



MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWEERTES
ÖSTERREICH

HBLFA RAUMBERG-GUMPENSTEIN
LANDWIRTSCHAFT

Abschlussbericht

Silagesensor

Projekt Nr./Wissenschaftliche Tätigkeit Nr. 101073

Anwendung von opto-chemischen Verfahren zur Messung der Sauerstoffkonzentration in der Gärgasatmosphäre von Grassilage während der Gärphase sowie unter Luftstress nach Siloöffnung

Application of opto-chemical methods for measurement of oxygen-concentration in gas atmosphere of grass-silage during fermentation period and under aerobic stress conditions

Projektleitung:

Ing. Reinhard Resch, HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Projektmitarbeiter:

Medardus Schweiger, HBLFA Raumberg-Gumpenstein
Gregor Huber, HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Projektpartner:

Joanneum Research - MATERIALS, Weiz
Coveris Flexibles Austria GmbH, Langkampfen
Futtermittellabor Rosenau, Wieselburg-Land

Projektlaufzeit:

2015 – 2016

raumberg-gumpenstein.at



IMPRESSUM

Herausgeber

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft (HBLFA)

Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft

Direktor

Dir. Mag. Dr. Anton Hausleitner

Leiter für Forschung und Innovation

Dipl. ECBHM Dr. Johann Gasteiner

Für den Inhalt verantwortlich

die Autoren

Redaktion

Ing. Reinhard Resch

Druck, Verlag und © 2017

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein

A-8952 Irdning-Donnersbachtal

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Zusammenfassung	4
Summary	5
1. Einleitung.....	6
2. Material und Methoden.....	8
2.1 Sensortechnik von Joanneum Research.....	8
2.2 Exaktversuch der HBLFA Raumberg-Gumpenstein.....	8
2.2.1 Ausgangsmaterial.....	9
2.2.2 Versuchsanlage	9
Futterernte	9
Installation opto-chemische Sensorspots	10
Ballenwicklung mit transparenter Stretchfolie.....	10
Installation der opto-chemischen Faserkabelsensoren	11
Installation konventionelle Temperaturmesstechnik.....	12
Messung Ballengewichtsveränderung.....	13
2.2.3 Haltbarkeitstest	13
2.2.4 Verarbeitung von opto-chemischen Messdaten	14
2.2.5 Probebeziehungen für qualitative Analysen	15
2.2.6 Laboranalysen	15
3. Ergebnisse und Diskussion	16
3.1 Sauerstoffdurchlässigkeit der Stretchfolie.....	16
3.2 Verdichtung der Versuchsrundballen	16
3.3 Futter- und Gärqualität der Rundballensilage	16
3.4 Gärverlauf im Siloballen	17
3.5 Massenverluste bei der Rundballensilage	17
3.6 Temperaturentwicklung im Silorundballen	18
3.6.1 Temperaturmessung mit Sonden.....	18
3.6.2 Temperaturmessung mit Joanneum Sensorik.....	19
3.7. Sauerstoffentwicklung im Silorundballen	20
Schlussfolgerungen.....	22
Literatur	22
Abbildungsverzeichnis	24
Tabellenverzeichnis	24

ZUSAMMENFASSUNG

In Österreich stellt Gärfutter in Form von Grassilage und Maissilage die bedeutendste Futterquelle für Wiederkäuer dar, daher nimmt die Qualität der Silagen eine zentrale Rolle auf landwirtschaftlichen Betrieben mit Grünland- und Viehwirtschaft ein. Das Sauerstoffangebot bestimmt wesentlich die Lebensbedingungen von Mikroorganismen und damit die Art der Gärung von Futterpflanzen sowie die Stabilität der vergorenen Futterkonserven. Die Messung der Sauerstoffkonzentration (O_2) konnte im Gärfutter bislang nur durch destruktive Beprobungen oder durch indirekte Rechenmodelle anhand des Sauerstoffverbrauchs gewisser Mikroorganismen ermittelt werden. Nicht-invasive Methoden der Sauerstoffmessung mit Hilfe von Sensoren stehen der Forschung erst seit wenigen Jahren zur Verfügung. Die Forschungseinrichtung Joanneum Research - Materials, Forschungsgruppe „Sensoren und funktionales Drucken“, hat opto-chemische Sauerstoffsensoren entwickelt. In einem kooperativen Ansatz wurde gemeinsam mit der HBLFA Raumberg-Gumpenstein ein Versuchskonzept erstellt, wo zwei unterschiedliche opto-chemische Sensortypen, nämlich Sensorspots und Faserkabelsensoren, in einem Exaktversuch unter Praxisbedingungen (Silierversuch S-64) in einem Silorundballen mit Grassilage für die Sauerstoffmessung eingesetzt wurden. Mehrere opto-chemische Sensorspots wurden vor der Wickelung mit transparenter Stretchfolie an der Rundballenoberfläche auf der Netzbindung angebracht. Die Sauerstoffmessung erfolgte dann über einen opto-elektronischen Messkopf, der das Sensorsignal durch die transparente Folie ungestört erfassen konnte, ohne die Folie zu beschädigen. Die opto-chemischen Faserkabelsensoren wurden gemeinsam mit einem Thermistor in Stahlrohren mit poröser Metallkappe eingebaut, um die Sauerstoffkonzentration und die Temperatur auch im Balleninneren in unterschiedlichen Tiefenstufen messen zu können. Die Stahlrohre wurden nach innen gegen die Glasfaserkabel und nach außen gegen die Silofolie absolut luftdicht abgedichtet, um O_2 -Störungen von außen zu unterbinden. Ein Teil der Sensoren wurde für die Messung manuell mit einem akkubetriebenen Handheldgerät betreut. Für drei Sensoren wurde eine eigene Messtechnik konstruiert, um die Sauerstoffkonzentration quasi permanent messen zu können.

Die weltweit ersten Versuchserfahrungen zum Einsatz von opto-chemischen Sauerstoffsensoren von Joanneum Research in Grassilage brachten wichtige Erkenntnisse über die Performance der verwendeten Sensoren und Messtechnik und plausible Messdaten der Sauerstoffkonzentration zu Beginn der Silierung, während der Lagerungsphase und insbesondere nach Siloöffnung unter Luftstress. Der Sauerstoff wurde nach Fertigstellung des Siloballens innerhalb von 1:35 Stunden fast vollständig verbraucht. Nach Siloöffnung kam es zu mehr oder weniger starken Anstiegen in der Sauerstoffkonzentration und es konnten deutliche Differenzen in der Zunahme der O_2 -Konzentration in Abhängigkeit der Distanz zur geöffneten Ballenseite beobachtet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass sich die eingesetzte opto-chemische Messtechnik für Exaktversuche als praxistaugliche Technologie eignet, um die Sauerstoffkonzentration in Gärsubstraten verfolgen zu können.

Anhand der Erfahrungen aus dem Versuch könnte künftig eine noch exaktere Anpassung der Implementierung der Sensorsysteme an die Erfordernisse solcher Versuche vorgenommen werden, um diese Messtechnik für verschiedene Fragestellungen der Gärungsforschung anwenden zu werden.

Schlüsselwörter: opto-chemische Sensortechnik, Sauerstoffkonzentration, Gärfutter, Grassilage

SUMMARY

Grass and maize silage are the most important forage resources for Austrian ruminants, therefore silage quality has a central function on dairy farms. Oxygen supply determine life conditions of microorganism and the way of fermentation of conserved forage plants, also stability of fermentated silage. So far measurement of oxygen-concentration (O_2) in silage required invasive sampling or statistical modelling based on O_2 -consumption of microorganism. For research non-invasive methods of oxygen-measurement via sensors are available since a few years. The Styrian research centre Joanneum Research-Materials (Research Group “Sensors and Functional Printing”) has developed opto-chemical oxygen sensors. In a cooperative approach Joanneum Research and AREC Raumberg-Gumpenstein designed an exact trial, where two different opto-chemical types of oxygen sensors (sensor spot and sensor on glass fibre tips) were installed in round baled grass silage and tested under practical conditions. Several opto-chemical sensor spots were installed onto the bounded net of the round bale surface before wrapping. Oxygen measurement was carried out via electronical detector head, which could perfectly read the sensor signal through six layers of transparent stretchfilm without damaging the foil. The opto-chemical sensors on the tips of glass fibre were implemented in stainless steel tubes in combination with a temperature sensor (thermistor) and protected with a porous metal cap in front of the tube. The tubes were inside sealed against air diffusion by epoxy. After sensor-tube installation in different depths (10, 50, 90 cm) of the bale, sealing outside the tube was completed via primer spray and liquid isolation mass. Some sensors were manually managed with an accumulation operated handheld device to measure oxygen values. For three opto-chemical sensors a specific measurement device was designed from Joanneum Research to receive oxygen data continuously.

The worldwide first experiences in a silage field experiment with calibrated opto-chemical oxygen sensors from Joanneum Research provided important knowledge about sensor performance of installed technique and plausible data of oxygen-concentrations at the beginning and during fermentation process but also after partial opening of wrapped bale surface at the test of aerobic silage stability. After wrapping, oxygen was nearly totally consumed within 1:35 hours. After partial removal of wrapped stretchfilm, oxygen concentration increased differently in dependence of distance to unsealed surface. However, results also showed that optochemical sensor-technology is absolutely suitable for oxygen measurement in exact silage trials.

Based on our findings a more precise and demand oriented implementation of such sensor systems could be developed for future questions in the field of fermentation research.

Key words: opto-chemical sensor-technology, oxygen-concentration, grass silage, ensilage

1. EINLEITUNG

Wenn keine frischen Futtermittel zur Verfügung stehen sind lagerstabile Futterkonserven für viehhaltende Betriebe eine essentielle Voraussetzung für die Ernährung der Nutztiere mit hygienisch einwandfreien Futtermitteln. Es gibt mehrere Möglichkeiten um Futtermittel vor einem raschen mikrobiellen Verderb zu bewahren. Eine Variante ist die Vergärung von Futtermitteln. In Österreich werden 75 % des Grundfutters in Form von Gärfutter (Gras- und Maissilage) konserviert (Resch, 2017). Nach Gross und Riebe (1974) werden bei der Gärfutterbereitung den Mikroorganismen die Lebensmöglichkeiten durch natürliche oder teilweise künstliche Säuerung unter Luftabschluss entzogen. Gärende Mikroorganismen sind nach Fuchs (2006) überall dort zu finden wo es abbaubare organische Verbindungen gibt, aber der Sauerstoff oder ein Elektronenakzeptor für eine anaerobe Atmung fehlen. Die luftdichte Abschottung eines Futtermittels vor Luftsauerstoff ermöglicht überhaupt erst den Gärprozess und schützt im Laufe der Lagerung des Gärfutters vor aerobem Verderb. Zu den Mikrobengruppen, die im Gärfutter vorkommen können, beschrieb Beck (1966) deren Verhalten zum Sauerstoff. Von den obligat anaeroben Sporenbildnern (Clostridien) über fakultative Arten, die unter aeroben und anaeroben Bedingungen überleben können, kommen im Gärfutter auch obligat aerobe Gruppen wie die Schimmelpilze vor. Das Sauerstoffangebot bestimmt somit wesentlich die Lebensbedingungen der Mikroorganismen und damit die Art der Gärung. Die erwünschte Milchsäuregärung und auch die Säuerungsgeschwindigkeit stehen in engem Zusammenhang mit der raschen Schaffung von anaeroben Bedingungen.

In der landwirtschaftlichen Praxis werden unterschiedliche Verfahren der Gärfutterkonservierung angewendet. Am stärksten verbreitet sind Flachsilos mit oder ohne Seitenwänden, günstigerweise auf befestigtem Boden, gefolgt von zylindrischen oder quaderförmigen Pressballensilagen und schließlich Monolithsilos in Hoch- bzw. Tiefbauweise, wo es leider immer wieder zu Gärgasunfällen mit tödlichem Ausgang kam. Eine möglichst luftdichte Versiegelung des einsilierten Futters soll durch Abdeckung der Oberfläche mittels Kunststofffolien gewährleistet werden. Im Fall der kleinen Pressballen kann diese Versiegelung sehr rasch unmittelbar nach dem Pressen erfolgen, bei größeren Volumen kann es mehr als einen Tag dauern bis die Folie aufgezogen wird. Nach Gross und Riebe (1974) ist der Luftsauerstoff nach der Silierung unter günstigen Verhältnissen nach einem Gärtag verbraucht, wodurch die Tätigkeit der obligat aeroben Organismen rasch zu Ende geht. In Bezug auf die erstrebenswerte optimale Milchsäuregärung wäre eine rasche Reduktion von Sauerstoff in der Gärfutterumwelt wünschenswert, um Gärungsverluste durch aerobe Mikroorganismen minimieren zu können.

Sauerstoffkonzentrationen wurden in der Gärgasatmosphäre von Grassilagen bisher kaum gemessen. Um den Einfluss von Sauerstoff auf die Gärung beantworten zu können wurden von (Williams *et al.*, 1994) verschiedene Gasgemische mit unterschiedlicher Sauerstoffkonzentration in Gärbehälter eingeleitet, um deren Effekte zu beobachten. Green *et al.* (2012) setzten nicht-invasive, kabellose elektrochemische Sensortechnologie in zwei Maissilagevarianten ein, um zeitliche und räumliche Messdaten der Sauerstoffkonzentration und Temperatur zu erhalten. Sauerstoff übt nach der Siloöffnung einen entscheidenden Effekt auf die Stabilität und die Geschwindigkeit des Verderbs von Gärfutter aus. Gasdiffusion in ein Gärfutter wird nach Rees *et al.* (1983) bzw. Roß *et al.* (2008) durch die Porosität beeinflusst. Parsons (1991), Pitt und Muck (1993) sowie McGechan und Williams (1994) simulierten modellhaft den Einfluss von Faktoren auf die zeitliche O₂-Konzentrationsveränderung in unterschiedlicher Tiefe hinter dem Siloanschnitt und schufen damit einen theoretischen Hintergrund um mikrobiologische Prozesse in Verbindung mit Temperaturerhöhung und Massenverlust von luftausgesetztem Gärfutter erklären zu können.

Mit Hilfe von opto-chemischen Sensoren besteht ebenfalls die Möglichkeit die Sauerstoffkonzentration im Gärgas minimal-invasiv bzw. sogar nicht-invasiv zu messen. Da es zurzeit keine wissenschaftlichen Studien über die zerstörungsfreie Messung der Sauerstoffkonzentration in Gärgasen von Grassilagen mittels opto-chemischer Sensortechnologie gibt, wurde von Joanneum Research - Materials (Forschungsgruppe „Sensoren und funktionales Drucken“) und der HBLFA Raumberg-Gumpenstein ein Forschungsprojekt initiiert, um diese Messtechnologie für die Gärungsforschung zu testen. Die Messung der Sauerstoffkonzentration an der

Silageoberfläche mittels Sensorspots funktioniert in Kombination mit einer transparenten Stretchfolie, welche erstmals an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein getestet wurde (Resch, 2014) und mittlerweile bei der Siloballenproduktion in der Praxis eingesetzt wird.

In diesem Forschungsprojekt stehen vordergründig die Praxistauglichkeit und Genauigkeit der optochemischen Messtechnologie im Exaktversuch unter Praxisbedingungen für den Bereich Gärfutter sowie die Veränderungen der Sauerstoffkonzentration im Gärgas in den Zeiträumen unmittelbar nach der Folienwicklung bzw. nach der Siloöffnung im Focus.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 SENSORTECHNIK VON JOANNEUM RESEARCH

Von Joanneum Research wurden dazu zwei Ausführungen von sensitiven Elementen für die Sauerstoffmessung entwickelt (Köstler und Tscherner, 2016). Einerseits waren das Oberflächensensoren, sogenannte Sensorspots mit ca. 1 cm Durchmesser auf Basis eines in einer Polymermatrix immobilisierten phosphoreszierenden Sensorfarbstoffs (Tscherner *et al.*, 2016), welche unmittelbar unterhalb der transparenten Stretchfolie auf dem Silorundballen angebracht und nicht-invasiv durch die Folie hindurch ausgelesen wurden. Andererseits wurden Einstechsonden konstruiert, bei denen die sensitiven Elemente in einem Stahlrohr mit einer aufgeschraubten porösen Metallkappe installiert waren (Abbildung 2), um die Sauerstoffkonzentration im Inneren eines Siloballens messen zu können. Die Messung der Temperatur erfolgte bei den Faserkabelsensoren mit einem Thermistor (Tscherner *et al.*, 2016), der nahe am opto-chemischen Sauerstoffsensor positioniert wurde. Die optische Verbindung der sensitiven Elemente mit der Auswerteelektronik wurde mit Glasfaserkabeln hergestellt. Diese waren an die Messeinheiten für permanente oder manuelle Messung anzuschließen. Die Abdichtung zwischen Stahlrohr und Glasfaser erfolgte mittels 3D-gedrucktem Rohreinsatz aus Epoxy-Harz und mehreren mit Laborfett („Apiezon Grease T“) eingestrichenen O-Ringen (Abbildung 1), damit kein Sauerstoff von außen an den Sensor kommen konnte. Die beiden Drähtchen zum Thermistor wurden durch kleine Bohrungen in den Epoxy-Einsatz geführt und dort mittels Epoxy-Kleber („Araldite 2012“) verklebt. Der Epoxy-Einsatz wurde dann vorne in das Stahlrohr geschoben und schlussendlich die poröse Schutzkappe aufgeschraubt.



Abbildung 1: Faserkabelsensoren für Silierversuch S-64



Abbildung 2: Poröse Metallkappe über Sensortechnik

2.2 EXAKTVERSUCH DER HBLFA RAUMBERG-GUMPENSTEIN

Tabelle 1: Untersuchungen im Exaktversuch - Versuchsplan

Variante	Untersuchungen
Ballen 1	Sauerstoffkonzentration und Temperatur in unterschiedlichen Bereichen Weender-Analyse, Gärqualität, Mikrobiologie nach dem Haltbarkeitstest am Versuchsende
Ballen 2	Permanente Temperaturmessung in den gleichen Bereichen wie im Ballen 1 bis Versuchsende
Ballen 3	Gewichtsmessung zu Versuchsbeginn, Siloöffnung und Versuchsende Weender-Analyse Ausgangsmaterial; Weender-Analyse, Gärqualität und Mikrobiologie nach Siloöffnung (vor dem Haltbarkeitstest)

Nach Entwicklung und Kalibrierung der opto-chemischen Sensortechnik bei Joanneum Research wurden die beiden Sensortypen in einem Exaktversuch unter Praxisbedingungen auf dem landwirtschaftlichen Betrieb Schweiger Medardus in Aigen/Ennstal von 13.09. bis 28.11.2016 unter Organisation der HBLFA Raumberg-Gumpenstein an einem mit transparenter Folie gewickelten Silorundballen getestet.

Für die Untersuchung von Aspekten der Gärung, welche in Zusammenhang mit der Sauerstoffkonzentration von Relevanz sind, wurden parallel zum Messballen zwei weitere Rundballen mit dem gleichen Ausgangsmaterial hergestellt (Tabelle 1). Dieser Schritt war notwendig, damit der Messballen völlig ungestört über die gesamte Versuchsdauer lagern konnte.

2.2.1 AUSGANGSMATERIAL

Für den Exaktversuch wurde ein Feldfutterbestand im ersten Hauptnutzungsjahr vom 4. Aufwuchs gewählt. Die Bestandeszusammensetzung (Tabelle 2) war geprägt durch eine starke Dominanz von Englischem Raygras sowie Weißklee und Rotklee. Die Bestandesdichte war mit 98,3 % für ein Feldfutter sehr hoch. Üblicherweise beträgt der Anteil an offenem Boden im Feldfutter etwa 7 % (Resch *et al.*, 2014).

Tabelle 2: Botanische Zusammensetzung des Pflanzenbestandes für Silierversuch S-64 (Bonitur von Reinhard Resch am 13.09.2016 um 13:00 Uhr)

Prüf.-Nr.	Wh 1	Wh 2	Wh 3	Ø	Deutscher Pflanzenname
Proj. Deckung	98	99	98	98,3	
offener Boden in %	2	1	2	1,67	
Wuchshöhe in cm	40	38	38	38,7	
Gräser in %	55	49	53	52,3	
Leguminosen in %	43	50	46	46,3	
Kräuter in %	2	1	1	1,33	
Moos in %	0	0	0	0	
Lolium perenne	45	42	44	43,7	Englisches Raygras
Lolium hybridum	5	4	5	4,7	Bastard-Raygras
Dactylis glomerata	5	6	5	5,3	Knautgras
Gräser gesamt	55	52	54	54	
Trifolium pratense	30	34	32	32,0	Rotklee
Trifolium repens	25	28	27	26,7	Weißklee
Leguminosen	55	62	59	58,7	
Rumex obtusifolius	2	1	1	1,3	Stumpfblättriger Ampfer
Kräuter gesamt	2	1	1	1,3	
Gesamtdeckung	112	115	114	113,7	
Artenanzahl	6	6	6	6	

2.2.2 VERSUCHSANLAGE

FUTTERERENTE

Die Mahd des Feldfutterbestandes erfolgte am 13.09.2016 um 14:00 Uhr mit einem Trommelmäherwerk. Da das Futter feinblättrig war, wurde von der ursprünglichen Zielrockenmasse 35 % abgewichen und ein höherer TM-Gehalt von ca. 45 bis 50 % angestrebt. Grund dafür war die wahrscheinliche Verringerung des Porenvolumens bei feinerem Futter (Roß *et al.*, 2008) und der damit verbundene Einfluss auf die Sauerstoffkonzentration. Um diesen TM-Gehalt zu erreichen war es notwendig die Anwelkdauer entsprechend zu verlängern, sodass die Versuchsanlage erst am 15.09.2016 stattfinden konnte. Am 15.09.2016 wurde ab 09:30 Uhr das Erntegut geschwadet. Die Pressarbeit wurde mit einer variablen Ballenpresse (Typ Krone Comprima V150 XC) von 09:55 bis 10:40 Uhr durchgeführt (Abbildung 3). Die Ballenpresse war mit sechs Schneidmessern bestückt, der Pressdruck wurde hoch eingestellt. Der Ballendurchmesser wurde mit 120 cm festgelegt, was dem durchschnittlichen Niveau von österreichischen Pressballen entspricht (Resch, 2010).

INSTALLATION OPTO-CHEMISCHE SENSORSPOTS



Abbildung 3: Ballenpressen im Silierversuch S-64



Abbildung 4: Montage der Sensorspot-Sensoren

Schon während der Pressarbeit wurde mit der Wicklung der ersten Ballen vom Feldrand mit einer transparenten Stretchfolie vom Typ „Agristretch Crystal“ ab 10:00 Uhr begonnen. Der Zeitabstand des Pressvorganges bis zur Installation und den ersten Sauerstoffmessungen sollte so kurz wie nur möglich gehalten werden. Die Installation von acht Oberflächensensoren (Sensorspots) am Messballen 1 erfolgte durch Mitarbeiter von Joanneum Research und HBLFA Raumberg-Gumpenstein zwischen 10:15 und 10:32 Uhr durch Befestigung auf der Netzbindung mittels Spagat (Abbildung 5). Die Sensorspot-Positionen wurden am Spagat mit gelbem Klebeband markiert. Die Positionierung der Sensorspots für Ballen Nr. 1 wurde so gewählt, dass die Messpunkte gut verteilt und für die Messungen gut zugänglich auf dem Ballenmantel lagen. Die vertikale Position wurde mit 10 cm, 50 cm und 90 cm entfernt von der Ballenstirnseite gewählt.



Abbildung 5: Montierter Spotsticker-Sensor (grauer Kreis)



Abbildung 6: pH- und Ammoniaksensoren

Zusätzlich wurden von Dr. Mohr/Joanneum Research aus Interesse an der Eignung in einer solchen Anwendung Farbindikatoren montiert, welche durch Farbreaktion die Veränderungen von pH-Wert bzw. der Ammoniakkonzentration anzeigen sollten (Abbildung 6).

BALLENWICKELUNG MIT TRANSPARENTER STRETCHFOLIE

Unmittelbar nach Fertigstellung der Spotsticker-Montage wurde der Messballen 1 mittels transparenter Stretchfolie bei einer Folienvorstreckung von 70 % mit sechs Lagen gewickelt (Abbildung 7 und 8). Die Stretchfolie mit Namen „Agristretch Crystal“ wurde vom Projektpartner COVERIS Flexibles Austria GmbH kostenlos zur Verfügung gestellt. Dieses Produkt ist eine Castfolie mit einer Foliendicke von 25 µm. Um 10:35

Uhr war der Messballen fertig und wurde mit einer Ballenzange auf den nur wenige Meter entfernten überdachten, nach Osten offenen Lagerplatz transportiert.



Abbildung 7: Wicklung Messballen mit Agristretch Crystal



Abbildung 8: 6-lagige Wicklung Messballen

Eine Probe der transparenten Stretchfolie wurde im Oktober 2016 von Joanneum Research in Weiz auf Sauerstoffdurchlässigkeit bzw. Barriereeigenschaften untersucht. Dazu wurden 6 Lagen Folie übereinandergelegt (genauso wie in der Praxis bei der Ballenwicklung) und zwei kreisrunde Proben mit einem Laser herausgeschnitten. Diese Folienpakete wurden anschließend in den beiden zur Verfügung stehenden Barriermesszellen mit einem Prüfgas, dessen O₂-Anteil 100 ppm betrug, auf ihre Sauerstoffdurchlässigkeit untersucht. Gegenüber reinem Sauerstoff war der O₂-Anteil somit um den Faktor 10.000 geringer. Durch diese Vorgangsweise wurde die Sauerstofftransmission entsprechend verringert, um die Messung mit den auf Ultrahochbarrieren ausgelegten Geräten überhaupt erst sinnvoll zu ermöglichen.

INSTALLATION DER OPTO-CHEMISCHEN FASERKABELSENSOREN

Der Messballen wurde auf einer Europalette mantelseitig vorsichtig so abgelegt, dass sämtliche Sensorspots für die Messung gut zugänglich waren. Der stirnseitige Einbau der Faserkabelsensoren dauerte von 10:40 bis 12:00 Uhr. Insgesamt standen 6 Faserkabelsensoren mit den Einbaulängen 10 cm, 50 cm und 90 cm zur Verfügung (Abbildung 9). Da der Pressballen äußerst gut verdichtet wurde, musste mit einem Stahldorn ähnlichen Durchmessers vorgestochen werden. In das Loch wurde dann das jeweilige Edelstahlrohr mit der porösen Metallspitze eingebaut. Die luftdichte Abdichtung (Abbildung 10) erfolgte mit Hilfe eines Primer-Sprays (Plasti-Dip) zur Haftvermittlung und einer pastösen Dichtmasse (Plasti-Dip Flüssiggummi).



Abbildung 9: Faserkabelsensoren vor der Montage



Abbildung 10: Abdichtung Faserkabelsensor nach Einbau

An einem Sensorspot wurde eine Permanentmessstelle eingerichtet (Abbildung 11). Der Messkopf musste exakt senkrecht auf den Sensorspot ausgerichtet werden, daher wurde die Hardware mit einem Laborstativ

fixiert. Die Faserkabelsensoren wurden so eingebaut, dass drei Sensoren in 10 cm unter der Manteloberfläche und drei Sensoren in Kernnähe jeweils in 10, 50 und 90 cm Einstechtiefe positioniert wurden. Der Gradient sollte im Fall von Messdifferenzen in der Sauerstoffkonzentration eine Modellierung ermöglichen. Das Messequipment (Laptop, Optoelektronik, GSM-Modul, Netzteile, etc.) für die drei Messstellen mit permanenter Aufzeichnung wurde in einer Kunststoffbox neben dem Messballen positioniert. Eine permanente Stromversorgung über Kabel war notwendig, um den ständigen Messbetrieb aufrecht erhalten zu können (Abbildung 12).



Abbildung 11: Permanentmessung auf Sensorspot



Abbildung 12: Messballen mit opto-chemischen Sensoren

INSTALLATION KONVENTIONELLE TEMPERATURMESSTECHNIK

Nicht von jeder opto-chemischen Messstelle der Sensorspots bzw. Faserkabelsensoren wurden permanente Temperaturdaten aufgezeichnet, daher wurde schon bei der Projektplanung eine Temperaturmessung an einem zweiten Messballen mittels konventioneller Temperatursonden geplant. Die HBLFA Raumberg-Gumpenstein verfügt über die entsprechende Sensortechnik, welche in Verbindung mit einem Datenlogger (Mikromec 2036-96) eine permanente Datenspeicherung zulässt. Im Silierversuch S-64 wurde daher ein Messballen (Ballen 2) mit exakt den gleichen Ausgangsbedingungen von Seiten des Futters und der Siliertechnik hergenommen und insgesamt sechs Temperatursonden auf den gleichen Positionen installiert wie Ballen 1 (Abbildung 13).



Abbildung 13: Temperaturmessung mit konventioneller Sensormesstechnik im Silierversuch S-64



Die Installation erfolgte zeitmäßig parallel mit den opto-chemischen Sensoren von 10:40 bis 12:00 Uhr. Die Messintervalle wurden im 30-Minutentakt programmiert. Neben der Silagetemperatur wurden mit einem Kombifühler auch die Lufttemperatur neben dem Rundballen und die Luftfeuchtigkeit gemessen.

MESSUNG BALLENGEWICHTSVERÄNDERUNG

Die Ballenwiegun g von Ballen 3 ermöglichte die Beobachtung von Nährstoffverlusten im Zuge der Gärung während der Lagerung bis zur Siloöffnung und in der Folge die Verluste nach Siloöffnung unter Luftstress im Haltbarkeitstest. Die Wiegun g wurde mit einer Kranwaage (Dini Argeo Typ DFW-MCW, Wiegebereich 1500 kg, Teilung 0,1 kg) durchgeführt (Abbildung 15). Für die Wiegun g wurden zwei Kanthölzer unter die Europalette geschoben und Gewebegurten an den Kanterenden sowie in den Lasthaken eingehängt. Der Frontlader wurde so lange angehoben, bis der Rundballen inklusive Europalette schwebte und sich das Gewicht auf der digitalen Anzeige stabilisierte. Insgesamt erfolgten vier Gewichtsmessungen.

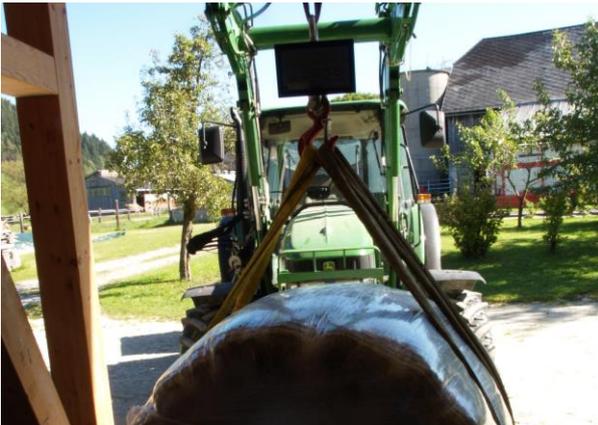


Abbildung 14: Erfassung Ballengewicht mit Kranwaage



Abbildung 15: Kranwaagenanzeige bei der Ballenwiegun g

2.2.3 HALTBARKEITSTEST

Gute Gärfutterqualität bedeutet auch, dass die vergorene Silage nach Öffnung der luftdichten Versiegelung eine gewisse Stabilität aufweisen soll und nicht nach kurzer Zeit verdirbt. Der Luftsauerstoff verändert die Lebensbedingungen von Mikroorganismen sehr stark (Fuchs, 2006), was auch einen erheblichen Einfluss auf den Futterverderb haben kann. Im Silierversuch S-64 war eine zentrale Fragestellung mit der Veränderung der Sauerstoffverhältnisse am und im Siloballen verbunden, um Fragen der aeroben Stabilität beantworten zu können.

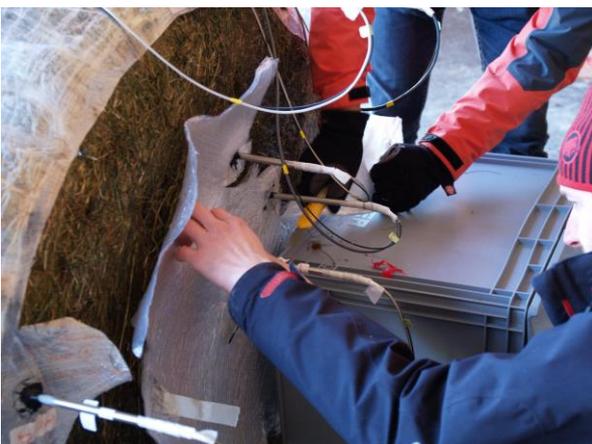


Abbildung 16: Partielle Entfernung der Stretchfolie



Abbildung 17: Fasersensoren nach Folienentfernung

Am 14. November 2017 wurde an den Messballen nach 59 Tagen Lagerung die Stretchfolie stirnseitig entfernt (Abbildung 16 und 17). Ab diesem Zeitpunkt wurde die Rundballensilage 14 Tage lang bis zum 28.11.2017 hinsichtlich Temperatur- und Sauerstoffveränderung beobachtet. Nach Gärungsexperten wie Ranjit und Kung (2000) gelten Temperaturabweichungen des Testsubstrats von + 2°C gegenüber der konstanten

Raumtemperatur als Hinweis für deutlichen Futtermittelverderb. Im Silierversuch S-64 lagen keine konstanten Außentemperaturen vor und außerdem war die Futtermasse im Ballen wesentlich höher als in üblichen Haltbarkeitstest. Die Messungen sollten in erster Linie verfolgen wie schnell die Sauerstoffkonzentration in unterschiedlicher Messtiefe ansteigt.

Am Tag der Siloöffnung wurden von Martin Tscherner/Joanneum Research Modifikationen im optoelektronischen Modul vorgenommen, mit dem Ziel, den wiederholten Ausfall der Messtechnik, der bei den Permanentsensoren während der Lagerphase eine lückenlose Datenaufzeichnung verhinderte, in Zukunft zu vermeiden. Die Modifikation verlief erfolgreich, sodass im Haltbarkeitstest die Sauerstoffkonzentration an drei Sensoren permanent verfolgt werden konnte.

2.2.4 VERARBEITUNG VON OPTO-CHEMISCHEN MESSDATEN

Die Aufzeichnung der permanenten Sensormessungen erfolgte an drei Messstellen durch zeitlich hoch aufgelöste Erfassung mittels von Joanneum Research speziell adaptierter Ausleseelektronik für einen Sensorspot (Abbildung 11) und für zwei Faserkabelsensoren (10/10 cm bzw. 50/50 cm). Die permanent aufgezeichneten Messdaten wurden viermal täglich mittels GSM-Verbindung an einen FTP-Server des Joanneum Research gesendet. Zudem wurden die Daten auch lokal gespeichert. Diese Maßnahme diente der Datensicherung und laufenden Datenvalidierung, auch konnte zeitnah auf Systemausfälle reagiert werden (z.B. durch Neustart der Geräte).



Abbildung 18: Datenmanagement Permanentmessung



Abbildung 19: Manuelle Handheld-Messeinheit

Der Großteil der opto-chemischen Sensoren musste manuell über ein akkuversorgtes Handheld ausgelesen werden (Abbildung 19). Dieses Device verfügte über eine in einem Aluminiumgehäuse befindliche elektronische Messeinheit und ein darauf angebrachtes kleines Tablet. Auf dem Tablet war eine Auslesesoftware (TecSenseO2) installiert, die es ermöglichte die Messergebnisse von Sauerstoffkonzentration und Temperatur zu erfassen und zu speichern oder zu notieren. Zur späteren Identifikation und Zuordnung der gespeicherten Einzelwerte zu den jeweiligen Sensoren wurde parallel zur manuellen Messung vom Versuchstechniker Medardus Schweiger detailliert Protokoll geführt. Die Messintervalle wurden so festgelegt, dass zu Versuchsbeginn eine höhere Dichte an Messungen erfolgen sollte bis sich die Sauerstoffkonzentration auf sehr niedrigem Niveau einpendelt. In der stabilen Phase wurde die Frequenz der Messungen ausgedehnt. Nach Siloöffnung und dem folgenden Haltbarkeitstest wurde das Messintervall wiederum erhöht, um die Zunahme der Sauerstoffkonzentration enghaschiger erfassen zu können. Sämtliche manuelle Messungen wurden von Medardus Schweiger durchgeführt.

2.2.5 PROBEZIEHUNGEN FÜR QUALITATIVE ANALYSEN

Noch während der Montage der Sensorspots wurde am 15.09.2017 von einem Pressballen eine Probenentnahme des Ausgangsmaterials mit Hilfe eines Edelstahl-Probenstechzylinders durchgeführt (Abbildung 20). Dabei wurden drei Einstiche mantelseitig bis auf eine Tiefe von 60 cm gesetzt, um genügend Frischmaterial für die chemischen (ca. 1.000 g) und mikrobiologischen Untersuchungen (ca. 500 g) zur Verfügung zu haben. Die Bohrungen wurden am Siloballen so gesetzt, dass eine Mischprobe entstand, welche der Sensorpositionierung 10/50/90 cm entsprach. Die Bohrlöcher des Siloballens wurden mit Spezialklebefolie verschlossen, um einen Verderb zu unterbinden (Abbildung 19).



Abbildung 20: Probeziehung Ausgangsmaterial



Abbildung 21: Luftdichter Verschluss mit Spezialklebeband

2.2.6 LABORANALYSEN

Das entnommene Probenmaterial wurde umgehend in Kühlung gegeben und noch am gleichen Tag per Express gekühlt an das Futtermittellabor Rosenau (LK Niederösterreich) zur Analyse geschickt. Der Analysenauftrag umfasste eine nasschemische Analyse auf Weender Nährstoffe, Zucker und Gärqualität nach VDLUFA (1976) sowie mikrobiologische Parameter (VDLUFA, 2007).

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 SAUERSTOFFDURCHLÄSSIGKEIT DER STRETCHFOLIE

Die im Oktober 2016 von Joanneum Research durchgeführten Messungen der Barriereigenschaften der transparenten Stretchfolie „Agristretch Crystal“ im sechslagigen Folienpaket ergaben eine O₂-Transmissionsrate pro Quadratmeter und Tag von 0,25 Litern reinem Sauerstoff. Für eine einzelne Lage der Folie wurde eine Transmissionsrate von 1,52 Litern pro Quadratmeter und Tag gemessen. Der Silorundballen im Silierversuch S-64 wies eine Gesamtoberfläche von etwa 6,8 m² auf, d.h. es diffundieren nach Tscherner (2017) durch die intakte, 6-lagige Folienversiegelung täglich ungefähr 1,7 Liter reiner Sauerstoff in das Balleninnere zum konservierten Gärfutter.

3.2 VERDICHTUNG DER VERSUCHSRUNDBALLEN

Die Rundballen hatten im Silierversuch einen Durchmesser von 120 cm und eine Länge von 120 cm. Das ergibt ein Volumen von 1,357 m³. Nach der ersten Wiegung wurde ein Nettogewicht des Ballens inklusive Wickelfolie von 821,5 kg festgestellt, d.h. das Frischfuttergewicht je Kubikmeter betrug 605,4 kg. Bei einem TM-Gehalt von 475 g/kg Frischmasse (FM) ergab das ein Raumgewicht von 287,6 kg TM/m³. Anhand der Schätzformel für die Lagerungsdichte von Rundballen für variable Presssysteme auf Praxisbetrieben (Resch, 2010) wurde unter der Annahme gleicher Verhältnisse bei TM- und Rohfasergehalt sowie Ballendurchmesser, eine Lagerungsdichte der Versuchsballen von 185 kg TM/m³ ermittelt. Die Verdichtung der Versuchsballen war gegenüber durchschnittlichen Praxisverhältnissen um über 100 kg TM/m³ höher, daher kann die erzeugte Lagerungsdichte im Silierversuch S-64 als sehr hoch eingestuft werden. Unter den hohen Dichteverhältnissen ist davon auszugehen, dass das Porenvolumen (Roß *et al.*, 2008) deutlich geringer war als in der Praxis.

3.3 FUTTER- UND GÄRQUALITÄT DER RUNDBALLENSILAGE

Tabelle 3: Futter- und Gärqualität bei Siloöffnung bzw. nach Haltbarkeitstest (Silierversuch S-64)

Parameter	Kürzel	Einheit	Siloöffnung	H-Test
			14.11.2016	28.11.2016
Trockenmasse	TM	g/kg FM	475	499
Rohprotein	XP	g/kg TM	207	203
Rohfaser	XF	g/kg TM	228	228
Rohfett	XL	g/kg TM	28	27
Rohasche	XA	g/kg TM	89	89
Zucker	XZ	g/kg TM	72	87
OM-Verdaulichkeit	dOM	%	76,8	76,8
Nettoenergie-Laktation	NEL	MJ/kg TM	6,57	6,57
pH-Wert	pH		4,8	5
Milchsäure	Ms	g/kg TM	42,1	14,8
Essigsäure	Es	g/kg TM	10,9	7
Propionsäure	Ps	g/kg TM	0,8	1
Buttersäure	Bs	g/kg TM	0,8	0,4
Gesamtsäure	Gs	g/kg TM	54,7	23,3
Ethanol	Eth	g/kg TM	1,2	1
NH ₃ von Ngesamt	NH3	%	5,8	4
DLG-Bewertung	DLG	Punkte	95	90
Bakterien (aerobe mesophile)		KBE/g FM	70.000	250.000
Schimmelpilze		KBE/g FM	< 1.000	< 1.000
Hefen		KBE/g FM	20.000	140.000

Die chemische und mikrobiologische Analyse der Grassilage zum Zeitpunkt der Siloöffnung (14.11.2016) und nach 14 Tagen Lagerung unter Luftstress (Haltbarkeitstest) ergab im Vergleich zu Praxissilagen (Resch, 2010) eine stärkere Anwelkung und qualitativ überdurchschnittlich gute Nährstoffgehalte. Das Gär säurenmuster wies bei der Siloöffnung auf eine optimale Milchsäuregärung mit sehr geringer Buttersäurebildung hin. Der pH-Wert von 4,8 lag um 0,2 pH-Punkte unter dem für Grassilagen über 450 g TM/kg FM empfohlenen Richtwert von 5,0. Die mikrobiologische Situation war bei der Siloöffnung einwandfrei, weil sowohl Schimmelpilze als auch Hefen deutlich unter den DLG-Orientierungswerten für Futtermittel lagen (VDLUFA, 2007).

Die vierzehntägige Überlagerung der Grassilage unter Luftstress war außergewöhnlich lang und zeigte entsprechende Veränderungen im Vergleich zur ersten Silagebeprobung. Der TM-Gehalt stieg um 22 g auf 499 g/kg FM (Tabelle 3), die Inhaltsstoffe änderten sich aber nur geringfügig. Über 50 % der gesamten Gär säuren wurden während des Haltbarkeitstests abgebaut. Am stärksten betroffen war die Milchsäure, die um 65 % gegenüber der Siloöffnung reduziert wurde. Der Abbau der Gär säuren führte zu einer Anhebung des pH-Wertes um 0,2 pH-Einheiten. Der Lufteinfluss erhöhte auch die Keimzahlen der aeroben mesophilen Bakterien und der Hefepilze. Der Anstieg bei den Hefen auf 140.000 kolonienbildende Einheiten (KBE) je Gramm FM überstieg den qualitativen Orientierungswert von 100.000 KBE/g FM.

3.4 GÄRVERLAUF IM SILOBALLEN

Im Silierversuch S-64 wurde der pH-Wert mehrmals gemessen, um den Verlauf der Gärung verfolgen zu können. In Abbildung 22 ist eine langsame Absäuerung erkennbar. Der pH-Richtwert von 5,0 wurde wahrscheinlich zwischen 40 und 50 Tagen Gärdauer unterschritten. Bis zum Ende des Haltbarkeitstests stieg der pH-Wert wieder an (Abbildung 22).

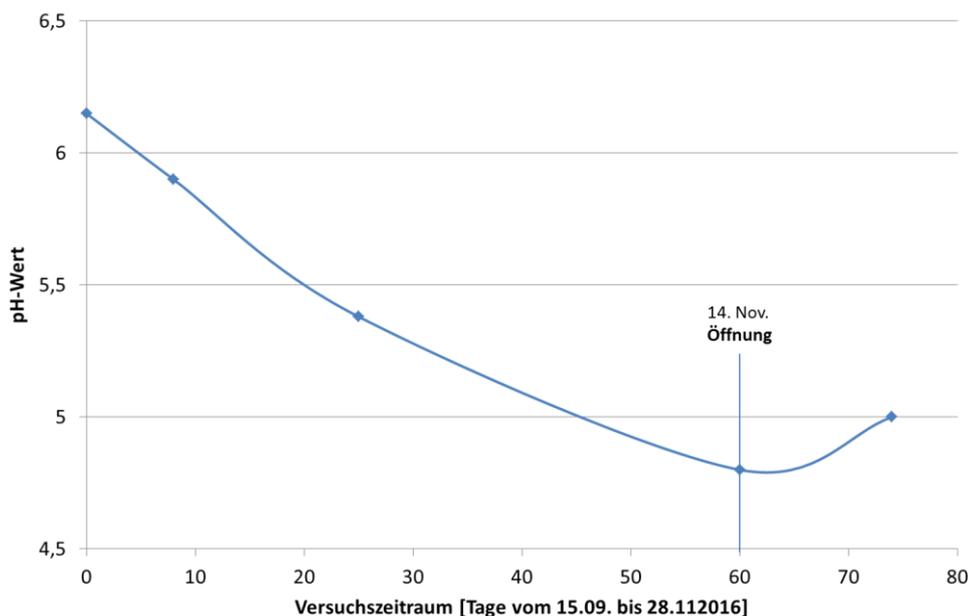


Abbildung 22: Verlauf pH-Wert in Rundballensilage im Silierversuch S-64

3.5 MASSENVERLUSTE BEI DER RUNDBALLENSILAGE

Die Wiegung von Ballen 3 ergab einen Gewichtsverlust zwischen Versuchsanlage und Siloöffnung von 5,5 kg Frischmasse, das entspricht einem relativen Massenverlust von 0,7 %. Durch die Überlagerung unter Luftstress verlor der Versuchsballen nach 14 Tagen nur 1 kg Frischmasse, d.h. die Verluste kann man als marginal bezeichnen.

3.6 TEMPERATURENTWICKLUNG IM SILORUNDBALLEN

Optimaler Gärverlauf hängt bei Futterpflanzen mit einer guten Entwicklung der Milchsäurebakterien zusammen. Nach (Beck, 1966) weisen Milchsäurebakterien ein Temperaturoptimum zwischen 20 und 40°C auf. Die Temperaturmessung im Silierversuch S-64 wurde einerseits für Aussagen hinsichtlich Milchsäuregärung benötigt, war aber andererseits auch für die Sauerstoffmessung von Relevanz, weil die O₂-Messwerte temperaturabhängig sind.

3.6.1 TEMPERATURMESSUNG MIT SONDEN

Die Verlaufskurve der Lufttemperatur (Abbildung 23) zeigte einen abnehmenden Trend vom Silierbeginn bis zur Siloöffnung am 14. November. Zum Zeitpunkt der Versuchsanlage am 15. September lagen optimale Temperaturen mit mehr als 20°C für die Silierung vor, während bei der Siloöffnung schon Temperaturen um den Gefrierpunkt herrschten. In der Haltbarkeitstestphase stiegen die Tagestemperaturen teilweise wieder deutlich an. Die Tageswerte schwankten in der Spannweite allgemein sehr stark, d.h. es gab Tage mit geringen Differenzen zwischen Tag und Nacht (unter 5°C) und welche mit hohen Schwankungen (10 bis 15 °C).

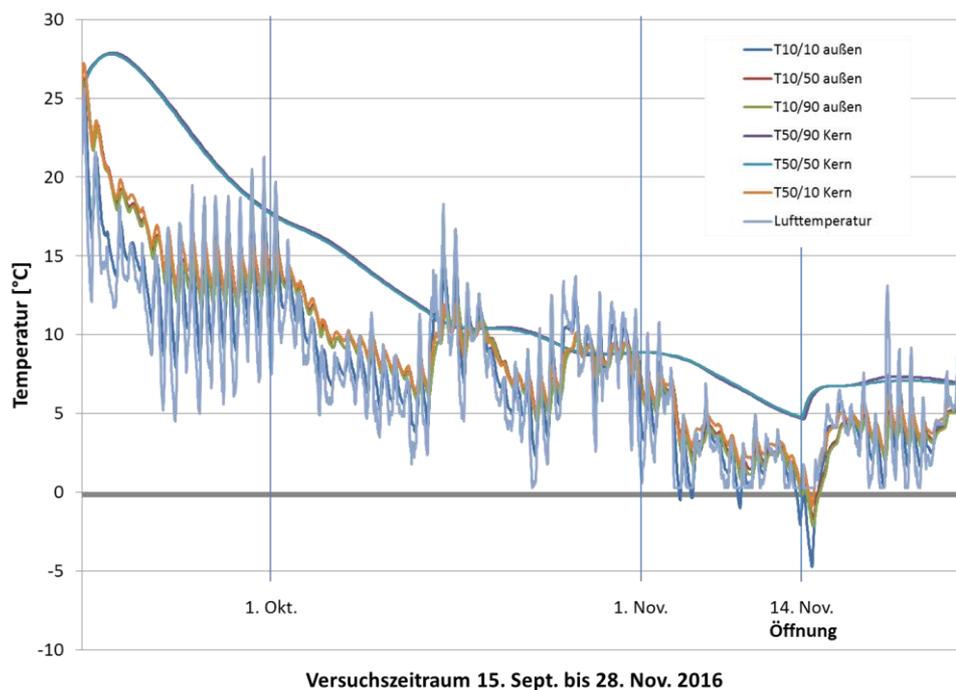


Abbildung 23: Temperaturverlauf in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition im Vergleich zur Außentemperatur (Daten: Silierversuch S-64)

Im Siloballen konnte beobachtet werden, dass die vier Sonden in der Nähe der Oberfläche mehr oder weniger stark mit den Außentemperaturen mitgingen. Dieser Zusammenhang betraf sowohl den Trend über die Lagerungszeit als auch die Tagesschwankungen, welche jedoch im Rundballen wesentlich geringer waren. Die Temperatur im Kernbereich des Siloballens verlief deutlich anders (Abbildung 23). In den ersten Tagen kam es zu einer Temperaturerhöhung auf über 27°C und danach zu einer allmählichen Abkühlung. Außerdem waren im Kernbereich keine Tagesschwankungen zu beobachten. Der Temperaturtiefpunkt wurde im Kernbereich bei der Siloöffnung am 14. November mit knapp 5°C erreicht. Im Ballenmantel lagen die Temperaturen vergleichsweise dazu bei etwa Null Grad Celsius. Beim Haltbarkeitstest stieg die Temperatur im Ballenkern wieder Richtung 7°C an. Immerhin konnte im Kernbereich über mehr als ein Monat lang eine Durchschnittstemperatur von über 10°C gehalten werden, während die Temperatur im Mantel schon nach ca. 3 Wochen Lagerung unter 10°C fiel.

3.6.2 TEMPERATURMESSUNG MIT JOANNEUM SENSORIK

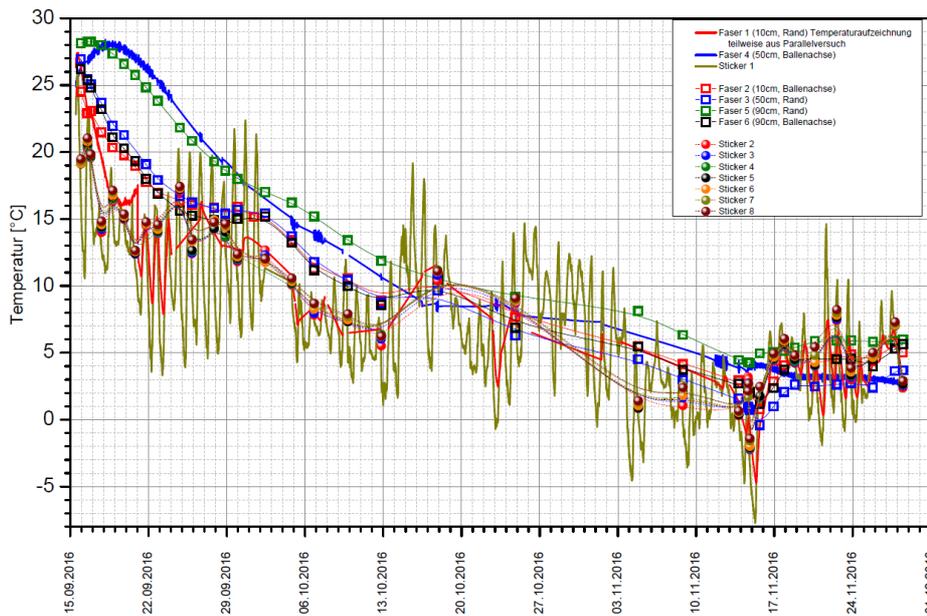


Abbildung 24: Temperaturverlauf auf und in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition (Daten: Silierversuch S-64)

Die Temperaturaufzeichnung funktionierte bei der Permanentmessung des Sensorspots 1, einer der beiden Einstichsonden sowie auch bei der manuellen Messung der Sensorspots bzw. der Faserkabelsensoren sehr gut (Abbildung 24). Diese Temperaturverläufe zeigen eine recht gute Vergleichbarkeit mit den Sensoren der HBLFA Raumberg-Gumpenstein. Die geplanten permanenten Aufzeichnungen an zwei Faserkabelsensoren erfolgten aufgrund elektronischer Probleme (Systemabsturz) nur zeitweise permanent, sodass für beide Messpunkte kein durchgehender Temperaturverlauf zur Verfügung steht. Fasersensor 1 lieferte teilweise Werte, die sprunghafte Abweichungen aufwiesen. Verantwortlich dafür war vermutlich Kondenswasser und/oder das Eindringen von Pflanzensaft zusammen mit einer nicht vollständig gelungenen elektrischen Isolierung/Einkapselung, was zu einer Änderung des gemessenen Widerstands des Thermistors geführt hat. Für die Berechnung der Sauerstoffwerte wurden für den Fasersensor 1 daher die Temperaturdaten der parallel durchgeführten Aufzeichnung durch die HBLFA verwendet.

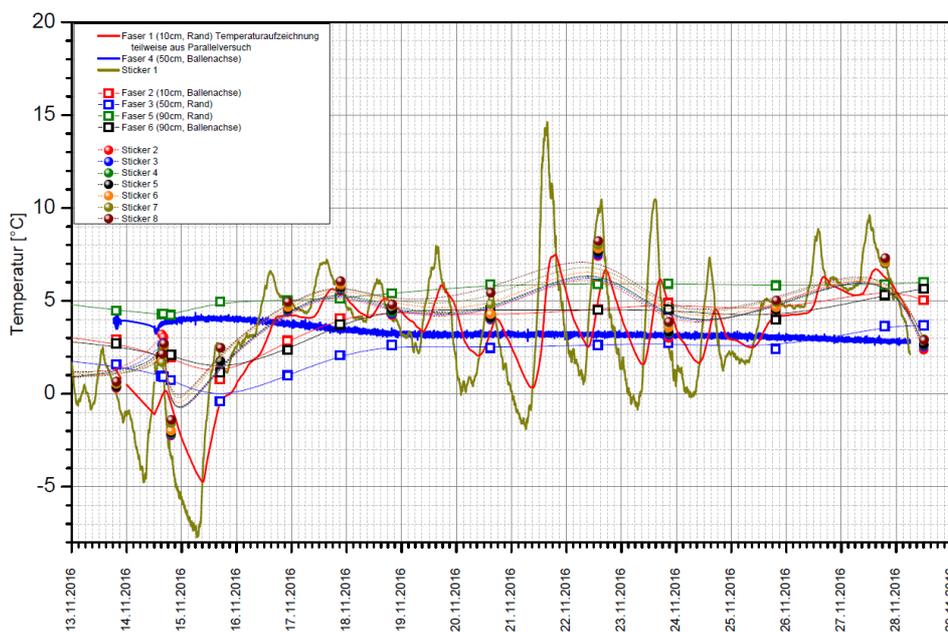


Abbildung 25: Temperaturverlauf auf und in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition nach Siloöffnung im Haltbarkeitstest (Daten: Silierversuch S-64)

Die permanenten Temperaturmessungen am Sensorspot 1 zeigten ähnlich starke Tagesschwankungen wie jene der Lufttemperatur im Ballen 2 (Abbildung 23). Der Faserkabelsensor im Kernbereich zeichnete genauso wie die konventionellen Sensoren im Vergleichsballen einen Temperaturanstieg in den ersten drei Tagen auf, der schließlich in einem kontinuierlichen Temperaturabfall überging. Temperaturmessungen sind in einem Haltbarkeitstest essentiell, um im Fall einer Temperaturerhöhung die Verderbempfindlichkeit des Gärfutters gegenüber Luftsauerstoff feststellen zu können. Die Messdaten der permanenten, aber auch der manuellen Messstellen zeigten in Abbildung 24, dass es deutliche Differenzen zwischen den stark schwankenden Oberflächentemperaturen und den konstant verlaufenden Kerntemperaturen gab. Eine signifikante Temperaturerhöhung konnte gegenüber der Lufttemperatur nicht verzeichnet werden, d.h. die vorliegende Grassilage hatte über 14 Tage Beobachtungsdauer eine gute aerobe Stabilität (ASTA).

3.7. SAUERSTOFFENTWICKLUNG IM SILORUNDBALLEN

Die Versuchsanlage inklusive Einbau der Sensortechnik verlief im Silierversuch S-64 aufgrund der koordinierten Vorgangsweise schlagkräftig. Die Inbetriebnahme der gesamten eingebauten Messtechnik in Ballen 1 und Ballen 2 erfolgte 80 Minuten nach dem Wickelvorgang. Gegenüber der durchschnittlichen O₂-Konzentration der Außenluft von ca. 20,95 % lagen die ersten Sauerstoff-Messwerte im Siloballen sehr schnell unter 1,0 % Sauerstoff (O₂) und damit extrem tief. Im Vergleich zur Annahme von Gross und Riebe (1974) wurde der Sauerstoff im Versuchsrundballen an allen Sensoren sehr viel schneller als erwartet verbraucht. An den Permanentmessstellen konnte nur mehr die letzte Phase der Sauerstoffkonsumation beobachtet werden (Abbildung 26). Referenzmessungen an Sensorspots außerhalb des Rundballens lieferten für Verhältnisse an der Luft plausible O₂-Konzentrationen über 20 %.

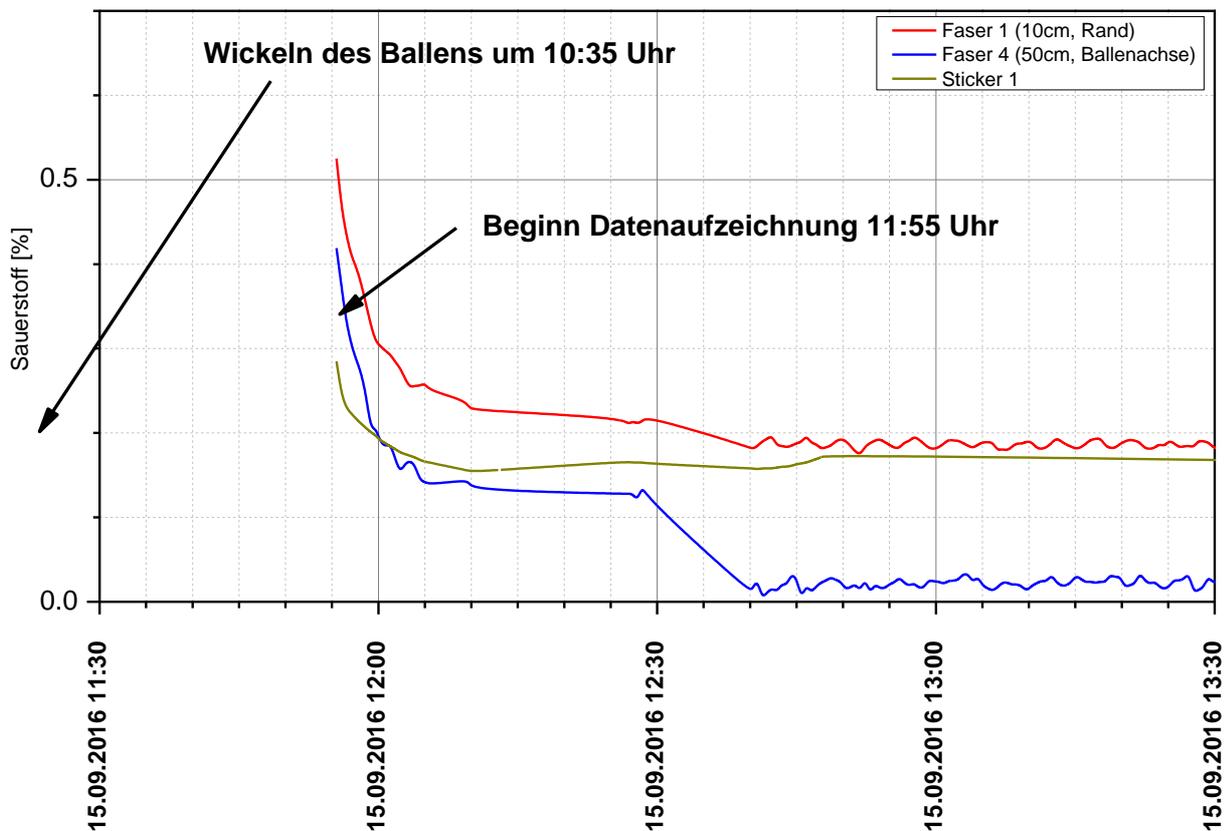


Abbildung 26: Sauerstoffkonzentration im Silorundballen nach erfolgter Wicklung in Abhängigkeit der Messtiefe (Silierversuch S-64)

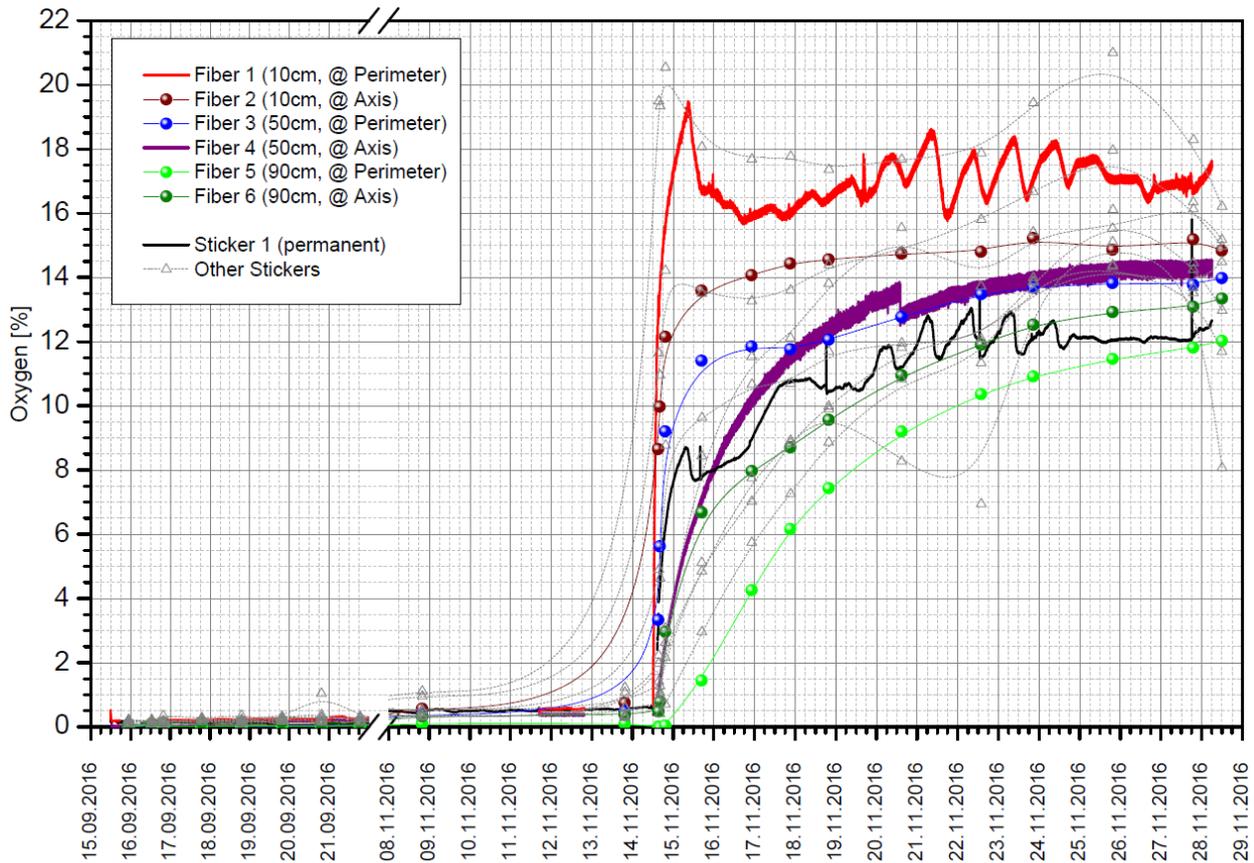


Abbildung 27: Verlauf der Sauerstoffkonzentration am und in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition (Daten: Silierversuch S-64)

Die Messintervalle an den manuell auslesbaren Sensoren sollten nach Messbeginn zeitlich eng gestaffelt sein, um die O₂-Konzentrationsabnahme entsprechend gut aufzeichnen zu können. Aufgrund der extrem schnellen O₂-Absenkung wurden die Messintervalle aber bereits am zweiten Tag auf Tagesrhythmus umgestellt, weil sich das O₂-Niveau auf sehr tiefem Level stabilisierte (Abbildung 25). Im Verlauf der zweimonatigen Lagerung waren nur marginale O₂-Veränderungen feststellbar.

Die Datenaufzeichnung bei den Permanentmesspunkten erforderte eine regelmäßige Kontrolle und Datenvalidierung. Beim Sensorspot kam es in den ersten Tagen nach Silierung zu vertikalen Lageänderungen des Sensors, weil sich der Ballen durch den Gärprozess und die Schwerkraft verformte. Die Messposition der Messhardware musste mehrmals mit dem Stativ adjustiert werden, damit die O₂-Messung plausible Daten lieferte.

Die stirnseitige Entfernung der Foliensiegelung am 14.11.2016 hatte massive Auswirkungen auf die Erhöhung der O₂-Konzentration im Siloballen (Abbildung 25). In Abhängigkeit der Sensordistanz zur geöffneten Ballenseite konnten hohe Differenzen zwischen den Kurvenverläufen festgestellt werden. Trotz der hohen Lagerungsdichte erhöhte sich die O₂-Konzentration bei 10 cm Abstand zur Öffnung innerhalb von wenigen Stunden auf über 10 Vol.%. Je weiter der Abstand zur offenen Ballenseite war, umso verzögerter stieg die O₂-Konzentration an. Bei 50 cm Einbautiefe dauerte es im Kernbereich des Rundballens etwa 48 Stunden bis der Sauerstoffgehalt im Gärgas über 10 Vol.% stieg. Noch wesentlich verzögerter stieg die O₂-Konzentration bei 90 cm Einbautiefe zur offenen Ballenseite. Hier dauerte es etwa 6 Tage lang um eine O₂-Konzentration von 10 Vol.% zu erreichen. Die O₂-Messergebnisse im Silierversuch S-64 waren gegenüber den simulierten O₂-Modellrechnungen von Pitt und Muck (1993) widersprüchlich, weil die O₂-Anstiege an fast allen Messpunkten anhielten und nicht durch Sauerstoffkonsum von Hefen wieder zurückgingen. Die Stabilisierung der O₂-Gehalte auf unterschiedlichen Niveaus weist auf eine O₂-Konsumierung durch Hefen und aerobe Bakterien hin, was auch die leicht erhöhten Keimzahlen nach 14 Tagen Lagerung unter Luftstress

bestätigen. Die niedrigen Außentemperaturen haben die Entwicklung der obligat aeroben Organismen eingebremst, wodurch sich der Verderbprozess verlangsamt und der Sauerstoffkonsum deutlich geringer ausgeprägt war.

Die Dichtheit der Stretchfolie am Ballenmantel war trotz partieller Entfernung der Folie an der Ballenstirnseite so gut, dass nur die Sensorspots in der Nähe der Öffnung einen raschen und hohen O₂-Anstieg anzeigten (Abbildung 25). Die oberflächlich angebrachten Sensorspots mit größerer Entfernung zur offenen Ballenseite wiesen ähnliche O₂-Verlaufskurven auf als die im Siloballen eingebauten Faserkabelsensoren.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die ersten Versuchserfahrungen zum Einsatz von opto-chemischen Sauerstoffsensoren von Joanneum Research brachten wichtige Erkenntnisse über die Performance der eingesetzten Sensoren unter sauren und teilweise kalten Verhältnissen (Tscherner, 2017). Es stellte sich heraus, dass die manuellen Messungen mit einem Handheldgerät an den beiden installierten Sensortypen (Sensorspot, Faserkabelsensor) problemlos funktionierten. Die permanente Überwachung und Aufzeichnung der Sauerstoffkonzentration in einem Gärfutterballen stellten im ersten Exaktversuch eine Herausforderung an die Messtechniker dar. Die Datenverarbeitung erforderte einen entsprechenden Betreuungsaufwand und verlief nicht vollkommen lückenlos. Die Ursachen, die sich negativ auf die Betriebsstabilität des Systems auswirkten, konnten im Verlauf des Versuches identifiziert und zum großen Teil auch behoben werden. Die validierten Daten sind plausibel. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse kann festgehalten werden, dass sich die eingesetzte opto-chemische Messtechnik für Exaktversuche unter Feldbedingungen als gute Technologie erwiesen darstellt, um die Sauerstoffkonzentration in Gärsubstraten verfolgen zu können. Aus messtechnischer Sicht erlauben die Erfahrungen aus dem Versuch künftig eine noch exaktere Anpassung der Implementierung der Sensorsysteme an die Erfordernisse solcher Versuche.

Der erfolgreiche Pilotversuch S-64 ist ein innovativer Schritt, um in der Gärungsforschung einen völlig neuen Zugang zu bekommen, weg von der indirekten Modellierung, hin zur Messung der Sauerstoffreduktion am Beginn der Gärung bzw. der Sauerstoffdiffusion an Siloanschnittflächen nach Siloöffnung.

LITERATUR

- Beck, T. (1966): Die Mikrobiologie der Gärfutterbereitung Eine zusammenfassende Darstellung des derzeitigen Wissensstandes. *Das wirtschaftseigene Futter* **12** (3), 227-263.
- Fuchs, G. (2006): Allgemeine Mikrobiologie, *Thieme Verlag*, Stuttgart, 678 S.
- Green, O.; Bartzanas, T.; Løkke, M.M.; Bochtis, D.D.; Sørensen, C.G.; Jørgensen, O.J. und Tortajada, V.G. (2012): Spatial and temporal variation of temperature and oxygen concentration inside silage stacks. *Biosystems Engineering* **111** (2), 155-165.
- Gross, F. und Riebe, K. (1974): Gärfutter - Betriebswirtschaft, Erzeugung, Verfütterung, *Verlag Eugen Ulmer*, Stuttgart, 283 S.
- Köstler, S. und Tscherner, M. (2016): Adaptierung von optochemischen Messverfahren zum Permanentmonitoring der Sauerstoffkonzentration in der Gärgasatmosphäre von Grassilage während der Gärung Lagerungsphase sowie unter Luftstress nach Siloöffnung, Zwischenbericht zum Forschungsprojekt "Silage-Sensor" (DaFNE-Nr. 101082), Joanneum Research GmbH, Materials, Weiz, 7 S.
- McGechan, M.B. und Williams, A.G. (1994): A Model of Air Infiltration Losses During Silage Storage. *Journal of Agricultural Engineering Research* **57** (4), 237-249.
- Parsons, D.J. (1991): Modelling gas flow in a silage clamp after opening. *Journal of Agricultural Engineering Research* **50**, 209-218.
- Pitt, R.E. und Muck, R.E. (1993): A Diffusion Model of Aerobic Deterioration at the Exposed Face of Bunker Silos. *Journal of Agricultural Engineering Research* **55** (1), 11-26.
- Ranjit, N.K. und Kung, L. (2000): The Effect of *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus plantarum*, or a Chemical Preservative on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn Silage1. *Journal of Dairy Science* **83** (3), 526-535.

- Rees, D.V.H.; Audsley, E. und Neale, M.A. (1983): Apparatus for obtaining an undisturbed core of silage and for measuring the porosity and gas diffusion in the sample. *Journal of Agricultural Engineering Research* **28** (2), 107-114.
- Resch, R. (2010): Qualitätsbewertung von österreichischen Grassilagen und Silomais aus Praxisbetrieben, Abschlussbericht der wissenschaftlichen Tätigkeit "Silagequalität", Nr. 3561 (DaFNE 100535), LFZ Raumberg-Gumpenstein, 87 S.
- Resch, R. (2014): Einfluss von transparenten Stretchfolien auf Silagequalität, aerobe Stabilität und Gärungsverluste von Grassilage in Rundballen, Abschlussbericht des Forschungsprojektes "Stretchfolie IV" Nr. 3620 (DaFNE 100953), HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irnding, 23 S.
- Resch, R. (2017): Gärfutterqualitäten in Österreich - Wo gibt es Probleme? 23. Wintertagung zum Thema "Unser Essen, Unsere Regionen, Wer wird uns morgen versorgen?", Puttererseehalle Aigen/Ennstal, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 2. bis 3. Februar 2017, 17-24.
- Resch, R.; Frank, P.; Stögmüller, G.; Tiefenthaller, F.; Peratoner, G.; Adler, A.; Gasteiner, J. und Pötsch, E.M. (2014): Futtermittelverschmutzung mit Erde - Ursachen, Erkennung und Auswirkungen. *Landwirt ÖAG-Sonderbeilage* 5/2014, 1-16.
- Roß, F.; Maack, C. und Büscher, W. (2008): Einfluss von Trockenmasse-Gehalt, Lagerungsdichte und Häcksellänge auf das Porenvolumen im Siliergut. *LANDTECHNIK-Agricultural Engineering* **63** (6), 344-345.
- Tscherner, M. (2017): Adaptierung von optochemischen Messverfahren zum Permanentmonitoring der Sauerstoffkonzentration in der Gärgasatmosphäre von Grassilage während der Gärung Lagerungsphase sowie unter Luftstress nach Siloöffnung, Abschlussbericht Forschungsprojekt Nr. 101082 "Silage-Sensor", JOANNEUM RESEARCH Materials, Institute for Surface Technologies and Photonics, Weiz, 51 S.
- Tscherner, M.; Resch, R.; Schweiger, M. und Köstler, S. (2016): Permanent oxygen monitoring in the fermentation atmosphere of grass silage using optochemical sensing technology. *Sensing in Food and Agriculture*, Cambridge UK, 29. - 30. November 2016.
- VDLUFA (1976): Methodenbuch Band III - Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, inkl. Ergänzungsblätter 1983, 1988, 1993, 1997, *VDLUFA-Verlag*, Darmstadt.
- VDLUFA (2007): Methode 28.1.2 Futtermitteluntersuchung - Bestimmung der Keimgehalte an aeroben, mesophilen Bakterien, Schimmel- und Schwärzepilzen und Hefen. Methodenbuch III, 7. Ergänzung 2007, *VDLUFA-Verlag*, Darmstadt.
- Williams, A.G.; Lowe, J.F. und Rees, D.V.H. (1994): The effect of oxygen concentration on changes in the microbial population, temperature and dry-matter content in grass silage. *Grass and Forage Science* **49** (2), 183-191.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Faserkabelsensoren für Silierversuch S-64	8
Abbildung 2: Poröse Metallkappe über Sensortechnik	8
Abbildung 3: Ballenpressen im Silierversuch S-64	10
Abbildung 4: Montage der Sensorspot-Sensoren.....	10
Abbildung 5: Montierter Spotsticker-Sensor (grauer Kreis).....	10
Abbildung 6: pH- und Ammoniaksensoren.....	10
Abbildung 7: Wicklung Messballen mit Agristretch Crystal.....	11
Abbildung 8: 6-lagige Wicklung Messballen.....	11
Abbildung 9: Faserkabelsensoren vor der Montage.....	11
Abbildung 10: Abdichtung Faserkabelsensor nach Einbau.....	11
Abbildung 11: Permanentmessung auf Sensorspot	12
Abbildung 12: Messballen mit opto-chemischen Sensoren	12
Abbildung 13: Temperaturmessung mit konventioneller Sensormesstechnik im Silierversuch S-64.....	12
Abbildung 14: Erfassung Ballengewicht mit Kranwaage	13
Abbildung 15: Kranwaagenanzeige bei der Ballenwiege.....	13
Abbildung 16: Partielle Entfernung der Stretchfolie	13
Abbildung 17: Fasersensoren nach Folienentfernung	13
Abbildung 18: Datenmanagement Permanentmessung	14
Abbildung 19: Manuelle Handheld-Messeinheit.....	14
Abbildung 20: Probeziehung Ausgangsmaterial.....	15
Abbildung 21: Luftdichter Verschluss mit Spezialklebeband	15
Abbildung 22: Verlauf pH-Wert in Rundballensilage im Silierversuch S-64	17
Abbildung 23: Temperaturverlauf in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition im Vergleich zur Außentemperatur (Daten: Silierversuch S-64)	18
Abbildung 24: Temperaturverlauf auf und in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition (Daten: Silierversuch S-64).....	19
Abbildung 25: Temperaturverlauf auf und in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition nach Siloöffnung im Haltbarkeitstest (Daten: Silierversuch S-64).....	19
Abbildung 26: Sauerstoffkonzentration im Silorundballen nach erfolgter Wicklung in Abhängigkeit der Messtiefe (Silierversuch S-64)	20
Abbildung 27: Verlauf der Sauerstoffkonzentration am und in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition (Daten: Silierversuch S-64).....	21

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Untersuchungen im Exaktversuch - Versuchsplan	8
Tabelle 2: Botanische Zusammensetzung des Pflanzenbestandes für Silierversuch S-64 (Bonitur von Reinhard Resch am 13.09.2016 um 13:00 Uhr)	9
Tabelle 3: Futter- und Gärqualität bei Siloöffnung bzw. nach Haltbarkeitstest (Silierversuch S-64)	16