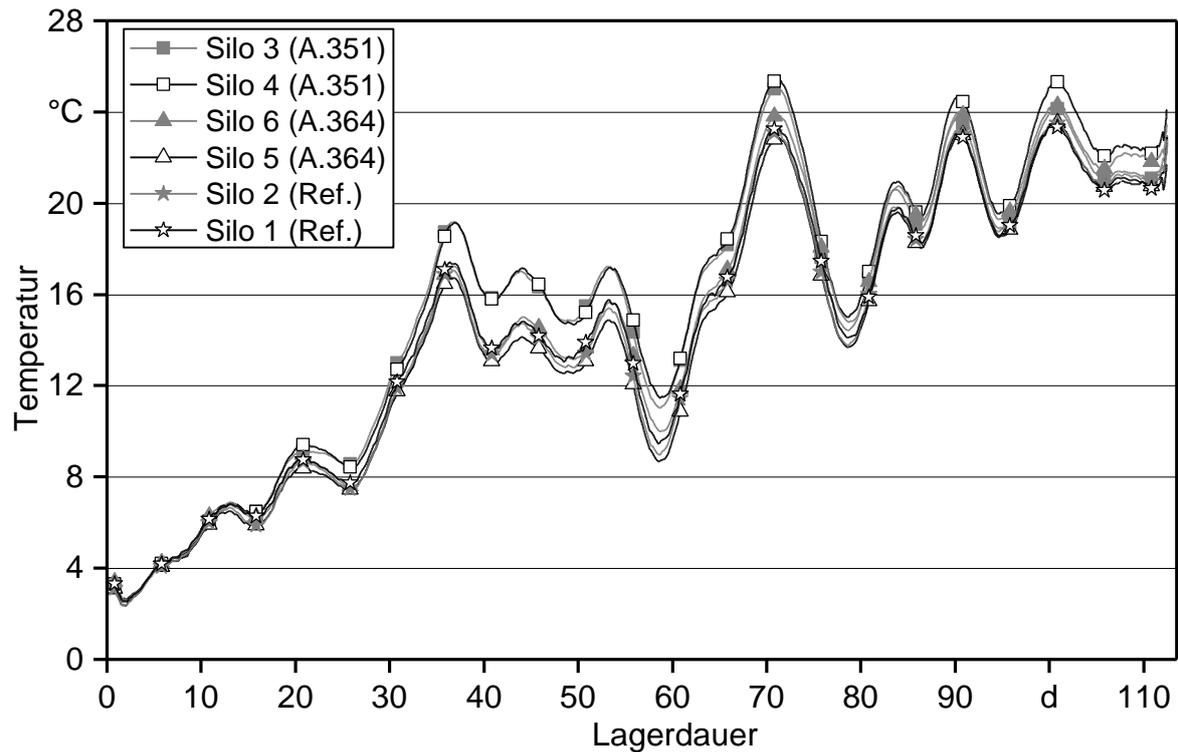


Abbildung 73: Silierversuche mit Silofässern – Gleitender Mittelwert der Temperaturverläufe (Mittelungszeitraum 1 Tag) in der Silage ab März 2017

Bonitur der Silofässer

Bei Silofass Nr. 1, abgedeckt mit Silofolie, lässt sowohl der Geruch als auch das Aussehen auf eine Silage mit hoher Qualität schließen. Es ist kein Wasser eingedrungen, die Silage macht einen trockenen Eindruck und sowohl Farbe als auch Geruch lassen eine sehr gute Silagequalität erwarten. Es ist keine Schimmelbildung im Inneren des Fasses erkennbar.

Abbildung 74 zeigt das Silofass beim Öffnen der Folienabdeckung. Direkt unter der Abdeckung ist die Silage trocken und gut erhalten.



Abbildung 74: Referenzsilofass Nr. 1 – links: oberste Schicht der Silage nach dem Öffnen, rechts: tiefliegende Silage

Referenz-Silofass Nr. 2 wird nach 177 Tagen Lagerdauer absichtlich manipuliert, um zu testen, ob der Sauerstoffzutritt über eine beschädigte Folie zu einer messbaren Temperaturerhöhung führt. Eine Geruchsprobe zum Zeitpunkt der Manipulation lässt auf eine gute Silagequalität schließen. Beim Öffnen des Versuchs nach zehn Monaten ist erkennbar, dass am Rand des Fasses Wasser eingedrungen ist. Die Silage ist dort etwas dunkel gefärbt und feucht, wie in Abbildung 75 zu erkennen ist. Die Mitte des Silofasses ist jedoch mit hellem, trockenem Substrat gefüllt. Im Bereich der Beschädigung ist die Silage ebenfalls etwas dunkler gefärbt und feucht, Schimmel oder Parasiten sind jedoch nicht zu erkennen. Unter der obersten Schicht macht die Silage auch einen sehr guten Eindruck.



Abbildung 75: Referenzsilofass Nr. 2 – links: oberste Schicht der Silage nach dem Öffnen, rechts: tiefliegende Silage

Die Abdeckung der Fässer Nr. 3 und Nr. 4 auf Glycerinbasis (A.351) ist sehr stark geschrumpft und weist mehrere Löcher und Risse auf. Es ist klar erkennbar, dass die Abdeckung undicht ist. An der Oberfläche sind verschiedene Schimmelarten zu erkennen, wie in Abbildung 76 und Abbildung 77 zu sehen ist. Die Silageabdeckung hat beim Öff-

nen nur noch eine Schichtdicke von ca. 2 mm im Vergleich zur ursprünglichen Materialdicke von 1,5 cm.

Die oberste Schicht der Silage hat sich dunkel verfärbt und in den oberen 5 cm haben sich Insekten eingenistet. Der Geruch der Silage ist faulig, Buttersäure ist deutlich wahrnehmbar. Nach der Abtragung dieser obersten Schicht wird die Silage heller. Durchwegs ist die Silage sehr nass, Wasser hat sich aufgrund von Undichtigkeiten in der Tonne angesammelt. Insgesamt ist die Füllhöhe des Fassinhalts um ca. 10 cm niedriger, was einen deutlichen Materialabbau erkennen lässt.



Abbildung 76: Silofass Nr. 3, abgedeckt mit Glycerinvariante A.351 – links: Silofass vor dem Öffnen, rechts: Öffnen der Silageabdeckung



Abbildung 77: Silofass Nr. 4, abgedeckt mit Glycerinvariante A.351 – links: Silofass vor dem Öffnen, rechts: Entnahme der oberen Silageschicht

Silofass Nr. 5, abgedeckt mit Rezepturvariante A.364, ist ebenfalls erkennbar undicht. Im Gegensatz zu der Rezepturvariante mit Glycerin sind die Abdeckungen nicht so stark geschrumpft. An Schwachstellen, wie dem Übergang zur Folie, die am Randbereich unter der Abdeckung angebracht wurde, hat sich die Abdeckung jedoch zurückgezogen. Die Silageabdeckung unter den mit Sand befüllten Schläuchen zur Beschwerung hat sich farblich nicht verändert. Sie ist wie das frisch ausgegossene Material nahezu weiß

und wesentlich dicker als die Bereiche, die der Witterung ausgesetzt waren. In Abbildung 78, die das Silofass Nr. 5 zeigt, ist der farbliche Unterschied zwischen dem abgedeckten und dem bewitterten Material zu sehen. Die direkt unter der Abdeckung befindliche Silage ist dunkel, nass und riecht unangenehm. Auch hier haben sich, wie bei den Tonnen abgedeckt mit A.351, Insekten eingenistet und es ist eine Schimmelbildung in der obersten Schicht erkennbar. Der Gesamteindruck ist jedoch besser als bei den Fässern Nr. 3 und Nr. 4.



Abbildung 78: Silofass Nr. 5, abgedeckt mit Rezepturvariante A.364 – links: Anschnitt der Silageabdeckung, rechts: Entnahme der oberen Silageschicht

Die Abdeckung von Silofass Nr. 6, dargestellt in Abbildung 79, weist nur wenige undichte Stellen auf und die Silage riecht besser als die der anderen drei mit der alternativen Siloabdeckung verschlossenen Fässer. Die Silage der Fässer Nr. 5 und Nr. 6 ist ebenfalls sehr feucht, Wasser ist wohl eingedrungen und hat sich auch am oberen Rand des Fasses angesammelt. Bei der im Fass enthaltenen Silage ist kein Materialabbau erkennbar.

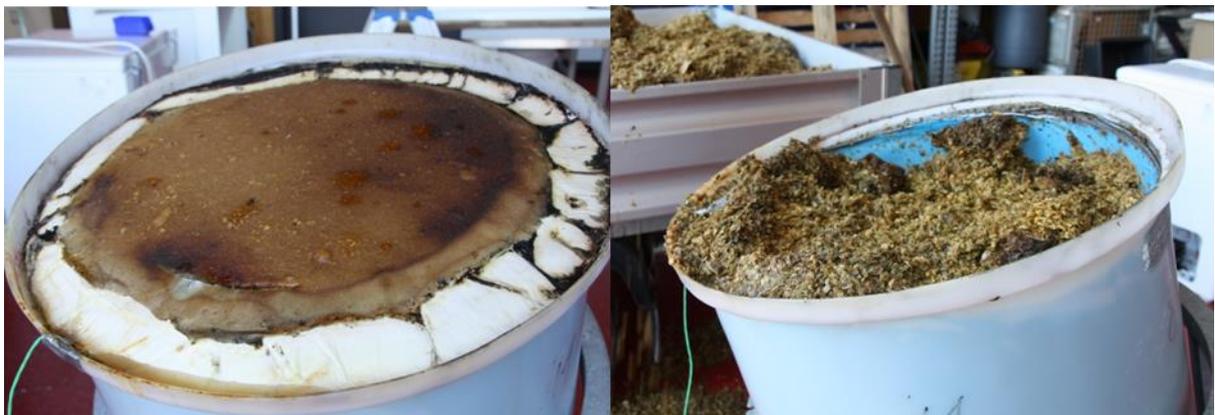


Abbildung 79: Silofass Nr. 6, abgedeckt mit Rezepturvariante A.364 – links: Silofass vor dem Öffnen, rechts: Silage nach Entnahme der oberen Silageschicht

Die Futtermittelanalysen der Silagen, deren Ergebnisse in Tabelle 19 und Tabelle 20 dargestellt sind, bestätigen die Beobachtungen beim Öffnen der Silofässer. Die besten Ergebnisse erzielen die beiden Referenzfässer mit Folienabdeckung, hier ist die Trockenmasse mit 33,5 % und 27,5 % bei dem manipulierten Fass am höchsten. Fass Nr. 3 zeigt trotz strengen Geruchs keine Fehlgärungen, es hat sich etwas Propionsäure gebildet (3 g pro kg TM). Fass Nr. 4 zeigt eine starke Fehlgärung. Hier hat sich Buttersäure gebildet (10 g pro kg TM), der pH-Wert ist mit 4,7 erhöht und der Milchsäureanteil ist mit 22 g pro kg TM zu niedrig (Soll: >30 g pro kg TM).

Auch bei Fass Nr. 5 ist der Milchsäureanteil mit 28 g pro kg TM zu gering. Der Alkoholgehalt von 14 g pro kg TM lässt auf eine erhöhte Aktivität von Hefen schließen und der Essigsäuregehalt ist sehr hoch (40 g pro kg TM). Bei Fass Nr. 6 ist die Silierung ohne Störungen abgelaufen, die Analysewerte zeigen eine gute Qualität der Silage. Hier ist die Trockenmasse durch eingedrungenes Wasser etwas verringert, jedoch mit 30,2 % um einiges höher als bei den anderen Silofässern, die mit der neuartigen Abdeckung versehen waren.

Alle Silageproben aus der Mitte der Silofässer, mit Ausnahme von Fass Nr. 4, erreichen nach dem DLG-Bewertungsschlüssel 2006 100 DLG-Punkte, was einer sehr guten Futtermittelqualität entspricht. Das Fass Nr. 4 mit starker Fehlgärung erhält 50 DLG-Punkte und sei Inhalt somit nicht zur Verfütterung geeignet.

Zusammenfassend können aus diesem Silierversuch mit den beiden Rezepturvarianten folgende Erkenntnisse für eine weitere Verbesserung der Rezeptur des Materials gezogen werden: Glycerin als Basis für Komponente A anstatt Pflanzenöls stellt sich aufgrund der hohen Wasserlöslichkeit nicht als geeignet dar. Die Witterungsbeständigkeit ist bei dieser Rezepturvariante nicht ausreichend gegeben. Die Schrumpfung des Materials ist bei beiden Varianten zu beobachten und führt bei allen Silos trotz zusätzlicher Beschwerung mit Sandschläuchen in den Randbereichen zu einem Wassereintrag, der auch durch die zusätzlich angebrachte Randfolie nicht verhindert werden kann. Daher ist es notwendig, die Schrumpfungseigung bei der Weiterentwicklung des Materials zu minimieren.

Tabelle 19: *Siliversuche mit Silofässern – ernährungsphysiologische Analyse der Silagen – Teil 1*

Bezeichnung	Einheit	Fass Nr. 1	Fass Nr. 2	Fass Nr. 3
Rohnährstoffe				
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	335	275	194
Rohasche (XA)	g/kg TM	35	33	22
Rohprotein (XP)	g/kg TM	88	89	73
Rohfaser (XF)	g/kg TM	339	213	216
Rohfett (XL)	g/kg TM	38	38	43
Stärke (XS)	g/kg TM	322	323	378
Gärparameter				
Milchsäure	g/kg TM	45	52	42
Essigsäure	g/kg TM	21	36	18
Propionsäure	g/kg TM	0	0	3
Buttersäure	g/kg TM	0	0	0
pH-Wert		4,2	3,7	3,8
DLG-Punkte		100	100	100

Tabelle 20: *Siliversuche mit Silofässern – ernährungsphysiologische Untersuchung der Silagen – Teil 2*

Bezeichnung	Einheit	Fass Nr. 4	Fass Nr. 5	Fass Nr. 6
Rohnährstoffe				
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	179	181	302
Rohasche (XA)	g/kg TM	24	23	33
Rohprotein (XP)	g/kg TM	77	76	84
Rohfaser (XF)	g/kg TM	227	227	213
Rohfett (XL)	g/kg TM	44	45	37
Stärke (XS)	g/kg TM	345	342	336
Gärparameter				
Milchsäure	g/kg TM	22	28	40
Essigsäure	g/kg TM	15	40	27
Propionsäure	g/kg TM	0	4	0
Buttersäure	g/kg TM	10	3	0
pH-Wert		4,7	3,9	3,9
DLG-Punkte		50	100	100

5.4.2 Rezepturscreening mit Gärgläsern unter Bewitterung im Freien

Bereits zu Beginn der ersten Gärglasversuche zeigen die 14 verschiedenen Rezepturen unterschiedliches Materialverhalten. Bei allen Materialien mit Ausnahme der Varianten K35, P20, P08, P13 und W13 entsteht innerhalb der ersten Stunde nach dem Aufbringen ein kleines Loch im gelartigen, noch nicht ausgehärteten Material, wie in Abbildung 80 zu sehen ist. Dieses Phänomen tritt umso deutlicher auf, je dickflüssiger die Abdeckung nach dem Ausbringen ist und je länger es dauert, bis das Material zur Gänze aushärtet. Rezepturvariante K35 härtet innerhalb von zwei Minuten vollständig aus, weshalb sich hier auch kein Luftkanal im Material bildet. Allerdings sind keine Gärgashauben bei den mit K35 abgedeckten Gläsern zu erkennen. Bei den ebenfalls schnell aushärtenden Varianten P08 und P13 entstehen, wie Abbildung 81 zeigt, kleine Gärgashauben.



Abbildung 80: Gärglasversuche – Luftkanäle im aufgetragenen Material



Abbildung 81: Gärglasversuche – Gärgashauben der Variante P13 ca. vier Stunden nach dem Ausgießen des Materials

Die Varianten P08 und W15 lösen sich schon nach kurzer Zeit vom beschichteten Glasrand ab und garantieren daher nur bis zu sieben Tage luftdichten Abschluss. In Tabelle 21 ist die Anzahl der Tage gelistet, in denen die verschiedenen Rezepturen einen Sauerstoffeintrag in die Gärgläser verhindern.

Tabelle 21: Anzahl der Tage bis zu einem detektierten Sauerstoffgehalt von über 1 % im Gärglas

Rezepturvariante	Anzahl der Tage bis zum Sauerstoffeinbruch		
	Wiederholung 1	Wiederholung 2	Wiederholung 3
A.242	0	15	9
W04	3	3	3
W10	2	6	1
W13	2	1	0
W15	4	7	6
P08	0	3	2
P13	0	8	6
P20	> 90	20	40
P31	6	7	7
N06	21	55	41
K05	58	20	69
K20	9	0	21
K21	6	6	2
K35	6*	> 90	83
Glasdeckel	> 90	> 90	> 90
Wiederholung am 26.07.2016			
A.242	41	13	26
W10 mit Säurevor- behandlung	33	12	8
P20	> 90	8	12

* Abdeckung wurde von außen beschädigt

Nach dem Zusammenmischen der Rezepturvarianten P20 und A.242 tritt eine Abtrennung der Ölphase ein, dadurch hat das Material nicht die erwarteten Eigenschaften. Mögliche Ursachen hierfür sind eine zu niedrige Temperatur der Einzelkomponenten oder zu lange Rührzeiten beim Mischen. Zudem stellt sich heraus, dass bei Variante P20 bei Ansatzgrößen ab 250 g die ölige Komponente A in die wässrige Komponente B gegeben werden muss – und nicht wie bisher gehandhabt Komponente B in Komponente A. Je ein Gärglas konnte mit diesen beiden Mischungen (P20 und A.242) gut abgedeckt werden, bei den zwei nachfolgenden Gläsern tritt die Phasentrennung auf. Diese beiden Varianten werden daher in einem zweiten Versuch wiederholt.

Die Rezepturvariante W10 wird in einem zweiten Versuch (Wiederholung am 26.07.2016) mit einer Säurevorbehandlung aufgetragen. Auf das gehäckselte Gras im Glas wird 30 %ige Propionsäure gesprüht. Ziel ist, dass durch den niedrigen pH-Wert auf der Silageoberfläche die Abdeckung an der Kontaktfläche schnell aushärtet und so eine

Kanalbildung im Material verhindert wird. Dies gelingt jedoch nur bedingt. Es bildet sich im Vergleich zum ersten Versuch drei Stunden später ein kleines Loch in der Abdeckung. Da die Rezeptur erst nach einigen Stunden aushärtet, kann der dünne Film, der sich bei dem Kontakt mit der Säure bildet, dem Gasdruck im Glas nicht standhalten. Als Anforderung an das Abdeckmaterial kann daher ein schnelles Aushärten innerhalb von maximal 60 Minuten abgeleitet werden.

Die in Tabelle 21 dargestellten Zeitspannen bis zum Sauerstoffzutritt ins Glasinnere variieren stark. Einige Gläser sind aus oben dargelegten Gründen nur wenige Stunden oder Tage dicht. Bei Abbruch der Versuche ist bei einigen Gläsern erkennbar, dass sich der Silolack „IRSA Silodon Spezial“ durch die Bewitterung vom Glas gelöst hat und so zusätzlich Undichtigkeiten, unabhängig von der Silageabdeckung, entstehen konnten. Je eines von drei Gläsern der Varianten K35 und P20 ist über einen Zeitraum von 94 Tagen bis zum geplanten Versuchsabbruch gasdicht und schneidet damit am besten ab. Die Silagen dieser Gärgläser werden zusammen mit den Referenzen zur Futtermittelanalyse gegeben. Die Analysen ergeben bei keiner der Silagen, mit Ausnahme des Referenzglases Nr. 1, befriedigende Ergebnisse. In den Gläsern treten trotz luftdichten Abschlusses teils starke Fehlgärungen auf. Auch die mit Glasdeckel versiegelten Gläser Referenz 2 und Referenz 3 enthalten Silagen mit mangelhafter Qualität. Auffallend bei den Ergebnissen ist, dass der Rohaschegehalt der Grassilagen mit Werten von 119 g/kg bis 198 g/kg (Soll: < 100 g/kg) stark erhöht ist. Dies spricht für ein verunreinigtes Ausgangssubstrat, beispielsweise durch Humuseintrag bei zu niedrigem Abmähen des Grases. Starke Verunreinigungen führen auch bei guter luftdichter Versiegelung der Silage zu Fehlgärungen. Die genauen Analyseergebnisse der Futtermitteluntersuchung sind dem Anhang 3 und Anhang 4 zu entnehmen. Die Futtermittelanalysen sind daher nicht aussagekräftig zur Beurteilung der Gasdichtigkeit des Materials.

Abbildung 82 zeigt ein Glas, das mit Rezepturvariante N06 abgedeckt wurde, nach der Bewitterung im Freien. In der Abbildung links ist ein großes Loch erkennbar. Es ist ausgehend von dem kaum sichtbaren Luftkanal nach dem Ausgießen entstanden und wurde durch den Regen weiter ausgewaschen. Im Glas hat sich Wasser angesammelt und, wie rechts in der Abbildung erkennbar ist, Schimmel gebildet.



Abbildung 82: Gärglasversuche – undichtes Gärglas, abgedeckt mit Rezepturvariante N06

Eine weitere Ursache für den Sauerstoffzutritt ist in Abbildung 83 dargestellt. Variante P13 hat sich zum einen vom Rand gelöst und zum anderen ist die Abdeckung stark geschrumpft. Rechts im Bild ist das Material in der Mitte aufgeschnitten, damit man die verbleibende Materialdicke erkennen kann. Die Schichtdicke hat mehr als die Hälfte abgenommen. Dies ist durch den Ersatz des Pflanzenöls durch Glycerin zu erklären. Das Glycerin ist wasserlöslich und wird nicht ausreichend in der Polymermatrix der Abdeckung gebunden. Diese Beobachtung deckt sich auch mit den Beobachtungen der Silierversuche mit Silofässern (siehe Abschnitt 5.4.1). Glycerin in größeren Masseanteilen ist als Bestandteil der Rezeptur für die Abdeckung daher nicht geeignet. Jedoch ist als positive Eigenschaft der weiterentwickelten Varianten auf Glycerinbasis festzuhalten, dass diese durch UV-Licht und hohe Temperaturen nicht klebrig werden und somit auch keine Insekten an der Oberfläche haften bleiben.



Abbildung 83: Gärglasversuche – Rezepturvariante auf Glycerinbasis (P08) mit sichtbarem Materialschwund und Randablösung

Die Gärglasmethode hat sich als Screeningmethode bewährt. Aus den Gärglasversuchen lassen sich in einigen Wochen wichtige Erkenntnisse über die Rezeptur für eine gezielte Weiterentwicklung gewinnen.

5.4.3 Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1

Fünf vielversprechende Rezepturvarianten (A.242, A.109, K35, P20 und W10) werden auf jeweils zwei Miniatursilos aus Beton getestet.

5.4.3.1 Materialapplikation mit Prototyp 2 des Applikationsgeräts

Das Aufspritzen des Materials erfolgt, wie Abbildung 22 zeigt, manuell. Durch die raue Oberfläche der Silage ist es schwierig zu erkennen, ob die Abdeckung alles vollständig benetzt. Zudem stellen sich einzelne Pflanzenteile nach der Verdichtung wieder auf, so dass hier kleine Löcher in der Abdeckung entstehen. Abbildung 84 zeigt drei durch fehlerhafte Applikation verursachte Löcher in der Silageabdeckung. In allen drei Fällen treten die Löcher „im Schatten“ größerer Blätter und Stängel auf. Das Applikationsgerät muss daher für eine vollständige Benetzung des Substrats optimiert werden, damit auch unter schräg stehenden Stängeln Material auftrifft. Zudem muss der Abstand der Düse zum Substrat kontrolliert konstant gehalten werden. Bei der Applikation mit der manuellen Führung einer Spritzlanze kommt es immer wieder vor, dass der Abstand zum Substrat nicht ausreichend ist und durch den Druck an der Düse Blätter und Stängel aufgewirbelt werden. Diese Pflanzenbestandteile vermischen sich mit der Silageabdeckung und können später zu undichten Stellen führen. Auch das subjektive Ermessen beim Auftragen durch den Bediener ist eine weitere Fehlerquelle bei der luftdichten Abdeckung des Materials.



Abbildung 84: Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – Löcher im Abdeckmaterial, verursacht durch eine fehlerhafte Applikation in den Silos Nr. 4, Nr. 5 und Nr. 6 (von links nach rechts)

Die Siloabdeckungen P20, A.242 und A.109 sind beim Aufspritzen mit dem Applikationsgerät sehr flüssig und es läuft viel Material an den Flanken des Silohaufens ab und sammelt sich in Vertiefungen des Silohaufens oder läuft auf den Boden. Durch die Dünnschichtigkeit des Materials beim Aufspritzen kann die gewünschte Behandlung der Silo-

wände mit einer ausreichend dicken Materialschicht nicht erreicht werden. Zudem entstehen durch das Abfließen der Abdeckung auf der Silage viele Stellen mit sehr dünner Bedeckung. Einzelne Blätter oder Maiskörner scheinen bereits unmittelbar nach der Applikation durch die Abdeckung hindurch.

Die Austrittsgeschwindigkeit des Materials mit dem druckluftunterstützten Spritzkopf des Prototyps 1 ist für die Applikation auf die Silohaufen zu groß. Es werden durch den hohen Druck Pflanzenteile an der Oberfläche des Silohaufens aufgewirbelt. Dadurch ist die frisch aufgespritzte Silageabdeckung von Pflanzenteilen durchsetzt, was zu Schwachstellen im Material führt.

Das Mischungsverhältnis der Komponenten A und B konnte bei einigen Applikationen im Durchschnitt gut erreicht werden. Doch treten während des Spritzens starke Schwankungen auf, wie sie beispielsweise für Silo Nr. 3 in Abbildung 85 zu sehen sind. Bei dieser Applikation schwanken die Mischungsverhältnisse zwischen 1:0,7 und 1:2 mit größeren Ausreißern nach oben und unten in den ersten 90 Sekunden und gegen Ende der Applikation. Im Vergleich zu den anderen Applikationen treten hier die geringsten Schwankungen im Mischungsverhältnis auf. Im Durchschnitt wird bei Silo Nr. 3 das für die Variante ideale Mischungsverhältnis von 1:1,25 genau erreicht. Das Ergebnis solcher Schwankungen ist, dass die Reaktionspartner in der Abdeckung nicht zum angestrebten und erforderlichen Verhältnis zusammentreffen und somit auch nicht die gewünschten Materialeigenschaften entstehen. Die Regelung zur Erreichung des Mischungsverhältnisses muss daher weiter verbessert werden.

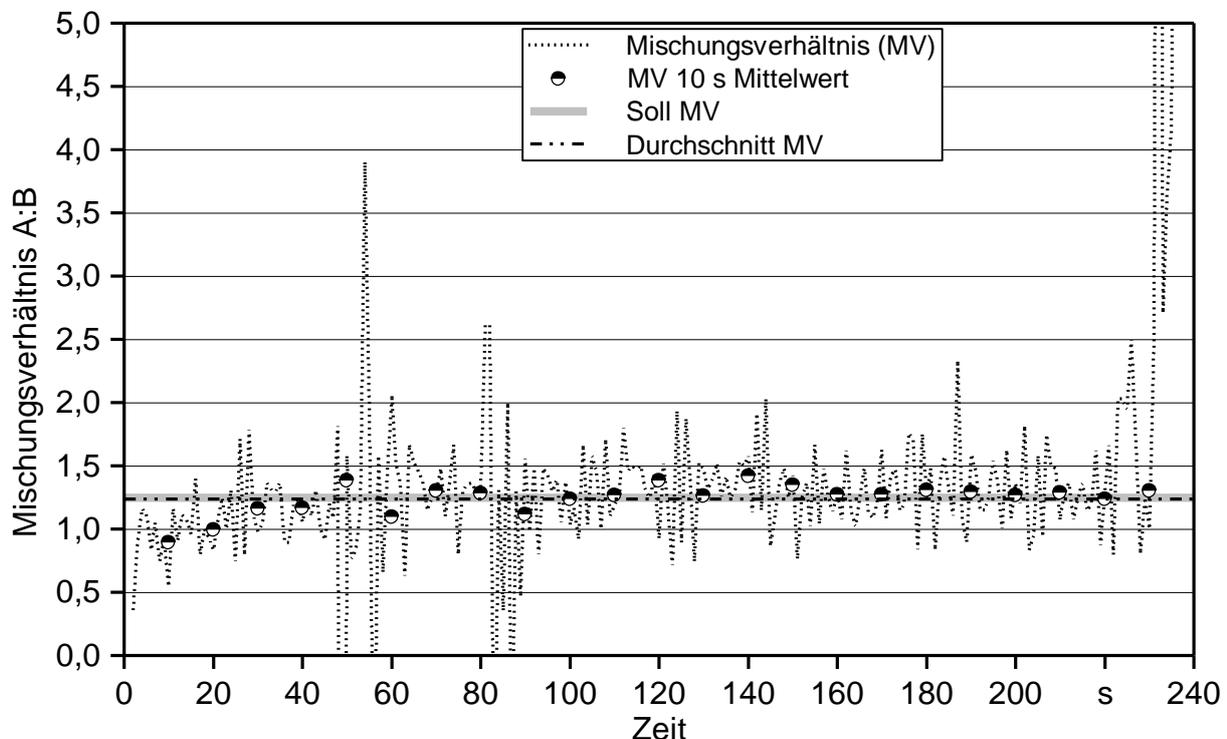


Abbildung 85: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur P20 auf Silo Nr. 3

Bei Rezeptur K35 wurde das Mischungsverhältnis, wie in Abbildung 86 gezeigt, im Durchschnitt sehr gut erreicht. Doch auch hier zeichnet sich die Applikation durch starke Schwankungen im Mischungsverhältnis, vor allem in der ersten Hälfte der Applikation aus. Die Schwankungen können durch die schwarz eingefärbte Ölkomponente auch optisch wahrgenommen werden. Durch das sofortige Reagieren der zwei Komponenten fließt diese Variante nicht nennenswert vom Silohaufen ab und kann auch einzelne hervorstehende Pflanzenteile ausreichend ummanteln. Trotz der Schwankungen im Mischungsverhältnis bindet die Abdeckung schnell ab. Bei Silo Nr. 5 wird bei der Applikation mit dem ersten Spritzstrahl reine Ölkomponente an die Silowand gespritzt. Hier ist durch die Ölbenetzung zwischen Abdeckmaterial und Wand im weiteren Verlauf keine gute Randhaftung zu erwarten. Die aufgespritzte Abdeckung kann durch die schnelle Reaktion sehr gleichmäßig aufgebracht werden. Nach dem Aushärten der Abdeckung tritt auf beiden Silos Nr. 5 und Nr. 7 eine bräunliche Flüssigkeit aus. Dies ist ein eindeutiges Zeichen dafür, dass die Abdeckmasse nicht richtig reagiert hat. Hierfür können zum einen die schwankenden Mischungsverhältnisse und zum anderen eine nicht ausreichende Mischung durch das Applikationsgerät verantwortlich sein.

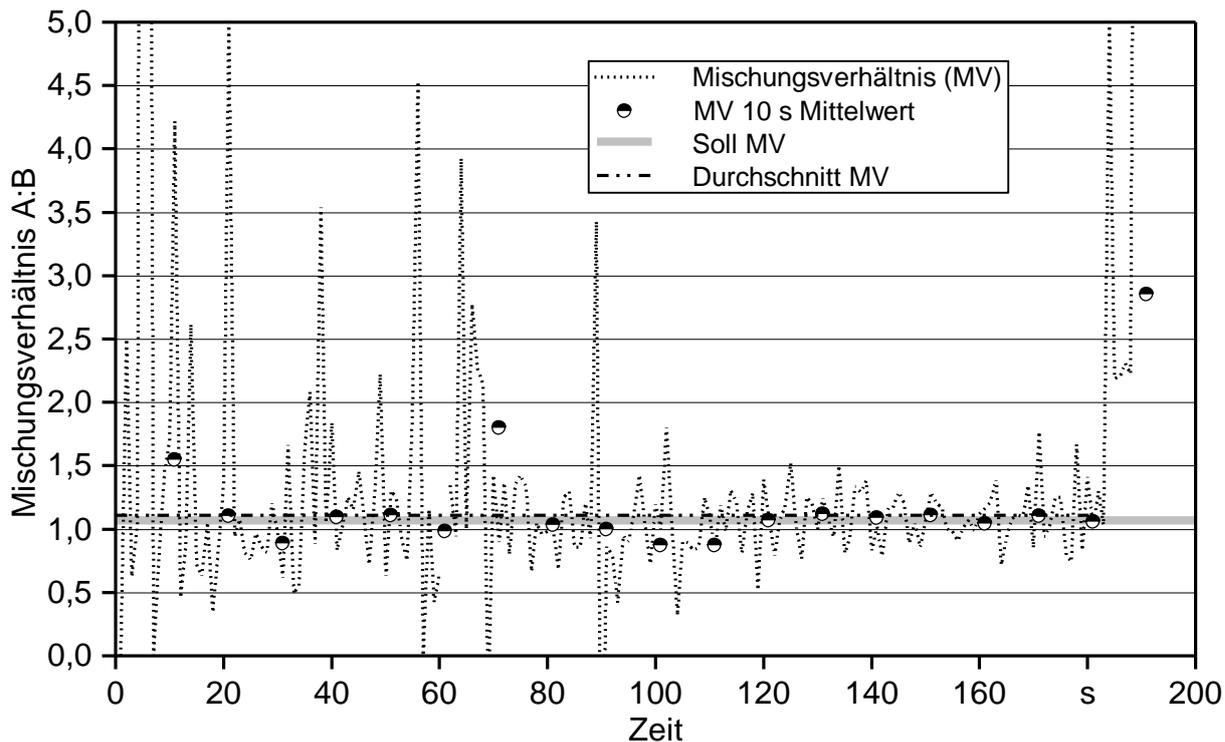


Abbildung 86: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur K35 auf Silo Nr. 7

Die beiden Varianten mit sehr ungleichen Mischungsverhältnissen der Komponenten A und B von ca. 1:2 (A.242 und A.109) sind bei der Applikation wesentlich schwieriger zu kontrollieren als die Varianten mit einem Mischungsverhältnis von annähernd 1:1, wie in Abbildung 84 zu sehen ist. In dieser Grafik ist das Mischungsverhältnis der Variante

A.109 auf Silo Nr. 6 zu sehen. Nach einer Minute ist der Zulauf der Latexkomponente verstopft, weshalb das Mischungsverhältnis gegen 1:0 geht. Die Applikation muss daher abgebrochen werden. Nach der Reinigung des verstopften Bauteils und dem Wechseln der Zuläufe wird erneut gespritzt. Die Unterbrechung ist in Abbildung 87 durch eine schwarze senkrechte Linie gekennzeichnet. Auch im zweiten Anlauf kann das Mischungsverhältnis nicht zufriedenstellend erreicht werden und die Schwankungen sind nach wie vor sehr groß. Die Mischungsverhältnisse der weiteren Applikationsversuche sind im Anhang dargestellt.

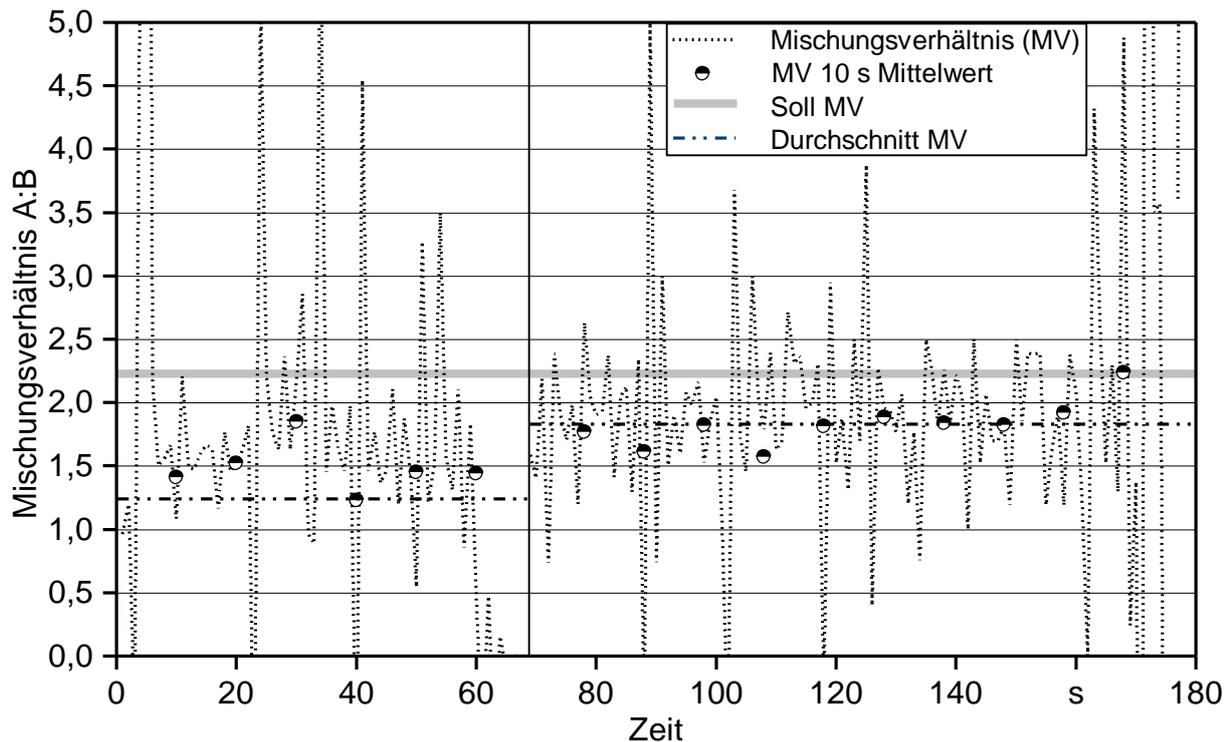


Abbildung 87: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur A.109 auf Silo Nr. 6

Tabelle 22 gibt einen Überblick der im Durchschnitt erreichten Mischungsverhältnisse, der aufgetragenen Menge der Silageabdeckung auf die Miniatursilos und der daraus resultierenden durchschnittlichen Schichtdicke.

Tabelle 22: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – Ergebnisse der Applikation der Silos

Silo Nr.	Abdeckung	Mischungsverhältnis A:B Soll	Durchschnittliches Mischungsverhältnis A:B	Masse Abdeckmaterial in kg	Errechnete durchschnittliche Schichtdicke in mm
1	W10	1:1,23	1:1,27	24,4	8,5
2	W10	1:1,23	1:1,45	23,3	8,0
3	P20	1:1,25	1:1,24	24,5	6,9
4	P20	1:1,25	1:1,26	23,5	6,4
5	K35	1:1,07	1:1,02	24,2	9,0
6	A.109	1:2,23	1:1,25* 1:1,83	7,1* 13,9	7,0
7	K35	1:1,07	1:1,11	23,8	8,5
8	A.242	1:2,25	1:2,45	24,9	8,0
9	A.109	1:2,23	1:1,75	18,6	6,0
11	A.242	1:2,25	1:2,36	24,2	7,5

* Mischungsverhältnis und Masse des Abdeckmaterials vor Unterbrechung (oben) und nach Unterbrechung (unten)

5.4.3.2 Monitoring der Miniatursilos während der Lagerzeit

Bereits nach zwei Wochen ist bei den Rezepturen A.109, A.242 und W10 eine deutliche Ablösung bis zu 4 mm von der Silowand festzustellen. Auch bei Silo Nr. 5 hat sich an der mit Öl benetzten Wand ein schmaler Riss (ca. 1 mm) gebildet, der sich jedoch bis zum Frühjahr nicht weiter verändert. Abbildung 88 zeigt Silo Nr. 11, besprüht mit Rezeptur A.242, zwei Wochen nach der Silierung. Das Material löst sich deutlich von der Silowand ab. Im Abdeckmaterial sind einzelne Blatteile und Maiskörner zu erkennen. Stellen mit sehr geringer Schichtdicke auf dem Silohaufen erscheinen bei allen Rezepturen, mit Ausnahme von K35, durchsichtig und die darunterliegende Silage ist zu erkennen. Zudem sind alle Silageabdeckungen, mit Ausnahme von K35 klebrig, sodass Insekten an der Oberfläche haften bleiben. Die Beobachtungen weisen darauf hin, dass die Applikation mangelhaft war.

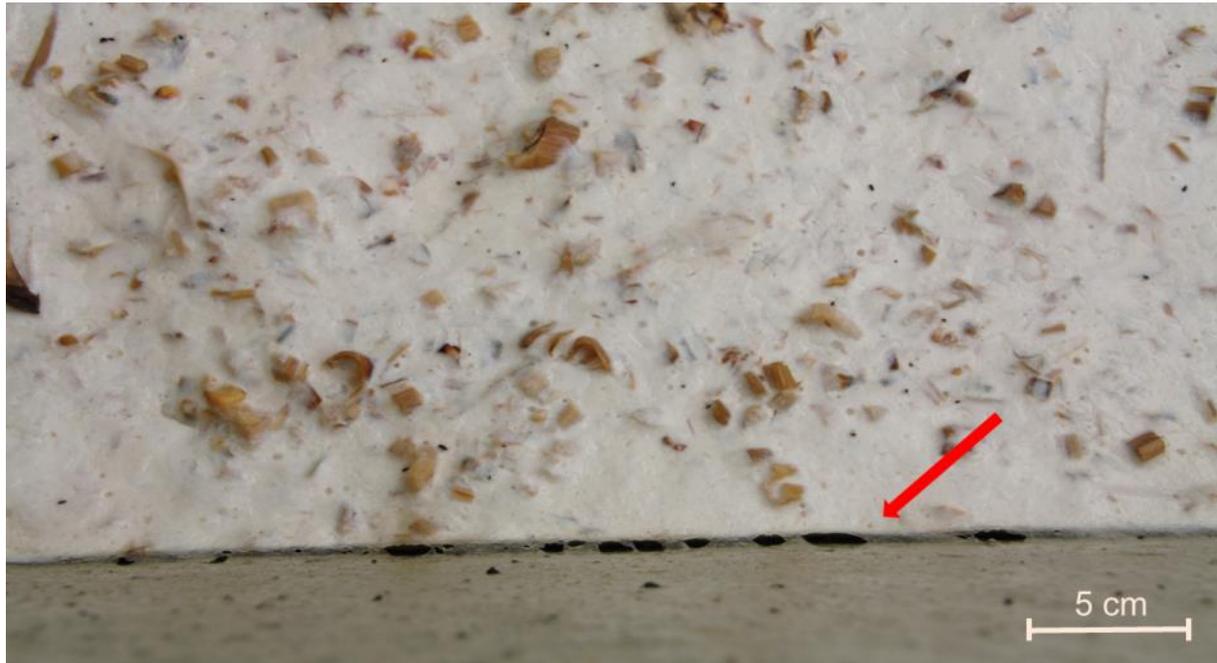


Abbildung 88: Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – Ablösung der Rezepturvariante A.242 von der Silowand nach zwei Wochen nach Silierung

Drei Wochen nach der Silierung bilden sich bei einigen Silos erste Schimmelherde. Auf den Silos Nr. 3 und Nr. 4, bedeckt mit Variante P20, sind nur kleine Stellen von wenigen Millimetern Durchmesser erkennbar, die mit schwarzem Schimmel befallen sind. Verursacht werden diese kleinen Stellen durch Samen oder andere Biomasse, die auf der Silooberfläche anhaften und sich nun zersetzen. Großflächiger Befall, ca. ein Viertel der gesamten Silooberfläche, ist bei den Silos Nr. 5 und Nr. 7 durch grünen Schimmel und auf den Silos Nr. 1 und Nr. 2 durch schwarzen Schimmel zu verzeichnen. In beiden Fällen ist der Befall ausschließlich auf der beschatteten Nordseite des Silohaufens zu erkennen. Die Silos der Rezepturen A.109 und A.242 weisen, ähnlich wie P20, punktuell an oberflächlichen Verunreinigungen kleine Schimmelherde von wenigen Millimetern auf. Doch daneben wächst bei diesen beiden Varianten ein orangefarbener Pilz mit einem Durchmesser von ca. 5 cm, der sich von unten durch die Abdeckung zu arbeiten scheint. Erste Schimmelherde sind in Abbildung 89 zu sehen.

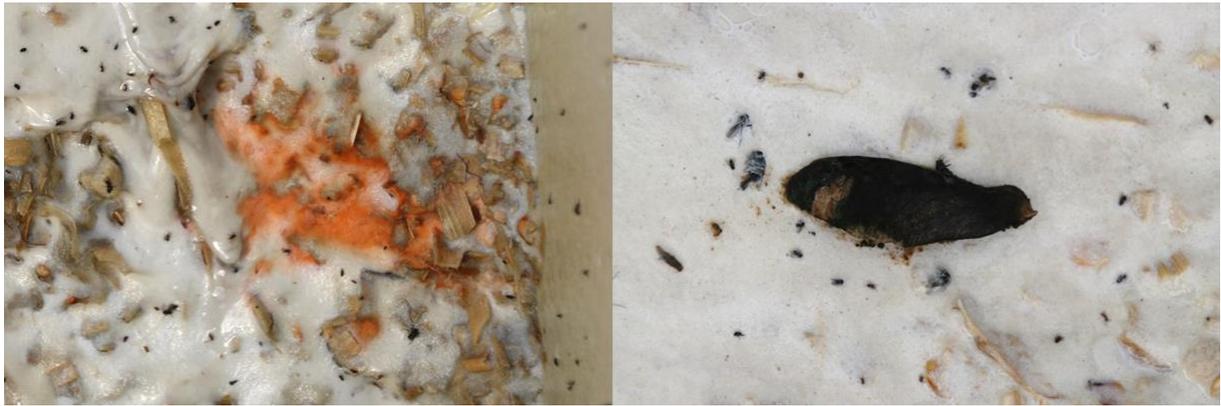


Abbildung 89: Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erste Schimmelbildung bei Variante A.109 (links) und schimmelnder Ahornsamen auf Variante P20 (rechts) sechs Wochen nach der Silierung

Nach sechs Wochen zeigen sich bei der sehr dünn aufgetragenen Variante A.109 erste Risse an Stellen, an denen Pflanzenteile an der Oberfläche aus der Abdeckung herausragen, wie in Abbildung 90 zu sehen ist. Durch die Schrumpfungsneigung des Materials und die ungenügende Applikation dieser Variante weist die mittlere Materialdicke im Mittel lediglich 3 mm auf.

Das Schimmelwachstum hat nach fünf Monaten, Ende Februar, das Maximum erreicht. Die Silos, abgedeckt mit den Varianten W10 und K35, zeigen großflächigen Befall. Die Silos mit Variante W10 sind bis zu einem Drittel der Gesamtoberfläche mit Schimmel überzogen, vor allem die schattige Nordseite ist betroffen. Abbildung 91 zeigt Schwarzsimmel auf der Nordseite des mit W10 abgedeckten Silos Nr. 1.



Abbildung 90: *Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erste Risse in der Abdeckung A.109 nach sechs Wochen an heraustretendem Pflanzenmaterial*



Abbildung 91: *Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – Schimmelbefall der Variante W10 auf der Nordseite des Silohaufens fünf Monate nach der Silierung*

Die mit K35 abgedeckten Silos sind nahezu zu 100 % mit Schimmel bedeckt. Bei den restlichen Silos (P20, A.242 und A.109) sind an der Oberfläche vor allem auf der Nordseite vereinzelte Schimmelherde mit Durchmessern von 1 cm bis zu 10 cm vorzufinden. Die Südseite des Silohaufens ist bei allen Silos größtenteils schimmelfrei. Die Silos mit P20 sind von allen Miniatursilos am wenigsten betroffen. Auch ein Silo mit A.242 ist fast schimmelfrei. Dieses Silo ist an der Nordseite mit einer Silowand verschlossen. Daher ist der Silohaufen nicht konvex gerundet, hat keine Schattenseite und ist schräg der Südseite zugewandt. Die Silageabdeckung dieses Silos ist frei von oberflächlichem Schwarzsimmel. Zwei handflächengroße orangefarbene Schimmelherde sind zu verzeichnen. Die als Abdeckung verwendete Rezeptur A.242 löst sich ca. 1 cm von der Silowand ab. Durch den entstandenen Spalt gelangt Regenwasser ins Siloinnere und auch zwischen Wand und Abdeckung entstehen verschiedene Schimmelherde.

Nach über vier Monaten löst sich auch Variante P20 leicht von der Silowand ab. Somit konnte mit dieser Rezepturvariante die Randablösung von zwei Wochen auf 18 Wochen verbessert werden.

Im Frühjahr, nach fünf Monaten, reißt die Abdeckung K35 auf und gibt somit keinen Schutz vor Sauerstoff- und Wassereintrag ins Siloinnere. Vögel werden durch die sichtbare Silage angelockt. In Kürze entstehen Fraßschäden und die Abdeckung ist mit bis zu 5 cm großen Löchern überzogen.

Im April 2017, sechs Monate nach dem Beginn des Praxistests, werden alle Silos am Rand zur Silowand aufgrund der teils starken Schrumpfungseigenschaft der Abdeckvarianten nachgebessert. Verwendet wird hierfür eine weiterentwickelte Version der Rezeptur P20, die sich durch gute mechanische Eigenschaften, geringe Schrumpfungseigenschaft und Schimmelresistenz auszeichnet. Bei den Ausbesserungsarbeiten ist auffällig, dass die Silos, abgedeckt mit den Varianten A.242 und A.109, bei Weitem am stärksten geschrumpft sind, hier wird mehr als die doppelte Menge an Material für die Ausbesserungsarbeiten benötigt. Variante P20 hat sich nur an der Südseite des Silos etwas abgelöst und damit das beste Randhaftungsverhalten aller getesteten Varianten der Silageabdeckung. Hier wurde eindeutig eine wesentliche Verbesserung der Rezeptur im Vergleich zur vorhergehenden Projektphase erreicht.

Das Material zur Ausbesserung verbindet sich gut mit den verschiedenen Rezepturvarianten. Doch bereits nach zwei Wochen beginnt sich auch das ausgebesserte Material abzulösen. Die Siloabdeckungen ziehen sich bei den höheren Außentemperaturen erneut etwas zusammen (2 mm bis 5 mm).

Mitte Juni werden alle Silos aufgelöst und beprobt. Durch die starke Hitze im Sommer hat sich der Silostock erneut um ca. 3 cm bis 5 cm abgesenkt. Die starre Sauerstoffsonde, die sich ursprünglich 5 cm unter der Abdeckung befand, liegt nun bei den meisten Silos über der Silageoberfläche und die darüber befindliche Silageabdeckung ist aufgerissen, daher muss der Versuch abgebrochen werden. Zudem wurde das Silo Nr. 3 durch Unbekannte mit Steinen beworfen. Diese Steine können wieder vorsichtig abge-

nommen werden, ohne große Schäden an der Silageabdeckung zu hinterlassen, doch sind Spuren der Fremdkörper auf der Abdeckung zu erkennen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auf den unbeschatteten Südseiten der Silos bei allen Rezepturvarianten fast kein Schimmel wächst, hier jedoch die Randablösung der Abdeckung verstärkt auftritt. Die Schimmelresistenz der Silageabdeckung muss noch weiter verbessert werden, damit auch in Bereichen mit Staunässe oder Dauerbeschattung keine Schimmelbildung stattfinden kann. Auch die Randablösung gilt es noch zu verbessern und die aufgebrauchte Materialdicke soll erhöht werden. Es sind in zukünftigen Versuchen mindestens 8 mm Schichtdicke im frischen Zustand aufzubringen. Dabei sollte versucht werden, die Applikation weitgehend zu automatisieren, um das subjektive Verhalten des Bedieners als potenzielle Fehlerquelle auszuschließen und das Mischungsverhältnis besser konstant zu halten. Außerdem muss die Aufprallgeschwindigkeit des Abdeckmaterials auf das Substrat verringert werden, um das Aufwirbeln von Pflanzenteilen zu verringern.

Temperatur- und Sauerstoffgehalte während der Lagerzeit

Der Temperaturverlauf im Siloinneren über das Jahr ist in Abbildung 92 dargestellt. Die Silos Nr. 6 und Nr. 9 mit der sehr dünn aufgetragenen Silageabdeckung (Rezeptur A.109) zeigen bereits ab November einen Temperaturanstieg im Siloinneren. Besonders ausgeprägt ist die Erwärmung in Silo Nr. 6. Im Dezember erreicht der Wert fast 20 °C, während die Außentemperatur unter -2 °C fällt. Diese Erwärmung ist ein eindeutiges Zeichen für Fehlgärungen im Silo. Ab Februar ist zu erkennen, dass auch die Temperaturen der Silagen, abgedeckt mit den Varianten A.242 und K35, im Vergleich zu den Referenzsilos und zur Außentemperatur um etwa 10 °C ansteigen. Die Silos, abgedeckt mit den Varianten W10 und P20, sind mit den Referenzsilos bis zum Beprobieren Anfang Mai in einem vergleichbaren Bereich. Nach dem Öffnen der Silos und der Probenahme steigt die Temperatur innerhalb weniger Tage auf über 35 °C an. Anhand der Temperaturverläufe können bereits erste Rückschlüsse auf den Gärerfolg und die Funktionalität der Abdeckung gezogen werden.

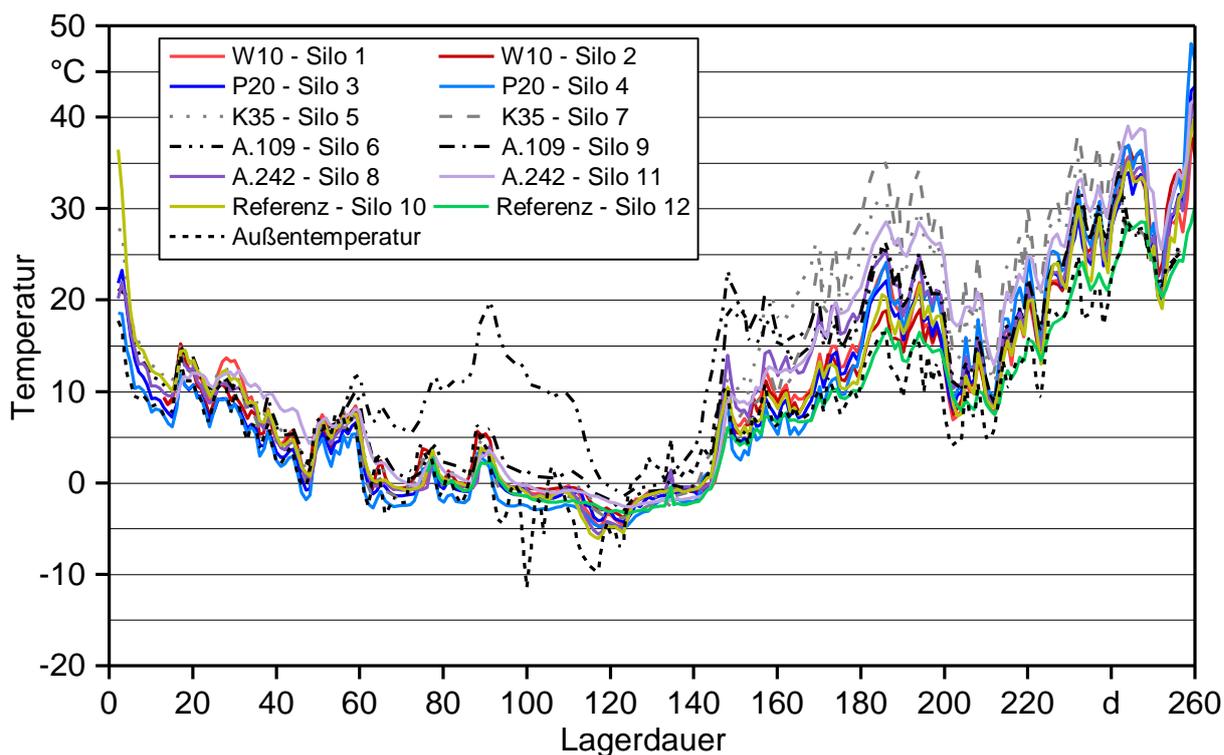


Abbildung 92: Temperaturverlauf im Siloinneren im Vergleich zur Außentemperatur

Neben der Temperatur wird auch der Sauerstoffgehalt im Inneren der Silos gemessen. Hierbei treten einige Besonderheiten auf, die im Folgenden dargestellt werden.

Bei allen Silos steigt der Sauerstoffgehalt im Siloinneren nach ca. sechs Wochen stark an. Auch bei den mit Silofolie abgedeckten Silos ist dieses Verhalten zu beobachten. Der Sauerstoffanstieg geht einher mit dem Temperaturabfall des Silostocks zu Beginn der Wintermonate. Es werden, wie in Abbildung 93 beispielhaft für Silo Nr. 4 zu sehen, Sauerstoffgehalte von über 10 % gemessen, die Werte fallen erst zum Frühjahr wieder ab, nachdem auch die Temperatur im Silo wieder ansteigt und der Sauerstoff veratmet wird. Die hohen Sauerstoffgehalte sind mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht durch Undichtigkeiten der Siloabdeckungen verursacht.

Eine mögliche Erklärung für den Anstieg bei allen Messstellen liegt in der Beschaffenheit der neuartigen Sauerstoffsonden. Hier wurden Edelstahl und Plexiglas mit einem Spezialkleber verklebt. Der Kleber selbst ist zwar frostunempfindlich, doch könnten die unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien zu Undichtigkeiten geführt haben. Um die undichten Sonden wieder zu versiegeln und funktionsfähig zu machen, werden die Messstellen umgebaut und außen am Silo angebracht.

Ab März, nachdem der eingebrachte Sauerstoff wieder veratmet wurde, ist wieder gut zu erkennen, welche Siloabdeckungen noch luftdicht abschließen. Im Wandbereich sind die Silos zu diesem Zeitpunkt bereits undicht und die Sauerstoffsonde in diesem Bereich zeigt höhere Konzentrationen als die beiden anderen an. Durch die zwei in unterschiedlicher Höhe liegenden Sonden ist das Diffundieren des Sauerstoffs ins Siloinnere erkenn-

bar. Als auch an der unteren Sonde ein Sauerstoffgehalt von 2 % erreicht wird, wird der Langezeitversuch abgebrochen und die Silos beprobt.

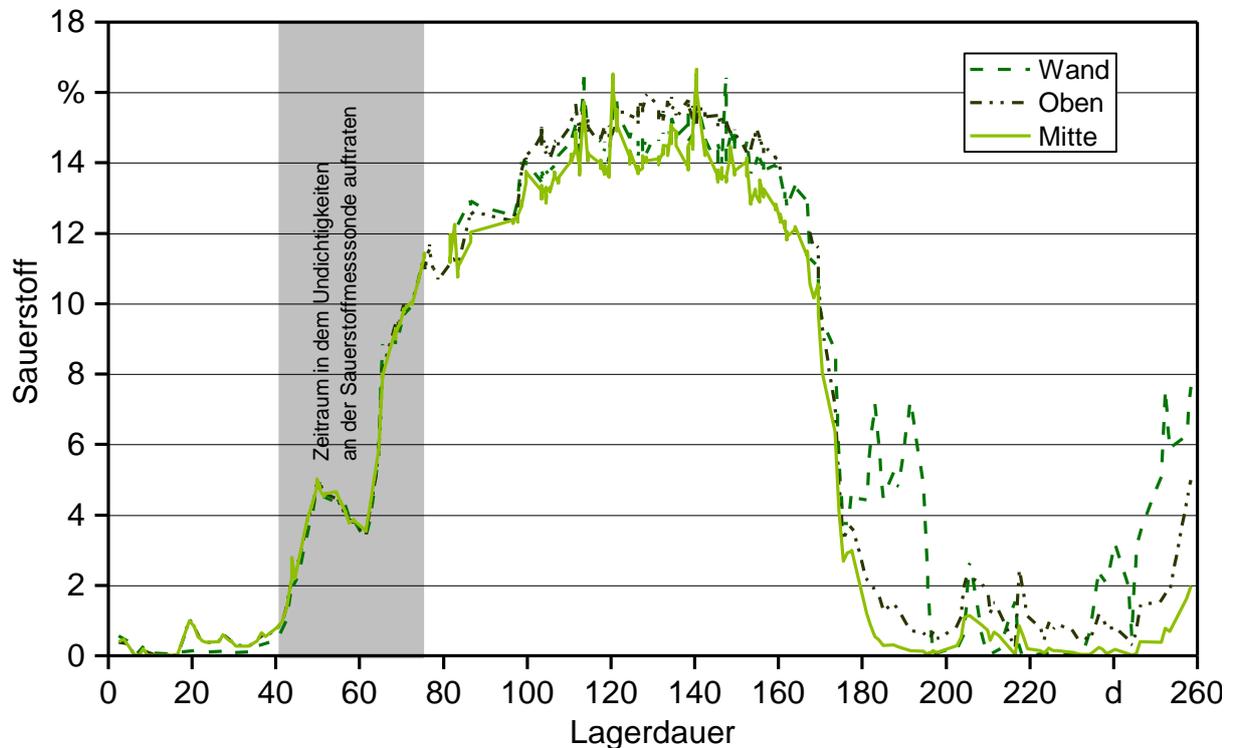


Abbildung 93: Miniatursilos Versuchsreihe 1 – Sauerstoffentwicklung im Silo Nr. 4, abgedeckt mit Variante P20

5.4.3.3 Bonitur der Miniatursilos

Die Silos werden nach ca. acht Monaten beprobt. Die mit den Varianten A.109 und K35 abgedeckten Silos werden zwei Wochen früher aufgelöst, da sich hier schon sichtliche Undichtigkeiten, Löcher und Risse seit dem Auftauen der Silos ergeben. In der schwarzen Abdeckung K35 bilden sich durch die Sonneneinstrahlung im Frühjahr deutliche Risse, die die Silage unter der Abdeckung freigeben. Vögel erweitern diese Risse durch Fraßschäden. Ab April entsteht bereits ein unangenehmer Geruch durch entstehende Fehlgärungen.

Variante A.109 ist aufgrund der fehlerhaften Applikation und der sehr geringen Schichtdicke schon nach wenigen Wochen undicht. Auch hier ist ein unangenehmer Geruch wahrnehmbar und der Silostock bereits einige Zentimeter abgesunken. Beim Öffnen der vier offensichtlich undichten Silos zeigt sich direkt unter der Abdeckung eine dunkle, faulige Silageschicht, in die sich bereits Insekten eingemischt haben. Die Silage ist durch das Eindringen von Regenwasser sehr nass und es haben sich einige Schimmelherde gebildet. Nach dem Abtragen der ersten 10 cm wird die Silage heller und auch der Geruch verbessert sich, ähnlich wie bei den Silierversuchen mit Silofässern. Von jedem Silo werden nach 241 Tagen drei Proben genommen: eine direkt unter der Abdeckung bis zu

15 cm Tiefe und eine weitere in 30 cm Tiefe, jeweils in der Mitte der Silos. Die dritte Probe wird direkt an der Silowand gezogen, ebenfalls in 30 cm Tiefe. Die Analyseergebnisse der Silage bestätigen die schlechte Qualität durch die fehlerhafte Abdeckung von Variante A.109. Die Analyseergebnisse der Silagen aus den Silos, abgedeckt mit Variante A.109, sind Tabelle 26 und Tabelle 29 zu entnehmen.

Die mit Variante K35 abgedeckten Silagen sind ebenfalls direkt unter der Abdeckung verdorben. Trotz der bei Silo Nr. 7 erreichten 85 DLG-Punkte kann hier keine „gute“ Silagequalität festgestellt werden. In der Futtermittelprobe sind keine Säuren nachweisbar, eine gute Silage hat hingegen einen Milchsäuregehalt von mindestens 30 g/kg TM. Die Säuren sind aus der oberen Schicht komplett ausgewaschen und metabolisiert. Der Zersetzungsgrad ist hier weit fortgeschritten. In Tabelle 29 sind die Analyseergebnisse der Proben direkt unter der Silageabdeckung dargestellt. Tabelle 25 zeigt, dass in der Mitte der Silos sehr gute Silagequalität vorhanden ist. Eine geringfügige Bildung von Buttersäure ist allerdings auch hier ein Indiz für eine beginnende Fehlgärung. Die Silageproben vom Silorand lassen bereits eine Beeinträchtigung der Qualität erkennen, befinden sich jedoch noch im guten Bereich. Der Buttersäuregehalt ist bei diesen Proben höher, der Milchsäuregehalt und die Trockenmasse niedriger als bei Proben der Silomitte.

Die Lagerdauer der beiden später erstellten Silos mit W10 beträgt 245 Tage. Die entstandenen Silagen sind nicht direkt mit denen der anderen Silos vergleichbar, da für diese Versuche ein späterer Erntetermin des Silomaises gewählt wurde. Direkt unter der Abdeckung sind auch hier Schimmelherde zu erkennen, vor allem am Silorand und um die Sauerstoffsonden. Die Silage ist nahe der Oberfläche braun und der Geruch ist unauffällig. Beim Öffnen des Silos ist kein Geruch nach Buttersäure oder Essigsäure wahrnehmbar. Nach 10 cm dunkler und feuchter Oberschicht wird die Silage hell, die Farbe wandelt sich in ein Gelbgold und die Silage ist durchweg sehr feucht, was auch die Analyseergebnisse in Tabelle 23 bestätigen. Hierbei ist zu beachten, dass bei diesen beiden Silos bereits das Ausgangssubstrat eine Trockenmasse von 25 % hatte.

Bei den Referenzsilos ist die Silage nach 256 Tagen Lagerdauer direkt unter der Folie trocken und schimmelfrei. Von der Silowand ist Wasser ins Silo eingedrungen, in diesem Randbereich ist auch vereinzelt Schimmelbildung erkennbar. Auffallend ist ein essigsaurer Geruch, der sich von den anderen Silos unterscheidet. Die tieferliegende Silage riecht sehr gut und ist trocken. Alle gezogenen Proben in den Referenzsilos sind von sehr guter Qualität – selbst die Probe, die in den oberen 15 cm gezogen wurde. Die Analyseergebnisse sind in Tabelle 28 und Tabelle 30 gelistet.

Die Lagerdauer der Silos, abgedeckt mit Variante P20, beträgt 256 Tage. Auch beim Öffnen der Silos sind vor allem an den Sauerstoffsonden und vereinzelt unter der Abdeckung Schimmelherde erkennbar. Unter den oberen 10 cm ist die Silage von sehr guter Qualität. Tabelle 24 zeigt die qualitätsbestimmenden Eigenschaften der entstandenen Silagen. Es wurden sehr gute Qualitäten im Siloinneren erreicht. Auch im Bereich der Silowände sind sehr gute Silagequalitäten vorzufinden. Mit der Abdeckvariante P20 werden die besten Ergebnisse der getesteten Silageabdeckungen erzielt.

Die Abdeckungsvariante A.242 ist nach der Lagerdauer von 256 Tagen beim Öffnen sehr spröde und zerfällt. Unter der Abdeckung sind mehr Schimmelherde aufzufinden als bei Variante P20 und auch der Geruch der Silage lässt auf eine Beeinträchtigung der Qualität schließen. Nach 10 cm ist die Silage etwas dunkler als bei den anderen Silos. Hier scheint die Abdeckung schon länger undicht zu sein. Doch auch bei diesen Silos sind in der Silomitte sehr gute Silagequalitäten vorzufinden, wie Tabelle 27 zeigt. An der Silowand sind wie bei allen mit der neuen Silageabdeckung abgedeckten Silos Qualitätseinbußen zu verzeichnen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei keinem der Miniatursilos mit der neuartigen Silageabdeckung eine gute Silagequalität direkt unter der Siloabdeckung festzustellen war. Die Qualitätsmängel an der Silageoberfläche sind u. a. auf Applikationsfehler, eine zu geringe Materialdicke und ein meist unzureichend erreichtes Mischungsverhältnis der beiden Komponenten bei der Aufbringung des Materials zurückzuführen. Doch bereits in 30 cm Tiefe liegt in der Silomitte eine gute bis sehr gute Silagequalität vor, mit Ausnahme der mit der fehlerhaft applizierten und stark schrumpfenden Variante A.109 abgedeckten Silos. Variante P20 hat insgesamt das beste Ergebnis dieses Praxistests erreicht. Ein Verbesserungspotenzial bei dieser Rezepturvariante liegt in erster Linie bei der Aufbringung des Materials. Die Reaktionsgeschwindigkeit der beiden Komponenten beim Applizieren soll erhöht werden, damit eine ausreichende Materialdicke auf dem Silo erreicht werden kann.

Tabelle 23: Ernährungswissenschaftliche Untersuchung der mit Variante W10 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm

Bezeichnung	Einheit	Silo Nr. 1 Mitte	Silo Nr. 1 Wand	Silo Nr. 2 Mitte	Silo Nr. 2 Wand
Ernte		10.10.2016	10.10.2016	10.10.2016	10.10.2016
Probenahme		13.06.2017	13.06.2017	13.06.2017	13.06.2017
Versuchsdauer	d	245	245	245	245
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	230	222	230	190
Rohasche (XA)	g/kg TM	42	55	43	58
Rohprotein (XP)	g/kg TM	65	68	67	72
Rohfaser (XF)	g/kg TM	289	288	266	313
Rohfett (XL)	g/kg TM	21	25	23	27
Stärke (XS)	g/kg TM	125	155	163	174
Zucker (XZ)	g/kg TM	115	68	109	36
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	580	547	540	597
ADFom ²⁾	g/kg TM	343	333	317	369
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	609	595	627	585
Proteinwerte					
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	117	119	120	119
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-8	-8	-8	-7
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	44	55	50	21
Essigsäure	g/kg TM	23	28	25	19
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	0	2	0	22
pH-Wert		4,9	4,9	5,1	4,3
DLG-Punkte		85	85	85	33
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	1	0	0	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	4	3	4	4

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose

²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

Tabelle 24: Ernährungswissenschaftliche Untersuchung der mit Variante P20 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm

Bezeichnung	Einheit	Silo Nr. 3 Mitte	Silo Nr. 3 Wand	Silo Nr. 4 Mitte	Silo Nr. 4 Wand
Ernte		29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016
Probenahme		13.06.2017	13.06.2017	13.06.2017	13.06.2017
Versuchsdauer	d	256	256	256	256
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	354	315	347	348
Rohasche (XA)	g/kg TM	35	39	38	38
Rohprotein (XP)	g/kg TM	83	81	86	88
Rohfaser (XF)	g/kg TM	194	204	196	208
Rohfett (XL)	g/kg TM	34	33	34	34
Stärke (XS)	g/kg TM	362	362	353	347
Zucker (XZ)	g/kg TM	33	28	40	32
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	384	397	397	411
ADFom ²⁾	g/kg TM	225	235	232	242
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	706	696	692	677
Proteinwerte					
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	137	136	137	136
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-9	-9	-8	-8
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	49	41	45	36
Essigsäure	g/kg TM	14	18	17	28
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	0	2	0	0
pH-Wert		4,9	5,2	4	5,3
DLG-Punkte		90	90	100	90
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	1	1	1	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	6	5	5	5

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose

²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

Tabelle 25: Ernährungspysiologische Untersuchung der mit Variante K35 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm

Bezeichnung	Einheit	Silo Nr. 5 Mitte	Silo Nr. 5 Wand	Silo Nr. 7 Mitte	Silo Nr. 7 Wand
Ernte		29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016
Probenahme		29.05.2017	29.05.2017	29.05.2017	29.05.2017
Versuchsdauer	d	241	241	241	241
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	329	254	335	323
Rohasche (XA)	g/kg TM	40	37	40	37
Rohprotein (XP)	g/kg TM	88	82	88	84
Rohfaser (XF)	g/kg TM	209	226	206	202
Rohfett (XL)	g/kg TM	34	36	34	35
Stärke (XS)	g/kg TM	345	359	346	370
Zucker (XZ)	g/kg TM	21	15	25	30
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	407	433	399	386
ADFom ²⁾	g/kg TM	245	274	241	236
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	684	644	683	671
Proteinwerte					
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	137	133	137	136
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-8	-8	-8	-8
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	51	19	47	35
Essigsäure	g/kg TM	15	21	16	14
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	3	11	3	4
pH-Wert		4	4,1	4,1	4,9
DLG-Punkte		98	57	100	80
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	1	1	1	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	6	4	5	5

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose

²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

Tabelle 26: Ernährungswissenschaftliche Untersuchung der mit Variante A.109 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm

Bezeichnung	Einheit	Silo Nr. 6 Mitte	Silo Nr. 6 Wand	Silo Nr. 9 Mitte	Silo Nr. 9 Wand
Ernte		29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016
Probenahme		29.05.2017	29.05.2017	29.05.2017	29.05.2017
Versuchsdauer	d	241	241	241	241
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	257	257	292	243
Rohasche (XA)	g/kg TM	41	37	37	38
Rohprotein (XP)	g/kg TM	96	79	88	85
Rohfaser (XF)	g/kg TM	198	229	218	247
Rohfett (XL)	g/kg TM	39	35	35	36
Stärke (XS)	g/kg TM	390	353	342	300
Zucker (XZ)	g/kg TM	24	25	23	10
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	381	449	415	467
ADFom ²⁾	g/kg TM	243	279	260	303
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	655	635	636	607
Proteinwerte					
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	139	131	134	131
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-7	-8	-7	-7
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	5	14	28	13
Essigsäure	g/kg TM	25	16	19	9
Propionsäure	g/kg TM	2	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	16	18	6	19
pH-Wert		5,7	4,9	4,2	4,1
DLG-Punkte		34	31	73	42
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	1	1	1	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	7	4	6	4

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

Tabelle 27: Ernährungspysiologische Untersuchung der mit Variante A.242 abgedeckten Silagen in einer Tiefe von 30 cm

Bezeichnung	Einheit	Silo Nr. 8 Mitte	Silo Nr. 8 Wand	Silo Nr. 11 Mitte	Silo Nr. 11 Wand
Ernte		29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016
Probenahme		13.06.2017	13.06.2017	13.06.2017	13.06.2017
Versuchsdauer	d	256	256	256	256
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	318	254	303	292
Rohasche (XA)	g/kg TM	38	29	33	35
Rohprotein (XP)	g/kg TM	86	70	84	82
Rohfaser (XF)	g/kg TM	191	220	194	203
Rohfett (XL)	g/kg TM	36	37	38	36
Stärke (XS)	g/kg TM	366	379	398	399
Zucker (XZ)	g/kg TM	20	18	8	15
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	386	429	371	373
ADFom ²⁾	g/kg TM	228	264	223	230
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	711	671	704	676
Proteinwerte					
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	139	132	139	137
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-9	-10	-9	-9
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	56	25	46	37
Essigsäure	g/kg TM	18	14	24	26
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	2	10	4	5
pH-Wert		4,8	3,9	3,9	4,1
DLG-Punkte		91	63	94	80
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	1	1	1	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	6	6	6	7

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

Tabelle 28: Ernährungswissenschaftliche Untersuchung der konventionell mit Folien abgedeckten Silagen (Referenz) in einer Tiefe von 30 cm

Bezeichnung	Einheit	Silo Nr. 10 Mitte	Silo Nr. 10 Wand	Silo Nr. 12 Mitte	Silo Nr. 12 Wand
Ernte		29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016
Probenahme		13.06.2017	13.06.2017	13.06.2017	13.06.2017
Versuchsdauer	d	256	256	256	256
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	384	380	384	390
Rohasche (XA)	g/kg TM	38	36	37	35
Rohprotein (XP)	g/kg TM	84	81	83	81
Rohfaser (XF)	g/kg TM	192	202	183	199
Rohfett (XL)	g/kg TM	36	35	37	36
Stärke (XS)	g/kg TM	362	367	385	356
Zucker (XZ)	g/kg TM	27	27	28	26
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	391	409	372	408
ADFom ²⁾	g/kg TM	232	243	218	245
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	694	696	710	685
Proteinwerte					
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	138	136	139	136
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-9	-9	-9	-9
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	41	39	43	39
Essigsäure	g/kg TM	12	12	11	13
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	0	0	0	0
pH-Wert		4,0	4,9	4,0	4,0
DLG-Punkte		100	90	100	100
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	1	1	1	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	4	4	4	4

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose

²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

Tabelle 29: Ernährungspysiologische Untersuchung der oberen 10-cm-Schicht Silage – Teil 1

Bezeichnung	Einheit	W10: Silo Nr. 1	W10: Silo Nr. 2	P20: Silo Nr. 3	P20: Silo Nr. 4	K35: Silo Nr. 5	K35: Silo Nr. 7
Ernte		10.10.16	10.10.16	29.09.16	29.09.16	29.09.16	29.09.16
Probenahme		13.06.17	13.06.17	13.06.17	13.06.17	29.05.17	29.05.17
Versuchsdauer	d	245	245	256	256	241	241
Rohnährstoffe							
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	182	170	232	252	130	115
Rohasche (XA)	g/kg TM	66	85	55	50	88	86
Rohprotein (XP)	g/kg TM	99	129	110	107	241	215
Rohfaser (XF)	g/kg TM	317	371	244	227	353	327
Rohfett (XL)	g/kg TM	30	18	38	38	22	30
Stärke (XS)	g/kg TM	142	103	302	334	160	175
Zucker (XZ)	g/kg TM	42	29	12	24	2	6
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	581	581	433	411	460	560
ADFom ²⁾	g/kg TM	372	409	290	280	451	495
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	537	411	564	610	287	380
Proteinwerte							
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	124	120	136	139	147	146
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-4	1	-4	-5	15	11
Gärparameter							
Milchsäure	g/kg TM	7	0	5	0	0	0
Essigsäure	g/kg TM	0	0	15	4	0	0
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	0	11	3	3	9	0
pH-Wert		6,1	7,1	7	7,4	8,5	7,2
DLG-Punkte		85	47	81	82	51	85
Weitere Parameter							
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	0	0	2	1	3	2
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	0	2	8	6	6	5

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

Tabelle 30: Ernährungswissenschaftliche Untersuchung der oberen 10-cm-Schicht Silage – Teil 2

Bezeichnung	Einheit	A.109: Silo Nr. 6	A.109: Silo Nr. 9	A.242: Silo Nr. 8	A.242: Silo Nr. 11	Referenz: Silo Nr. 10	Referenz: Silo Nr. 12
Ernte		29.09.16	29.09.16	29.09.16	29.09.16	29.09.16	29.09.16
Probenahme		29.05.17	29.05.17	13.06.17	13.06.17	13.06.17	13.06.17
Versuchsdauer	d	241	241	256	256	256	256
Rohnährstoffe							
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	162	110	161	176	363	398
Rohasche (XA)	g/kg TM	72	93	63	57	41	36
Rohprotein (XP)	g/kg TM	200	227	124	113	97	86
Rohfaser (XF)	g/kg TM	338	323	315	283	202	213
Rohfett (XL)	g/kg TM	28	34	37	37	40	35
Stärke (XS)	g/kg TM	174	121	150	231	355	346
Zucker (XZ)	g/kg TM	8	6	0	2	12	26
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	338	514	541	455	402	423
ADFom ²⁾	g/kg TM	384	419	374	322	246	253
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	307	405	480	484	674	657
Proteinwerte							
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	143	153	131	131	141	134
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	9	12	-1	-3	-7	-8
Gärparameter							
Milchsäure	g/kg TM	0	0	0	0	24	35
Essigsäure	g/kg TM	0	0	0	0	26	17
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	7	12	4	0	0	0
pH-Wert		7,9	7,9	7,7	6,5	5,1	4,1
DLG-Punkte		61	44	73	85	90	100
Weitere Parameter							
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	2	2	1	1	1	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	5	6	5	3	5	5

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose

²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

5.4.4 Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 2

Bei dieser Versuchsreihe wird in den Miniatursilos Nr. 5, Nr. 6 und Nr. 7 Ganzpflanzensilage mit dem Material W20 abgedeckt. Für die Applikation wird Prototyp 2 verwendet.

Die Versuche beginnen im Juli 2017 und sind zum Ende des Berichtszeitraums noch nicht abgeschlossen, daher liegen keine Ergebnisse zur erreichten Silagequalität vor.

5.4.4.1 Materialapplikation mit Prototyp 3 des Applikationsgeräts

Auf die Miniatursilos dieser Versuchsreihe wird das Material W20 mit dem Prototyp appliziert. Die verbesserte Rezeptur zeichnet sich durch ein unmittelbares Aushärten nach dem Zusammenmischen der Komponenten aus. Insgesamt verläuft die Applikation dieser Rezepturvariante mit Prototyp 3 des Applikationsgeräts mit weniger Schwankungen im Mischungsverhältnis als beim vorhergehenden Praxisversuch. Bei Silo Nr. 7 verläuft die Applikation am kontinuierlichsten und das Mischungsverhältnis wird auch im Durchschnitt gut erreicht. Abbildung 94 zeigt das erreichte Mischungsverhältnis der Komponenten A und B während der Applikation auf das Miniatursilos. Im Anhang sind die erreichten Mischungsverhältnisse der restlichen Silos zu finden. Eine Lücke in der Aufzeichnung entsteht durch das Nachfüllen der Komponenten während des Spritzvorgangs in die Vorratsbehälter. Der neue Prototyp eignet sich sehr gut, die Silageabdeckung auf das Silo zu spritzen. Durch die Schienenführung der auf einem Schlitten befestigten Düse über das Silo wird im nahezu gleichbleibenden Abstand von 30 cm auf das Silo gespritzt. Durch den Abstand und den geringen Druck beim Austrag der Abdeckmasse werden hier keine Pflanzenteile aufgewirbelt. Es kann eine homogene, gleichmäßige Schicht erzeugt werden.

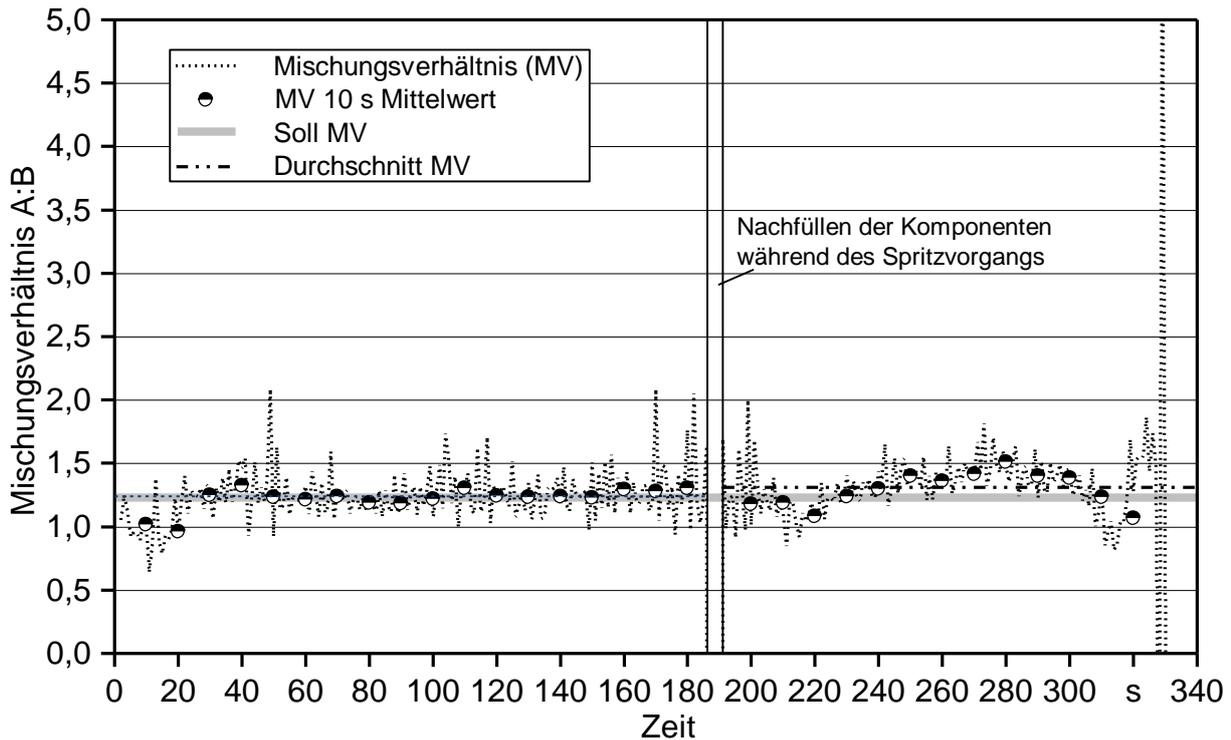


Abbildung 94: Miniatursilos Versuchsreihe 2 – Mischungsverhältnis während der Applikation des Miniatursilos Nr. 7 mit Rezepturvariante W20

Der Kegel der verwendeten 90° Hohlkegeldüse wird bei längerer Applikation immer wieder instabil, daher ist bei der Applikation auf größere Silos eine alternative Düse zu verwenden. Durch den großen Überlappungsbereich bei der Applikation von 200 % können die Unregelmäßigkeiten der Düse auf der Silooberfläche ausgeglichen werden. Jedoch kann die angestrebte verstärkte Wandbehandlung für eine bessere Randhaftung des Materials nicht umgesetzt werden, da Ausbesserungsarbeiten durch die fixe Anbringung des Spritzkopfs auf einer Schiene die Flexibilität bei der Applikation einschränken. Bei diesen Silos wird die doppelte Menge an Material im Vergleich zum Vorjahr aufgebracht und somit eine Materialdicke von ca. 1,4 cm erreicht. Die Applikationszeit je Silo beträgt 5,5 Minuten bis 6,0 Minuten. Abbildung 95 zeigt die Applikation eines Miniatursilos mit Prototyp 3 des Applikationsgeräts von oben.



Abbildung 95: Silierversuche mit Miniatursilos – Versuchsreihe 2 – Applikation der Rezepturvariante W20 mit Prototyp 3 des Applikationsgeräts mit Schienenführung der Austragsdüse – Blick von oben

5.4.4.2 Monitoring der Miniatursilos während der Lagerzeit

Die Siloabdeckung wird bei allen Silos durch die hohen Temperaturen und die Sonneneinstrahlung im Sommer sehr klebrig und Insekten haften auf der Oberfläche. Nach einer Woche löst sich bei Silo Nr. 5 das Abdeckmaterial leicht (ca. 1 mm) von der Silowand ab. Es handelt sich hierbei um das Silo, das mit dem Silolack „IRSA Silodon Spezial“ beschichtet wurde. Hier konnte die Wandbehandlung bei der Applikation nicht ausreichend erfolgen.

Bei den Silos Nr. 6 und Nr. 7 löst sich die Abdeckung nach drei Wochen an der Südseite etwas ab. Die Randhaftung konnte durch die weiterentwickelte Rezeptur nicht verbessert werden. Durch die Hitze in den Sommermonaten senkt sich der Silostock um 3 cm bis 5 cm ab. Der dadurch entstehenden Materialbelastung am Übergang zur Silowand kann die Abdeckung nicht standhalten. Durch die geringe Verdichtung der Ganzpflanzensilage steigt der Sauerstoffgehalt in der obersten Silageschicht, im Bereich der Messsonden schnell an. Der Sauerstoff diffundiert vom Rand in das Siloinnere. Abbildung 96 zeigt den Sauerstoffgehalt unter der Siloabdeckung in den Miniatursilos. Selbst beim Referenzsilo steigt der Sauerstoffgehalt unter der PE-Folie nach 115 Tagen auf über 2 % an, jedoch ist hier optisch keine Beschädigung der Folienabdeckung festzustellen. Die Temperaturmessung in den Silos zeigt, dass sich nach zwei Wochen die drei Silos mit der Abdeckungsvariante W20 um 2 K bis 4 K, wie in Abbildung 97 dargestellt, erhöht hat. Ob dies

bereits ein Zeichen von Fehlgärungen oder durch die Farbgebung der Siloabdeckung bedingt ist, kann nicht beurteilt werden. Fehlgärungen führen in der Regel zu einer Temperaturerhöhung von über 10 K. Die Silageabdeckung dunkelt bei großer Sonneneinstrahlung und trockenem Wetter nach und wandelt das nahezu weiße Erscheinungsbild der frischen Abdeckmasse zu einer orange-braunen, glänzenden Schicht.

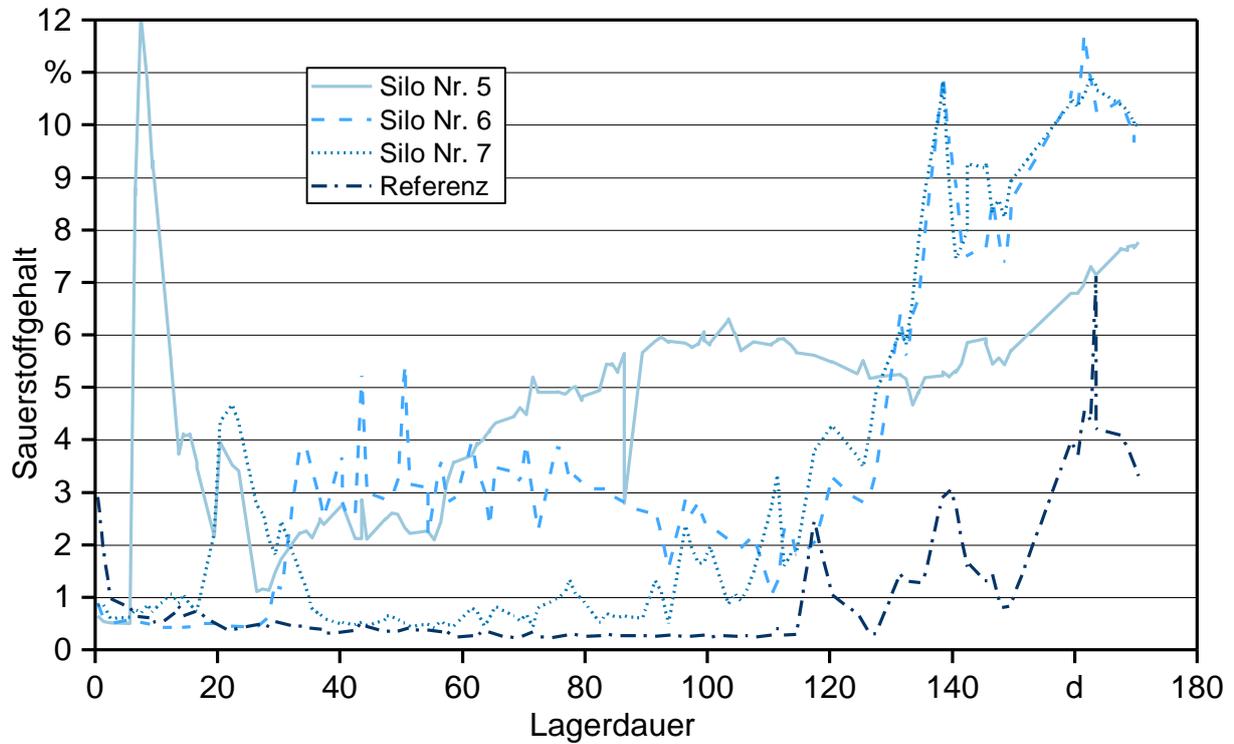


Abbildung 96: Miniatursilos Versuchsreihe 2 – Sauerstoffgehalt in den Miniatursilos während 170 Tagen Lagerung

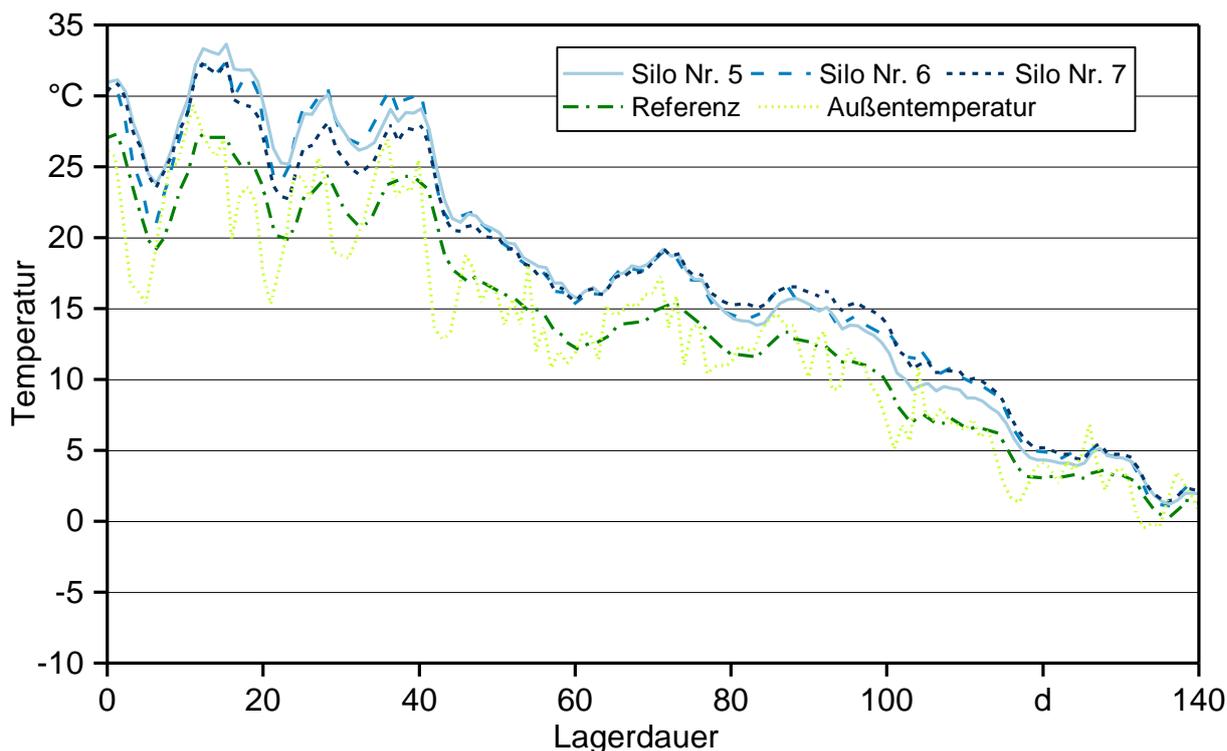


Abbildung 97: Miniatursilos Versuchsreihe 2 – Temperaturverlauf in den im Juli angelegten Miniatursilos

Die Silageabdeckung weist auch nach sechs Monaten keine Schimmelbildung auf. Durch die Erhöhung des Natriumbenzoatgehalts in der Abdeckung auf 1,8 % konnte einer Schimmelbildung erfolgreich entgegengewirkt werden. Der Silostock senkt sich vor allem im Sommer um einige Zentimeter ab. Bei den Miniatursilos hat sich der Silostock bis zu 5 cm nach sechs Monaten abgesenkt. Dies stellt für das an der Silowand haftende Abdeckmaterial eine große Belastungsprobe dar, der auch das weiterentwickelte Material nicht standhalten kann. Abgesehen von der Randablösung und der dadurch entstehenden Undichtigkeit ist die Silageabdeckung auch nach sechs Monaten noch unversehrt und weist keine Risse oder Löcher auf.

5.4.4.3 Bonitur der Miniatursilos nach zehn Monaten Lagerzeit

Die Ergebnisse der Untersuchung der Gärqualität der Silageproben aus der oberen 5 cm Schicht direkt unter der Abdeckung sind in Tabelle 31 aufgelistet. Die Referenzprobe aus dem konventionell abgedeckten Miniatursilos weist mit 100 DLG Punkten eine sehr gute Gärqualität auf. Von den drei Proben aus den mit W20 abgedeckten Silos weisen zwei eine verbesserungswürdige und eine Probe eine gute Gärqualität auf. Die Einstufung als verbesserungswürdig resultiert aus den etwas erhöhten Gehalten an Essigsäure, die zum Punktabzug führen. Butter- oder Propionsäure konnte in keiner der Proben nachgewiesen werden. Auch der pH Wert liegt bei allen Proben im guten Bereich und die Trockenmasse ist bei allen Proben auf gleichem Niveau, so dass der Zutritt von Wasser ausgeschlossen werden kann.

Tabelle 31: Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus der oberen 5 cm Schicht

Bezeichnung	Einheit	Referenz oben	Silo Nr. 5 oben	Silo Nr. 6 oben	Silo Nr. 7 oben
Ernte		04.07.2017	04.07.2017	04.07.2017	04.07.2017
Probenahme		03.05.2018	03.05.2018	03.05.2018	03.05.2018
Versuchsdauer	d	303	303	303	303
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	397	385	393	389
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	62	14	6	20
Essigsäure	g/kg TM	16	48	55	36
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	0	0	0	0
pH-Wert		3,9	4,4	4,5	4,4
DLG-Punkte		100	70	62	87

Die Silageproben aus 30 cm Tiefe der mit W20 abgedeckten Miniatursilos weisen im Mittel eine bessere Gärqualität auf, als die Proben aus der darüber liegenden Schicht. Jedoch ist zwischen den Proben untereinander eine hohe Schwankungsbreite der Gärqualität festzustellen. Während die Probe aus Silo Nr. 7 eine sehr gute Gärqualität mit 100 DLG-Punkten aufweist, ist diese bei der Probe aus Silo Nr. 6 als gut und bei der Probe aus Silo Nr. 5 als verbesserungswürdig zu bewerten. Die unterschiedliche Bewertung resultiert ausschließlich aus den Gehalten an Essigsäure. Die Probe mit dem höchsten Gehalt an Essigsäure weist im Vergleich zu den anderen Proben einen etwas verringerten Gehalt an Milchsäure auf. Alle anderen untersuchten Parameter unterscheiden sich zwischen allen Proben, auch der Referenz, kaum.

Insgesamt ist festzustellen, dass nach zehn Monaten Lagerzeit keine wesentlich unterschiedlichen Trockenmassegehalte zwischen allen Proben zu beobachten ist. Ein Wasserzutritt durch die Abdeckung kann somit ausgeschlossen werden. Die im Vergleich zur Referenz geringeren Gehalte an Milchsäure und höheren Gehalte an Essigsäure der Proben aus der oberen Schicht deuten auf eine beginnende Umsetzung der Milchsäure aufgrund von Sauerstoffzutritt hin.

Tabelle 32: Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus 30 cm Tiefe

Bezeichnung	Einheit	Referenz 30 cm	Silo Nr. 5 30 cm	Silo Nr. 6 30 cm	Silo Nr. 7 30 cm
Ernte		04.07.2017	04.07.2017	04.07.2017	04.07.2017
Probenahme		03.05.2018	03.05.2018	03.05.2018	03.05.2018
Versuchsdauer	d	303	303	303	303
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	406	391	394	399
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	68	27	45	57
Essigsäure	g/kg TM	11	49	39	8
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	0	0	0	0
pH-Wert		3,9	4,2	4	4
DLG-Punkte		100	69	83	100

5.4.5 Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3

In einem abschließenden Praxistest werden zwei Flachgärhaufen aus Mais ohne Silowand mit je 15 m² Grundfläche mit der favorisierten Rezepturvariante W20 abgedeckt. Die Analyse der Rohnährstoffe lässt auf ein gutes silierfähiges Substrat schließen, als einzige Auffälligkeit wird ein leicht erhöhter Rohaschegehalt von 43 g/kg TM festgestellt. Die Trockenmasse beträgt 34,4 %.

5.4.5.1 Materialapplikation der Freigärhaufen mit Prototyp 3

Durch das Applizieren mit einem am Traktor befestigten Spritzbalken, wie in Abbildung 98 zu sehen, wird die Silageabdeckung gleichmäßig aufgespritzt. Die zwei entgegengesetzten Flachstrahldüsen mit je einem Spritzwinkel von 120° spritzen je in einem Winkel von 45° zur Senkrechten auf den Boden in und gegen die Fahrtrichtung. Aufgetragen wird mit einem Überlappungsbereich von 100 %. So kann eine gleichmäßige und umfassende Beschichtung der Silomaisoberfläche gewährleistet werden. Der Spritzkopf wird bei der Überfahrt im Randbereich der Silos entsprechend geneigt, damit die seitlich schräg abfallende Haufenform ebenfalls bestmöglich benetzt wird. Die Geschwindigkeit des Traktors wird dem Durchsatz des Applikationsgeräts angepasst, sodass eine Bedeckung des Silos mit 8 kg Abdeckmaterial pro m² erfolgt.



Abbildung 98: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Aufspritzen der Rezepturvariante W20 mit Prototyp 3 des Applikationsgeräts, in der Höhe und Neigung verstellbarer Spritzbalken im Heckaufbau eines Traktors

Bei den ersten beiden Bahnen kann das Mischungsverhältnis aufgrund eines technischen Defekts einer Waage nicht ausreichend kontrolliert werden. Hier wird in den ersten fünf Minuten der Applikation zu viel von Komponente B aufgetragen. Nach Behebung des Defekts kann das Mischungsverhältnis gut eingestellt und nahezu konstant gehalten werden. Die bereits bei den Miniatursilos verwendete Rezepturvariante W20 bindet bei korrektem Mischungsverhältnis schnell ab und läuft nicht, wie vorhergehende Rezepturen, vom Silohaufen ab. Selbst das Eintreten leichten Regens ab der Hälfte der applizierten Fläche hat augenscheinlich keinen negativen Einfluss auf die Aushärtung des Abdeckmaterials. Beide Miniatursilos können mit dem Applikationsgerät, an dem ein einzelner Spritzkopf am Spritzbalken befestigt ist, in einem Spritzvorgang innerhalb von 20 min ohne Unterbrechungen abgedeckt werden. Abbildung 99 zeigt das Ergebnis der Applikation einen Monat nach dem Silieren. Die Abdeckung ist aufgrund der hohen Feuchtigkeit noch sehr hell gefärbt.



Abbildung 99: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Blick auf die zwei Miniatursilos mit der Silageabdeckung W20 einen Monat nach Versuchsbeginn – hinten im Bild: Referenz mit Folienabdeckung

5.4.5.2 Monitoring der Freigärhaufen während der Lagerzeit

Der Sauerstoffgehalt in den Silos fällt nach dem Abdecken der Silos im Vergleich zu den kleineren 2-m²-Silos wesentlich langsamer ab. Nach vier Tagen ist der Restsauerstoff in den Silos im Wesentlichen aufgebraucht und sinkt unter 0,4 %. Nach der ersten Woche bleibt der Sauerstoffgehalt in den mit der neuartigen Silageabdeckung versehenen Freigärhaufen unter 0,2 %.

Im Referenzsilo und Silo 1 verbleibt der Sauerstoffgehalt auf einem niedrigen Niveau von unter 0,4 % über die gesamte Lagerdauer. Bei Silo 2 ist im Zeitraum zwischen 145 und 175 Tagen ein Anstieg auf knapp 0,8 % Sauerstoff und anschließender Abfall auf unter 0,2 % festzustellen. Eindeutige Ursachen für diese Beobachtung konnten nicht gefunden werden. Wahrscheinlich ist eine Undichtigkeit im Bereich der Messsonde und weniger im Bereich der Abdeckung an sich. Bei einer Undichtigkeit in der Abdeckung ist zu erwarten, dass der Sauerstoffgehalt weiter ansteigt und nicht absinkt.

Die Sauerstoffmessungen zeigen, dass im Siloinneren an der Position der Messgassonden weitgehend anaerobe Bedingungen vorlagen. Abbildung 100 zeigt den Verlauf des Sauerstoffgehalts im Siloinneren.

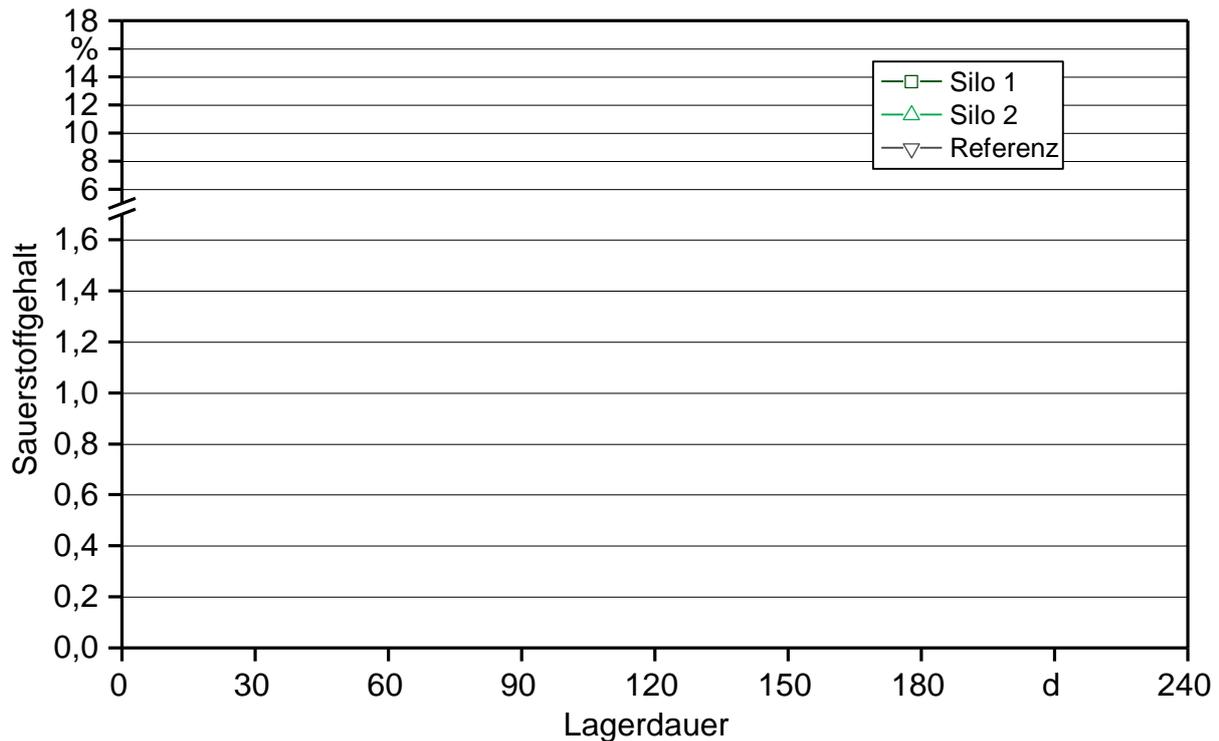


Abbildung 100: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Entwicklung des Sauerstoffgehalts im Siloinneren

Nach drei Wochen beginnt die Silageabdeckung leicht klebrig zu werden, jedoch nicht in dem Ausmaß, wie es in den Sommermonaten bei den Silos der vorhergehenden Testreihe der Fall war. Durch das Herbstwetter ist die Silageabdeckung ständiger Nässe ausgesetzt und die Luftfeuchtigkeit beträgt die meiste Zeit über 90 %. Abbildung 101 zeigt die Miniatursilos nach erstem Frost: Nach drei Monaten sind noch keine Veränderungen im Material festzustellen.

Nach acht Monaten waren im Juni 2018 an Stellen mit nur dünner Schichtdicke erste, kleine Risse in der Silageabdeckung ersichtlich. Die Freigärhaufen wurden daher am 5. Juni 2018 aufgelöst, um die bis dahin erhaltene Qualität der Silage untersuchen zu können. Die Siloabdeckung war frei von Schimmel und wies eine bräunliche Färbung auf, letzteres vermutlich verursacht durch UV-Strahlung. Während der heißen Sommertage war außerdem festzustellen, dass das Abdeckmaterial W20 klebrig wurde. Abbildung 102 zeigt die Freigärhaufen mit der Silageabdeckung W20 nach acht Monaten Lagerung.



Abbildung 101: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Freigärhaufen mit der Silageabdeckung W20 drei Monate nach Versuchsbeginn



Abbildung 102: Silierversuche mit Freigärhaufen – Versuchsreihe 3 – Freigärhaufen mit der Silageabdeckung W20 acht Monate nach Versuchsbeginn

5.4.5.3 Bonitur der Freigärhaufen

Die Futtermittelanalysen der Silageproben aus 30 cm Tiefe unter der Silageabdeckung W20 sind in Tabelle 33 aufgeführt. Bei der Beurteilung der Gärqualität erreichen alle Proben 100 DLG-Punkte und weisen daher eine sehr gute Gärqualität auf. Eine der vier Proben ist gekennzeichnet durch einen etwas geringeren Trockenmassegehalt von 268 g/kg FM und etwas geringeren Gehalt an Milchsäure von 24 g/kg TM. Die Orientierungswerte nach der Gruber Tabelle [3] für gutes Grobfutter für die Trockenmasse von > 300 g/kg FM und für den Gehalt an Milchsäure > 30 g/kg werden von dieser einen Probe knapp verfehlt. In keiner dieser Proben konnte Butter- oder Propionsäure in relevanten Mengen nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der direkt unter der Abdeckung gezogenen Proben sind in Tabelle 34 aufgelistet. Die Gärqualität ist hier mit 80 bis 87 DLG-Punkten etwas geringer und damit als gut einzuschätzen. Hauptgrund für die etwas schlechtere Bewertung ist der angestiegene pH-Wert aufgrund von zu geringen Gehalten an Milchsäure. Die beginnende Rissbildung in der Abdeckung beeinträchtigt hier bereits die Silagequalität. Diese Ergebnisse bestätigen aber auch, dass die Rissbildung erst kurz vor dem Öffnen auftrat, da ansonsten eine schlechtere Qualität festzustellen gewesen wäre. Durch größere Schichtdicken des aufgetragenen Materials ließe sich die Standzeit des Materials bzw. der dichte Abschluss über acht Monate hinaus realisieren.

Die Analyseergebnisse der Proben aus dem konventionell abgedeckten Freigärhaufen sind in Tabelle 35 dargestellt. Alle Proben weisen eine sehr gute Gärqualität auf.

Tabelle 33: Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus 30 cm Tiefe von Silo 1 und 2 an Probenahmeort A und B

Bezeichnung	Einheit	Silo Nr. 1 A - 30 cm	Silo Nr. 1 B - 30 cm	Silo Nr. 2 A - 30 cm	Silo Nr. 2 B - 30 cm
Ernte		10.10.2017	10.10.2017	10.10.2017	10.10.2017
Probenahme		05.06.2018	05.06.2018	05.06.2018	05.06.2018
Versuchsdauer	d	238	238	238	238
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	337	268	308	313
Rohasche (XA)	g/kg TM	34	30	34	33
Rohprotein (XP)	g/kg TM	83	86	86	80
Rohfaser (XF)	g/kg TM	171	192	164	178
Rohfett (XL)	g/kg TM	34	40	33	30
Stärke (XS)	g/kg TM	430	431	452	430
Zucker (XZ)	g/kg TM	45	33	41	45
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	345	389	322	346
ADFom ²⁾	g/kg TM	212	249	196	214
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	690	655	698	694
Proteinwerte					
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	138	137	139	136
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-9	-8	-9	-9
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	50	24	52	51
Essigsäure	g/kg TM	16	29	19	19
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	0	0	2	0
pH-Wert		3,8	3,9	3,9	3,9
DLG-Punkte		100	100	100	100
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	1	1	1	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	5	4	5	6

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose

²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

Tabelle 34: Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus der oberen 5 cm Schicht von Silo 1 und 2 an Probenahmeort A und B

Bezeichnung	Einheit	Silo Nr. 1 A - oben	Silo Nr. 1 B - oben	Silo Nr. 2 A - oben	Silo Nr. 2 B - oben
Ernte		10.10.2017	10.10.2017	10.10.2017	10.10.2017
Probenahme		05.06.2018	05.06.2018	05.06.2018	05.06.2018
Versuchsdauer	d	238	238	238	238
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	293	303	254	319
Rohasche (XA)	g/kg TM	38	35	48	40
Rohprotein (XP)	g/kg TM	117	106	170	124
Rohfaser (XF)	g/kg TM	227	212	280	237
Rohfett (XL)	g/kg TM	43	40	31	55
Stärke (XS)	g/kg TM	299	352	142	267
Zucker (XZ)	g/kg TM	22	29	15	15
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	449	422	520	456
ADFom ²⁾	g/kg TM	307	271	381	322
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	530	576	341	499
Proteinwerte					
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	137	137	133	141
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-3	-5	6	-3
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	3	2	2	5
Essigsäure	g/kg TM	12	41	6	36
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	2
Buttersäure	g/kg TM	0	0	0	3
pH-Wert		5,2	4,5	7,8	4,5
DLG-Punkte		85	80	85	87
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	1	1	2	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	6	5	7	5

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose

²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

Tabelle 35: Ergebnisse der ernährungsphysiologischen Untersuchung der Silage aus 30 cm Tiefe und der oberen 5 cm Schicht des Referenzsilos an Probenahmeort A und B

Bezeichnung	Einheit	Referenz A - 30 cm	Referenz B - 30 cm	Referenz A - oben	Referenz B - oben
Ernte		10.10.2017	10.10.2017	10.10.2017	10.10.2017
Probenahme		05.06.2018	05.06.2018	05.06.2018	05.06.2018
Versuchsdauer	d	238	238	238	238
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	349	329	407	392
Rohasche (XA)	g/kg TM	33	35	32	34
Rohprotein (XP)	g/kg TM	76	80	91	89
Rohfaser (XF)	g/kg TM	194	199	175	184
Rohfett (XL)	g/kg TM	30	29	34	31
Stärke (XS)	g/kg TM	410	386	439	430
Zucker (XZ)	g/kg TM	45	50	29	33
aNDFom ¹⁾	g/kg TM	384	385	348	373
ADFom ²⁾	g/kg TM	245	235	208	228
Enzymlösl. org. Subst. (ELOS)	g/kg TM	664	661	693	672
Proteinwerte					
Nutzbares Protein (nXP)	g/kg TM	132	132	140	136
Ruminale N-Bilanz (RNB)	g/kg TM	-9	-8	-8	-8
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	44	50	40	45
Essigsäure	g/kg TM	16	18	18	19
Propionsäure	g/kg TM	0	0	0	0
Buttersäure	g/kg TM	0	0	0	0
pH-Wert		3,9	3,9	4	3,9
DLG-Punkte		100	100	100	100
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	1	1	1	1
NH ₃ -N an Gesamt-N	%	5	6	5	6

¹⁾ aNDFom: Neutrale Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose, Hemicellulose

²⁾ ADFom: Säure-Detergenzien-Fasern: Lignin, Cellulose

5.4.6 Gesamtübersicht der praxisnahen Versuche

Im Laufe der Forschungsvorhaben werden verschiedene praxisnahe Tests zur Erprobung der weiterentwickelten Rezepturen und des Applikationsgeräts durchgeführt. In Tabelle 36 erfolgt eine zusammenfassende Bewertung der wichtigsten Erkenntnisse dieser Praxistests für verschiedene Rezepturvarianten. Die Bewertung der fünf beispielhaft ausgewählten Rezepturen erfolgt analog zum Schema aus Tabelle 17 in Abschnitt 5.2.11.

Bei keiner der betrachteten Materialvarianten werden alle praxisnahen Versuche durchgeführt, da Erkenntnisse aus den Versuchen direkt in die Rezepturverbesserung einfließen und die weiteren Versuche mit dem verbesserten Material erfolgen.

Rezepturvariante W20 wird auf Basis von Variante W10 zum Projektende hin entwickelt und auf den Miniatursilos der Versuchsreihen 2 und 3 getestet. Diese Praxisversuche zeigen, dass mit diesem Material und verwendeten Schichtdicken für einen Zeitraum von acht bis zehn Monaten eine ausreichende Funktionalität als Silageabdeckung vorliegt. Im Vergleich zu den in Versuchsreihe 1 getesteten Varianten ist eine wesentliche Verbesserung der Materialeigenschaften feststellbar und die Applikation der Variante W20 ist ohne Komplikationen und Unterbrechungen gut möglich.

Variante P20 liefert im Labor und in ersten Praxisversuchen sehr vielversprechende Ergebnisse, jedoch kann auch die auf Basis von P20 im Labor weiterentwickelte Variante P41 keine für das entwickelte Applikationsgerät ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit erreichen. Daher wird diese Variante in den Versuchsreihen 2 und 3 nicht untersucht, obwohl diese bei den Materialprüfungen im Labor sehr gute Ergebnisse erzielt.

Tabelle 36: Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse ausgewählter Rezepturvarianten aus den Praxistests

	A.242	A.351	P20	W10	W20
Silofässer	x	--	x	x	x
Screening Gärglas	–	x	+	–	x
Miniatursilo / Freigärhaufen	–	x	o	–	o
Applikation mit Prototyp 3	--	x	o	o	+

++ = sehr gut, + = gut, o = befriedigend, – = mangelhaft, -- = ungenügend

x = Test wurde bei dieser Rezepturvariante nicht durchgeführt, ° Versuch ist noch nicht abgeschlossen

5.5 Anaerober Abbau des Abdeckmaterials in Biogasanlagen

Autorin dieses Unterkapitels: Diana Andrade

Das Verhalten des Abdeckmaterials in Biogasanlagen wird am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL-ILT) untersucht. Hierfür werden Aktivitäts-, Toxizitäts- und Supplementierungs-Analysen (ATS-Analysen), Batch-Analysen und die Durchflussversuche durchgeführt.

5.5.1 Stabilität des Biogasbildungsprozesses im ATS-Test

Anhand der Druckverläufe über die Laufzeit lässt sich feststellen, dass der Druckanstieg von allen Proben gleichmäßig stattgefunden hat. Wie in Abbildung 103 zu sehen ist, lässt sich am ersten Versuchstag ein langsamer Anstieg beschreiben. Zwischen dem ersten und dritten, teils auch bis in den vierten Tag hinein lässt sich ein rascher Anstieg des Drucks und damit der Graphen beobachten. Ab diesem Punkt steigen die Drücke weniger rasch, dafür annähernd linear an. Die Einbuchtungen in den Kurven lassen sich schlichtweg mit der Dauer der täglichen Gasentnahme und der damit verbundenen rechnerischen Korrektur erklären.

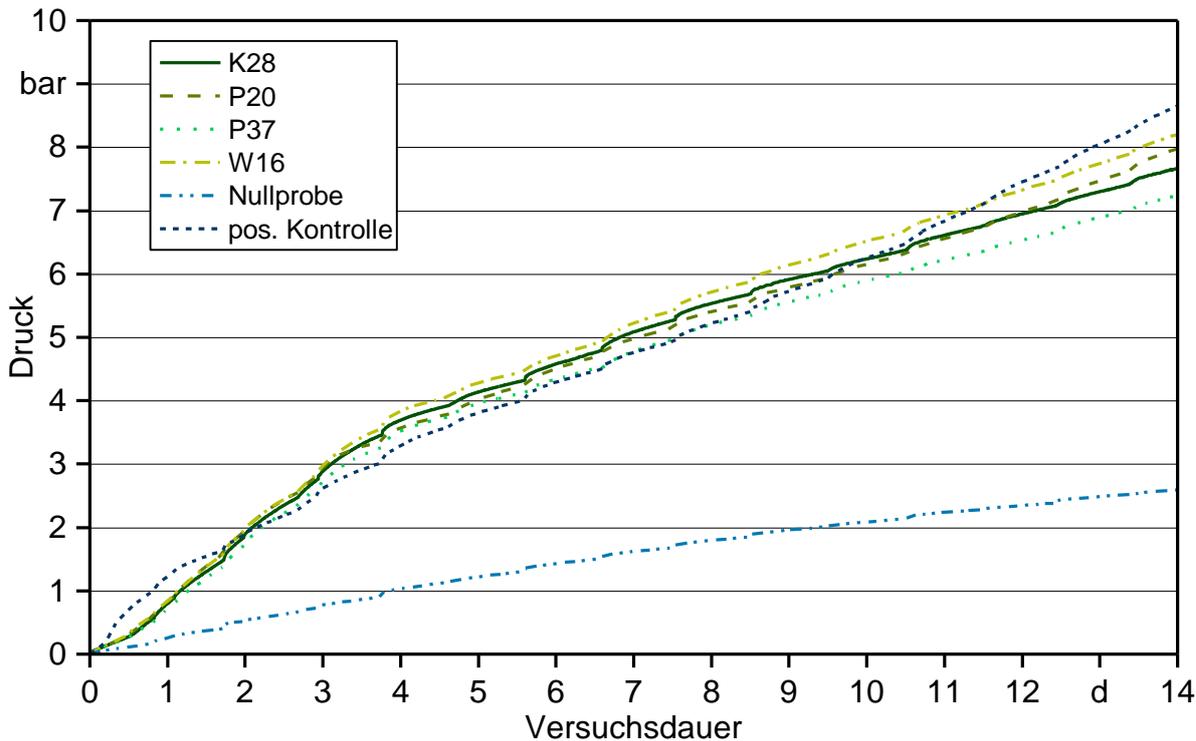


Abbildung 103: Mittelwert der kumulierten Druckentwicklung im ATS-Test

Zwischen den Messstellen kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p = 0,53$) und die Varianz zwischen den Wiederholungen ist sehr gering. Für die Auswertung wird der Mittelwert aus den sechs Wiederholungen berechnet. Die Gasprodukti-

on der Kontrolle (Zucker und Rapsöl) ist in den ersten zwei Versuchstagen höher. Da Zucker schnell abbaubar ist, ist er wahrscheinlich in den ersten zwei Versuchstagen bereits abgebaut worden. Zwischen den Versuchstagen zwei und acht war die Gasproduktion von allen vier Siloabdeckmaterialien höher als die der Kontrolle. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Biogasbildungsprozess nicht gehemmt wurde.

Ab Versuchstag acht steigt die Gasproduktion der Kontrolle, weil sie wahrscheinlich schneller abbaubar ist als die Siloabdeckmaterialien selbst. Außerdem verlangsamt Kautschuk voraussichtlich den Abbauprozess.

Sehr positiv zu bewerten sind die Verläufe der Nullproben, welche sich nicht nur sehr stark ähneln, sondern auch annähernd parallel und gleichmäßig im Verlauf sind.

Die Varianz innerhalb der Wiederholungen ist sehr gering, zwischen den Varianten können jedoch signifikante Unterschiede festgestellt werden ($p < 0,01$). Abbildung 104 zeigt die Gasentwicklung der getesteten Rezepturvarianten bei Versuchsende des Tests.

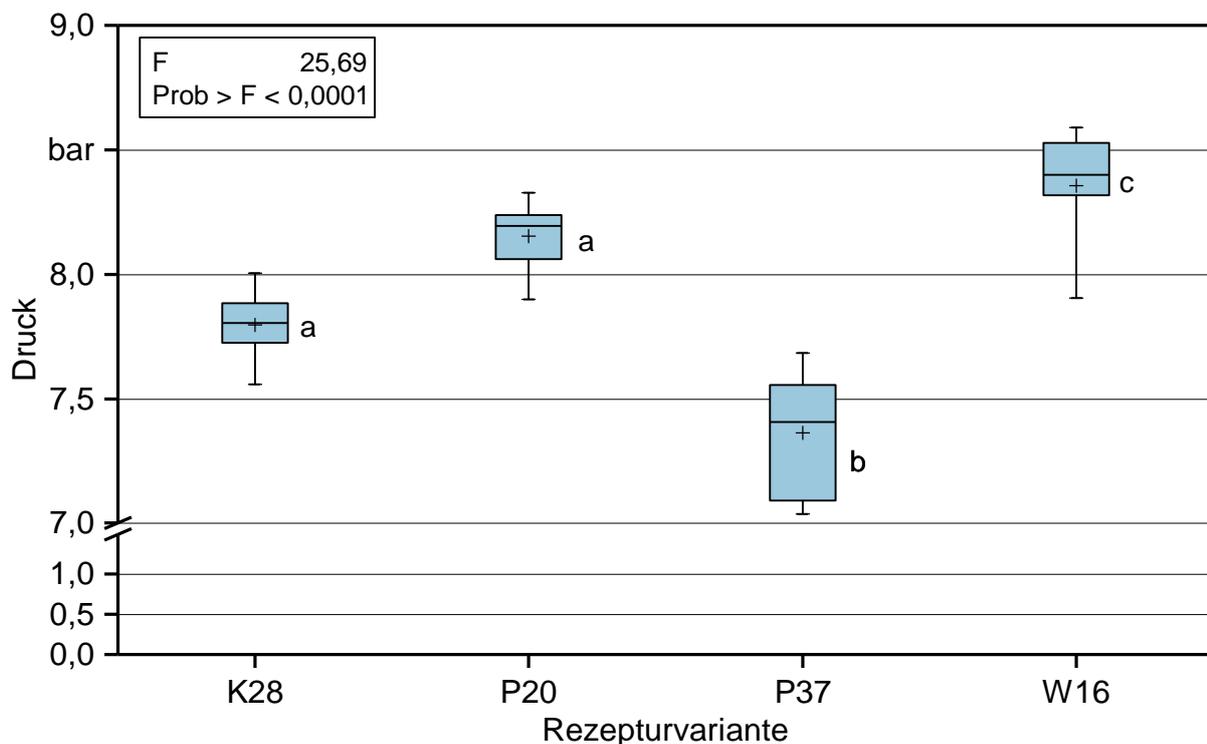


Abbildung 104: Boxplot für die vier Siloabdeckmaterialien mit sechs Wiederholungen am Versuchsende. Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Proben im ATS-Test

Für die Varianten K28 und P20 kann statistisch kein Unterschied festgestellt werden. Der Gasdruck bei Variante P37 ist signifikant niedriger als bei den anderen Proben. Die Variante W16 hat statistisch signifikant mehr Biogas als die anderen produziert. So hat jedoch die Variante, welche den geringsten Rapsölanteil hat, nicht den geringsten Druckanstieg zu verzeichnen, die Variante mit der höchsten Einwaage an Rapsöl allerdings

den höchsten. Wahrscheinlich beeinflusst die Matrix und nicht nur die Zusammensetzung des Materials den Prozess. Darüber hinaus finden Synergieeffekte und nicht nur additive Effekte statt. Ein weiterer Einfluss kann auch die leicht voneinander abweichende Partikelgröße der zerkleinerten Siloabdeckmaterialien sein, da diese eventuell unterschiedlich gut aufgeschlossen werden konnten.

Anhand dieser Beobachtungen lassen sich allerdings keinerlei hemmende Effekte aufgrund der Inhaltsstoffe der Abdeckmaterialien und ihrer hier vorliegenden Konzentrationen in den Materialien feststellen. Auffällig jedoch ist, dass die Materialien im ATS-Test nur partiell abgebaut wurden und die eingebrachten Teilstücke nach Versuchsende in verfärbter, fester und nicht mehr elastischer Form vorlagen, wie in Abbildung 105 zu sehen ist.



Abbildung 105: Konsistenz der Siloabdeckungsproben nach Batchversuch

5.5.2 Biogaspotenzial und Abbaugrad im Batchtest

Im Batchtest wird die Abbaubarkeit der Abdeckmaterialien unter definierten Bedingungen überprüft. Darüber hinaus werden die Biogasausbeuten der Abdeckmaterialien mit einer Referenzprobe (Maisganzpflanze zur Siloreife) verglichen. Um den Abbaugrad durch Gewichtsverlust (σ TS-Verlust) zu berechnen, werden die Proben in einen Beutel mit einem Gewebe der Porengröße 50 μm eingefüllt („in-sacco“-Verfahren). Die Masse wird vor und nach dem Batchtest bestimmt. Die im Batchtest gemessenen Biogas- und Methanausbeuten sind in Tabelle 37 dargestellt. Bei den Werten handelt es sich um Mittelwerte aus den Einzelwerten der drei Wiederholungen je Variante.

Tabelle 37: Biogas- und Methanausbeute im Batchtest

Material	Biogasausbeute in l/kg oTS	Methanausbeute in l/kg oTS	Variationskoeffizient in %	CH ₄ -Gehalt in %
K28	407	248	10	61
P20	320	194	7	61
P37	348	206	10	59
W16	313	187	4	60

Die in Abbildung 106 dargestellte Biogasausbeute beträgt zwischen 313 l/kg oTS und 417 l/kg oTS. Es wird jedoch eine vergleichsweise große Spannweite festgestellt. Den höchsten Wert erzielt die Variante K28, den niedrigsten Wert die Variante W16. Statistisch ist die Biogasausbeute der Variante K28 signifikant höher als bei den anderen, aber für die Biogasausbeute zwischen P20, P37 und W16 kann kein Unterschied festgestellt werden. Obwohl das getestete Material sehr homogen war, lag der Variationskoeffizient der drei Wiederholungen zwischen 4 % und 10 %. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung ist, dass das Material unter anaeroben Bedingungen nicht leicht abbaubar ist. Weitere Einflüsse können die Partikelgröße und die Oberfläche des Materials sein, welche sich signifikant auf das Wachstum der Mikroorganismen bzw. auf die Biogasproduktion auswirken können.

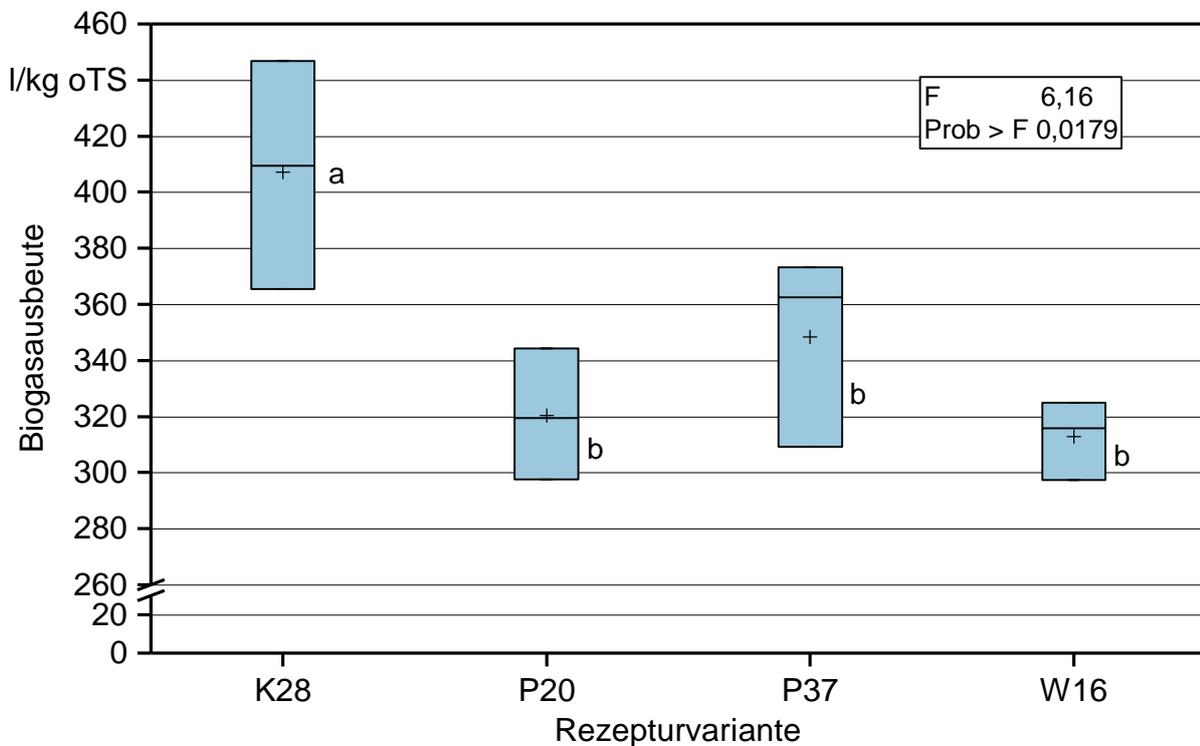


Abbildung 106: Boxplot für die vier Siloabdeckmaterialien mit drei Wiederholungen im Batchversuch, Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Proben

Abbildung 107 stellt die kumulierte Biogausausbeute der untersuchten Siloabdeckmaterialien und von Mais dar. Anhand der stündlichen Gasproduktion wird keine lag-Phase bzw. keine Hemmung des Populationswachstums festgestellt. Die Siloabdeckmaterialien werden sehr langsam abgebaut und die Biogausausbeute liegt mit 43 % bis 56 % niedriger als die des Referenzmaises. Die Methangehalte der Siloabdeckmaterialien sind sehr ähnlich und die Werte liegen zwischen 59 % und 61 %.

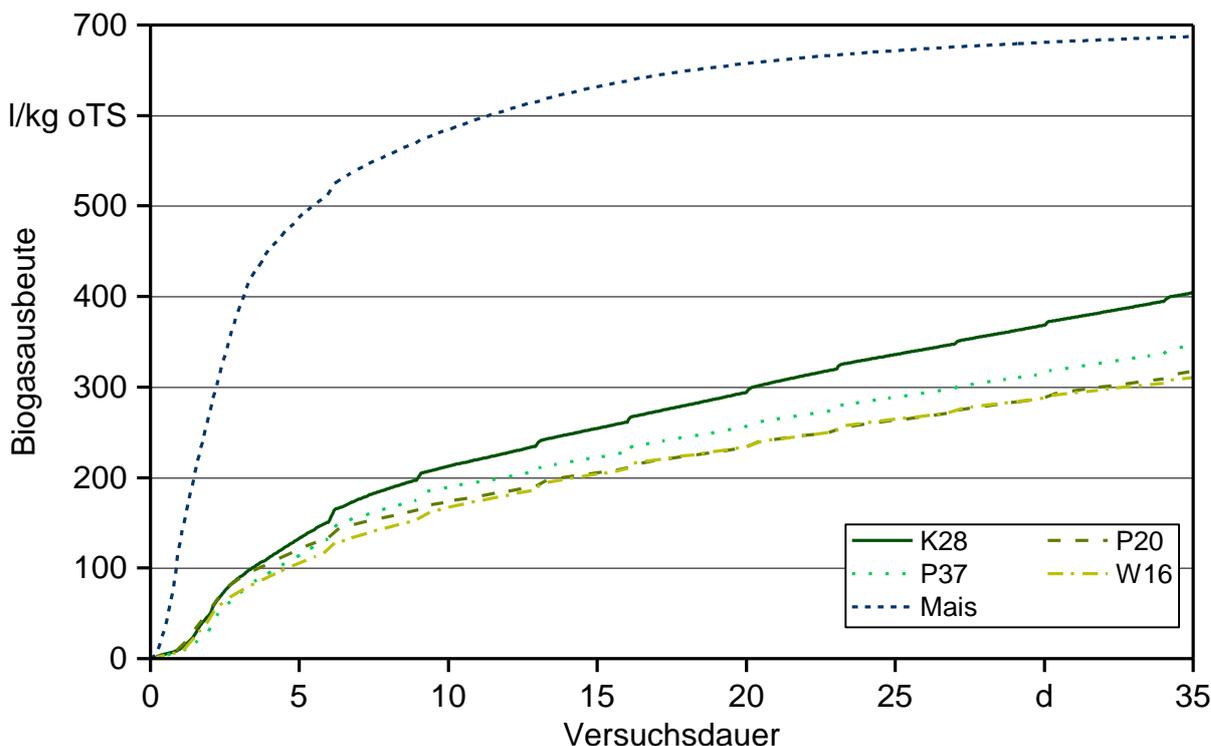


Abbildung 107: Kumulierte Biogausausbeute der untersuchten Siloabdeckmaterialien und des Referenzsubstrats im Batch-Test

Der Abbaugrad wird mittels zwei unterschiedlicher Verfahren berechnet: zum einen über den oTS-Verlust bzw. Masseverlust und zum anderen über die Biogasproduktion. Das maximale Biogaspotenzial ist in Tabelle 9 dargestellt. Tabelle 38 stellt den Abbaugrad für jede Variante dar. Es wurden nicht mehr als 26 % bzw. 34 % abgebaut. Der Versuch hat 34 Tage gedauert, wobei das Abbruchkriterium von 0,5 % der Gesamtgasproduktion nicht erreicht wurde. Bei Versuchsende beträgt die tägliche Biogasproduktion des Abdeckungsmaterials ca. 2,13 % der Gesamtgasproduktion. Die tägliche Biogasproduktion des Mais betrug 0,15 % der Gesamtgasproduktion. Durch das „in-sacco“-Verfahren könnte die Abbaugeschwindigkeit eventuell beeinflusst werden.

Bezogen auf die zwei unterschiedlichen Berechnungen des Abbaugrads werden unterschiedliche Werte erreicht. Die Unterschiede zwischen den Werten lassen sich durch die Hydratisierung des Materials erklären.

Tabelle 38: Abbaugrad der Siloabdeckungsmaterialien im Batchversuch

Material	nach TS-Verlust in %	nach Biogasproduktion in %
K28	26	34
P20	19	27
P37	20	29
W16	23	26

5.5.3 Abbau des Materials im Durchflussversuch

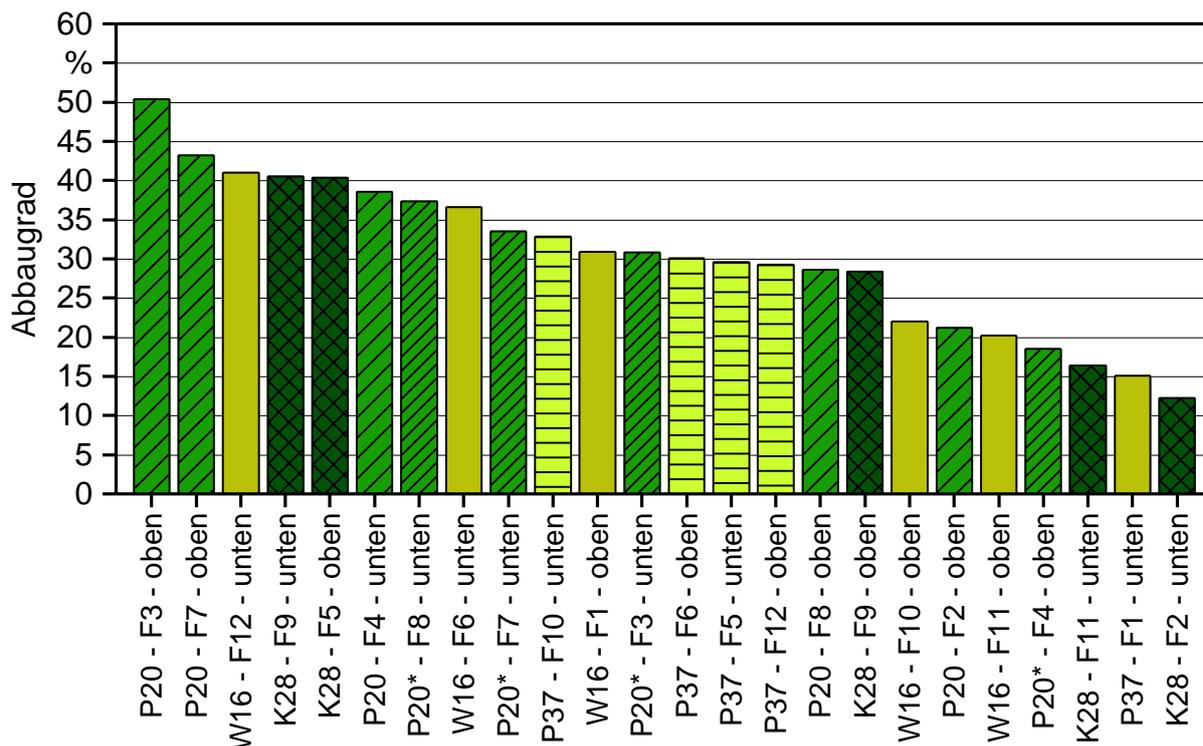
Nach 99 Tagen im Durchflussversuch werden die 24 Proben aus den Fermentern entfernt, um die Trockenmasse der Proben zu bestimmen. Durch den Masseverlust wird der Abbaugrad der Proben unter anaeroben Bedingungen bestimmt. Während der Versuchslaufzeit kann keine Hemmung durch die Vergärung der getesteten Siloabdeckungsproben im Durchflussversuch festgestellt werden.

Bei den getesteten Siloabdeckungsproben liegt der gemessene Abbaugrad, dargestellt in Abbildung 108, im Biogasprozess zwischen 12 % und 50 %. Als Mittelwert der gemessenen Werte wird ein Abbaugrad der Proben von 30 % TS ermittelt. Den maximal gemessenen Wert im Durchflussversuch erzielt eine Probe der Variante P20.

Wird der Einfluss der Substratmischung in der Beschickung betrachtet, zeigt sich kein Einfluss der Substratmischung bzw. mit oder ohne Rindergülle auf den gemessenen Abbaugrad der getesteten Siloabdeckungsproben.

Auch die Probenposition in der Keimträgerhalterung im Fermenter (oben oder unten) wird nicht als Einflussparameter für die Beurteilung des Abbaugrads der untersuchten Proben im Durchflussversuch erkannt, da der Abstand zwischen den Proben gering (ca. 10 cm) und durch die komplette Durchmischung im Fermenter kein Unterschied erkennbar ist.

Bei der Betrachtung der einzelnen Probengruppen lässt sich Folgendes anmerken: Für die Proben der Rezepturvariante W16 kann ein TS-Masseverlust des getesteten Materials von 30 % als Mittelwert, für die Variante K28 ein Abbaugrad von 28 % als Mittelwert bestimmt werden. Die Siloabdeckungsproben der Variante P37 zeigen einen TS-Masseverlust durch die anaerobe Vergärung von 27 % als Mittelwert der getesteten Proben.



* Proben wurden vorab fünf Monate im Freien gelagert

Abbildung 108: Abbaugrad der getesteten Siloabdeckungsproben im Durchflussversuch nach 99 Tagen Expositionszeit

Die Ergebnisse für die Proben der Variante P20, einmal drei Monate gealtert (Probenbezeichnung: P20) und einmal fünf Monate den vorgenannten Umweltfaktoren exponiert (Probenbezeichnung: P20*), werden einander gegenübergestellt und anschließend zusammen betrachtet. Bei Prüfung des Einflusses der Umweltexposition der Proben auf den Abbaugrad, erreichen die „Rohproben“ 38 % TS-Masseverlust als Mittelwert, während die „Umweltproben“ 28 % TS-Masseverlust als Mittelwert erzielen. Die längere Lagerung im Freien der „Umweltproben“ kann die Oxidation und Verflüchtigung organischer Komponenten des Siloabdeckungsmaterials begünstigen. Diese „Verluste“ durch die Lagerungszeit können deswegen den organischen Anteil des Materials ändern, sodass ein geringerer Abbaugrad unter anaeroben Bedingungen erzielt wird. Insgesamt für die untersuchten Proben der Varianten P20 und P20* wird ein TS-Abbaugrad von 33 % als Mittelwert ermittelt.

5.6 Aerobes Abbau der Abdeckung – Desintegrationstest

Nach der Kompostierdauer von zwölf Wochen werden die Überreste des Abdeckmaterials quantifiziert. Die Überreste auf dem Sieb der Maschenweite von 2 mm werden zurückgewogen. Laut DIN EN 13432:2000-12 darf der Rückstand auf dem Sieb nach zwölf Wochen maximal 10 % TM betragen.

Bei der fünf Monate gealterten Probe kann nach zwölf Wochen im Komposter kein Abbau nachgewiesen werden. Die Auswertung wird durch anhaftende Partikel auf der stark klebenden Oberfläche gestört. Makroskopisch sind ein starkes oberflächliches Zerfließen und die Bildung von Löchern zu beobachten.

Das 14 Monate gealterte Material wurde während der thermophilen Phase des Kompostierungsprozesses stark fraktioniert. Der Siebrückstand beträgt 29 % TM. Das entspricht zwar nicht der Anforderung der Norm, doch zeigt es einen deutlichen Abbau unter aeroben Bedingungen.

Die Silageabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen zeigt einen sehr langsamen Abbau unter aeroben Bedingungen. Diese Eigenschaft ist für das Abdeckmaterial auch wünschenswert, da ein schneller aerober Abbau auch einhergeht mit einer geringen Langlebigkeit des Materials. Doch genau diese Eigenschaft des Materials ist für die Abdeckung von Silagen über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr sehr wichtig. Es soll sich im ersten Jahr nicht zu stark abbauen, damit die Schutzfunktion der Abdeckung über den gewünschten Einsatzzeitraum bestehen bleibt.

5.7 Abschätzung einer möglichen Verfütterbarkeit

In einem ersten Schritt zur Abschätzung der Mitverfütterung wird vor der Antragstellung geprüft, welche Inhaltsstoffe bereits in der Positivliste für Einzelfuttermittel gelistet sind und welche sich in der Liste der Futtermittelzusatzstoffe befinden [18] [20].

In der Positivliste für Einzelfuttermittel gelistete Materialbestandteile sind Calciumsulfat, Natriumchlorid, Pektin, Pflanzenglycerin (Glycerin mind. 99 %), Pflanzenöl und Pulvercellulose.

Als Futtermittelzusatzstoff nach Richtlinie 70/524/EWG und der Übergangsregelung Verordnung EG 1831/2993 gelistete Bestandteile sind:

- Natriumalginat: E 401, für alle Tierarten und Futtermittel zugelassen, kein Höchstgehalt vorgegeben,
- Sorbit (Sorbitol): E 420, für alle Tierarten und Futtermittel zugelassen, kein Höchstgehalt vorgegeben,
- Cellulosepulver: 460 (ii): für alle Tierarten und Futtermittel zugelassen, kein Höchstgehalt vorgegeben.

Nach Durchführungsverordnung (EU) 2016/2023 der Kommission zur Zulassung von Natriumbenzoat, Kaliumsorbat, Ameisensäure und Natriumformiat als Zusatzstoffe in Futtermitteln für alle Tierarten:

- Natriumbenzoat als Silierzusatzstoff: Höchstgehalt: 2.400 mg/kg für alle Tierarten, Geltungsdauer bis 2026.

Durch die Mischung verschiedener Quellen von Natriumbenzoat darf der zulässige Höchstgehalt nicht überschritten werden. Je nach Schichtdicke und Silogröße wird die Silageabdeckung, gleichmäßig mit der Silage homogenisiert, höchstens 1 % der Masse ausmachen (bei einer maximalen Schichtdicke von 2 cm und einer minimalen Silohöhe von 2 m). Beinhaltet die Abdeckung zu 2 % Natriumbenzoat, entspricht das 200 mg/kg Natriumbenzoat im Silage-Abdeckungsgemisch.

Für die Bewertung einer möglichen Mitverfütterung des Abdeckmaterials wird zudem ein Fließschema für die Herstellung der Silageabdeckung mit Kontrollpunkten (CPs) entworfen. In Abbildung 109 ist der Herstellungsprozess schematisch dargestellt. Ausgangspunkt sind die Rohstoffe, die entsprechend dem Materialbedarf besorgt werden und am Betrieb bis zur Silierung zwischengelagert werden. Ein Lohnunternehmer mit einer selbstfahrenden Arbeitsmaschine, wie sie ausführlich unter 5.9 beschrieben ist, mischt die einzelnen Bestandteile in den zwei Vorratsbehältern mit Rührwerk zusammen. Bei dieser Tätigkeit befindet sich für die Herstellung der Abdeckung ein Kontrollpunkt (CP). Es muss beim Einfüllen der Bestandteile darauf geachtet werden, dass keine Fremdkörper in das Innere des Applikationsgeräts gelangen, die die spätere Futtermittelsicherheit gefährden können. Dem kann beispielsweise durch die Anbringung eines Siebs an der Luke des Tanks entsprochen werden.

Nach dem Befüllen der Tanks werden die Komponenten im Applikationsgerät gemischt. Während des Mischvorgangs kann die selbstfahrende Arbeitsmaschine zur Verdichtung der Silage verwendet werden. Nach der Verdichtung des Silos beginnt die Applikation. Die zwei Komponenten werden mit lebensmitteltauglichen Pumpen gefördert, mit Statikmischern homogenisiert und mit einem Spritzbalken aufgespritzt. Die Abdeckung härtet innerhalb einer Minute vollständig aus und gewährleistet sofort einen luftdichten Abschluss.

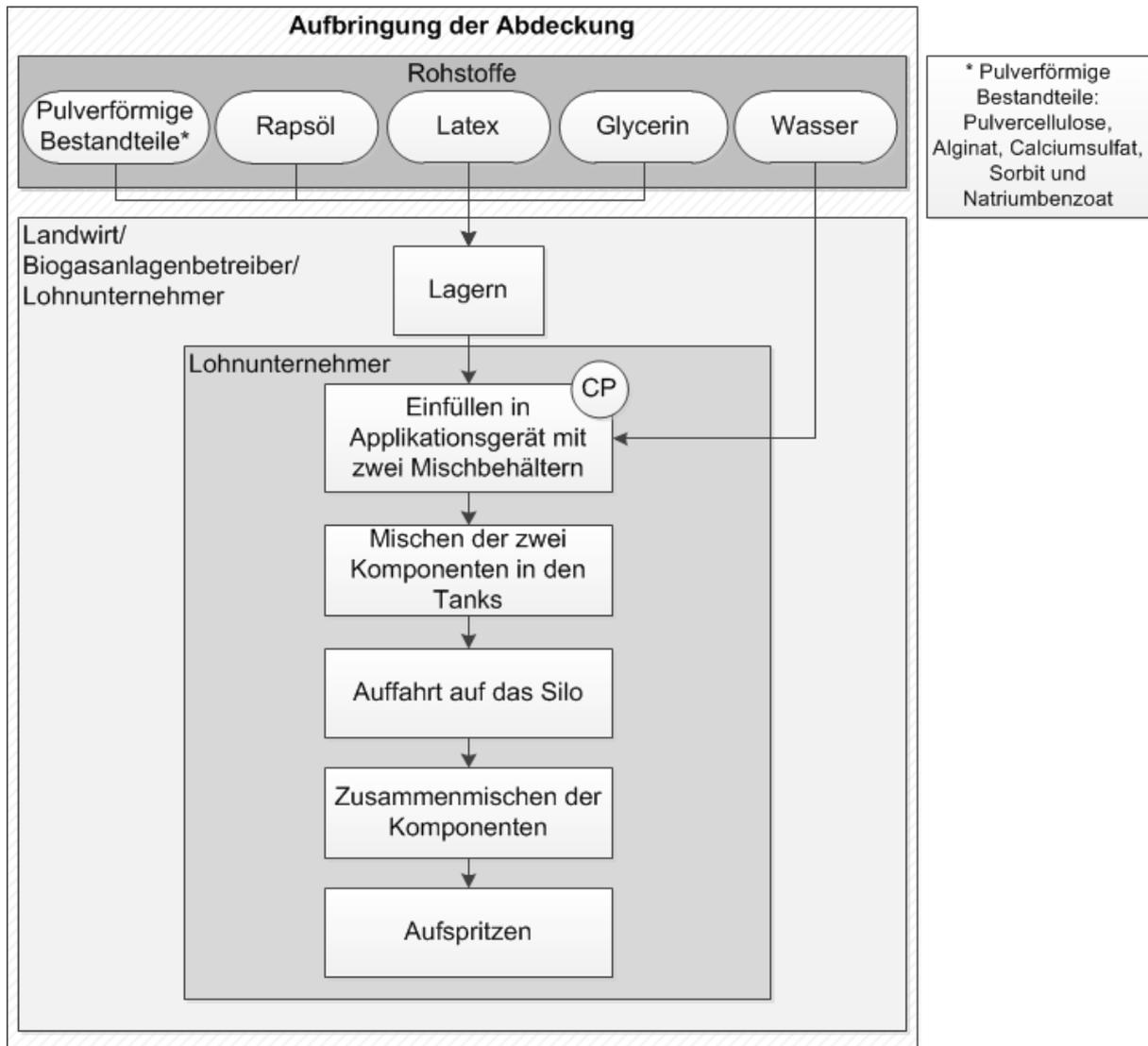


Abbildung 109: Beispielhaftes Fließschema der Herstellung der Silageabdeckung in der Praxis

Auf dieser Grundlage und mit der am Ende des Projekts favorisierten Rezepturvariante W20 (Tabelle 15) wird die Aufnahme der Silageabdeckung als Einzelfuttermittel in die Positivliste durch die Normenkommission Einzelfuttermittel des Zentralausschusses der Deutschen Landwirtschaft bewertet.

5.8 Wirtschaftlichkeitsabschätzung

Die Kosten sind ein wesentlicher Faktor bei der Auswahl des Abdeckverfahrens für Silos. Die neue, aufspritzbare Silageabdeckung wird daher mit einer Siloabdeckung, bestehend aus Unterzieh-, Silofolie und Siloschutzgitter verglichen. Betrachtet wird im Folgenden der gesamte Prozess von der Aufbringung über die Nutzungsdauer bis hin zur Verwertung oder Entsorgung der Abdeckungen.

Abbildung 110 zeigt das Prozessschema für eine dreilagige Siloabdeckung, wie es derzeit Stand der Technik ist. Die für die Silageabdeckung benötigten Materialien werden beim Betrieb vor der Nutzung gelagert. Schutzgitter und Sandsäcke können mehrere Jahre genutzt werden. Für diese Kalkulation wird eine Nutzungsdauer von zehn Jahren angenommen. Unterzieh- und Silofolie müssen jedes Jahr neu beschafft werden. Die Aufbringung der Folien wird in diesem Szenario von einem Lohnunternehmen übernommen, da hier die Arbeitskosten besser abzuschätzen sind.

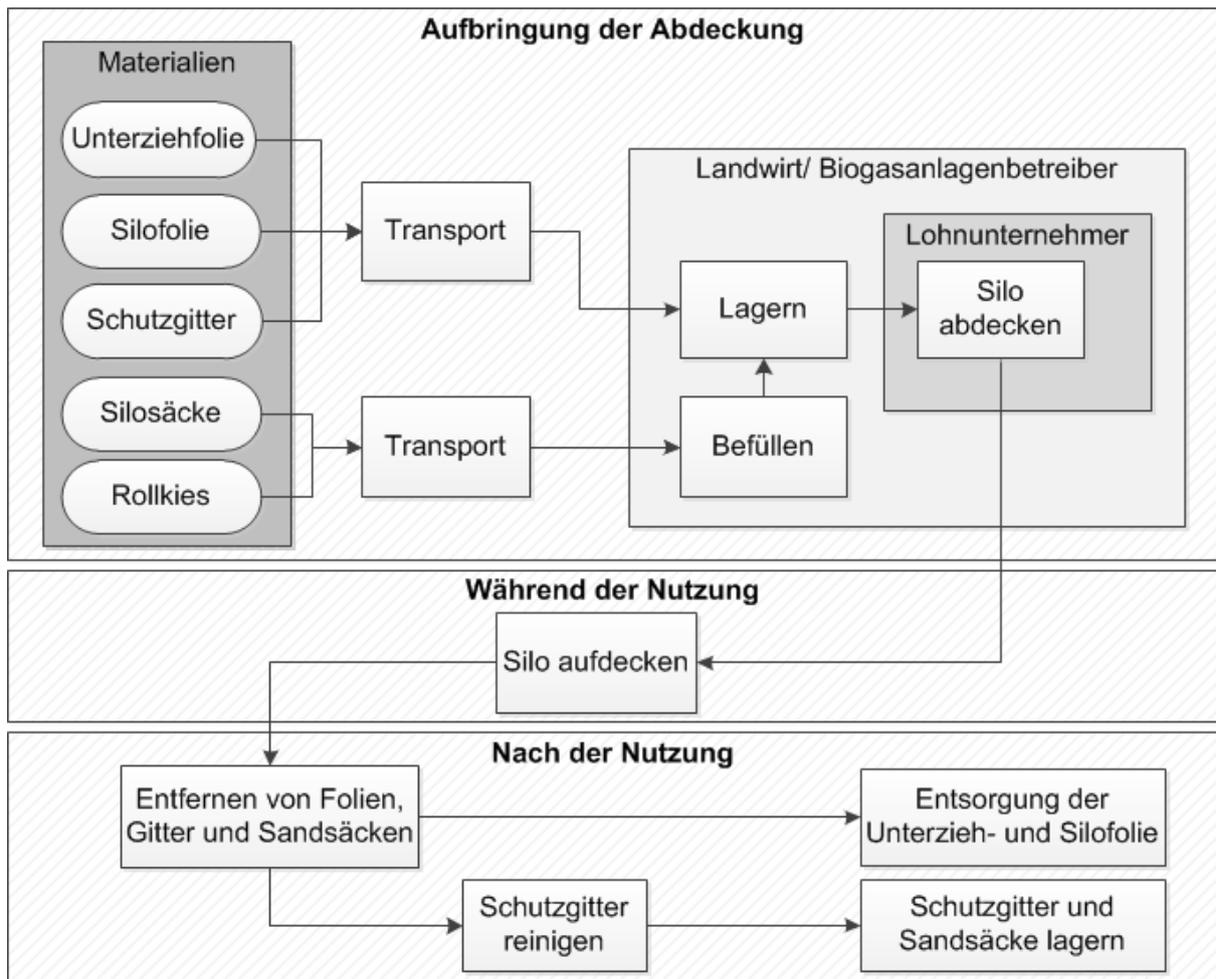


Abbildung 110: Beispielhaftes Prozessschema Siloabdeckung mit Silofolie und Schutzgitter

Bei der Silageentnahme während der Silagenutzung muss immer wieder Arbeitszeit für das Aufdecken der Silofolie aufgewendet werden. Hier müssen Sandsäcke abgenommen, verschoben und die Silofolien umgeschlagen werden. Ist die Silage aufgebraucht, werden Unterzieh- und Silofolie kostenpflichtig entsorgt. Die Sandsäcke und das Schutzgitter können wiederverwendet werden.

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 111 ein mögliches Prozessschema der Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen. Auch hier steht die Beschaffung der Rohstoffe

für die Silageabdeckung an erster Stelle. Damit das Anmischen der Siloabdeckung möglichst einfach erfolgen kann, wird angenommen, dass die pulverförmigen Zusatzstoffe für die Abdeckung vorab gemischt und in Säcke abgefüllt werden. Das Pulver wird dann zusammen mit Rapsöl, Latex und Glycerin besorgt und wie die Folien beim Landwirt oder Biogasanlagenbetreiber zwischengelagert. Denkbar ist auch, dass die Rohstoffe beim Lohnunternehmer, der die Dienstleistung des Siloabdeckens übernimmt, zwischengelagert werden. Gemischt und aufgespritzt wird die Silageabdeckung mit einem speziellen Applikationsgerät, das unter 5.9 beschrieben ist. Dieses Gerät wird von einem Lohnunternehmer bereitgestellt und betrieben, für das Bedienen des Fahrzeugs ist nur eine Arbeitskraft notwendig. Das Gerät kann bei der Silierung zusätzlich als Verdichtungsfahrzeug verwendet werden. Während der Silagenutzung fallen keine zusätzlichen Arbeitskosten an. Die Abdeckung wird zusammen mit der Silage entnommen und verwertet. So bleiben auch am Ende keine zu entsorgenden Reste übrig und es fallen auch nach der Nutzung keine zusätzlichen Kosten an. Da die Abdeckung mit der Silage verwertet wird, ist hier eine Gutschrift für den Energiegehalt der Abdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen miteinzuberechnen, wenn diese beispielsweise in einer Biogasanlage verwertet wird.

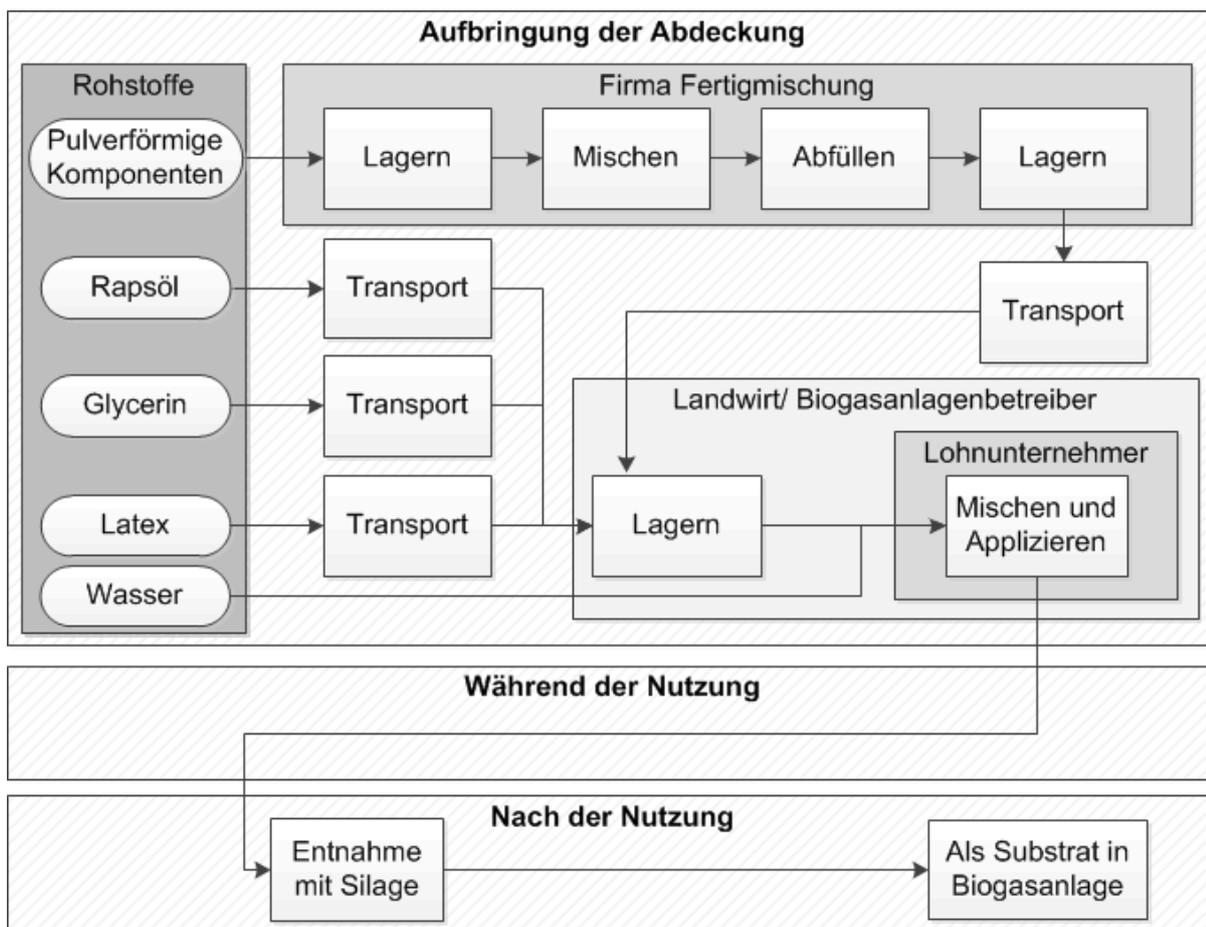


Abbildung 111: Beispielhaftes Prozessschema Siloabdeckung mit der Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen

5.8.1 Materialkosten

Alle Materialkosten, die in folgenden Tabellen gelistet sind, beinhalten bereits die Kosten einer Lieferung in einen zentral gelegenen Standort in Bayern. Vor allem bei Latex ist der Ort der Anlieferung für die Preisbildung wichtig, da der Flüssigkautschuk über die Häfen der Nordsee nach Deutschland gelangt und von dort aus weiter distribuiert wird. So fallen für Bayern höhere Lieferkosten als für Norddeutschland an.

Der Latex verursacht knapp die Hälfte der Kosten der Silageabdeckung. Er wird entweder in IBC-Tanks oder in Tanklastwägen geliefert wird. Für das Szenario einer dezentralen Herstellung der Abdeckung werden IBC-Tanks verwendet und der Preis beträgt hierfür Ende 2017 2,37 €/kg. Der Latexpreis würde für die Abnahme größerer Mengen von 20 bis 22 Tonnen noch weiter auf 1,72 €/kg sinken. Doch muss für die Anlieferung eines Tanklastwagens eine geeignete Infrastruktur geschaffen sein und entsprechend viel der Abdeckmasse produziert werden. Ein IBC-Tank reicht für die Herstellung einer Abdeckmasse für 650 m².

Der Latexpreis lehnt sich am Börsenpreis des Naturkautschuks an und unterliegt großen Schwankungen, sodass die Kostenkalkulation nur eine Momentaufnahme der derzeitigen Marktsituation widerspiegelt. In den Jahren 2012 bis 2017 schwankte der Naturkautschukpreis um bis zu 300 % bezogen auf den niedrigsten Preis. Der Latexpreis liegt tendenziell knapp über dem Preis des Naturkautschuks und reagiert etwas verzögert auf die Preisschwankungen an der Börse.

Auch das Rapsöl trägt mit 25 % einen wesentlichen Anteil an den Gesamtkosten des Abdeckmaterials. Je nach Preisentwicklung der Pflanzenöle könnte das Rapsöl auch durch kostengünstigeres Sojaöl ersetzt werden.

Der entscheidende Faktor ist jedoch die benötigte Materialmenge je Fläche, also die zum Schutz der Silage benötigte Masse des Materials. Bei einer durchschnittlichen Schichtdicke von 9 mm, was einer Masse von 8 kg pro m² entspricht, würden sich die reinen Materialkosten auf 11,78 € belaufen. Wird die benötigte Masse durch eine Prozess- und Materialoptimierung auf 5 kg pro m² verringert, ergibt sich ein Preis von 7,86 €. Eine größere Reduktion der Schichtdicke ist nach derzeitigem Wissensstand nicht möglich. Tabelle 39 gibt einen Überblick zu den Materialkosten und Kostenanteilen der neuen Abdeckung. Es werden die Kosten pro Quadratmeter für zwei verschiedene Materialdicken der Abdeckung dargestellt.

Tabelle 39: *Materialkosten der Vorzugsrezeptur W20 inklusive Transportkosten der Einzelbestandteile*

Bestandteil	Masse-	Material-	Anteilige	Anteil an	Kosten bei	Kosten bei
	anteil					
	in %	in €/kg	kg Siloab-	kosten	8 kg/m ²	5 kg/m ²
			deckung	in %	in €/m ²	in €/m ²
			in €/kg			
Rapsöl	40,37	0,95	0,38	25,08	3,07	1,92
Natriumalginat	0,92	13,40	0,12	8,04	0,98	0,61
Calciumsulfat	1,10	0,12	0,00	0,09	0,01	0,01
Cellulosefasern (BC200)	2,20	4,10	0,09	5,90	0,72	0,45
Latex (60 %ig)	30,58	2,37	0,72	47,40	5,80	3,62
Wasser	14,35	0,002	0,000	0,015	0,002	0,001
Glycerin	5,50	1,26	0,07	4,54	0,55	0,35
D-Sorbitol (70 %ig)	3,14	1,52	0,05	3,24	0,38	0,24
Natriumbenzoat	1,83	1,72	0,03	2,19	0,26	0,16
Summe	100,00		1,53	100,00	11,78	7,86

Für ein Silo mit 1.000 m² Grundfläche wird unter Berücksichtigung der Wölbung eine Silageoberfläche von 1.050 m² angenommen. Bei einer Aufbringmenge von 5 kg pro m² ergeben sich 8.253 € Materialkosten pro Silo. Werden 8 kg pro m² benötigt, wie es derzeit der Entwicklungsstand des Applikationsgeräts und des Abdeckmaterials erfordern, belaufen sich die Kosten auf 12.369 €.

Die Materialkosten der konventionellen Siloabdeckung fallen deutlich geringer aus. Preiserhebungen von NUSSBAUM (2005) [34] ergeben für eine dreilagige Abdeckung einen Kostenaufwand von 0,73 €/m² und Jahr. Darin sind nur die Folienpreise ohne Sandsäcke enthalten. Es wurden Durchschnittspreise herangezogen und ein Preis für die Unterziehfolie von 0,09 €/m², Silofolie für 0,27 €/m² und Schutzgitter für 2,34 €/m² mit einer Nutzungsdauer von zehn Jahren angenommen. Werden in diese Kalkulation noch Sandsäcke mit einer Nutzungsdauer von zehn Jahren einbezogen, ergibt sich ein reiner Materialpreis von 0,76 €/m².

Nach den Faustzahlen für die Landwirtschaft KTBL [30] bewegen sich die Preise der Folien in folgenden Bereichen: Silofolie 0,30 €/m² bis 0,40 €/m²; Unterziehfolie 0,30 €/m² bis 0,40 €/m²; Vogelschutzgitter 1,20 €/m² bis 1,60 €/m². Eine eigene Erhebung durch konkrete Anfragen an Folienhändler ist in Tabelle 40 aufgelistet. Die Preise unterscheiden sich leicht, je nach Größe der zu verwendenden Folienbahnen, Anbietern und Foli-

enqualitäten. Für den Preisvergleich mit der Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen wird die Kostenkalkulation von NUSSBAUM (2005) herangezogen.

Zur Kostenberechnung für die Abdeckung eines Silos mit 1.000 m² muss neben den 5 % Wölbung des Silagehaufens bei einer Folienabdeckung ein Überlappungsbereich der Folienbahnen einberechnet werden. Dieser Überlappungsbereich soll im Idealfall 19 % betragen und wird so in die Berechnung integriert. Insgesamt ergibt sich daraus ein Flächenbedarf von 1.240 m² Folie in mehreren Lagen. Bei einem Materialpreis von 0,76 €/m² ergeben sich Materialkosten von 942,40 € für ein Silo mit 1.000 m² Grundfläche.

Tabelle 40: Materialkosten einer konventionellen Siloabdeckung mit Unterzieh-, Silofolie und Schutzgitter – nach einem Angebot eines Folienhändlers vom 19.12.2017

	Kosten für 500 m ² Silofläche in €/m ²	Kosten für 1.000 m ² Silofläche in €/m ²
Unterziehfolie	0,18	0,18
Silofolie 0,2 mm	0,48	0,29
Schutzgitter*	0,22	0,21
Sandsäcke*	0,04	0,03
Summe	0,92	0,71

* Nutzungsdauer: zehn Jahre

5.8.2 Arbeitsaufwand

Für die Arbeitskosten wird pro Arbeitskraft ein Stundensatz von 15 € verwendet, wie bei Lohnunternehmern im Jahr 2018 üblich [32]. Für das Abdecken eines Silos mit 1.000 m² Grundfläche wird von vier Arbeitskräften ausgegangen, die vier Stunden benötigen, um das Silo fachgerecht abzudecken. Zusätzlich wird eine Arbeitskraft für das Bedienen des Traktors mit Frontlader benötigt. Daraus ergeben sich Arbeitskosten von insgesamt 375 €. Für das Aufdecken der Silos wird eine Stunde Arbeitszeit pro Woche während der Silonutzung angenommen.

Diese Annahmen beziehen sich auf Aussagen aus der Praxis. Der Arbeitsaufwand des Siloabdeckens hängt sehr stark von den örtlichen Gegebenheiten am Betrieb sowie der Größe und Bauweise des Fahrsilos ab. So benötigen manche Betriebe für ein ca. 1000 m² großes Silo zehn bis fünfzehn Arbeitskräfte, andere wiederum nur vier bis fünf. Auch variiert in der Praxis die Bezahlung stark. Lohnunternehmer bieten beispielsweise eine Arbeitskraftstunde für 12 €, andere für 32,90 € an. Insgesamt sind der Arbeitsaufwand und die daraus entstehenden Kosten schwierig zu verallgemeinern, da je nach Bauart und Größe des Silos sowie der Kompetenz der Arbeitskräfte die benötigte Arbeitszeit und die Personenanzahl sehr schwanken.

Der Arbeitsaufwand beim Aufbringen der neuen Silageabdeckung ist im Vergleich zum konventionellen Abdeckverfahren wesentlich geringer, da für das maschinelle Aufspritzen nur eine Person benötigt wird. Das Ausbringen der Abdeckung dauert weniger als eine Stunde, abhängig von der Bauart und Spritzbalkenbreite des Selbstfahrers. Es wird für die Aufbringung selbst eine Arbeitsstunde veranschlagt. Das Befüllen und Mischen der Komponenten für die Abdeckmasse benötigt voraussichtlich zwei Personen mit je 0,5 h Arbeitsaufwand. Als Summe ergibt sich hieraus inklusive Anfahrtkosten ein Kostenaufwand von 45 €.

5.8.3 Gerätekosten

Für die konventionelle Folienabdeckung wird ein 110-PS-Schlepper mit Frontlader veranschlagt. Bei einer Anfahrtszeit von einer Stunde, einer Abdeckzeit von vier Stunden und einer Gebühr von 35 €/h inklusive Diesel ergeben sich 175 € Gerätekosten [32].

Für die Abdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen wird ebenfalls eine Stunde Anfahrt, 1,5 h für das Anmischen und Aufspritzen verrechnet. Um die Kosten eines Selbstfahrers inklusive Umbaukosten für den Applikationsaufbau zu kalkulieren, wird ein Umbau im Wert von 50.000 € inklusive Abschreibung, Zinsansatz, Unterbringungskosten und Versicherung, wie in Tabelle 41 aufgelistet, einberechnet. Es ergeben sich Festkosten von 6.000 € pro Jahr. Bei einer jährlichen Auslastung von 300 h ergibt sich ein zusätzlicher Stundensatz von 20 €/h. Unter Einbezug einer Einsatzpauschale für Selbstfahrer von 25 € und eines Stundensatzes von 80 € zzgl. des Diesels für 21 €/h ergeben sich Maschinenkosten für das Aufbringen der Silage bei einem 1000-m²-Silo von 327,50 €.

Tabelle 41: Maschinenkosten für den Umbau eines Selbstfahrers

	Kosten in €
Anschaffungskosten	50.000,00
Abschreibung 8 %	4.000,00
Zinsansatz 2 %	1.000,00
Unterbringungskosten 1 %	500,00
Versicherung 1 %	500,00
Festkosten pro Jahr	6.000,00

Tabelle 42: Stundensatz einer selbstfahrenden Applikationsmaschine mit Aufbau

Jährliche Auslastung in h	Gesamtkosten in €/h
300	20,00
400	15,00
500	12,00
600	10,00
700	8,60
800	7,50

5.8.4 Entsorgungskosten und Verwertungsgutschriften

Die Entsorgungskosten der PE-Folie betragen 0,05 €/m² und somit 62 € für ein 1.000-m²-Silo. Bei der neuartigen Silageabdeckung entfallen die Entsorgungskosten, stattdessen kann sie gemeinsam mit der Silage in Biogasanlagen eingebracht werden. Durch den zusätzlichen Energiegehalt der Silageabdeckung ergibt sich ein Mehrwert, der ebenfalls in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einfließt.

Die Einspeisevergütung für Strom aus Biogasanlagen ist abhängig von Anlagentyp und Jahr der Inbetriebnahme, daher kann keine allgemeingültige Gutschrift bestimmt werden. Im vorliegenden Beispiel wird von einer Vergütung von 0,1155 €/kWh (Grundvergütung für eine 2010 in Betrieb gegangene Biogasanlage) ausgegangen. Die Gutschrift für die Verwertung der Silageabdeckung in der Biogasanlage wird nach EEG-Vergütung auf einen Kubikmeter Methan bezogen.

Des Weiteren wird ein Jahresnutzungsgrad von 40 % angenommen. Die Gärrestaubsbringung und weitere Ausgaben werden bei dieser Kalkulation nicht berücksichtigt. Für die Berechnung der Vergütung je Kubikmeter Methan (M) wird folgende Formel verwendet:

$$x = ESP \cdot \eta \cdot H_{i,M} = 0,1155 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 0,40 \cdot 9,97 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 0,4606 \text{ €/m}^3 \quad (5.1)$$

Wobei:

x = Vergütung je m³ Methan

ESP = Einspeisevergütung

η = Wirkungsgrad

$H_{i,M}$ = Heizwert Methan

Die Methanausbeute des Abdeckmaterials wird anhand der Rohnährstoffanalyse des Futtermittellabors der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft berechnet. Die Zusammensetzung der Silageabdeckung ist in Tabelle 16 dargestellt. Die Gasausbeute der

einzelnen Rohnährstoffe wird nach den Angaben der Gasausbeute und des CH₄-Anteils unterschiedlicher Stoffgruppen von BASERGA (1998) [2] berechnet. Die verwendete Tabelle befindet sich im Anhang.

5.8.5 Kostenvergleich

Alle Kosten werden zur Veranschaulichung beispielhaft für ein 1.000-m²-Silo dargestellt. Tabelle 43 listet die Kosten einer konventionellen Folienabdeckung auf. Insgesamt belaufen sich die jährlichen Kosten für die Abdeckung eines solchen Silos auf ca. 2.300 €.

Tabelle 43: Kosten einer Folienabdeckung für ein 1000-m²-Silo

	Kosten in €
Material	942,40
Traktor mit Frontlader (5 h inkl. Anfahrt)	175,00
Arbeitskosten Abdecken (5 Personen à 5 h inkl. Anfahrt)	375,00
Arbeitskosten Aufdecken (1 h/Woche)	780,00
Entsorgung	62,00
Summe	2.334,40

Die Kosten der Silageabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen werden durch die benötigte Materialdicke zur Abdeckung beeinflusst. Nach dem derzeitigen Entwicklungsstand belaufen sich daher die Kosten für die Abdeckung eines 1.000-m²-Silos auf etwa 11.200 €, was dem 4,7-Fachen der konventionellen Abdeckung entspricht. Durch Optimierung des Applikationsverfahrens und weitere Rezepturanpassungen kann die benötigte Materialmenge voraussichtlich auf etwa 5 kg pro m² gesenkt werden. Die Kosten würden dadurch auf ca. 7.600 € sinken und die neue Abdeckung würde in etwa das Dreifache einer konventionellen Folienabdeckung kosten.

Tabelle 44: Kosten einer Silageabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen für ein 1.000-m²-Silo

	Kosten €/Silo 5 mm Schichtdicke	Kosten €/Silo 8 mm Schichtdicke
Material	8.253,00	12.369,00
Selbstfahrer mit Applikationsgerät (2,5 h inkl. Anfahrt)	327,50	327,50
Arbeitskosten Abdecken (3 h inkl. Anfahrt)	45,00	45,00
Arbeitskosten Aufdecken	–	–
Entsorgung	–	–
Gutschrift für Energiegehalt	952,76	1.523,13
Summe	7.627,74	11.218,37

Ein wichtiger Beweggrund für die Verwendung der Silageabdeckung ist die Arbeitssicherheit, die nicht mit Kosten aufgerechnet werden kann. Die Unfallgefahr durch das ständige Betreten des Silos zwecks Aufdeckens und Umschlagens der Silofolien entfällt bei der Silageabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen komplett. Dies könnte neben der Verwendung Nachwachsender Rohstoffe anstatt von Erdölprodukten ein ausschlaggebendes Argument für die Verwendung der aufspritzbaren Siloabdeckung sein.

5.9 Alternative Verwendungsmöglichkeiten

Parallel zu den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der neuartigen Silageabdeckung wird auch nach alternativen Verwendungsmöglichkeiten des Abdeckmaterials gesucht. Ein erster Tastversuch wird in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau mit dem Ziel der Unkrautunterdrückung und des Verdunstungsschutzes an einer Weinbausteillage durchgeführt. Der Versuch lässt auf eine wirksame Unterdrückung von Unkraut durch die Silageabdeckung schließen. Doch sind die Eigenschaften der Silageabdeckung nicht auf die Anforderungen an ein Mulchmaterial abgestimmt. Beispielsweise ist für diese Anwendung keine Gasdichtigkeit und Wasserundurchlässigkeit erforderlich. Im Gegenteil: Es ist keine Versiegelung der Flächen erwünscht.

Da je nach Anwendungsgebiet auch die nötigen Materialanforderungen variieren, müssen entsprechende Rezepturanpassungen vorgenommen werden. Erste Versuche einer gezielten Modifikation der Silageabdeckung sollen daher zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt und bewertet werden. Tabelle 45 gibt einen Überblick zu möglichen Anwendungsfeldern.

Tabelle 45: Alternative Verwendungsmöglichkeiten eines neuartigen Abdeckmaterials auf Basis Nachwachsender Rohstoffe

Alternativer Verwendungszweck	Aktuelle Problematik	Mögliche Vorteile des neuen Materials	Mögliche Nachteile des neuen Materials
Geruchsbarriere offener Anschnittflächen von Silagehaufen	Große Siloanschnittflächen, die längere Zeit offenstehen	Kann nach Bedarf, ohne das Silo zu betreten, abgespritzt werden	Die flüssige Siloabdeckung wird bei senkrechten Flächen zu schnell ablaufen
Abdeckung im Freien lagernder Biomasse (z. B. Stroh- und Heuballen)	Abdeckung mit Vliesen aufwendig, Anfall großer Abfallmengen nach Nutzungsdauer	Aufspritzbar, muss nicht entsorgt werden	Klebrig, Kosten hoch
Bindemittel für Mulchmaterialien	Mulchmaterialien wie Stroh werden vom Wind abgetragen	Wirkt als Kleber für Mulchmaterialien, biologisch abbaubar	Technische Herausforderung: Zwei-Komponenten-Material mit einer dritten Komponente verbinden: hoher Preis
Schweinespielzeug	Plastikreste, die durch Zerkauen der Spielzeuge entstehen, könnten zu Mikroplastik in der Schweinehaltung führen	Biologisch abbaubar, toxikologisch unbedenklich, aus Nachwachsenden Rohstoffen	Zu niedrige mechanische Stabilität (soll bissfest sein), zu geringe Langlebigkeit des Materials
Schneckenbarriere	Derzeit Verwendung unbedenklicher Chemikalien gegen Schnecken	Toxikologisch unbedenklich, Schnecken meiden die klebrige Oberfläche	Preis, Aufbringung komplizierter als bisherige Methoden
Aufspritzbare Mulchmasse	Mulchfolien sind aufwändig aufzubringen und zu befestigen	Aufspritzbar, kann auf dem Feld verbleiben	Benötigte Materialmenge, Kosten, Anreicherung von Latex auf dem Feld

Zusammenfassung

Die Konservierung von Futtermitteln erfolgt bei der Silierung durch Milchsäuregärung, die nur unter anaeroben Bedingungen stattfinden kann. Der gasdichte Abschluss der Silage ist hierfür Grundvoraussetzung und wird nach derzeitigem Stand der Technik mit erdöl-basierten Kunststofffolien erreicht. Eine geeignete Silageabdeckung muss über den Zeitraum von mindestens zwölf Monaten einer Vielzahl an äußeren Einflüssen standhalten. Sie muss wind- und wasserfest sein sowie eine sehr gute UV- und Temperaturstabilität besitzen. Das Verfahren der konventionellen Abdeckung des Silos mit Kunststofffolien ist arbeitsintensiv, birgt potenzielle Unfallgefahren beim Zu- und Aufdecken und zudem ist die Entsorgung der Folien nach der Nutzung aufwändig.

Ziel dieses Vorhabens ist es, aufbauend auf vorhergehenden Arbeiten, eine umweltfreundliche, aufspritzbare und selbsthaftende Abdeckung für Silage auf Basis nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife zu überführen. Die Abdeckung soll mit der Silage entnommen werden, in Biogasanlagen verwertbar und gegebenenfalls verfütterbar sein.

Dazu werden die in vorhergehenden Arbeiten entwickelten Rezepturen der Siloabdeckung weiter optimiert und deren Eigenschaften im Labor untersucht. Durch Rezepturoptimierungen wird eine Verbesserung der Dehnbarkeit von 13 % auf über 90 % erreicht. Die Materialschrumpfung, die bei den Rezepturen der vorangegangenen Arbeiten als Problem identifiziert wurde, kann um bis zu 80 % reduziert werden. Die Wasseraufnahme und das Quellverhalten werden wesentlich verringert und damit verbessert. Auch die Gasdichtigkeit des Materials kann weiter verbessert werden und der Permeationskoeffizient für Sauerstoff liegt für die optimierten Rezepturen bei $2 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ im Vergleich zu $3 \text{ cm}^3 \text{ m}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ für Materialien aus den vorangegangenen Arbeiten. Die Prüfung der Materialverträglichkeit mit Siloanstrichen ergibt, dass bitumenhaltige Siloanstriche nicht mit dem Material kompatibel sind. Geeignet sind Siloanstriche auf Basis von Epoxidharz, Polyurethan oder Acrylpolymeren.

In Vorbereitung für die Materialaufspritzung bei den praxisnahen Versuchen werden drei Prototypen eines Applikationsgeräts für das Abdeckmaterial entwickelt. Mit dem dritten Prototyp kann das Abdeckmaterial gezielt auf den Silagehaufen aufgebracht und die grundsätzliche Machbarkeit demonstriert werden. Die wesentlichen Bauteile sind zwei Pumpen, die für die Förderung scherempfindlicher Suspensionen geeignet sind, ein Statikmischer, um die beiden reaktionsfähigen Komponenten zu mischen, und für das Aufspritzen des Materials geeignete Flachstrahldüsen. Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse werden Anforderungen für die Entwicklung eines praxistauglichen Applikationsgeräts auf einem Trägerfahrzeug für große Silagehaufen abgeleitet.

Erste praxisnahe Untersuchungen werden mit im Freien gelagerten Fässern aus Kunststoff durchgeführt, die mit Silomais befüllt und mit den im Vorgängerprojekt entwickelten Materialrezepturen abgedeckt werden. Dabei musste eine Schrumpfung des Abdeckmaterials festgestellt werden, die zur Undichtigkeit führt und die Notwendigkeit der oben beschriebenen Rezepturoptimierungen bedingt.

Optimierte Rezepturen mit vielversprechenden Laborergebnissen werden im Anschluss in weiteren praxisnahen Versuchen mit Gärgläsern und Miniatursilos geprüft. Die mit Gras befüllten und mit verschiedenen Materialrezepturen abgeschlossenen Gärgläser werden im Freien gelagert und sind mit Sensorspots zur nicht invasiven Messung des Sauerstoffgehalts im Gärglas ausgestattet. Durch die regelmäßige Messung der Sauerstoffkonzentration im Gärglas kann die Dichtigkeit des Abdeckmaterials unter Praxisbedingungen bewertet werden. Diese Methode wird als Screening eingesetzt, um die Eignung von insgesamt 14 verschiedenen Materialrezepturen zu prüfen. Dabei können zwei Rezepturen identifiziert werden, die nach über 90 Tagen im Freien immer noch einen Sauerstoffabschluss der Silage gewährleisten. Diese Erkenntnisse werden bei der weiteren Rezepturoptimierung berücksichtigt.

Die folgenden praxisnahen Silierversuche werden mit fünf Materialrezepturen auf Miniaturbetonsilos mit einer Grundfläche von zwei Quadratmetern getestet. Die Materialaufbringung mit einem manuell zu bedienenden Applikationsgerät stellt eine Herausforderung dar und als Resultat beeinträchtigen stark schwankende Mischungsverhältnisse der beiden Komponenten und unterschiedliche Materialdicken auf der Silageoberfläche die Interpretation der Versuchsergebnisse. Nach acht Monaten Lagerzeit im Freien werden die Silos beprobt. In 30 cm Tiefe unter der Abdeckung sind gute bis sehr gute Silagequalitäten vorzufinden, direkt unter der Abdeckung ist die Silagequalität zumeist ungenügend. Darüber hinaus sind zum Teil ein Wachstum von Schimmel auf der Oberfläche des Abdeckmaterials und ein Ablösen des Materials von der Silowandung festzustellen. Die zwei besten Rezepturen dieses Versuchs werden im Labor weiter optimiert.

Die Rezeptur mit der Codierung W20 vereinbart alle gewünschten Eigenschaften am besten und wird daher für die abschließenden praxisnahen Materialtests verwendet. Diese Rezeptur besteht aus 40,37 % Rapsöl, 2,20 % Cellulosefasern, 1,10 % Calciumsulfat und 0,92 % Natriumalginate in Komponente A sowie 27,52 % Wasser, 18,35 % Latex, 5,50 % Glycerin, 2,20 % Sorbit und 1,83 % Natriumbenzoat in Komponente B. Eine ebenfalls vielversprechende alternative Rezeptur mit der Codierung P41 (die genaue Zusammensetzung ist Anhang 1 zu entnehmen) konnte hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeit nicht so weit verbessert werden, dass eine Ausbringung mit dem dritten Prototyp des Applikationsgeräts möglich ist.

Im Praxistest gegen Ende des Projekts wird die neuartige Silageabdeckung mit der Rezeptur W20 auf zwei 15 m² große Freigärhaufen aufgetragen. Für die Applikation wird der Spritzkopf des dritten Applikationsprototyps an einem in der Höhe und Neigung verstellbaren Spritzbalken im Heckaufbau eines Traktors befestigt. Das Abdeckmaterial kann damit erfolgreich auf die Freigärhaufen in einem Arbeitsgang aufgespritzt werden und bindet innerhalb von Sekunden ab. Der Sauerstoffgehalt in allen Freigärhaufen liegt nach etwa acht Monaten unter 0,4 % und bestätigt weitgehend anaerobe Bedingungen im Siloinneren. An der Oberfläche der Abdeckung ist nach acht Monaten an Stellen mit dünnem Materialauftrag eine erste Rissbildung zu erkennen. Die im Anschluss durchgeführte Untersuchung der Silagequalität ergibt für die direkt unter der Abdeckung gezogenen Proben eine gute und für die in 30 cm Tiefe entnommenen Proben eine sehr gute Gärqualität. Im Vergleich zu den bisherigen Rezepturvarianten, ist mit der Rezeptur W20

eine deutliche Verbesserung gelungen und bei größeren Schichtdicken sind längere Konservierungszeiten der Silage möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass vor einer Markteinführung noch Rezepturoptimierungen und Abstimmungen auf ein zu entwickelndes Applikationsgerät vorzunehmen sind.

Versuche zum anaeroben Abbau des neuartigen Silageabdeckmaterials werden am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL-ILT) durchgeführt. Dabei ergeben sich keine Hinweise auf eine Beeinträchtigung des Gasbildungsprozesses. Weiterhin wird festgestellt, dass sich das vorab drei Monate gealterte Material langsam abbaut und nach ca. 100 Tagen im Durchflussreaktor eine Abbaurate von durchschnittlich 30 % bezogen auf die Trockenmasse aufweist. Es ist daher davon auszugehen, dass teilweise abgebautes Abdeckmaterial über den Gärrest mit ausgelesen wird. In zukünftigen Arbeiten sollte daher untersucht werden, wie sich dieses Material im Gärrest nach der Ausbringung weiter abbaut.

Die aerobe Abbaubarkeit wird mittels Desintegrationstests im Komposter geprüft. Der Siebrückstand nach drei Monaten im Komposter der zu Beginn der Tests 14 Monate alten Prüfkörper beträgt ca. 30 % bezogen auf die Trockenmasse. Der anaerobe Abbau ist auch hier nach drei Monaten nicht vollständig beendet. Daher sollte das weitere Abbauverhalten in zukünftigen Arbeiten untersucht werden.

Zur Verwertung des Silageabdeckmaterials als Futtermittel, beigemischt in der Silage, wird ein Antrag zur Aufnahme des Materials als Einzelfuttermittel durch die Normenkommission Einzelfuttermittel des Zentralausschusses der Deutschen Landwirtschaft gestellt. Die Entscheidung steht zum Projektende noch nicht fest. Mit Ausnahme des Latex sind alle Bestandteile des Silageabdeckmaterials bereits als Einzelfuttermittel oder Futtermittelzusatzstoff zugelassen.

Eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung des gesamten Abdeckverfahrens mit dem neuen Silagematerial auf Basis nachwachsender Rohstoffe ergibt, dass voraussichtlich drei- bis fünffach höhere Kosten im Vergleich zum konventionellen Abdeckverfahren mit drei Lagen Folie entstehen. Die höheren Materialkosten können nicht komplett durch Personalkostenreduktion beim weniger arbeitskraftintensiven Aufbringen und die Zeitersparnis durch den Wegfall des Abdeckens einer Folie kompensiert werden. Die Vorteile des neuen Verfahrens hinsichtlich einer geringeren Unfallgefahr, da keine Personen den Silagehaufen zum Abdecken betreten müssen, können nicht wirtschaftlich bewertet werden.

Insgesamt konnten durch die Arbeiten die Materialeigenschaften wesentlich verbessert und eine gute Ausgangsbasis für eine Produktentwicklung bei einem Industriepartner für eine anschließende Vermarktung geschaffen werden. Die Merkmale der optimierten Rezepturen sind zum Patent angemeldet (ergänzend zu einem bereits erteilten Patent), sodass potenzielle Interessenten die Möglichkeit haben, die Rechte zu erwerben, und noch zu tätige Investitionen gesichert sind.

In zukünftigen Arbeiten sollten alternative Verwendungsmöglichkeiten für das entwickelte Material untersucht werden.

Abstract

The preservation of feed by ensiling takes place by lactic acid fermentation, which can only take place under anaerobic conditions. The gas-tight closure of the silage is a prerequisite for this and is achieved according to the current state of the art with petroleum-based plastic films. A suitable silage cover must withstand a large number of external influences over a period of at least twelve months. It must be resistant against wind and water and also a very good UV and temperature stability is required. The method of conventional coverage of the silo with plastic films is labor-intensive and brings potential accident hazards during covering and revealing the film. Also the disposal of the films after use is elaborate.

Based on previous work, the target of this project is, to bring an environmentally friendly, sprayable and self-adhesive cover for silage based on renewable raw materials into practical maturity. The cover should be removed together with the silage. Additionally it should be digestible in biogas plants and possibly be feed together with the silage.

For this purpose, the formulations of the silo cover, which were developed in previous work, are further optimized and their properties examined in the laboratory. Optimization of formulas improves elasticity from 13 % to over 90 %. Material shrinkage, identified as a problem in previous formulations, can be reduced by up to 80 %. The water absorption and swelling behavior are significantly reduced and thus improved. The gas tightness of the material can be further improved and the permeation coefficient for oxygen of the optimized formulations is $2 \text{ cm}^3 \text{ m} / (\text{m}^2 \text{ d bar})$ compared to $3 \text{ cm}^3 \text{ m} / (\text{m}^2 \text{ d bar})$ for materials from the previous work. The examination of the material compatibility with silo paints shows that bituminous silo paints are not compatible with the material. Suitable silo paints are based on epoxy resin, polyurethane or acrylic polymers.

In preparation for spraying the material in the practical tests, three prototypes of an application device for the covering material were developed. With the third prototype, the covering material can be specifically applied to the silage heap and the fundamental feasibility can be demonstrated. The essential components are two pumps, which are suitable for conveying shear-sensitive suspensions, a static mixer to mix the two reactive components of the coverage material and flat spray nozzles, suitable for spraying the material. Based on the gained findings, requirements for the development of application device on a carrier vehicle for large silage heaps in practice are derived.

The first practical tests are carried out with plastic barrels stored outside, which are filled with silage maize and covered with material recipes developed in the previous project. In this case, shrinkage of the covering material had to be determined, which leads to leakage and the necessity of the formulation optimizations described above.

Subsequently, optimized formulations with promising laboratory results are tested in further practical experiments with fermentation glasses and miniature silos. The glasses are filled with grass and sealed with different material recipes. All glasses are stored outdoors and equipped with sensor spots for non-invasive measurement of the oxygen con-

tent in the fermentation glass. By regularly measuring the oxygen concentration in the fermentation glass, the tightness of the covering material can be evaluated under practical conditions. This method is used as a screening to test the suitability of a total of 14 different material formulations. Two recipes can be identified that will ensure that the silage is oxygen-free after 90 days outdoors. These findings are taken into account in the further formulation optimization.

The following practical silage tests are carried out with five different material formulations on miniature silos made of concrete with a base area of two square meters. Material application with a manually operated application device poses a challenge and, as a result, fluctuating mixing ratios of the two components and different material thicknesses on the silage surface impair the interpretation of the test results. After eight months of outdoor storage, the silos are sampled. In a depth of 30 cm under the cover, good to very good silage qualities are found. But directly under the cover material the silage quality is mostly insufficient. In addition, some growth of mold on the surface of the covering material and detachment of the material from the silo wall are noted. The two best formulations of this experiment will be further optimized in the laboratory.

The recipe with the code W20 matches all desired properties best and is therefore used for the final practical material tests. This formulation consists of 40.37 % rapeseed oil, 2.20 % cellulose fibers, 1.10 % calcium sulfate and 0.92 % sodium alginate in component A and 27.52 % water, 18.35 % latex, 5.50 % glycerol, 2.20 % sorbitol and 1.83 % sodium benzoate in component B. A likewise promising alternative formulation with the coding P41 (the exact composition can be found in appendix 1) could not be improved with regard to the reaction rate to such an extent that application with the third prototype of the application device is possible.

In the last practical test towards the end of the project, the novel silage cover with formulation W20 is applied on two 15 m² silage heaps. For the application, the spray head of the third application prototype is attached to a height and tilt adjustable spray bar in the rear body of a tractor. The cover material can be successfully sprayed onto the clearing piles in one operation and binds within seconds. After eight months of storage the measured oxygen content in all clearing clays is below 0.4 % and indicates anaerobic conditions inside the silos. On the surface of the material a beginning cracking was identified on positions with thin thickness of the material. Subsequent sampling of silage shows a good fermentation quality of the samples originating directly from under the cover material and a very good fermentation quality in a depth of 30 cm. Compared to former formulations the material W20 shows significant improvement and with higher thickness of the material longer preservation of the silage is possible. It can be assumed that, prior to a market launch, final recipe optimizations and adjustments must be carried out on an application device, which is still to be developed.

Attempts to anaerobic degradation of the novel silage cover material are carried out at the Institute of Agricultural Engineering and Animal Nutrition of the Bavarian State Research Center for Agriculture (LfL-ILT). There are no indications of any impairment of the gas formation process. Furthermore, it is found that the material aged in advance of

three months degrades slowly and has a degradation rate of 30 % in average based on the dry matter after about 100 days in the flow-through reactor. It is therefore to be assumed that partially degraded covering material is carried over the fermentation residue. Future work should therefore investigate how this material degrades further in the digestate after application.

The aerobic degradability is tested by means of a disintegration test in the composter. The sieve residue of the specimen, which is at the beginning of the tests 14 months old, after three months in the composter is about 30 % based on the dry matter. The aerobic degradation is not completely finished here after three months. Therefore, the further degradation behavior should be investigated in future work.

For the utilization of the silage cover material as feed, added in the silage, an application for the inclusion of the material as feed material by the Standard Commission on feed materials of the Central Committee of German Agriculture is made. A decision is not yet made at the end of the project. With the exception of the latex, all components of the silage cover material are already approved as a feed material or feed additive.

A profitability assessment of the entire covering process with the new silage material based on renewable raw materials shows that the costs are expected to be three to five times higher compared to the conventional covering process with three layers of foil. The higher material costs cannot be completely compensated by reducing the cost of labor in less labor-intensive application and the time savings by eliminating the covering of a film. The advantages of the new method with regard to a lower risk of accidents, since no persons have to enter the silage pile for covering, cannot be evaluated economically.

Overall, the work significantly improved the material properties and created a good starting point for product development at an industrial partner for subsequent marketing. The features of the optimized formulations are patent pending (in addition to an already granted patent), so that potential prospects have the opportunity to acquire the rights and further investments to be made are secured.

In future work, alternative uses for the developed material should be investigated.

Quellenverzeichnis

- [1] BALTES, W. (2010): Lebensmittelchemie. 6., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 497 Seiten, ISBN 978-3-540-3818-5
- [2] BASERGA U. (1998): Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen: Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras, FAT-Berichte, Nr. 512, Tänikon: Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), 12 Seiten
- [3] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (2017): Gruber Tabelle zur Fütterung der Milchkühe, Zuchrinder, Schafe, Ziegen. Stand: September 2017. 42. Aufl. BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (HRSG.). Freising-Weihenstephan, Poing: Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft, Arbeitsbereich Wiederkäuer- und Pferdeernährung. LfL-Information, 100 Seiten
- [4] BELITZ, H. D.; GROSCH, W.; SCHIEBERLE, P. (2007): Lehrbuch der Lebensmittelchemie. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1118 Seiten, ISBN 978-3-540-73201-3
- [5] BLAAS, F.; HATZIS, D.; KOMPATSCHER, I.; REITERER, R.; SENONER, J. L.; SEPPI, M.; TSCHURTSCHENTHALER, G.; VIEDER, E.; WACHTLER, S. (2007): Silagequalität. Autonome Provinz Bozen-Südtirol (Hrsg.): Ressort für örtliche Körperschaften Brand- und Zivilschutz Landwirtschaft Forstwirtschaft Wasserschutzbauten Land- und forstwirtschaftliches Versuchswesen, Abteilung 22 Land-, forst- und hauswirtschaftliche Berufsbildung, Dienststelle Bergbauernberatung, 4 Seiten
- [6] BUSWELL, A. M.; MUELLER, H. F. (1952): Mechanism of Methane Fermentation. Industrial & Engineering Chemistry, Jg. 44, Nr. 3, S. 550–552
- [7] DESOI GmbH (2016): Preko 220 - Artikelnummer 13875. Betriebsanleitung nach der EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG vom 24. April 2006. Stand: 21.09.2016. Kahlbach/Rhön: DESOI GmbH, 28 Seiten
- [8] DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E. V. (DLG) (2006): Grobfutterbewertung. Teil B - DLG-Schlüssel zur Beurteilung der Garqualität von Grünfuttersilagen auf Basis der chemischen Untersuchung. DLG-Information, 2/2006. Frankfurt am Main: Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V. (DLG), 4 Seiten
- [9] DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E. V. (DLG) (2011): Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung. Jetzt auch mit Silagen und Biogasanlagen. 8., vollst. überarb. Aufl. Frankfurt am Main: DLG-Verlag, 416 Seiten, ISBN 978-3-7690-0791-6
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2000): DIN EN 13432:2000-12: Verpackungen - Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau - Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen DIN EN 13432. Dezember 2000. Berlin: Beuth-Verlag, 18 Seiten
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2003): DIN EN ISO 527-3: Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln. Berlin: Beuth-Verlag, 8 Seiten
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2005): DIN ISO 10390: Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes. Dezember 2005. Berlin: Beuth-Verlag, 9 Seiten

- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2006): DIN 53380: Prüfung von Kunststoffen. Bestimmung der Gasdurchlässigkeit. Teil 2: Manometrisches Verfahren zur Messung an Kunststoff-Folien. Berlin: Beuth-Verlag, 7 Seiten
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2008): DIN EN ISO 62: Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme. Berlin: Beuth-Verlag, 21 Seiten
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2013): ISO 16929:2013-04: Kunststoffe - Bestimmung des Zersetzungsgrades von Kunststoffmaterialien unter festgelegten Bedingungen der Kompostierung mittels einer Technikums-Maßstab-Prüfung. April 2013. Berlin: Beuth-Verlag, 20 Seiten
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN 53377: Prüfung von Kunststoff-Folien - Bestimmung der Maßänderung. Berlin: Beuth-Verlag, 8 Seiten
- [17] EMBERGER, P.; REMMELE, E. (2015): Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 12 Seiten (unveröffentlicht), Tätigkeitsnachweis an das StMELF
- [18] ENGLING, F.-P.; STASCHINSKI, I.; BAUM, M.; HALLE, I.; PRIES, M.; MEYER, A. ET AL. (2017): Positivliste für Einzelfuttermittel. April 2017. 12. Aufl. Hrsg. v. Zentralausschuss der Deutschen Landwirtschaft (ZDL). Normenkontrollkommission für Einzelfuttermittel. Berlin, 75 Seiten
- [19] EUROPÄISCHE KOMMISSION (2011): VERORDNUNG (EU) Nr. 1129/2011 DER KOMMISSION vom 11. November 2011 zur Änderung des Anhangs II der Verordnung (EG) Nr. 1333/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf eine Liste der Lebensmittelzusatzstoffe der Europäischen Union. Amtsblatt der Europäischen Union, Nr. L 295, 177 Seiten, ISSN 1977-0642
- [20] EUROPEAN COMMISSION (2017): European Union Register of Feed Additives pursuant to Regulation (EC) No 1831/2003. Annex I: List of additives. (Released date 15.12.2017). Edition 259 (10/2017). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 235 Seiten
- [21] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (FNR) (2013): Kurzbeschreibung des Verbundvorhabens "Multifunktionale, sprühfähige und biologisch abbaubare Folien auf der Basis Nachwachsender Rohstoffe im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturpflanzenbau". Förderkennzeichen der Teilprojekte: 22010307, 22010407, 22010507, 22010607. URL: www.fnr.de (Stand: 30. Juli 2013)
- [22] FIGURA, L. (2012): Multifunktionale, sprühfähige und biologisch abbaubare Folien auf Basis Nachwachsender Rohstoffe im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturpflanzenbau. Abschlussbericht zu Teilvorhaben 4. Aufgabengebiet: Permeation. In: MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG (Hrsg.): Multifunktionale, sprühfähige und biologisch abbaubare Folien auf Basis Nachwachsender Rohstoffe im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturpflanzenbau. Förderkennzeichen 22010307 (07NR103), Laufzeit: 15.10.2008 bis 31.3.2012. Schlussbericht zum Vorhaben. Halle-Wittenberg: Zentrum für Umweltwissenschaften (UZU), S. 1–62
- [23] FÜRLL, 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, Nr. 12, S. 19–29

- [24] GLOMB, M.; SPANNEBERG, R.; RADUSCH, H.-J.; ANTON, W., KOLESOV, I.; JAHN, R.; TISCHER, S.; BORITZKI, A. (2012): Multifunktionale, sprühfähige und biologisch abbaubare Folien auf Basis Nachwachsender Rohstoffe im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturpflanzenbau. FKZ 22010307 (07NR103), Laufzeit: 15.10.2008 bis 31.3.2012. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, März 2012. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (Hrsg.). Halle an der Saale: Zentrum für Umweltwissenschaften (UZU), Getr. Zählung
- [25] GRACO (2004): Xtreme™ Mix – Mehrkomponenten – Spritzgeräte Materialien. Einfach zu bedienende Mehrkomponenten-Spritzgeräte mit innovativer Regelung der Mischverhältnissenauigkeit. Rev. C 09/04. Maasmechelen, Belgien, 8 Seiten
- [26] H. WILHELM SCHAUMANN GMBH (2011): Grassilage-Fibel. Leitfaden zur erfolgreichen Grassilierung. BON SILAGE. Pinneberg, 23 Seiten
- [27] HERBSTREITH & FOX PEKTIN-FABRIKEN (2001): Die Spezialisten für Pektin. Ausgabe 3/1. Neuenbürg/Württ.: Herbstreith & Fox Pektin-Fabriken, 35 Seiten
- [28] KLEIN, W.; KRIZ, R.; LÖSCH, M. (2015): Sicherheit an Fahrsiloplanlagen. Zusammenge stellt für die Arbeitsgruppe II (Substratbereitstellung) im "Biogas Forum Bayern". Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e. V. (ALB) (Hrsg.). Freising. Biogas Forum Bayern, Nr. II - 27/2015, 13 Seiten
- [29] KUMMERLÖWE, C.; TRAUTZ, D.; HAUNER, M.; DEHNEL, G.; HÜSING, B.; VERGARA HERNANDEZ, M. E.; KIELHORN, A. (2012): Multifunktionale, sprühfähige und biologisch abbaubare Folien auf Basis Nachwachsender Rohstoffe im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturpflanzenbau. Teilbericht 2. In: MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG (Hrsg.): Multifunktionale, sprühfähige und biologisch abbaubare Folien auf Basis Nachwachsender Rohstoffe im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturpflanzenbau. Förderkennzeichen 22010307 (07NR103), Laufzeit: 15.10.2008 bis 31.3.2012. Schlussbericht zum Vorhaben. Halle-Wittenberg: Zentrum für Umweltwissenschaften (UZU), 85 Seiten
- [30] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E. V. (KTBL) (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Einblicke in Tierhaltung und Emissionen. Darmstadt: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH Münster-Hiltrup, 47 Seiten
- [31] LÜCK, E.; JAGER, M. (1995): Chemische Lebensmittelkonservierung. Stoffe, Wirkungen, Methoden. 3., überarb. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 273 Seiten, ISBN 3-540-57607
- [32] MASCHINEN- UND BETRIEBSHILFSRING AIBLING-MIESBACH-MÜNCHEN E. V. (2018): Verrechnungssätze 2018. Preise gelten nur für die Abrechnung zwischen Landwirten. Stand: 11.01.2018. Irschenberg. 68 Seiten
- [33] MASCHINEN- UND BETRIEBSHILFSRING STRAUBING-BOGEN E. V. (2018): Verrechnungssätze ab 2015. Straubing. URL: <https://www.maschinenring.de/straubing/leistungen/abrechnung/verrechnungssaetze> (Stand: 17.01.2018), 44 Seiten
- [34] NUßBAUM, H. (2005): Die luftdichte Abdeckung von Silagen. Aulendorf: Lehr- und Versuchsanstalt, Bildungs- und Wissenszentrum Aulendorf, 10 Seiten
- [35] NUßBAUM, H.-J. (2009): Biogassilage: Geht's auch ohne Folie? Top agrar, Jg.38, Nr. 9, S. 80–82

- [36] PAHLOW, G.; MUCK, R. E.; DRIEHUIS, F.; OUDE ELFERINK, S. J. W. H.; SPOELSTRA, S. F. (2003): Microbiology of Ensiling. Chapter 2. In: AL-AMOODI, L.; BARBARICK, K. A.; VOLENEC, J. J.; DICK, W. A.; BUXTON, D. R.; MUCK, R. E.; HARRISON, J. H. (Hrsg.): Silage Science and Technology. Agronomy, Jg. 42. Madison, WI: American Society of Agronomy, Inc.; Crop Science of America, Inc.; Soil Science Society of America, Inc., S. 31–94, ISBN 0-89118-151-2
- [37] PÉRONNE, D. (2016): Une bâche comestible. La France Agricole, Jg. 71, Nr. 3665, 21 Octobre, S. 35
- [38] PYROSCIENCE GMBH (2016): Oxygen Sensors Spots. URL: <http://www.pyro-science.com/contactless-fiber-optic-oxygen-sensor-spots.html> (Stand: 23.01.2018)
- [39] RECKLEBEN, Y. (2016): Entwicklung und Erprobung eines Prototyps zur großflächigen Ausbringung von Stärkeschaum auf Fahrtilos. Abschlußbericht - Kurzfassung zum Abschlussbericht. Osterrönfeld: Fachhochschule Kiel, Fachbereich Agrarwirtschaft, Fachbereich Agrarwirtschaft, Fachgebiet Landtechnik, 11 Seiten
- [40] RECKLEBEN, Y.; LINDENBECK, M.; BONN, W. (2017): Stärke statt Plastik. Optimale Siloabdeckung aus natürlichen Rohstoffen - Keine Verschwendung von Ressourcen. Forschungsprojekt der Fachhochschule Kiel, EKSH-Projektförderung, Energieforschung in Schleswig-Holstein, Projektzeitraum: 07/2014 bis 06/2016. Hrsg. v. Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein (EKSH). Fachhochschule Kiel. Kiel (EKSH-Projektbericht, 2/2017), 4 Seiten
- [41] REUBOLD, H. (2015): RKW Agri GmbH & Co. KG Silofolie RENOPLAN® weiß/weiß, 150 µm. In: EISE, M.; WOLF, S.; SCHOLZ, F.; NUßBAUM, H.; HÜNTING, K.; DENGEL, U. (Hrsg.). Groß-Umstadt: DLG e. V., Testzentrum Technik und Betriebsmittel. DLG-Prüfbericht, Nr. 6251F, 6 Seiten
- [42] RICHTER, W.; ZIMMERMANN, N.; ABRIEL, M.; SCHUSTER, M.; KÖLLN-HÖLLRIGL, K.; OSTERTAG, J.; MEYER, K.; BAUER, J.; SPIEKERS, H. (2009): Hygiene bayerischer Silagen. Validierung einer Checkliste zum Controlling am Silo; Endbericht, Stand: Juni 2009. 1. Aufl. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Schriftenreihe, Nr. 09. Freising-Weißenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 130 Seiten, ISSN 1611-4159
- [43] RÖDER, O.; REMMELE, E.; GASSNER, T. (2007): Entwicklung einer Siloabdeckung aus verfütterbaren Rohstoffen, Abschlussbericht für das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 73 Seiten, unveröffentlicht
- [44] ROEDER, O.; REMMELE, E.; KIRCHHOFF, V.; BARTEL, R.; SCHWARZ, W. (2011): Abdeckmaterial für Biomasse und Verfahren zu dessen Herstellung. Anmelder: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.; Technologie- und Förderzentrum Straubing, Anmeldedatum: 25.00.2007. Anmeldenummer: 07764515.8. Veröffentlichungsdatum: 29.06.2011, Veröffentlichungs-Nr.: EP 1 998 955 B1, B32B 27 / 00 (2006.01). Prioritätsdaten: PRC: DE; PRN: 2007000610; PRD: 20070125, 10 Seiten
- [45] RUBENSCHUH, U.; DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT E. V. (DLG) (2013): Schriftliche Mitteilung zur Säurelagerung von Silofolien vom 29.05.2013

- [46] SCHREIEDER, V.; SIMON, S.; EMBERGER, P.; REMMELE, E.; WIDMANN, B. (2016): EP 3 277 754 A1; Chemisches Mehrkomponentensystem zur Herstellung eines Abdeckmaterials, beispielsweise für Biomasse, oder eines sonstigen Funktions- und/oder Dekormaterials. Patentschrift. Anmeldedatum: 30.03.2016. Veröffentlichungsdatum: 06.10.2016. IPC-Klassifikation: C08L 89/00. München: Europäisches Patentamt, 64 Seiten
- [47] SIMON, S.; REMMELE, E.; RIEPL, H.; DÖRRSTEIN, J.; EMBERGER, P. (2015): Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe. Berichte aus dem TFZ, Nr. 42. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 143 Seiten, ISSN 1614-1008
- [48] SOMMER, I. (2012): Entwicklung und Charakterisierung von Schutzfolien aus Nachwachsenden Rohstoffen. Dissertation. Halle-Wittenberg: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Zentrum für Ingenieurwissenschaften, 115 Seiten
- [49] THÜRINGISCHES INSTITUT FÜR TEXTIL- UND KUNSTSTOFF-FORSCHUNG E. V. (2012): Multifunktionale, sprühfähige und biologisch abbaubare Folien auf Basis Nachwachsender Rohstoffe im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturpflanzenbau. Teilbericht 3. Stengel, K. (Mitarb.). In: MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT HALLE-WITTENBERG (Hrsg.): Multifunktionale, sprühfähige und biologisch abbaubare Folien auf Basis Nachwachsender Rohstoffe im landwirtschaftlichen und gärtnerischen Kulturpflanzenbau. Förderkennzeichen 22010307 (07NR103), Laufzeit: 15.10.2008 bis 31.3.2012. Schlussbericht zum Vorhaben. Halle-Wittenberg: Zentrum für Umweltwissenschaften (UZU), S. 1–19
- [50] THÜRINGISCHES INSTITUT FÜR TEXTIL- UND KUNSTSTOFF-FORSCHUNG E. V. (TITK) (2012): Multifunktionale, sprühfähige und biologisch abbaubare Folien auf Basis Nachwachsender Rohstoffe. Schlussbericht. Rudolstadt-Schwarza, 19 Seiten
- [51] UHL, A.; WEINFURTNER, S.; BRÜCKNER, S.; WEINERT, A.-T.; RÖBL, G.; ETTLE, T.; GASSNER, T.; REMMELE, E.; RÖDER, O.; OSTERTAG, J.; SPIEKERS, H. (2011): Entwicklung einer Siloabdeckung aus Nachwachsenden Rohstoffen. Berichte aus dem TFZ, Nr. 27. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 169 Seiten, ISSN 1614-1008
- [52] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (VDI) (2016): VDI 4630: - Vergärung organischer Stoffe Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 132 Seiten

Anhang

Anhang 1: Übersicht der Masseanteile der im Bericht beschriebenen Rezepturvarianten in %

Variante	Rapsöl	Latex	Wasser	Glycerin	Alginat	Pektin	CaSO ₄	Na ₃ PO ₄	Cellulosefasern		AEROSIL 380 F	NaCl	Chitosan	Natriumbenzoat	Sorbit	Ligninsulfonat
									BC200	FT400						
A.109 [^]	28,06*	11,22	56,12		1,12		1,35	4,00	1,68					0,56		
A.242	27,9*	11,16	55,80		1,12		1,34	4,00	1,67					0,56		
A.364	27,96*	11,19	55,93		1,12		1,34	2,00	1,68					0,56		
A.351		11,16		27,90	1,12		1,34	4,00	1,67					0,59		
W03	23,70	11,85	23,70	35,55	1,18		1,42	2,00	1,78					0,63		
W04	25,19	12,59	37,78	18,89	1,26		1,51	2,00	1,89					0,56		
P08		11,20	55,99	28,00		1,68	0,34		1,68					0,80		0,56
P12	31,84	15,92	39,80	7,96		1,11	0,19		2,39					0,77		
P13	30,60	15,30	38,26	10,71		1,07	0,23		2,30					0,73		0,77
P19		14,63	43,88	36,57		1,02	0,25		2,91					0,93		0,73
P20 = K02	41,12	18,69	28,04	5,61		0,93	0,19		2,24					0,96	2,24	
P20.3	42,07	19,12	28,68	5,74		0,96	0,19				0,09			0,93	2,29	
A.P21	41,08	18,67	28,01	5,60		0,93	0,19		2,24		0,09			0,93	2,24	
A.P26	40,67	18,48	27,73	5,55		0,92	1,11		2,22					1,48	1,85	
A.P27	36,97	16,81	33,61	5,04		1,18	0,50		2,02		1,01			0,84	2,02	
A.P28	30,23	15,12	37,79	10,58		1,06	0,23		2,27					1,97		0,76
A.P29	30,37	15,19	37,97	10,63		1,06	0,23		2,28					1,52		0,76
A.P30	46,45	18,58	27,87	46,45		0,93	0,22		2,79			1,57		0,93	2,23	
A.P31	31,34	15,67	39,17	7,83		1,10	0,19		2,35					0,78		
P34	42,07	19,12	28,68	5,74		0,96	0,19		2,29					0,96		
P36	40,50	18,40	27,60	5,50		0,90	0,20	0,50	2,60					2,00	2,20	
P37	40,52	18,42	27,62	5,52		0,92	0,18		2,58					2,03	2,21	
P38	41,00	18,70	28,00	5,60		0,90	0,40		2,20					0,90	2,20	
P39	40,60	18,50	27,70	5,50		0,90	0,40		2,20					2,00	2,20	
P40	40,40	18,40	27,60	5,50		1,30	0,40		2,20					2,00	2,20	
P41	40,29	18,32	27,47	5,49		1,28	0,73		2,20					2,01	2,20	
Ö06	32,00**	16,00	40,00	8,00		1,12	0,16		1,92					0,80		
W10	40,52	18,42	27,62	5,52	0,92		1,10	3,00	2,21					0,92	2,21	
W10.1	41,43	18,83	28,25	5,65	0,94		1,13	3,00	0,00					0,94	2,26	
W13		16,64	33,28	41,60	1,66		2,00	2,00	2,50	1,47				2,00		
W15	40,29	18,32	27,47	5,49	0,92		1,10	1,00	2,21					1,83	2,20	0,73
W16	40,52	18,42	27,62	5,52	0,92		1,10		2,21					1,47	2,21	
W17	40,52	18,42	31,31	5,52	0,92		1,10		2,21					1,47	2,20	
W18	40,37	18,35	27,52	5,50	0,92		1,10		2,57					2,00	2,19	
W19	40,07	18,21	27,32	5,46	0,91		1,09		2,73					1,83	2,20	
W20	40,37	18,35	27,52	5,50	0,92		1,10		2,20					2,08	2,27	
K04.1	41,59	18,90	28,36	5,67		0,95	0,19								1,94	
N06	36,10	16,41	24,61	12,74		0,98	0,33				6,89				2,23	
C01	40,82	18,55	27,83	5,57		1,11	0,37			0,93					2,23	
C02	41,04	18,66	27,99	5,60		0,93	0,19			0,75					2,24	

* Sonnenblumendöl

** Sojaöl

[^] Mit 30%iger Propionsäure abgespritzt

Anhang 2: Übersicht der Masseanteile der Bestandteile der Konservierungsmittelreihe (K--) basierend auf Rezeptur P20 in %

Variante	Rapsöl	Latex	Wasser	Glycerin	Natrium- alginat	Pektin	Calcium- sulfat	Natrium- phosphat	BC200	AEROSIL 380 F	Aktiv- kohle	Natrium- chlorid	Chitosan	Natrium- benzoat	Sorbit	Tannin- säure
K00	41,51	18,87	28,30	5,66		0,94	0,19		2,26						2,26	
K01	41,20	18,73	28,09	5,62		0,94	0,19		2,25					0,75	2,25	
K02	41,12	18,69	28,04	5,61		0,93	0,19		2,24					0,93	2,24	
K03	40,89	18,59	27,88	5,58		0,93	0,19		2,23					1,49	2,23	
K04	40,67	18,48	27,73	5,55		0,92	0,18		2,22					2,03	2,22	
K05	40,48	18,40	27,60	5,52		0,92	0,18		2,21					2,48	2,21	
K06	40,77	18,53	27,80	5,56		0,93	0,19		2,22					0,75	2,22	1,02
K07	40,67	18,49	27,73	5,55		0,92	0,18		2,22					1,00	2,22	1,02
K08	40,47	18,39	27,59	5,52		0,92	0,18		2,21					1,50	2,21	1,01
K09	40,26	18,30	27,45	5,49		0,91	0,18		2,20					2,00	2,20	1,01
K10	40,05	18,21	27,31	5,46		0,91	0,18		2,18		2,24			2,50	2,18	1,00
K11	41,12	18,69	28,04	5,61		1,12	0,19				2,24			0,75	2,24	
K12	41,02	18,65	27,97	5,59		1,12	0,19				2,24			0,99	2,24	
K13	40,89	18,59	27,88	5,58		0,93	0,19				2,23			1,49	2,23	
K14	40,67	18,48	27,73	5,55		0,92	0,18				2,22			2,03	2,22	
K15	40,48	18,40	27,60	5,52		0,92	0,18				2,21			2,48	2,21	
K16	40,77	18,53	27,80	5,56		0,93	0,19		2,22				0,75		2,22	1,02
K17	40,52	18,42	27,63	5,53		0,92	0,18		2,21				0,99		2,21	1,01
K18	40,32	18,33	27,49	5,50		0,92	0,18		2,20				1,50		2,20	1,01
K19	40,18	18,26	27,40	5,48		1,10	0,18		2,19				2,01		2,19	1,00
K20	39,99	18,18	27,26	5,45		1,09	0,18		2,18				2,49		2,18	1,00
K21	41,35	18,80	28,20	5,64		1,13	0,38					1,50		0,75	2,26	
K22	41,22	18,74	28,11	5,62		1,12	0,37					1,50		1,07	2,25	
K23	41,04	18,66	27,99	5,60		1,12	0,37					1,49		1,49	2,24	
K24	40,84	18,56	27,84	5,57		1,11	0,37					1,49		1,99	2,23	
K25	40,63	18,47	27,70	5,54		1,11	0,37					1,48		2,49	2,22	
K26	39,58	17,99	26,98	7,20		1,08	0,36		2,16			1,49		1,01	2,16	
K27	39,38	17,90	26,85	7,16		1,07	0,36		2,15			1,97		1,00	2,15	
K28	39,17	17,81	26,71	7,12		1,07	0,36		2,14			2,49		1,00	2,14	
K29	38,97	17,71	26,57	7,08		1,06	0,35		2,13			3,01		0,99	2,13	
K30	38,76	17,62	26,43	7,05		1,06	0,35		2,11			3,52		0,99	2,11	
K31	34,81	15,82	23,73	12,66		0,95	0,32		1,90			7,91			1,90	
K32	34,40	15,64	23,46	12,51		0,94	0,31		1,88			8,99			1,88	
K33	34,00	15,46	23,18	12,36		0,93	0,31		1,85			10,05			1,85	
K34	37,48	17,04	25,55	6,81		1,02	0,34				2,04				2,04	
K35	34,81	15,82	23,73	12,66		0,95	0,32				1,90				1,90	
K36	34,48	15,67	23,51	12,54		0,94	0,31				1,90				1,88	0,94
K37	40,95	18,62	27,92	5,58		1,12	0,37			2,23				0,97	2,23	
K38	41,18	18,72	28,08	5,62		0,94	1,12			1,12				0,97	2,25	
K39	40,97	18,62	27,94	5,59		0,93	1,12		0,37					1,12	2,23	

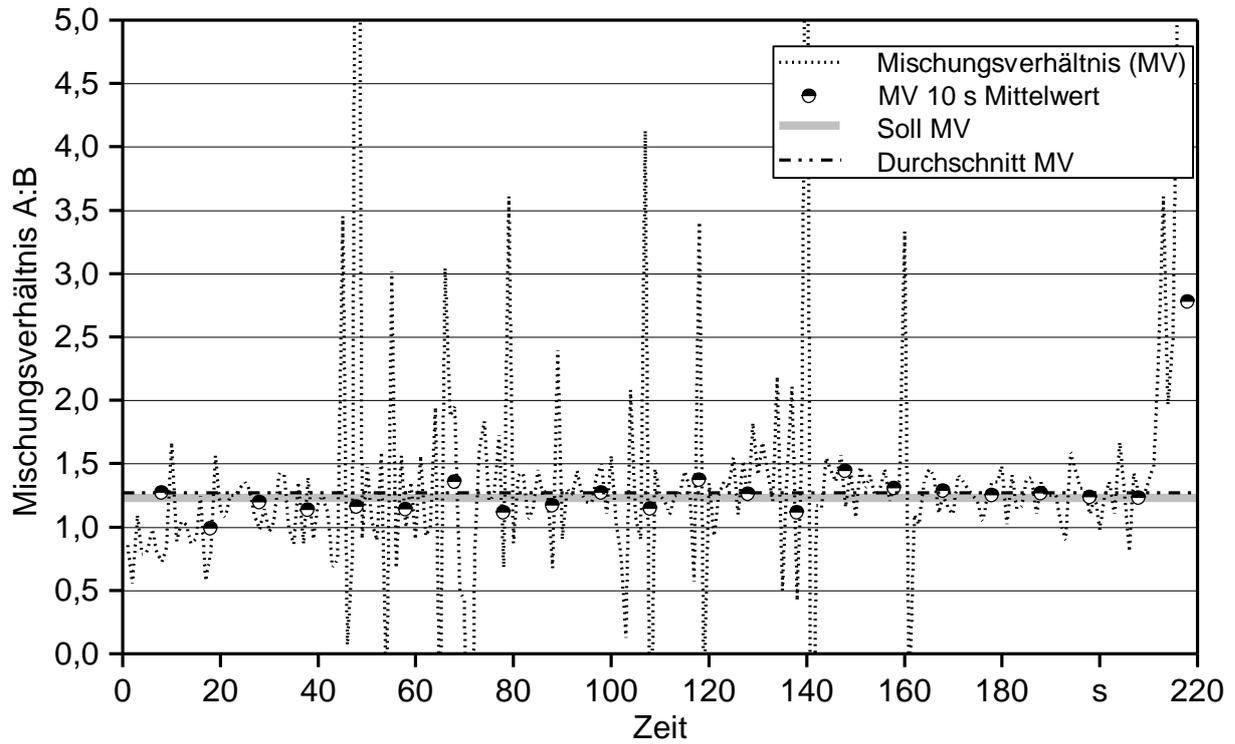
Anhang 3: *Ernährungsphysiologische Untersuchung der Grassilagen in den Gärgläsern nach dreimonatiger Lagerung im Freien – Teil 1*

Bezeichnung	Einheit	P20 Wiederholung 1	P20 Wiederholung 2	K35 Wiederholung 2	K35 Wiederholung 3
Rohnährstoffe					
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	206	247	229	214
Rohasche (XA)	g/kg TM	185	119	198	191
Rohprotein (XP)	g/kg TM	222	180	229	220
Rohfaser (XF)	g/kg TM	260	287	245	242
Rohfett (XL)	g/kg TM	53	35	50	67
ADFom	g/kg TM	318	374	295	295
Gärparameter					
Milchsäure	g/kg TM	13	22	7	4
Essigsäure	g/kg TM	40	16	37	33
Propionsäure	g/kg TM	7	0	7	6
Buttersäure	g/kg TM	39	21	33	30
pH-Wert		6,2	4,9	7,3	6,4
DLG Punkte		8	27	13	16
Weitere Parameter					
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	13	2	11	9
Ammoniak-N an Gesamt-N	g/kg TM	29	5	25	21
Ethanol, Alkohol	g/kg TM	1	2	1	1

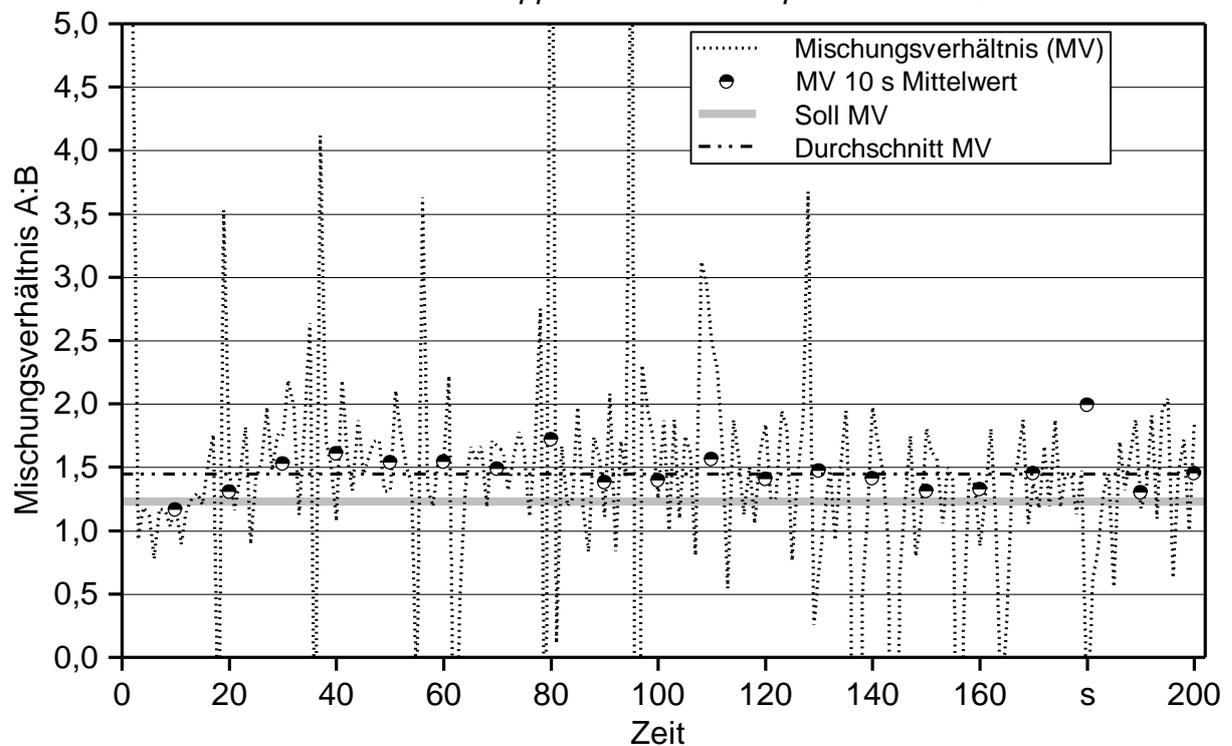
Anhang 4: *Ernährungsphysiologische Untersuchung der Grassilagen in den Gärgläsern nach dreimonatiger Lagerung im Freien – Teil 2*

Bezeichnung	Einheit	Referenz Wiederholung 1	Referenz Wiederholung 2	Referenz Wiederholung 3
Rohnährstoffe				
Trockenmasse (TM)	g/kg FM	250	248	260
Rohasche (XA)	g/kg TM	147	182	182
Rohprotein (XP)	g/kg TM	259	242	254
Rohfaser (XF)	g/kg TM	230	243	236
Rohfett (XL)	g/kg TM	50	48	51
ADFom	g/kg TM	275	289	283
Gärparameter				
Milchsäure	g/kg TM	47	13	23
Essigsäure	g/kg TM	45	22	21
Propionsäure	g/kg TM	0	5	3
Buttersäure	g/kg TM	3	54	41
pH-Wert		5,9	6,4	5,8
DLG Punkte		85	-1	7
Weitere Parameter				
Ammoniak (NH ₃)	g/kg TM	4	8	7
Ammoniak-N an Gesamt-N	g/kg TM	8	17	14
Ethanol, Alkohol	g/kg TM	1	2	2

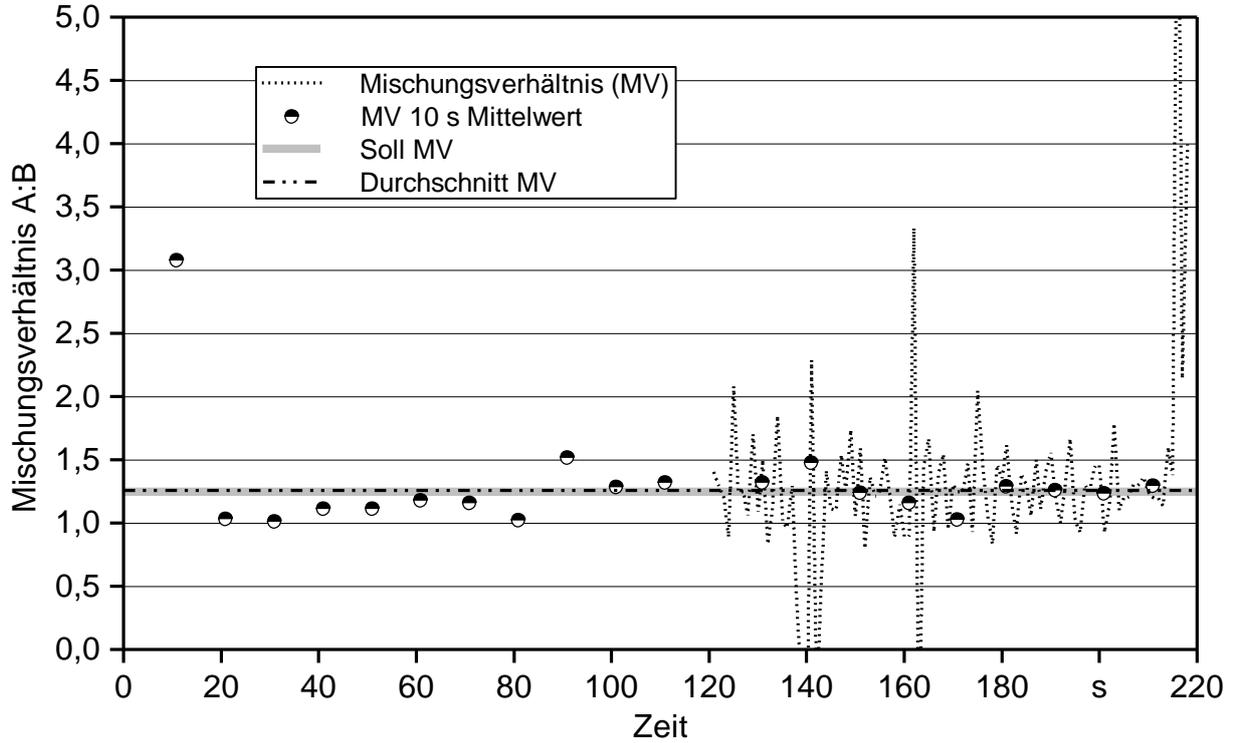
Anhang 5: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur W10 auf Silo Nr. 1



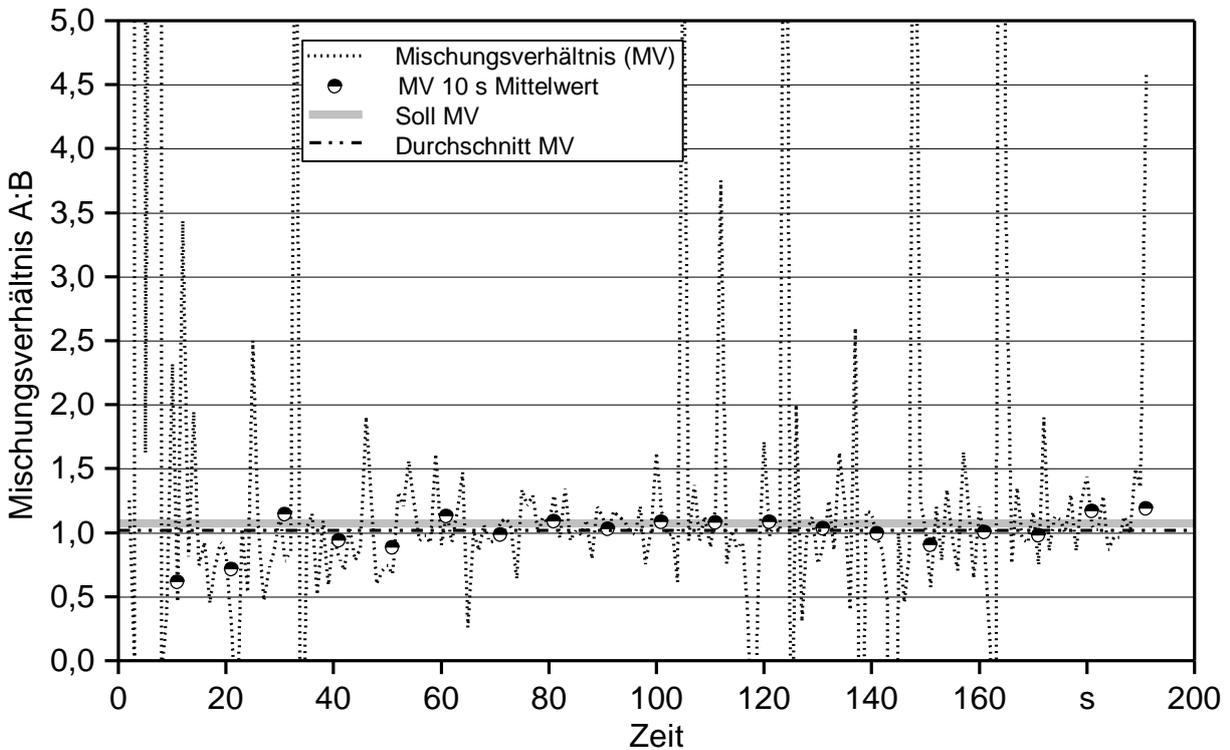
Anhang 6: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur W10 auf Silo Nr. 2



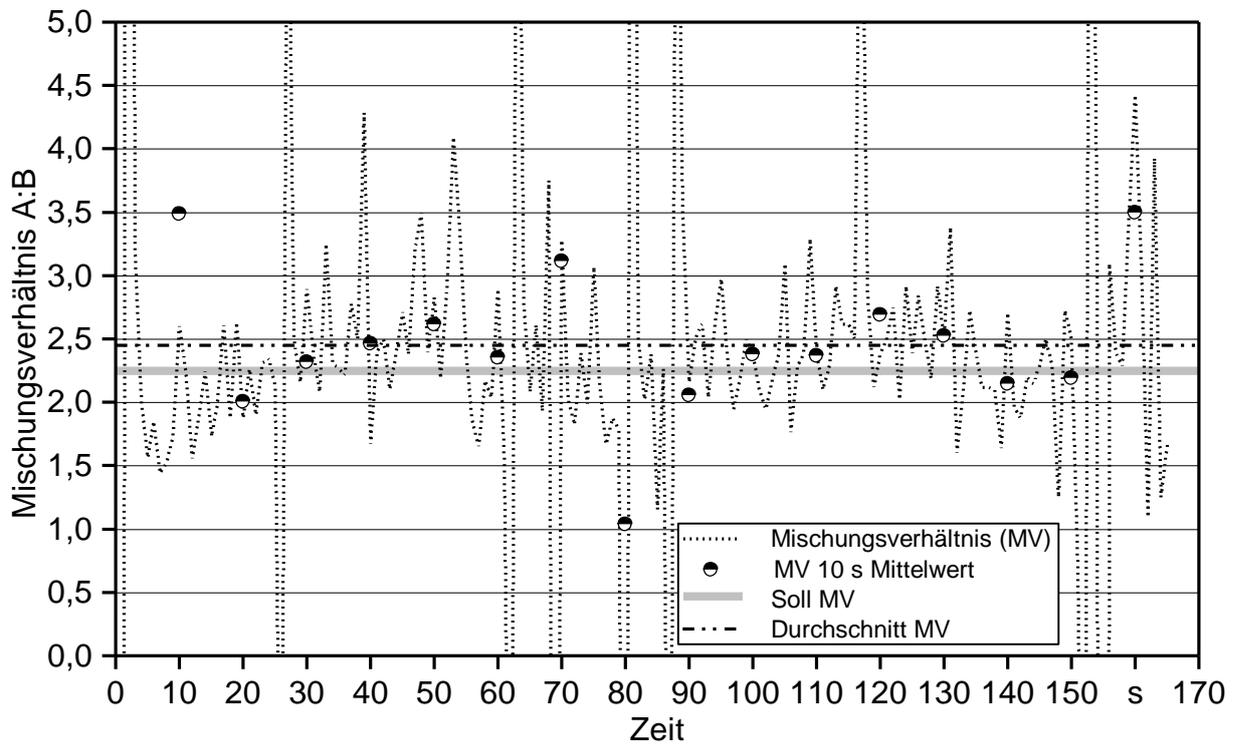
Anhang 7: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur P20 auf Silo Nr. 4



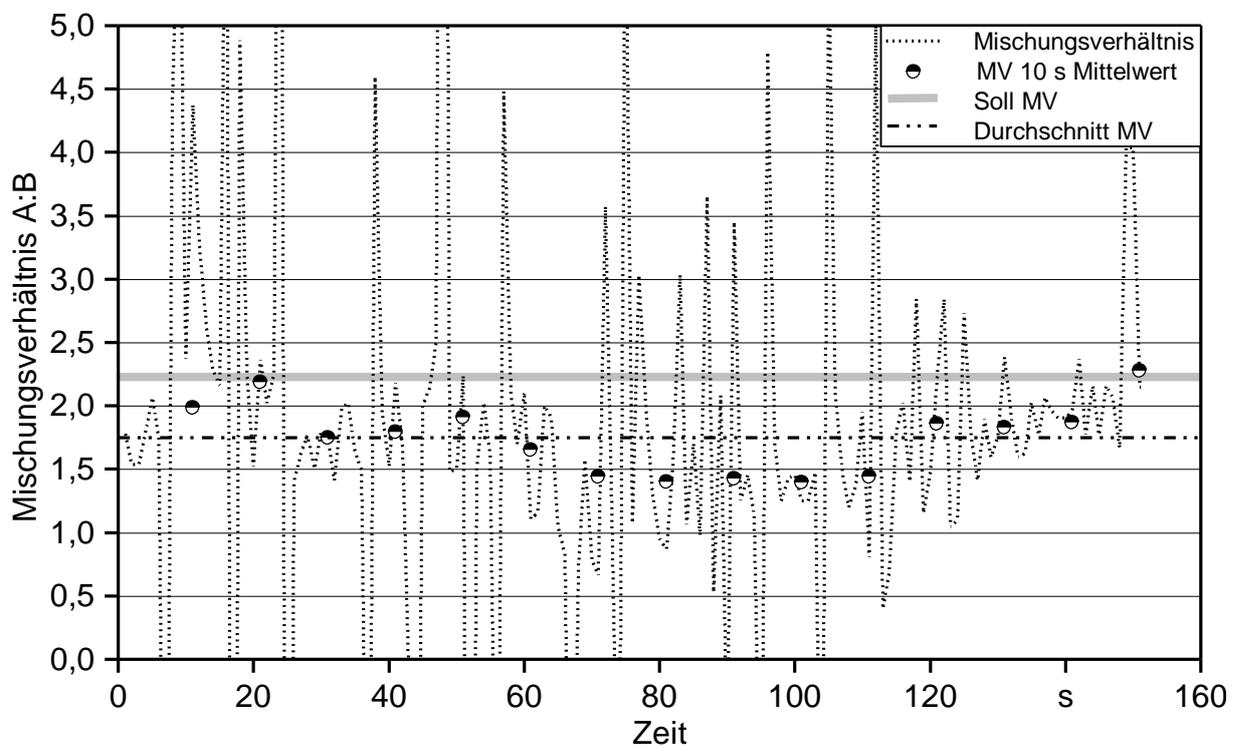
Anhang 8: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur K35 auf Silo Nr. 5



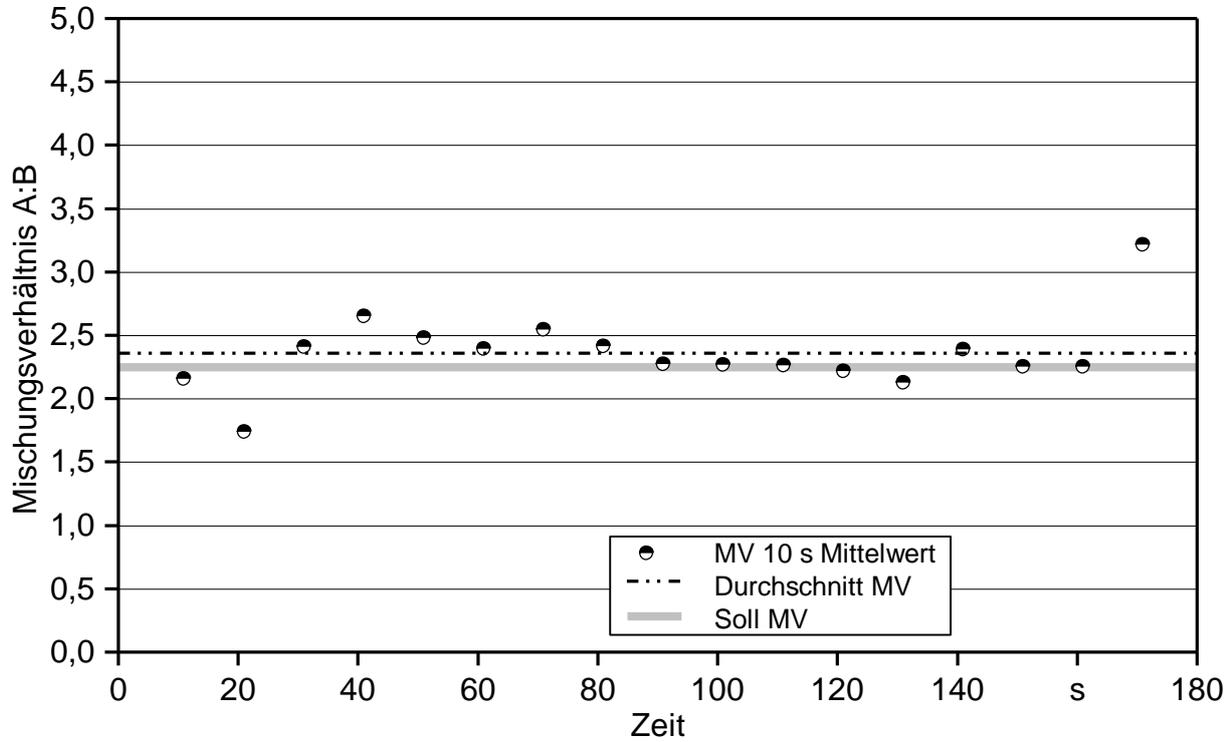
Anhang 9: Applikation Miniaturesilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur A.242 auf Silo Nr. 8



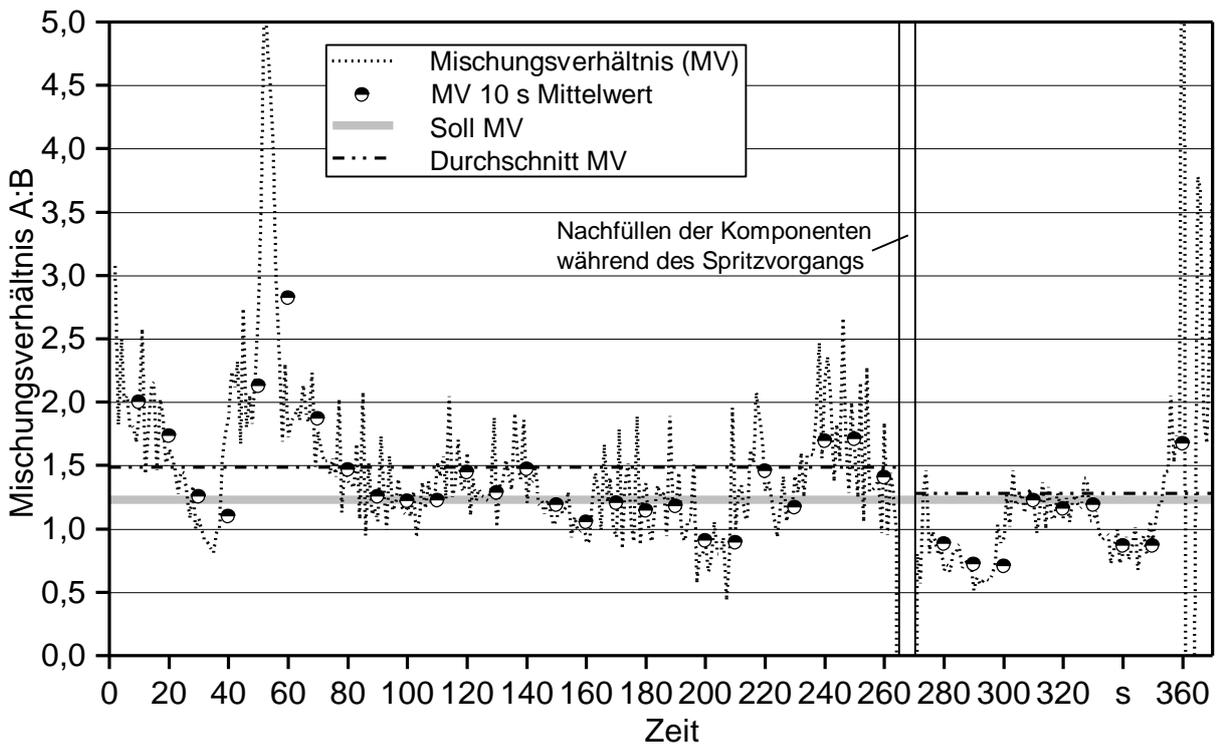
Anhang 10: Applikation Miniaturesilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur A.109 auf Silo Nr. 9



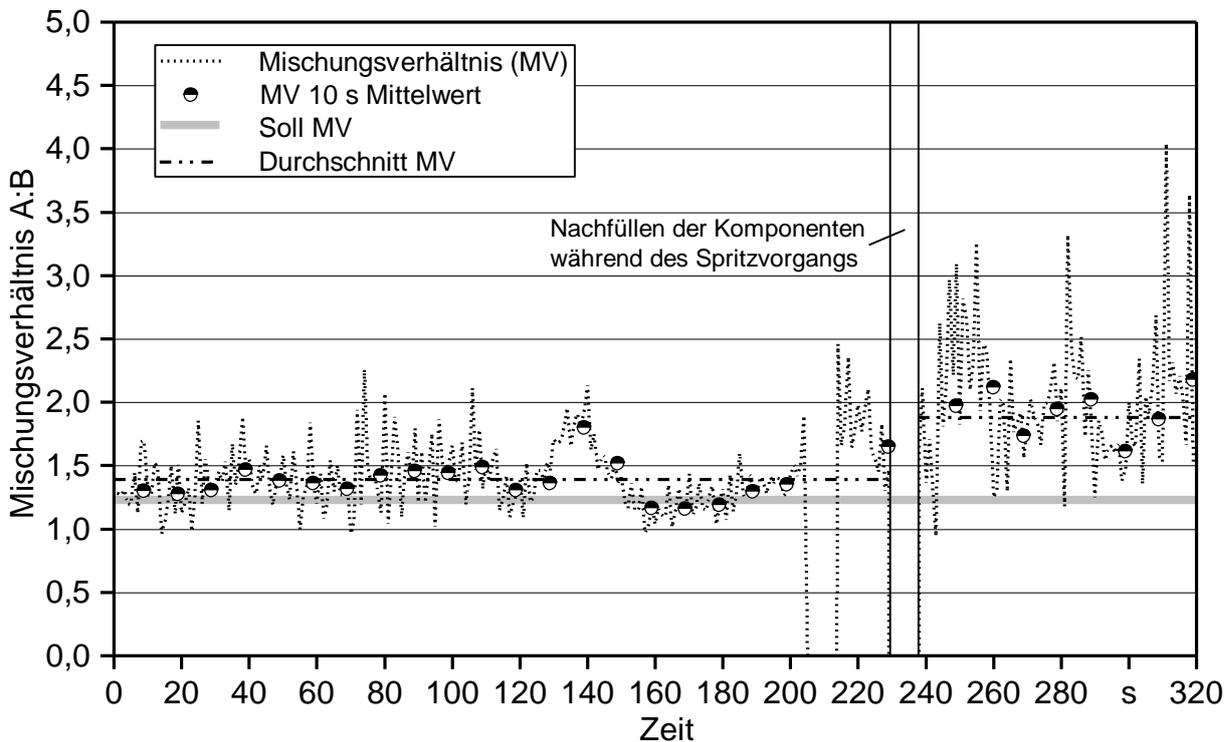
Anhang 11: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 1 – erreichtes Mischungsverhältnis im Laufe der Applikation der Rezeptur A.242 auf Silo Nr. 11 (sekundäre Aufzeichnung des Mischungsverhältnisses aufgrund eines Defekts nicht möglich)



Anhang 12: Applikation Miniatursilos – Versuchsreihe 12 – erreichtes Mischungsverhältnis bei der Applikation des Miniatursilos Nr. 5 mit Rezepturvariante W20



Anhang 13: Erreichtes Mischungsverhältnis bei der Applikation des Miniatursilos Nr. 6 mit Rezepturvariante W20



Anhang 14: Gasausbeute und CH₄-Anteil unterschiedlicher Stoffgruppen nach BASERGA (1998) [2]

Stoffgruppe	Gasausbeute in l/kg OS*	CH ₄ -Anteil in Vol.-%
Kohlenhydrate	790	50
Rohprotein	700	71
Rohfett	1.250	68

* OS = Originalsubstanz

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors

15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse aus bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
21	Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufen I und II
32	Pflanzenöltaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft

33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
39	Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
40	Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
41	Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605
42	Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis nachwachsender Rohstoffe
43	Brennstoffqualität von Holzpellets
44	Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
45	ExpResBio – Methoden
46	Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
47	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
48	Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayेरische Anbaubedingungen
49	Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
50	Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode
51	Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor

52	Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
53	Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
54	Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
55	Lagerung von Holzhackschnitzeln
56	Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
57	Optimierungspotentiale bei Kaminöfen – Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
58	Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife

