

Silagestabilität – mit neuer Sensortechnologie Verderbprozesse besser verstehen und vorbeugen

Reinhard Resch^{1*}

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 opto-chemischen Sensoren stehen der Forschung erst seit wenigen Jahren zur Verfügung.

Die weltweit ersten Versuchserfahrungen zum Feldeinsatz von, bei Joanneum Research entwickelten, opto-chemischen Sauerstoffsensoren in Grassilage brachten an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein 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. Im Pilotversuch wurde der Sauerstoff 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 im Prozessverlauf dynamisch verfolgen zu können. Anhand der Erfahrungen aus dem Pilotversuch wird in einem bereits genehmigten Folgeprojekt eine noch exaktere Anpassung der Implementierung der Sensorsysteme an die Erfordernisse solcher Versuche vorgenommen, um diese Messtechnik für verschiedene Fragestellungen der Gärungsforschung anzuwenden.

Die Verquickung der landwirtschaftlichen Forschung mit Highend-Sensortechnik zeigt am Beispiel des vorgestellten Forschungsprojektes völlig neue Perspektiven, um das Verständnis zu biologischen Prozessen auf eine höhere Stufe bringen zu können.

Einleitung

Lagerstabile Futterkonserven sind 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. 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

¹ Referat für Futterkonservierung und Futterbewertung, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: Ing. Reinhard Resch, reinhard.resch@raumberg-gumpenstein.at

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. Darüber hinaus erlaubt die Elektronik eine quasi permanente Erfassung von Messdaten in einer definierten zeitlichen Auflösung. Da es keine wissenschaftlichen Studien über die zerstörungsfreie Messung der Sauerstoffkonzentration in Gärgasen von Grassilagen mittels opto-chemischer Sensortechnologie gab, 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.

Im durchgeführten Forschungsprojekt standen vordergründig die Praxisauglichkeit und Genauigkeit der opto-chemischen 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 Fokus.

Material und Methoden

Sensorik 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 (*Abbildung 1*). 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 Sauerstoffsensoren positioniert wurde. Die optische

Verbindung der sensitiven Elemente mit der Auswertelektronik 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, 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 2*).

Exakter Silierversuch der HBLFA Raumberg-Gumpenstein

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 13.09.2016 bis 28.11.2016 unter Organisation der HBLFA Raumberg-Gumpenstein an einem mit transparenter Folie gewickelten Silorundballen getestet. Für den Exaktversuch wurde ein Feldfutterbestand im ersten Hauptnutzungsjahr vom 4. Aufwuchs gewählt. Die mittlere Bestandeszusammensetzung (47 % Gräser, 51 %



Abbildung 1: Montierter Spotsticker-Sensor (grauer Kreis).

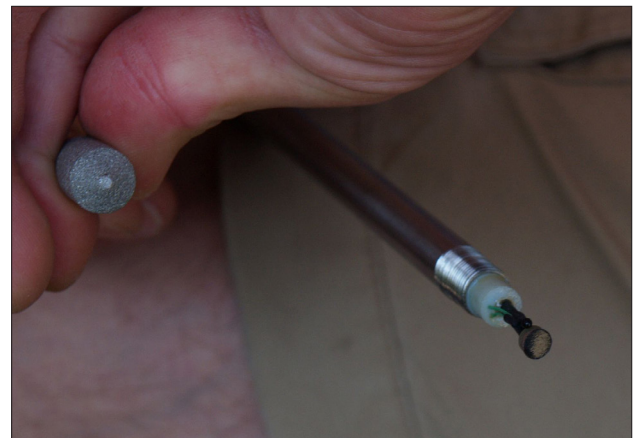


Abbildung 2: Faserkabelsensoren für Silierversuch S-64.

Leguminosen, 2 % Kräuter) war geprägt durch eine starke Dominanz von Englischem Raygras sowie Weißklee und Rotklee. Die Narbendichte (projektive Deckung) war mit 98,3 % für ein Feldfutter sehr hoch. Üblicherweise beträgt der Anteil an offenem Boden im Feldfutter etwa 7 % (Resch *et al.*, 2014).

Die Mahd des Feldfutterbestandes erfolgte am 13.09.2016 um 14:00 Uhr mit einem Trommelmähwerk. Da das Futter feinblättrig war, wurde von der ursprünglichen Ziel trockenmasse 35 % abgewichen und ein höherer TM-Gehalt von ca. 45 – 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. 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).

Unmittelbar nach Fertigstellung der Spotsticker-Montage wurde der Messballen mittels transparenter Stretchfolie (Bezeichnung „Agristretch Crystal“) bei einer Folienvorstre-



Abbildung 3: Wicklung Messballen mit Agristretch Crystal.

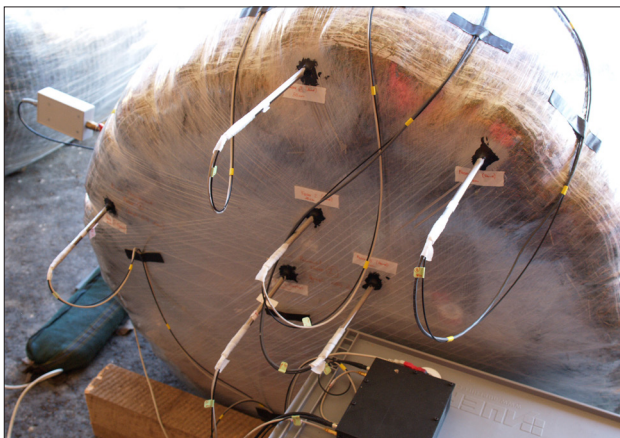


Abbildung 4: Messballen mit opto-chemischen Sensoren.

ckung von 70 % mit sechs Lagen gewickelt (Abbildung 3). Dieses Produkt ist eine Castfolie mit einer Foliendicke von 25 µm.

Insgesamt 6 Faserkabelsensoren mit den Einbaulängen 10 cm, 50 cm und 90 cm wurden in den Siloballen eingebaut (Abbildung 4). 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 erfolgte mit Hilfe eines Primer-Sprays (Plasti-Dip) zur Haftvermittlung und einer pastösen Dichtmasse (Plasti-Dip Flüssiggummi).

Für den Haltbarkeitstest wurde am 14. November 2016 am Messballen nach 59 Tagen Lagerung die Stretchfolie stirnseitig entfernt. Ab diesem Zeitpunkt wurde die Rundballensilage 14 Tage lang bis zum 28.11.2016 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 Futterverderb. Im Silierversuch S-64 lagen keine konstanten Außentemperaturen vor und außerdem war die Futtermasse im Ballen wesentlich höher als in üblichen Haltbarkeitstests. Die Messungen sollten in erster Linie verfolgen, wie schnell die Sauerstoffkonzentration in unterschiedlicher Messtiefe ansteigt.

Ergebnisse und Diskussion

Sauerstoffdurchlässigkeit Stretchfolie

Die im Oktober 2016 von Joanneum Research durchgeführten Messungen der Barriereigenschaften der transparenten Stretchfolie „Agristretch Crystal“ im sechslagigen Folienspaket 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 Foliensiegelung täglich ungefähr 1,7 Liter reiner Sauerstoff in das Balleninnere zum konservierten Gärfutter.

Verdichtung 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 Frischfuttermgewicht 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.

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).

Temperaturentwicklung im Siloballen

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.

Die Verlaufskurve der Lufttemperatur 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).

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 5). 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.

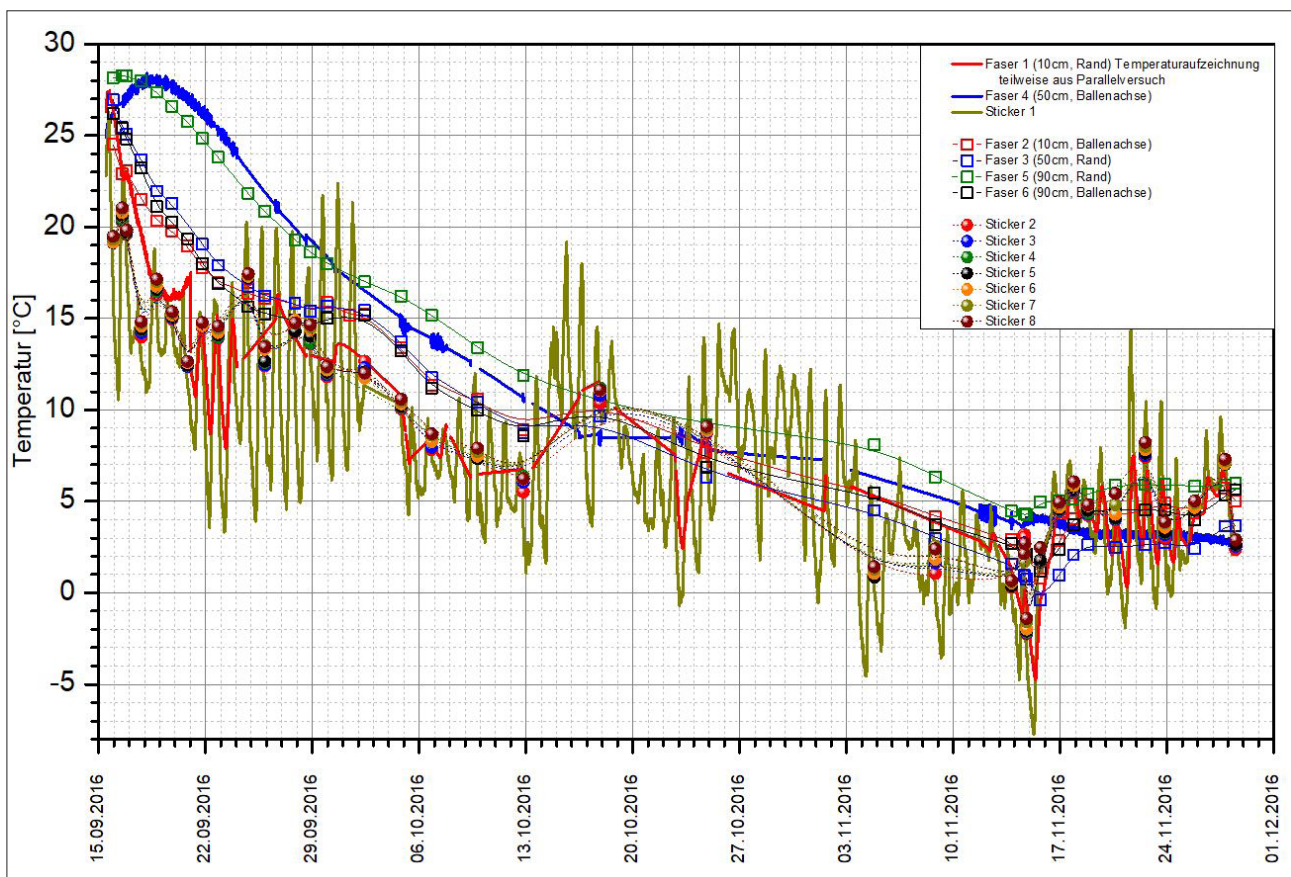


Abbildung 5: Temperaturverlauf auf und in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition. Messung mit Thermistor in der Faserkabelsonde.

Sauerstoffkonzentration im Gärgas eines Siloballen

Die Inbetriebnahme der gesamten eingebauten Messtechnik im Ballen 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 6). Referenzmessungen an Sensorspots außerhalb des Rundballens lieferten für Verhältnisse an der Luft plausible O₂-Konzentrationen über 20 %.

Die stirnseitige Entfernung der Folienversiegelung am 14.11.2016 hatte massive Auswirkungen auf die Erhöhung der O₂-Konzentration im Siloballen. 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 6). Die oberflächlich angebrachten Sensorspots mit größerer Entfernung zur offenen Ballenseite wiesen ähnliche O₂-Verlaufskurven auf als die im Siloballen eingebauten Faserkabelsensoren.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die ersten Versuchserfahrungen zum Einsatz von optochemischen Sauerstoffsensoren von Joanneum Research brachten wichtige Erkenntnisse über die Performance der eingesetzten Sensoren unter sauren und teilweise kalten

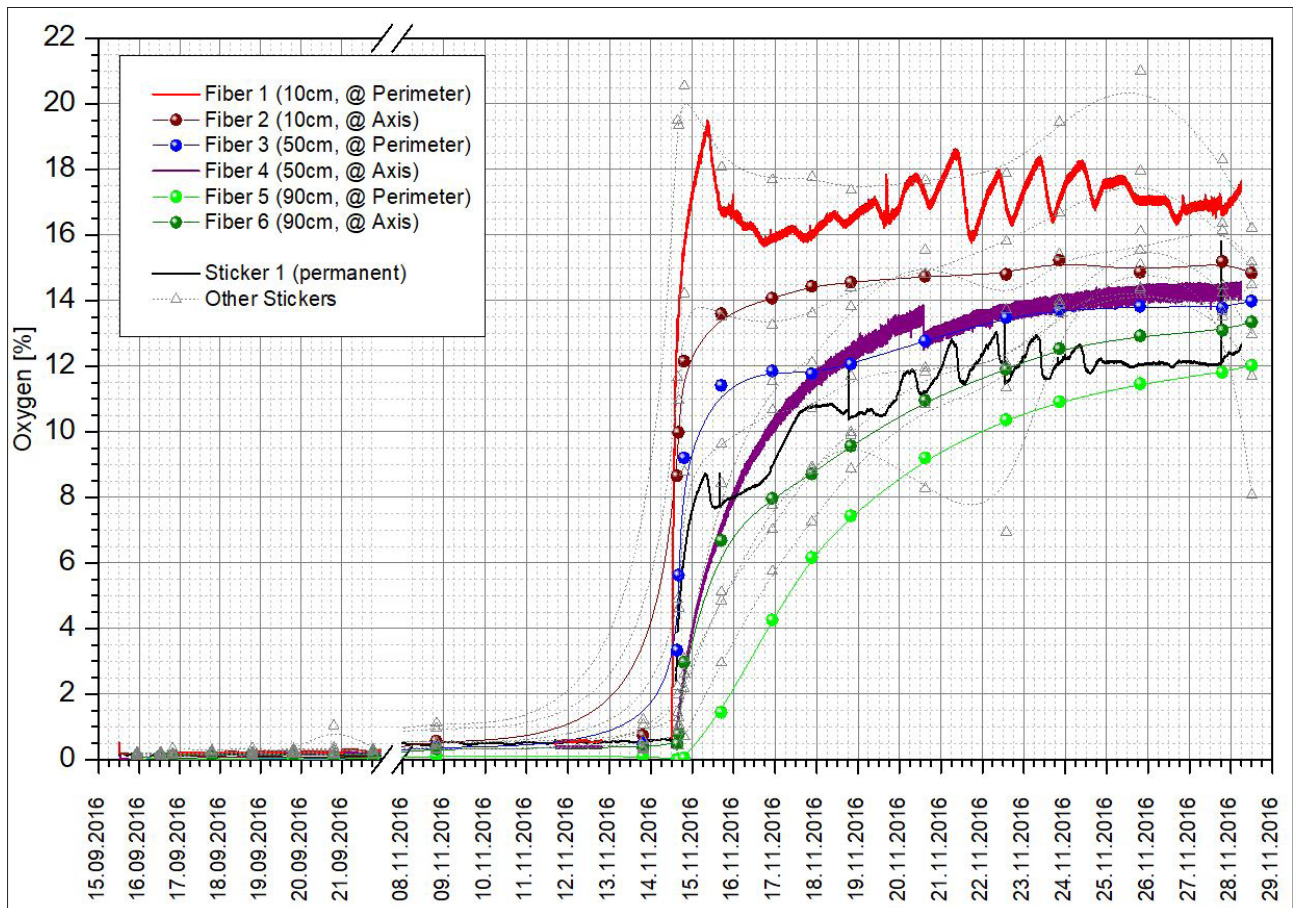


Abbildung 6: Verlauf der Sauerstoffkonzentration am und in einem Silorundballen in Abhängigkeit der Messposition.

Verhältnissen (Tscherner, 2017). 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 darstellt, um die Sauerstoffkonzentration in Gärs substraten 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.

Ab 2019 startet ein vom BMNT unterstütztes Forschungsprojekt der Partner HBLFA Raumberg-Gumpenstein und Joanneum Research mit dem Ziel, den Einfluss von wesentlichen gärbioologischen Einflussfaktoren (Art der Futterpflanze, TM-Gehalt, Verdichtung, Silosystem) auf den Sauerstoffgehalt in Gärgasen mit Hilfe eines Multifiberswitch an jeweils vier verschiedenen Testvarianten und je 4 Messpunkten, also insgesamt 16 Messkanälen, auf dynamische Art und Weise zu ermitteln.

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.; T. Bartzanas; M.M. Løkke; D.D. Bochtis; C.G. Sørensen; O.J. Jørgensen and V.G. Tortajada (2012): Spatial and temporal variation of temperature and oxygen concentration inside silage stacks. Biosystems Engineering 111 (2), 155 – 165.
- Gross, F. und K. Riebe (1974): Gärfutter - Betriebswirtschaft, Erzeugung, Verfütterung, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 283 S.
- Köstler, S. und M. Tscherner (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. and A.G. Williams (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. and R.E. Muck (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. and L. Kung (2000): The Effect of *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus plantarum*, or a Chemical Preservative on the Fermentation and Aerobic Stability of Corn Silage I. Journal of Dairy Science 83 (3), 526 – 535.
- Rees, D.V.H.; E. Audsley and M.A. Neale (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, Irdning, 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.; P. Frank; G. Stögmüller; F. Tiefenthaler; G. Peratoner; A. Adler; J. Gasteiner und E.M. Pötsch (2014): Futtermittelschmutzung mit Erde – Ursachen, Erkennung und Auswirkungen. Landwirt ÖAG-Sonderbeilage 5/2014, 1 – 16.
- Roß, F.; C. Maack und W. Büscher (2008): Einfluss von Trockenmassegehalt, 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.; R. Resch; M. Schweiger and S. Köstler (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.; J.F. Lowe und D.V.H. Rees (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.