

Qualitätsmesssystem für Getreide in hermetischen Säcken



Die Entwicklung einer Messlösung für die Getreidequalität in hermetischen Säcken erlaubt eine hermetische Getreidewertschöpfungskette und die Vermeidung von Nachernteverlusten

Aktenzeichen:	35986
Kurztitel:	Qualitätsmesssystem für Getreide in hermetischen Säcken
Mittellempfänger:	Saving Grains 301 GmbH
Autor:	Wolfgang Mittmann
Datum des Berichts:	1.11.2024
Projektleitung:	Wolfgang Mittmann (Geschäftsführer Saving Grains 301 GmbH) wolfgang@savinggrains.com , +49 163 3155 170 Sigismundkorso 15 , 13465 Berlin
Bandbezeichnung:	
Projektkennblatt:	ID: 20200401004



INHALT

Kurzfassung	4
Einführung	5
Methodik	6
Projektergebnisse	9
Getreideeigenschaften	9
Temperatur und Gasverteilung in hermetischen Säcken	11
Entwicklung der Kohlenstoffdioxidkonzentration in hermetischen Säcken	13
Detektion	17
Markttest	20
Interpretation	23
Ausblick	26
Öffentlichkeitsarbeit	27
Literaturverzeichnis	28

ABBILDUNGEN & TABELLEN

Abbildung 1 – Bild von befüllten hermetischen Sack mit Sensoren	6
Tabelle 1 – Einstellung der Luftfeuchte durch Salzlösungen	7
Abbildung 2 – Feldversuche in Ghana	7
Abbildung 3 – Zeit bis zur Einstellung des Gleichgewichtszustands	9
Abbildung 4 – Die Sorptionsisothermen für verschiedene Kultivare	10
Abbildung 5 – Die Gleichgewichtsfeuchte hängt vom Stärkegehalt ab	11
Abbildung 6 – Zeitlicher Verlauf der Temperatur und Luftfeuchte im hermetischen Sack	12
Abbildung 7 – Verlauf der Kohlenstoffdioxidkonzentration in herkömmlichen Säcken	13
Abbildung 8 – CO ₂ Verlauf für Mais aus dem Middle Belt und aus dem Norden unter Feldbedingungen	14
Abbildung 9 – Effekt von Insekten auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration für Mais aus dem Middle Belt	15
Abbildung 10 – Effekt von Insekten auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration für Mais aus dem Norden	16
Abbildung 11 – Entwicklung der CO ₂ Konzentration in Säcken mit unterschiedlichen Getreidefeuchten	16
Abbildung 12 – Detektion der Kohlenstoffdioxidkonzentration	18
Abbildung 13 – Kohlenstoffdioxidkonzentration für unbehandelten Mais in hermetischen Säcken.	19
Abbildung 14 – Detektion der Getreidefeuchte	19
Abbildung 15 - Trainings mit Kleinbauern	20
Abbildung 16 – Pilotierung mit Agricare	21

KURZFASSUNG

Im südlichen Afrika gibt es hohe Nachernteverluste von Getreide während der Lagerung. Hermetische Säcke eliminieren diese Verluste dadurch, dass Insekten und Schimmel vermieden werden. In diesem Projekt haben wir ein Messsystem entwickelt das Käufern durch Anzeige kritischer Qualitätsparameter ermöglicht, Getreide in verschlossenen hermetischen Säcken zu kaufen. Damit wird eine verlustfreie hermetische Wertschöpfungskette vom Kleinbauern bis zur Lebensmittelindustrie möglich. Durchsichtige hermetische Säcke ermöglichen die Einschätzung typischer Parameter der Getreidequalität (Farbe, Korngröße, Fremdanteile, etc.). Aber eine zu hohe Getreidefeuchte kann nicht optisch erkannt werden und führt zu Fermentation in hermetischen Säcken. Außerdem brauchen Käufer Sicherheit, dass gekauftes Getreide in hermetischen Säcken wirklich luftdicht abgeschlossen ist, damit Sicherheit zur vergangenen und zukünftigen verlustfreien Lagerung besteht.

Wir haben hier gezeigt, dass für die wichtigsten Maissorten in Ghana eine Detektion der relativen Luftfeuchtigkeit der äußersten Luftschichten in hermetischen Säcken einen Rückschluss auf die Getreidefeuchte zulässt. Feldversuche haben gezeigt, dass eine sichere Getreidefeuchte zuverlässig erkannt wird.

Die Luftdichtigkeit von hermetischen Säcken haben wir indirekt über die Kohlenstoffdioxidkonzentration gemessen. Kohlenstoffdioxid entsteht durch die Atmung von Insekten, aber auch durch den Stoffwechsel von Schimmelpilzen und des Stoffwechsels des Getreides selbst. Das sichere Detektionslimit für erhöhte Kohlenstoffdioxidkonzentration lag bei 0.7%. Diese Kohlenstoffdioxidkonzentration wurde bereits nach 24 Stunden erreicht und ermöglichte eine sichere Detektion. Mais aus hybriden Saatgut von „Pioneer“ aus dem Norden von Ghana zeigte einen zu kleinen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration für eine sichere Detektion.

Eine Pilotierung des Messsystems zeigte erwartungsgemäß, dass Kleinbauern nach kurzem Training sicher mit hermetischen Säcken umgehen können. In Ghana gibt es im privaten oder dem informellen geschäftlichen Bereich kaum ein Bewusstsein für Lebensmittelqualität. Die formale Lebensmittel- und Futtermittelindustrie achtet stärker auf Qualität, allerdings ist die Durchsetzung von gesetzlichen Qualitätsstandards lückenhaft, und die Zahlungsbereitschaft für Qualitätssicherung ist gering. Das Lieferketten- und Qualitätsmanagement ist uneinheitlich zwischen den verschiedenen Unternehmen und häufig gibt es kein Softwaresystem oder einen einheitlichen formalisierten Prozess. Wir haben unser System trotzdem erfolgreich pilotiert und es gibt Interesse an einer Fortsetzung. Die Hauptmotivation gilt neben der besseren Qualität dem Zugang zu Getreidehändlern, die durch Nutzung von Daten beim Auslesen der Qualitätssensoren den industriellen Kunden zugänglich gemacht werden könnten. Mit einer entsprechenden Ausgestaltung des Messsystems halten wir eine skalierbare hermetische Getreidelieferkette für möglich.

EINFÜHRUNG

Im südlichen Afrika entstehen die größten Lebensmittelverluste von Getreide während der Lagerung, wo ungefähr 15 - 35% verloren gehen (1,2, 3). Dies wird primär durch Insekten verursacht, die sich im Sack vermehren und das Getreide zerfressen. Die Insekten führen zudem zu sichtbaren qualitativen Schäden. Für die Lebensmittelindustrie und die öffentliche Gesundheit ist vor allem die Belastung durch Aflatoxin und andere durch Schimmel gebildete Mycotoxine wichtig. Aflatoxin verursacht Krebs und ist einer der Faktoren für „Stunting“, einer irreversiblen körperlichen und geistigen Entwicklungsstörung in den ersten Lebensjahren mit einer Prävalenz von 20% im südlichen Afrika (4).

Die Gewichts- und Qualitätsverluste verursachen zudem hohe ökologische Kosten (5). Die Landwirtschaft ist einer der größten Treibhausgasemittenten. In Westafrika breiten sich Agrarflächen stetig auf Kosten natürlicher Ökosysteme aus (6). Dies ist besonders besorgniserregend, da viele dieser Ökosysteme natürliche CO₂ Speicher sind. Die Vermeidung von Lebensmittelverlusten würde zu einem höheren Getreideangebot führen, dadurch den Getreideanbau senken und potenziell Verluste natürlicher Ökosysteme und den damit verbundenen CO₂ Ausstoß verringern.

Hermetische Säcke eliminieren Getreideverluste während der Lagerung (2). Insekten und Schimmelpilze sind aerob, verbrauchen den begrenzten Sauerstoffvorrat und sterben ab. Die Menge und Qualität des Getreides verändert sich kaum während einer Lagerdauer von 12 Monaten. Allerdings haben sich hermetische Säcke bisher kaum am Markt durchgesetzt. Dies liegt maßgeblich daran, dass sie nicht wie die herkömmlichen Säcke gehandelt werden können, da die Käufer nicht die Qualität überprüfen können, ohne die Säcke zu öffnen.

Wir führen ein System ein, das dem Käufer Sicherheit über die Getreidequalität gibt. Unsere hermetischen Säcke sind transparent und ermöglichen somit Käufern die Getreidequalität einzuschätzen (Farbe, Korngröße, Fremdkörper, gebrochene Körner, etc.). Allerdings können Käufer optisch nicht beurteilen, ob die Säcke wirklich hermetisch sind, sicher gelagert wurden und weiterverkauft werden können. Außerdem ist nicht sichtbar, ob die Getreidefeuchte niedrig ist, sodass keine Fermentation auftritt (7).

Deshalb entwickeln und testen wir in diesem Projekt ein Messsystem, welches die Luftdichtigkeit der hermetischen Säcke und die Getreidefeuchte anzeigt und somit eine hermetische Getreidelieferkette ermöglicht. Getreide kann von Kleinbauern in hermetische Säcke verpackt werden und über eine Reihe von Getreidehändlern bis zur Industrie gelangen. Lebensmittelverluste entlang der gesamten Getreidelieferkette werden dabei vermieden. Ein solcher Ansatz ist skalierbar, besonders durch Einbindung von IT-Systemen und dem Auslesen der Getreidequalität durch eine Smartphone App, die zusätzlich auch noch Rückverfolgbarkeit erlaubt. Das Potenzial der hier entwickelten Technologie liegt darin, die Millionen von Tonnen Ernteverlust an Getreide in den Getreidelieferketten des südlichen Afrikas zu vermeiden.

METHODIK

Für eine gute Auslesbarkeit und das praktische Handhaben von hermetischen Säcken wurden Sensoren zum Messen der Getreidefeuchte und Luftdichtigkeit direkt zwischen dem Getreide und den transparenten hermetischen Verpackungsmaterialien platziert. Um zu untersuchen, inwieweit die klimatischen Bedingungen an der Peripherie des Einfüllvolumens repräsentativ für die Bedingungen im gesamten hermetischen Sack sind, wurden 100 kg Körnermais hermetisch gelagert. In die befüllten Säcke wurden Luftfeuchte-, Temperatur-, und CO₂ Sensoren an 5 unterschiedlichen Stellen in den Sack eingebracht und die klimatischen Bedingungen zeitlich hochaufgelöst erfasst. Zusätzlich wurden die klimatischen Bedingungen außerhalb des Sackes erfasst, um nachzuweisen, dass hermetische Lagerbedingungen vorlagen, und um zu untersuchen, mit welcher zeitlichen Verzögerung sich Änderungen in den klimatischen Außenbedingungen innerhalb des Sacks manifestieren.

Die Getreidefeuchte wurde nach ISO 712:2009 (8) über den Gewichtsunterschied nach Ofentrocknung bestimmt. Der Zusammenhang der Getreidefeuchte und der relativen Luftfeuchte (9) innerhalb des hermetischen Sacks wurde unter Laborbedingungen und unter simulierten, für ghanaische Verhältnisse typischen, Lagerbedingungen getestet. Für die Labortests von Mais mit unterschiedlicher Getreidefeuchte, wurde Mais in Exsikkatoren gelagert, die mit verschiedenen gesättigten Salzlösungen befüllt sind. Für diese Salzlösungen sind die relativen Luftfeuchten bekannt, die sie in der Gasphase über den Salzlösungen hervorrufen. So wurde eine konstante Luftfeuchte erzeugt, anhand dessen sich ein Gleichgewicht mit der Getreidefeuchte einstellen konnte (Tabelle 1).

Um auf Funktionalität unter simulierten Lagerbedingungen zu testen, wurden Sensoren in mit Körnermais befüllte hermetische Säcke eingebracht und drei Wochen in stufenlos steuerbaren Klimaschränken gelagert, in denen Temperaturtagesgänge simuliert wurden, die für ghanaische



Abb. 1 Bild von befüllten hermetischen Sack mit Sensoren. Ein Hermetischer Sack ist mit 100 kg Mais befüllt und Sensoren zur Erfassung der klimatischen Bedingungen innerhalb und außerhalb. A: Temperatur- und Luftfeuchtedatenlogger innerhalb des hermetischen Sacks nah unter der Außenwand, wo später die kolorimetrischen Sensoren eingefügt werden sollen. B: CO₂ Datenlogger an gleicher Stelle. C: Temperatur und Luftfeuchtedatenlogger zur Erfassung der äußerlichen Lagerbedingungen.

Salz	Relative Luftfeuchte (%) über der gesättigten Salzlösung für:		
	35°C	27°C	20°C
Sodium hydroxide	6.8	6.9	7.0
Lithium chloride	10.8	11.3	11.8
Potassium acetate	21.6	23.3	24.9
Magnesium chloride	32.1	32.6	33.1
Magnesium nitrate	51.6	53.2	54.7
Potassium Iodide	67.1	68.6	70.0
Sodium chloride	74.3	75.8	77.2
Potassium chloride	82.2	84.8	87.3
Barium chloride	90.9	91.3	91.9

Tabelle 1: Einstellung der Luftfeuchte durch Salzlösungen. Die Salze von denen eine gesättigte Lösung in je einen separaten Exsikkator gegeben wurde und die relativen Luftfeuchten, die über den Salzlösungen entstehen bei drei für ghanaische Verhältnisse typische Lagerbedingungen (35 °C Tagestemperatur, 27 °C Tagesmittelwert, 20 °C Nachttemperatur).

Verhältnisse üblich sind. Da bekannt ist, dass mit der Kornfeuchte sowohl die mikrobielle als auch die Insektenvermehrung und damit die Atmung steigt, wurden die hermetischen Säcke mit Körnermais mit 5 unterschiedlichen Kornfeuchten befüllt und gelagert. Die Temperatur und Luftfeuchte innerhalb der hermetischen Säcke wurde durch Temperatur- und Luftfeuchtedatenloggern erfasst.

Als Basis für die Feldforschung unter realen Vor-Ort Bedingungen müssen nicht nur die klimatischen Lagerbedingungen bekannt sein, sondern auch die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Getreides. Um über die Luftfeuchte und CO₂-Konzentration in hermetischen Säcken auf die Kornfeuchte und damit auf die Lagerfähigkeit des Ernteguts zu schließen, muss der Zusammenhang zwischen Kornfeuchte und den klimatischen Bedingungen nach Einstellung eines Gleichgewichts im Sack bekannt sein. Der Zusammenhang zwischen Feuchte in Korn und Luft wird als Sorptionsisotherme bezeichnet. Dieser Zusammenhang ist spezifisch für das Produkt/ Erntegut. Deutscher Futtermaills und 5 von den in Ghana ökonomisch bedeutendsten Maissorten wurden importiert, und die jeweiligen Sorptionsisothermen unter Laborbedingungen erfasst. Diese Daten können später genutzt werden, um anhand der von Sensoren detektierten Luftfeuchte auf die Kornfeuchte im hermetischen Sack zu schließen. Die Daten für die Sorptionsisothermen wurden zur Veröffentlichung in einer einschlägigen internationalen Fachzeitschrift eingereicht. Die Publikation erhielt den Arbeitstitel:

„The cultivar dependency of maize sorption isotherms is explained by inner quality traits of the grains“.



Abb. 2 Feldversuche in Ghana. Links: Hermetische Säcke im Lagerhaus auf Holzpaletten. Hinten im Bild sind Kontrollversuche in konventionellen Säcken sichtbar. Rechts: Messung

Für Feldversuche in Ghana wurde Mais, welcher dem typischen lokalem Maisangebot entsprach, direkt von Kleinbauern gekauft. Daten zum Anbau und besonders zur Verwendung von Pestiziden vor oder nach der Ernte wurden erhoben.

Versuche wurden in einem für Ghana typischen, natürlich ventiliertem Warenlager durchgeführt (Abb. 2). Die Säcke waren keinem direkten Sonnenlicht ausgesetzt und standen auf Holzpaletten ohne Kontakt zu Wänden oder Decke. Dies entspricht den empfohlenen Lagerbedingungen für hermetische Säcke. Die Kohlenstoffdioxidkonzentration in den hermetischen Säcken wurden durch ein Dansensor Checkpoint III Messgerät von Ametec/Mocon gemessen (Abb. 2). Eine Gasprobe von 2 ml wurde von den Säcken durch eine Spritze mit einer Kanülenstärke von 25 G (0.5 mm) entnommen. Der Messfehler lag bei 0.2% Kohlenstoffdioxid. Die Einstichstelle wurde durch einen Filzaufkleber abgedeckt, der das Einstichloch weitgehend wieder verschließt. Proben wurden nach dem Einfüllen anfänglich alle 1-2 Tage entnommen, später alle 3-4 Tage.

Für einige Versuche wurde Mais sterilisiert, um vorhandene Insekten abzutöten. Dies wurde durch jeweils 3 Aluminiumphosphid-Tabletten (insgesamt 9g entsprechend 1g Phosphingas) an unterschiedlichen Positionen im hermetischen Sack erreicht. Die Säcke wurden erst nach 7 Tagen geöffnet und ventiliert und anschließend in einen anderen hermetischen Sack oder herkömmlichen Polypropylensack umgefüllt und für Experimente verwendet.

Zu anderen Säcken wurden Insekten künstlich hinzugefügt. Diese Insekten stammten aus einer Zucht von Maiskäfern (*Sitophilus zeamais*). Nachdem adulte Insekten Eier gelegt haben, wurde die Elterngeneration ausgesiebt. Jeweils ein neu geschlüpfter adulter Maiskäfer wurde pro Kilogramm Mais zu den Säcken hinzugefügt.

ERGEBNISSE

GETREIDEEIGENSCHAFTEN

Das ISO Verfahren zur Bestimmung der Getreidefeuchte sowie andere Verfahren die auf Dichte, Leitfähigkeit oder Oberflächeneigenschaften basieren setzen voraus, dass hermetische Säcke geöffnet werden, um eine Getreideprobe zu entnehmen. Deswegen messen unsere Sensoren die Luftfeuchtigkeit.

Um anhand der von Sensoren detektierten Luftfeuchte auf die Kornfeuchte im hermetischen Sack zu schließen, haben wir Unterproben der verschiedenen Maissorten in Petrischalen über den verschiedenen Salzlösungen gelagert, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Kornfeuchte und Umgebungsluft eingestellt hat (9). Wir beobachteten, dass dies nach ca. 16 Tagen für alle klimatischen Bedingungen erreicht wurde und keine nennenswerte Gewichtsänderung der Maiskörner mehr auftrat (Abb. 3).

Mit der gleichen Methodik wurden nun die Luftfeuchte-Kornfeuchte Beziehungen unter Gleichgewichtsbedingungen für 6 verschiedene Maissorten bestimmt (Abb. 4). Da die relative Luftfeuchte eine Funktion der Temperatur ist, wurden die Sorptionsisothermen für typische in Ghana auftretende Tages- (35°C, rot in Abb. 9), Nacht- (20°C, blau) und Tagesmitteltemperaturen (27 °C, nicht gezeigt) bestimmt. Wir beobachteten eine Sortenabhängigkeit der Sorptionsisothermen. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen der Maissorte mit dem der Sack befüllt wird und der gemessenen relativen Luftfeuchte bei gleicher Kornfeuchte. Die Gleichgewichtsluftfeuchte in räumlicher Nähe zu Körnermais mit einer Kornfeuchte von 13 % schwankte in Abhängigkeit von der Sorte um ca. 12 %. Eine Detektion der relativen Luftfeuchte <70% würde für alle Sorten und Temperaturen zwischen 20 und 35 °C Sicherheit schaffen, dass die Getreidefeuchte von Mais unter 13% liegt, und bei hermetischer Lagerung keine Fermentation auftritt (7).

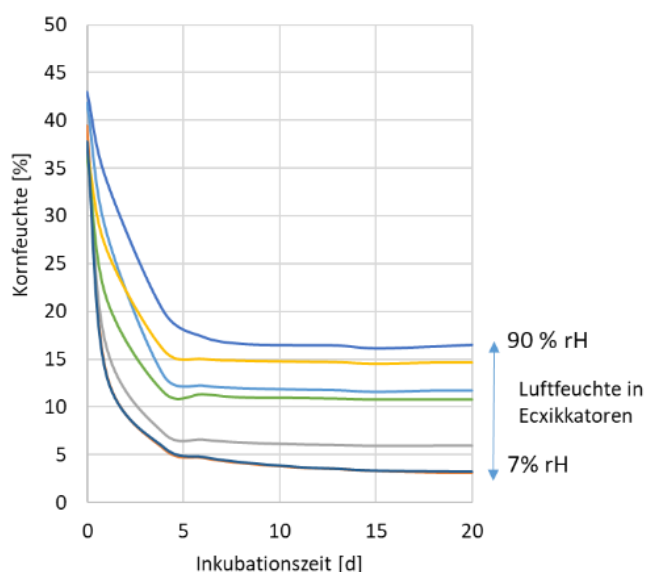


Abb. 3 Zeit bis zur Einstellung des Gleichgewichtszustands zwischen Getreidefeuchte und der Umgebungsluft. Die Abbildung zeigt die tägliche Änderung in der Kornfeuchte in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte unter denen der Körnermais gelagert wurde. Mais mit hoher Getreidefeuchte wurde bei konstanter relativer Luftfeuchtigkeit über 20 Tage gelagert. Neun verschiedene relative Luftfeuchtigkeitswerte wurden gemessen (siehe Methodik). Eine schnelle Einstellung der Getreidefeuchte findet in den ersten 5 Tagen statt. Das Kornfeuchte-Luftfeuchte Equilibrium stellte sich nach spätestens 16 Tagen ein.

Dies zeigt, dass sich das Gleichgewicht zwischen Kornfeuchte und der relativen Luftfeuchtigkeit über Tage einstellt. Damit ist es unabhängig von üblichen Schwankungen die beim Verladen oder dem Transport von Mais auftreten. Außerdem ist es weitgehend unabhängig von Tagesschwankungen.

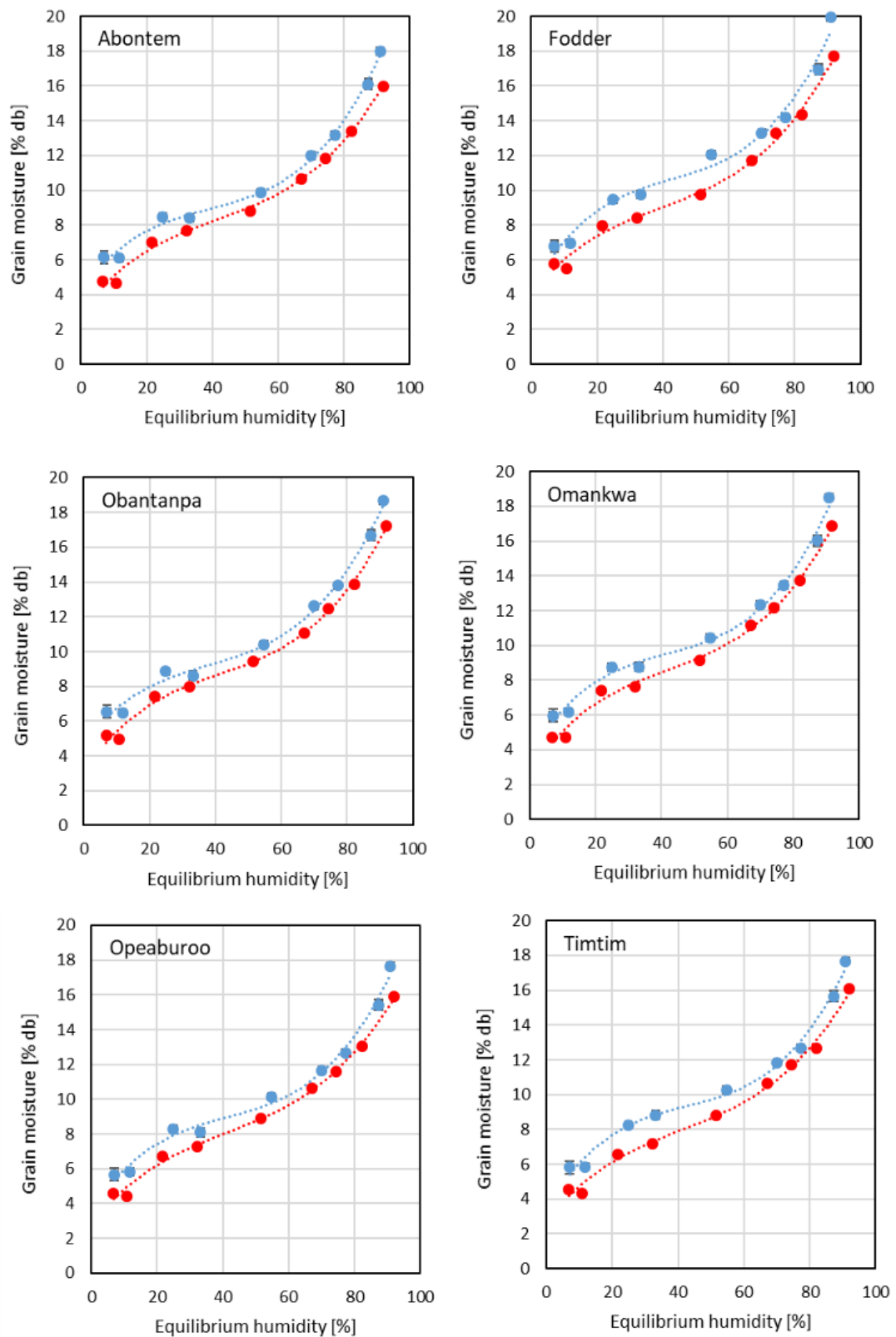


Abb. 4 Die Sorptionsisothermen für verschiedene Kultivare. Messungen für 20°C (blau) und 35°C (rot) für Körnermais der 5 ghanaischen Sorten (Abontem, Obantanpa, Omankwa, Opeaburoo, Timtim) und einer Futtermaismischung (Fodder) aus Deutschland. Die Datenpunkte zeigen den Mittelwert von 3 Messwiederholungen.

Um die Ursachen besser zu verstehen, führten wir eine Futtermittelanalyse an den verschiedenen Maissorten durch. Hier zeigte sich ein klarer Zusammenhang zwischen dem Stärkegehalt des Körnermais in der Trockenmasse und der Gleichgewichtsluftfeuchte in der Umgebungsluft von Mais mit 13 % Kornfeuchte (Abb. 5). Dass die Sortenabhängigkeit der Gleichgewichtsluftfeuchte durch den Stärkegehalt erklärt werden kann, legt weiterhin nahe, dass ähnliche Schwankungen wohl auch innerhalb einer Maissorte auftreten können, je nachdem wie die Anbaubedingungen innerhalb eines Erntezyklus die innere Qualität des Ernteguts beeinflusste. Eine Bestimmung der Einflussfaktoren auf die Erntequalität und den Stärkegehalt in Feldversuchen wäre dafür notwendig.

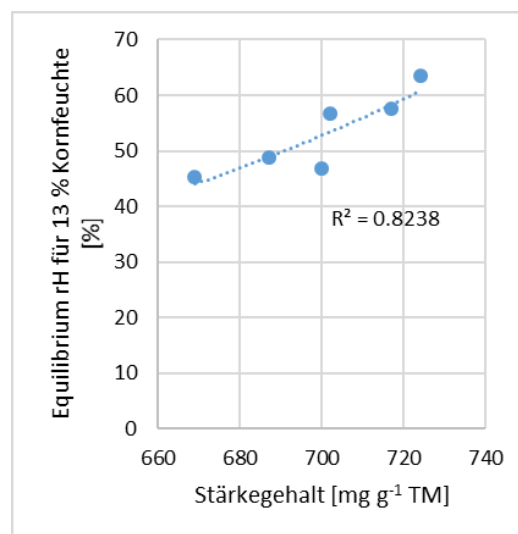


Abb. 5 Die Gleichgewichtsfeuchte hängt vom Stärkegehalt ab. Gleichgewichtsfeuchte (%) bei 27°C und 13 % Kornfeuchte in Abhängigkeit vom Stärkegehalt in der Trockenmasse. Jeder Datenpunkt entspricht dem Mittelwert einer Maissorte (s. Abb. 4).

TEMPERATUR UND GASVERTEILUNG IN HERMETISCHEN SÄCKEN

Die einfachste Messstrategie ist, die relative Luftfeuchte an der Innenseite des hermetischen Sacks zu messen, anstatt in der Mitte des Sacks. Bei Temperaturfluktuationen in der Umgebung ändern die äußeren Getreideschichten und die das Getreide umgebende Luft zuerst die Temperatur. Damit ändert sich auch die relative Luftfeuchtigkeit, bevor das Gleichgewicht zwischen Getreidefeuchte und Luftfeuchtigkeit sich wieder einstellen kann. Die Diffusion der Luft aus den tieferen Schichten im Sack wirkt diesem Effekt entgegen.

Um einen fälschlichen Rückschluss von der Luftfeuchte auf die Getreidefeuchte auszuschließen, wurde ein mit Körnermais befüllter hermetischer Sack an unterschiedlichen Stellen mit Temperatur- und Luftfeuchtesensoren ausgestattet und gelagert (Abb. 5). In diesen Untersuchungen zeigte sich, dass sich nur sehr geringe vertikale Temperatur- und Feuchtegradienten im Sack einstellten. Es konnte ein mittlerer vertikaler Luftfeuchtegradient von 1.3 % (max. 2.5 %) während der Lagerung beobachtet werden. Dies liegt innerhalb der Messungenauigkeit und kann daher vernachlässigt werden. Für die Temperatur stellte sich ein mittlerer vertikaler Unterschied von 1.4 °C ein (max. 2.6 °C). Auch dies ist als gering einzuschätzen.

Der Vergleich des vertikalen Feuchtegradienten im Sack von ca. 2 % räumliche Heterogenität zeigte, dass die inneren Eigenschaften des Ernteguts wichtiger für einen Rückschluss auf die Getreidefeuchte war als die Unterschiede der Luftfeuchtigkeit innerhalb des Sacks (Position des Sensors).

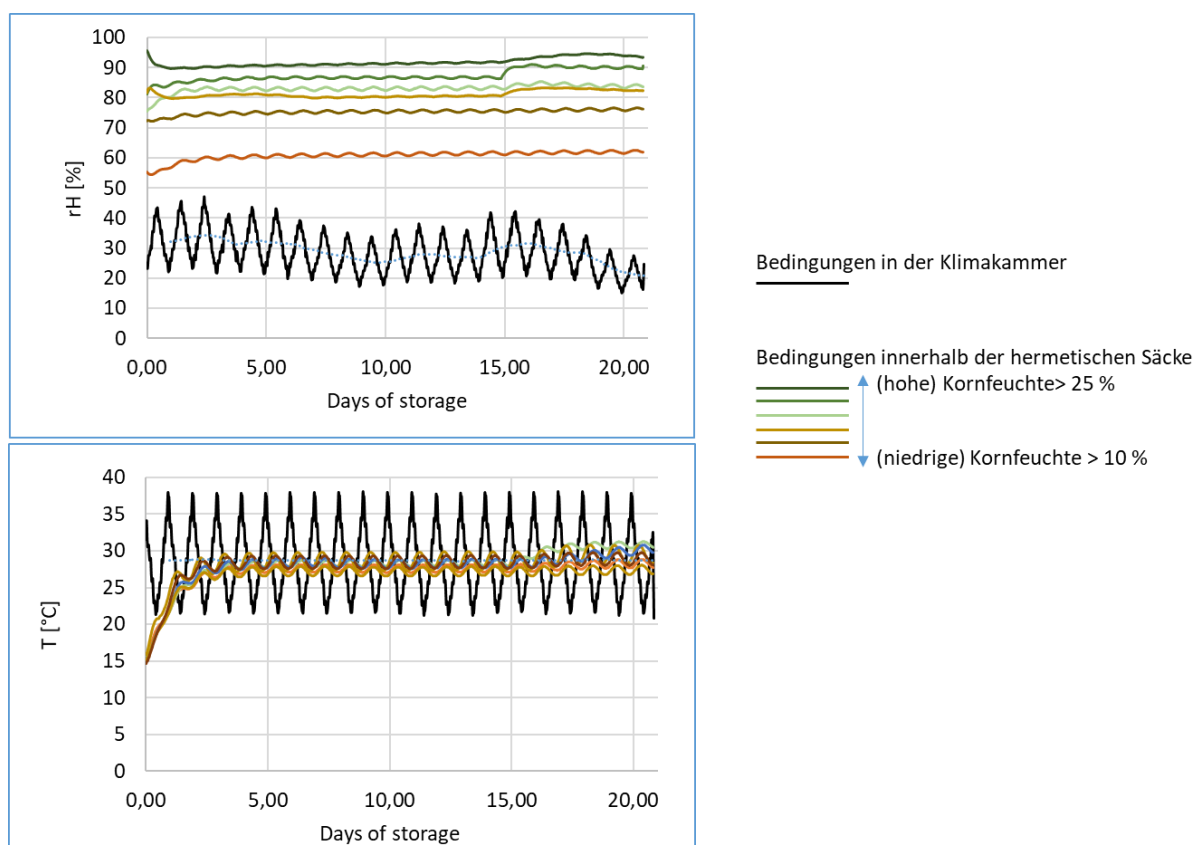


Abb. 6 Zeitlicher Verlauf der Temperatur und Luftfeuchte im hermetischen Sack im simulierten ghanaischen Klima. Die klimatischen Bedingungen innerhalb der Säcke befüllt mit Körnermais unterschiedlicher Kornfeuchten (13%, 15%, 17%, 19%, 21% und 29% von braun bis dunkelgrün), die unter Temperaturbedingungen gelagert wurden (schwarze Linien), die für ghanaische Verhältnisse typisch sind.

Um die typischen Bedingungen in Ghana zu simulieren haben wir hermetische Säcke im Klimaschrank den typischen Temperaturverläufen ausgesetzt. Säcke wurden mit Kornfeuchten von 13%, 15%, 17%, 19%, 21% und 29% befüllt (Abbildung 6). Die schwarze Linie zeigt die Temperatur im Klimaschrank an während die anderen Linien die Temperatur und rH in den Säcken mit den verschiedenen feuchten Getreiden anzeigen.

Wir konnten beobachten, dass zum einen mit steigender Kornfeuchte die Luftfeuchte erwartungsgemäß in den hermetischen Säcken anstieg und zum anderen, dass die Tagestemperaturschwankungen innerhalb des Sackes durch das Korn selbst abgepuffert/reduziert werden. Unsere Beobachtungen zeigen, dass eine mittlere Tagesstemperatur eine ausreichende Bemessungsgrundlage für Lagerbedingungen innerhalb des Sackes ist.

ENTWICKLUNG DER KOHLENSTOFFDIOXIDKONZENTRATION IN HERMETISCHEN SÄCKEN

Hermetische Säcke sollen verhindern, dass Insekten und Schimmel das Gewicht und die Qualität während der Lagerung reduzieren. Insekten, Larven, Eier und Sporen gelangen mit dem Getreide in die Säcke, in denen gelagert wird. Die Atmung von Insekten innerhalb hermetischer Säcke führt zu abnehmender Sauerstoffkonzentration und zunehmender Kohlenstoffdioxidkonzentration bis die Insekten absterben (10, 11).

Auch Schimmelpilze und das Getreide selbst haben einen Stoffwechsel, der ebenfalls zu einer Abnahme von Sauerstoff und zunehmender Konzentration von Kohlenstoffdioxid führt. Deswegen ist die Messung von Kohlenstoffdioxid dazu geeignet, die Luftdichtigkeit von hermetischen Säcken indirekt zu messen.

Wir haben Getreide von jeweils drei Dörfern aus dem Middle Belt (Adidwan, Timeabu und Amantin), dem landwirtschaftlichen Herzland von Ghana, direkt nach der Ernte von drei verschiedenen Bauern gekauft. Die Getreidefeuchte war mit $13.5\% \pm 0.32$ am oberen Ende der Empfehlungen für hermetische Lagerung ($<13\%$), entsprach jedoch dem typischen Maisangebot zur Haupterntezeit. Analog dazu haben wir Getreide von drei Dörfern aus dem Norden (Kong, Bouti und Dasima) genutzt, der zweiten wichtigen Getreideregion in Ghana. Die Getreidefeuchte des typischen Maisangebots war etwas geringer ($12.7\% \pm 0.2$). Beide Regionen liegen in unterschiedlichen agrarökologischen Zonen und Anbaumethoden, Saatgut, Schädlinge und andere Parameter sind unterschiedlich.

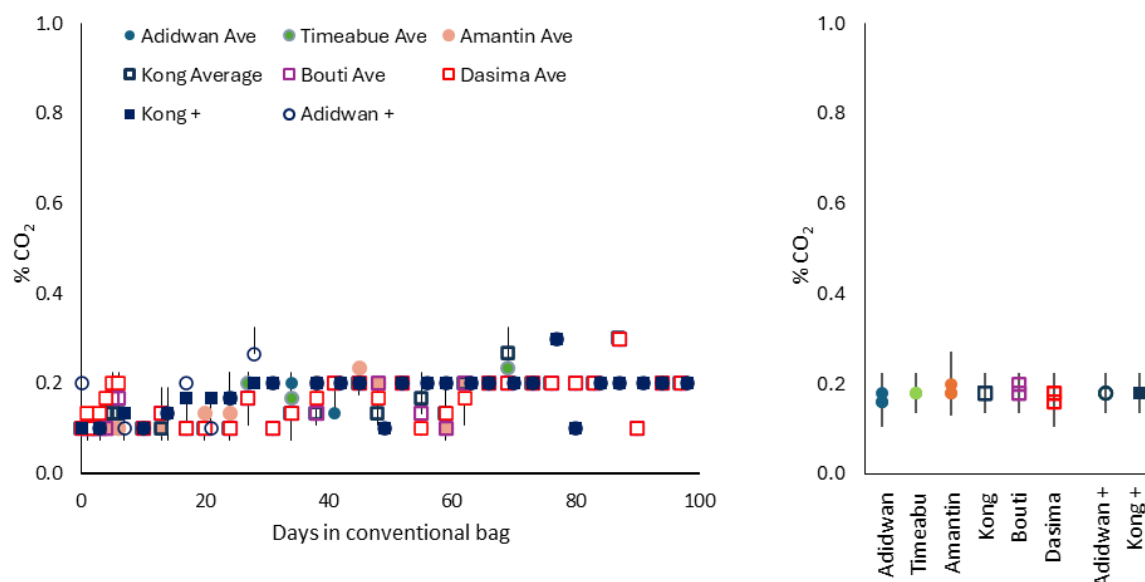


Abb. 7 Verlauf der Kohlenstoffdioxidkonzentration in herkömmlichen Säcken. Links: Durchschnittliche Kohlenstoffdioxidkonzentration von jeweils drei herkömmlichen Säcken mit Getreide aus Adidwan, Timeabu, Amantin (Middle Belt, gefüllte Kreise) und Kong, Bouti, Dasima (Norden, ungefüllte Quadrate). Getreide entsprach dem typischen Maisangebot für den jeweiligen Ort und wurde nicht behandelt. Drei zusätzlichen Säcken aus Adidwan und Kong wurden künstlich Insekten hinzugesetzt (ungefüllte Kreise und gefüllte Quadrate) Rechts: Kohlenstoffdioxidkonzentration von jedem einzelnen Sack gemessen als Durchschnitt von 5 Messpunkten vom 40. Tag nach dem Einfüllen in den jeweiligen herkömmlichen Sack.

Als Kontrollversuch wurde Getreide aus allen sechs Dörfern in jeweils drei herkömmliche, nicht-hermetische Polypropylensäcken verpackt. Die Kohlenstoffdioxidkonzentration wurde in Abständen von 3-4 Tagen gemessen. Wie erwartet, wurden keine Kohlenstoffdioxidwerte über dem Messfehler verzeichnet. Zu jeweils drei Säcken aus Adidwan und Kong wurden künstlich Insekten hinzugefügt. Auch in diesen Säcken konnte keine Veränderung der Kohlenstoffdioxidkonzentration gemessen werden. Dies weist darauf hin, dass der Luftaustausch wesentlich schneller als die Kohlenstoffdioxidproduktion durch Insekten war (Abb. 7).

Um den Verlauf von Kohlenstoffdioxid im hermetischen Sack zu messen, wurden jeweils drei Getreidesäcke aus allen sechs Dörfern in hermetische Säcke gefüllt. Ein sehr schneller Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration auf >10% konnte in den ersten 6 Tagen für die Säcke aus dem Middle Belt beobachtet werden (Abb. 8). Eine anschließende Analyse ergab tote und lebendige Maiskäfer (*Sitophilus zeamais*). Im Gegensatz dazu, zeigten alle drei Säcke aus zwei Dörfern im Norden Ghanas keinen Kohlenstoffdioxidanstieg überhalb des Messfehlers. Nur ein Dorf aus dem Norden zeigte einen hohen Kohlenstoffdioxidanstieg, auch wenn dieser langsamer war und eine geringere Endkonzentrationen erreichte. In allen Säcken aus dem Middle Belt konnten wir Insekten identifizieren. Im Gegensatz dazu konnten wir in keinem der Säcke aus dem Norden Insekten nachweisen, auch nicht in dem Getreide aus Bouti, dem Dorf im Norden, dessen Getreide einen Kohlenstoffdioxidanstieg zeigte.

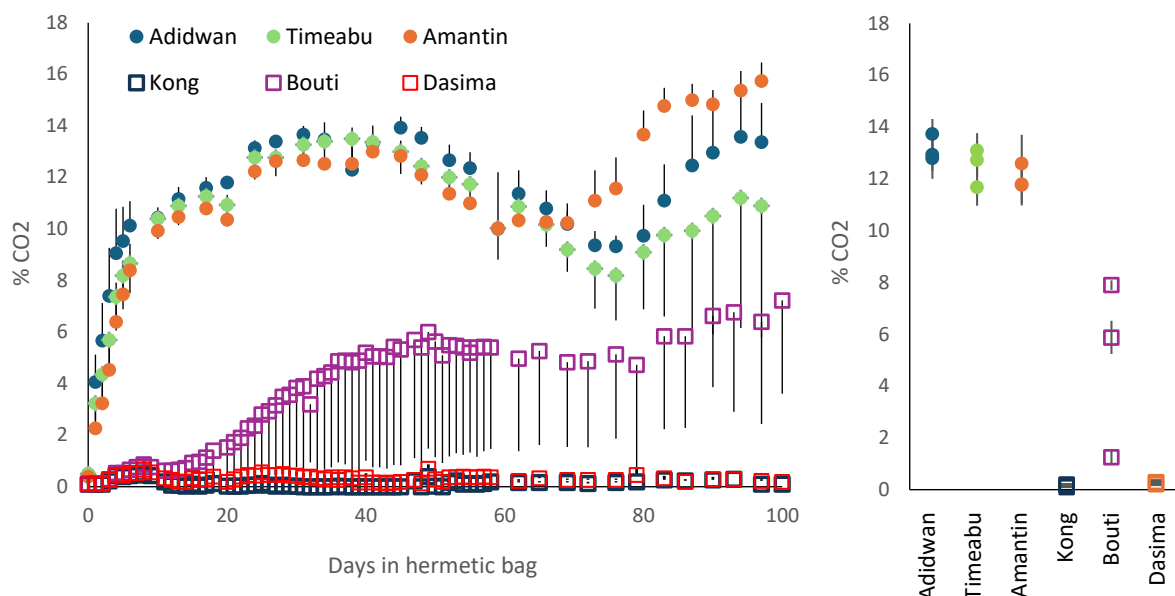


Abb.8 CO₂ Verlauf für Mais aus dem Middle Belt und aus dem Norden unter Feldbedingungen. Links: Durchschnittliche Kohlenstoffdioxidkonzentration von jeweils drei hermetischen Säcken mit Getreide aus Addiwan, Timeabu, Amantin (Middle Belt, circles) und Kong, Bouti, Dasima (Norden, Quadrate). Getreide entsprach dem typischen Maisangebot für den jeweiligen Ort und wurde nicht behandelt. Rechts: Kohlenstoffdioxidkonzentration von jedem einzelnen Sack gemessen als Durchschnitt von 5 Messpunkten vom 40. Tag nach dem Befüllen und Verschließen des jeweiligen hermetischen Sacks. Fehlerbalken in beiden Diagrammen und den nachfolgenden Darstellungen sind die Standardfehler. Die Richtungen der Fehlerbalken wurde ausschließlich für bessere Lesbarkeit gewählt.

Um zu testen, ob die Unterschiede durch die Prävalenz von Insekten zu erklären sind, haben wir Mais sterilisiert und hermetisch verpackt. Als Kontrollversuch haben wir zu sterilisiertem Mais künstlich Insekten hinzugefügt. Sterilisierte Mais aus dem Middle Belt zeigte kleine und langsame Anstiege der Kohlenstoffdioxidkonzentration (Abb. 9). In acht von neun Säcken lag die Kohlenstoffdioxidkonzentration von fünf Messungen nach Tag 40 über dem Messfehler. Die durchschnittliche Konzentration betrug $0.9\% \pm 0.6$ Kohlenstoffdioxid. Dies deutet auf den Getreidestoffwechsel oder Pilze als Quelle von Kohlenstoffdioxid hin.

Sterilisierte Mais aus dem Middle Belt dem künstlich Insekten hinzugefügt wurden, zeigte einen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration (Abb. 9). Der Anstieg war langsamer und die finale Kohlenstoffdioxidkonzentration geringer als bei Mais unter normalen Bedingungen. In allen Säcken lag die Kohlenstoffdioxidkonzentration von fünf Messungen nach Tag 40 über dem Messfehler. Die durchschnittliche Kohlenstoffdioxidkonzentration lag bei $4.9\% \pm 3.0$ Kohlenstoffdioxid. Dass der Anstieg niedriger und langsamer war als unter normalen Feldbedingungen kann dadurch erklärt werden, dass junge, adulte Insekten beigefügt wurden und diese erst nach mehreren Gestationszyklen die Kohlenstoffdioxidkonzentration verändern. Auch die Menge der Insekten im typischen Maisangebot könnte höher sein als die Anzahl der zugefügten Insekten.

Sterilisierte Mais aus dem Norden zeigte keinen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration (Abb. 10) In allen Säcken lag die Kohlenstoffdioxidkonzentration von fünf Messungen nach Tag 60 im Bereich des Messfehlers. Die durchschnittliche Kohlenstoffdioxidkonzentration betrug $0.2\% \pm 0.0$. Sterilisierte

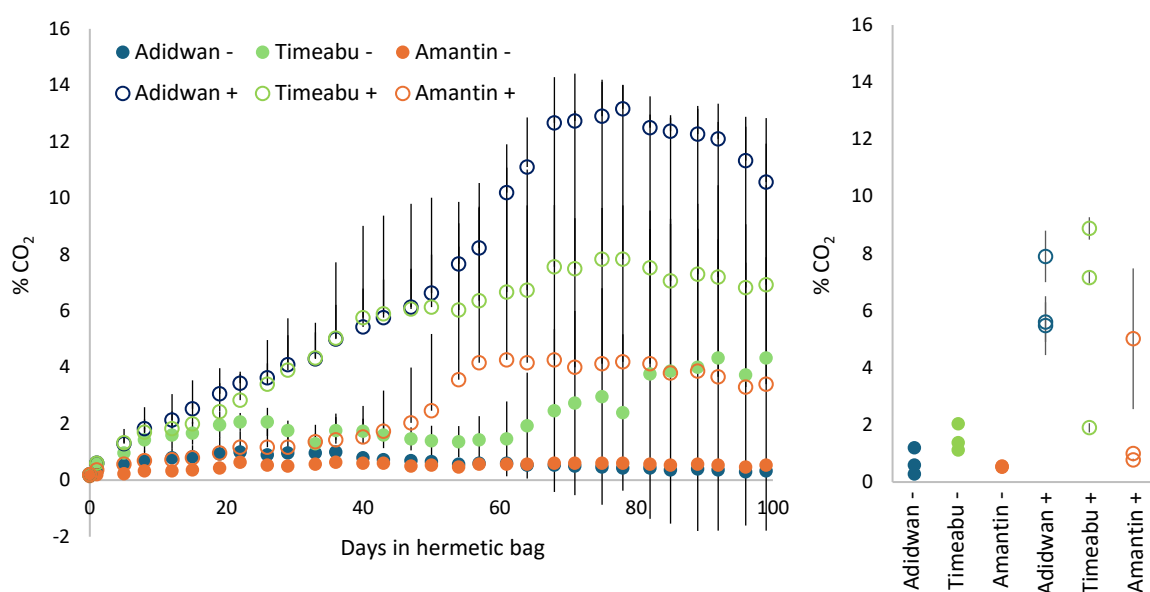


Abb. 9 Effekt von Insekten auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration für Mais aus dem Middle Belt. Links: Durchschnittliche Kohlenstoffdioxidkonzentration in den hermetischen Säcken mit sterilisiertem Mais aus dem Middle Belt (gefüllte Kreise / -). In einem parallelen Versuch wurde dem sterilisierten Mais künstlich lebende Insekten hinzugefügt (leere Kreise / +). Rechts: Kohlenstoffdioxidkonzentration von jedem einzelnen Sack gemessen als Durchschnitt von 5 Messpunkten vom 40. Tag nach dem Verschließen des jeweiligen hermetischen Sacks.

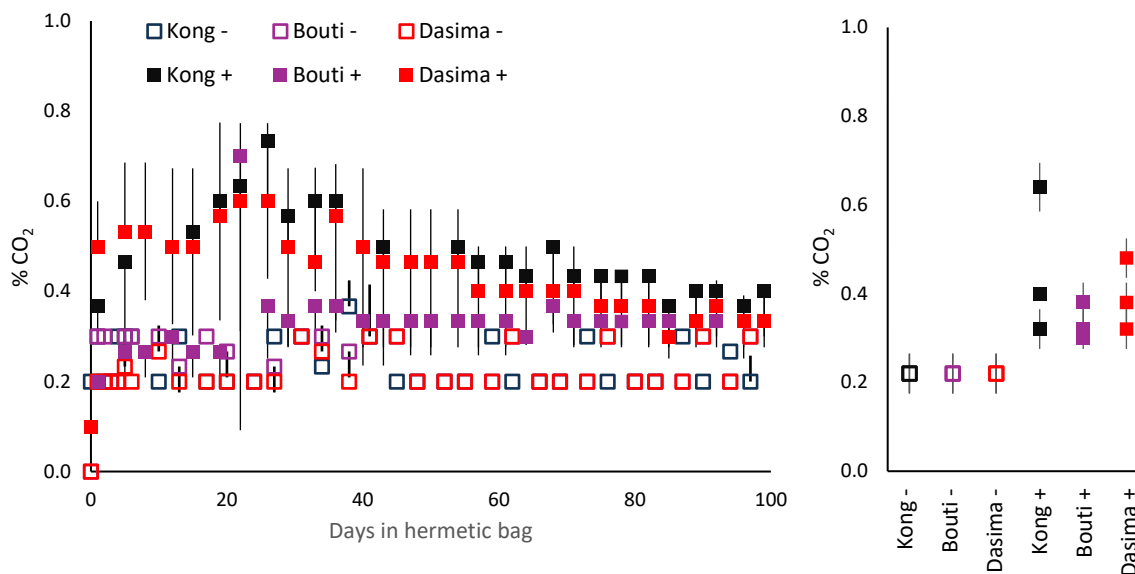


Abb. 10 Effekt von Insekten auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration für Mais aus dem Norden. Analog zur vorherigen Abbildung. Links: Durchschnittliche Kohlenstoffdioxidkonzentration in den hermetischen Säcken mit sterilisiertem Mais aus dem Norden (leere Quadrate / -). In einem parallelen Versuch wurde dem sterilisierten Mais künstlich lebende Insekten hinzugefügt (gefüllte Quadrate / +). Rechts: Kohlenstoffdioxidkonzentration von jedem einzelnen Sack gemessen als Durchschnitt von 5 Messpunkten vom 40. Tag nach dem Verschließen des jeweiligen hermetischen Sacks. Für jedes Dorf wurden drei Säcke gemessen, die Messpunkte liegen häufig übereinander.

Mais aus dem Norden, dem Insekten beigelegt wurden, zeigte einen geringen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration für alle Säcke. Der Durchschnitt lag bei $0.4\% \pm 0.1$. Diese Ergebnisse deuten auf Unterschiede zwischen dem Mais aus dem Norden und dem Middle Belt hin. Ein

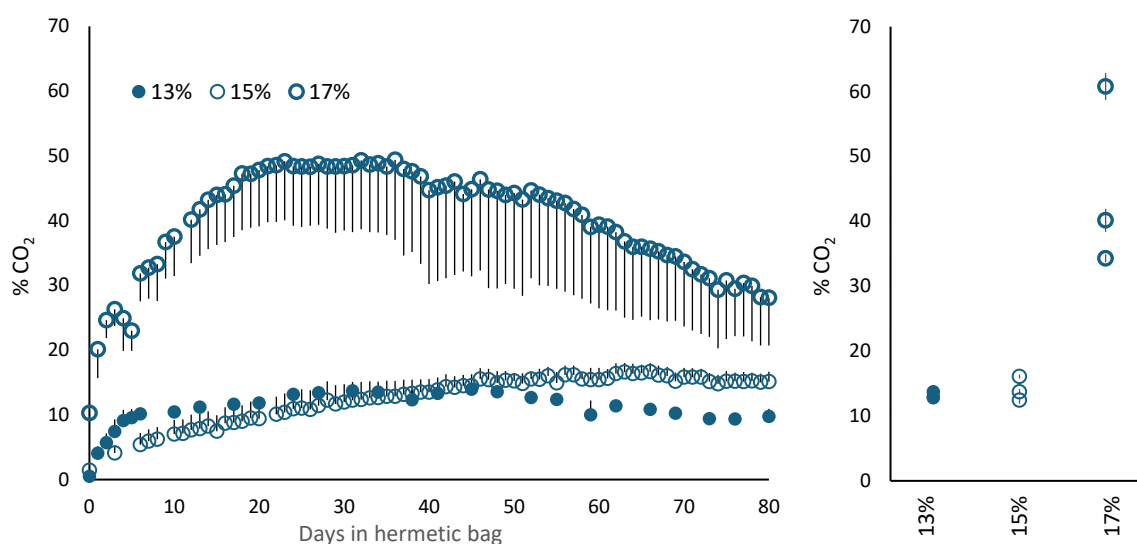


Abb. 11 Entwicklung der Kohlenstoffdioxidkonzentration in Säcken mit unterschiedlichen Getreidefeuchten. Links: Drei Säcke mit typischen Mais aus Adidwan mit einer Getreidefeuchte von ca. 13% (gefüllte Kreise). Wird diese künstlich auf 15% erhöht findet ein ähnlicher Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration statt (offene Kreise). Bei Getreidefeuchten von 17% gibt es einen wesentlich schnelleren und höheren Anstieg (offene fette Kreise). Rechts: Kohlenstoffdioxidkonzentration von jedem einzelnen Sack gemessen als Durchschnitt von 5 Messpunkten vom 40. Tag nach dem Verschließen des jeweiligen hermetischen Sacks.

Unterschied ist die Getreidefeuchte. Mais aus dem Middle Belt hatte im Durchschnitt eine Getreidefeuchte von $13.6\% \pm 0.3$. Mais aus dem Norden dagegen war trockener ($12.6\% \pm 0.2$).

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Getreidefeuchte und der Insektenaktivität, der Schimmelaktivität und der Stoffwechselaktivität von Getreide. Um diesen Effekt zu messen, wurde Getreide aus dem Middle Belt mit $13.4\% \pm 0.3$, $14.6\% \pm 0.1$ und $17.4\% \pm 0.2$ in hermetischen Säcken gelagert. Der Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration von Getreide mit 15% Getreidefeuchte war ähnlich zu dem unbehandelten Getreide mit der typischen Feuchte um 13% (Abb. 11). Getreide mit höherer Getreidefeuchte zeigte einen deutlich schnelleren und höheren Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration. Kohlenstoffdioxidkonzentrationen $>20\%$ können nicht von Insekten oder anderen aeroben Stoffwechselprozessen stammen da stöchiometrisch Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid im Verhältnis 1:1 anfallen. Dementsprechend müssen anaerobe Prozesse z.B. Fermentation, dafür verantwortlich sein.

DETEKTION

Die Detektion der Kohlenstoffdioxidkonzentration durch die Sensoren, wurde mit der direkten Messung einer Gasprobe aus dem Sack verglichen. Das Messgerät hatte einen Messfehler von 0.2%. Die einzelnen Messungen von jeweils drei hermetischen Säcken mit unbehandeltem Getreide aus den sechs Dörfern (Middle Belt und Norden von Ghana) wurden in Konzentrationsbereiche eingeteilt. Die negativen (kein Kohlenstoffdioxid detektiert) und positiven (erhöhter Kohlenstoffdioxid detektiert) Sensormessungen wurden gezählt und als Prozent dargestellt (Abb. 12). Eine zuverlässige Detektion von erhöhtem Kohlenstoffdioxid wurde bei Konzentrationen $>0.7\%$ erzielt (100% Detektionsrate / true positives). Im Bereich zwischen 0.4 – 0.7% Kohlenstoffdioxidkonzentration kann der Sensor nicht zuverlässig erhöhte Konzentrationen anzeigen. Die Genauigkeit des Sensors in diesem Bereich kann nicht zuverlässig bestimmt werden, da die Messung der Kohlenstoffdioxidkonzentration selbst einem Fehler von 0.2% unterliegt. Im Bereich unter 0.4% wurde zuverlässig keine erhöhte Kohlenstoffdioxidkonzentration detektiert (0% false positives).

Kontrollversuche haben gezeigt, dass während nicht-hermetischer Lagerung in normalen Polypropylensäcken (siehe Abb. 5) die Kohlenstoffdioxidkonzentration nie den Grenzwert von 0.4% überschreitet. Dies zeigt, dass eine Detektion einer erhöhten Kohlenstoffdioxidkonzentration durch den Sensor in jedem Fall auf hermetische Lagerung schließen lässt (0% false positives).

Einem negativem Sensorenergebnis dagegen können drei Fälle zugrunde liegen:

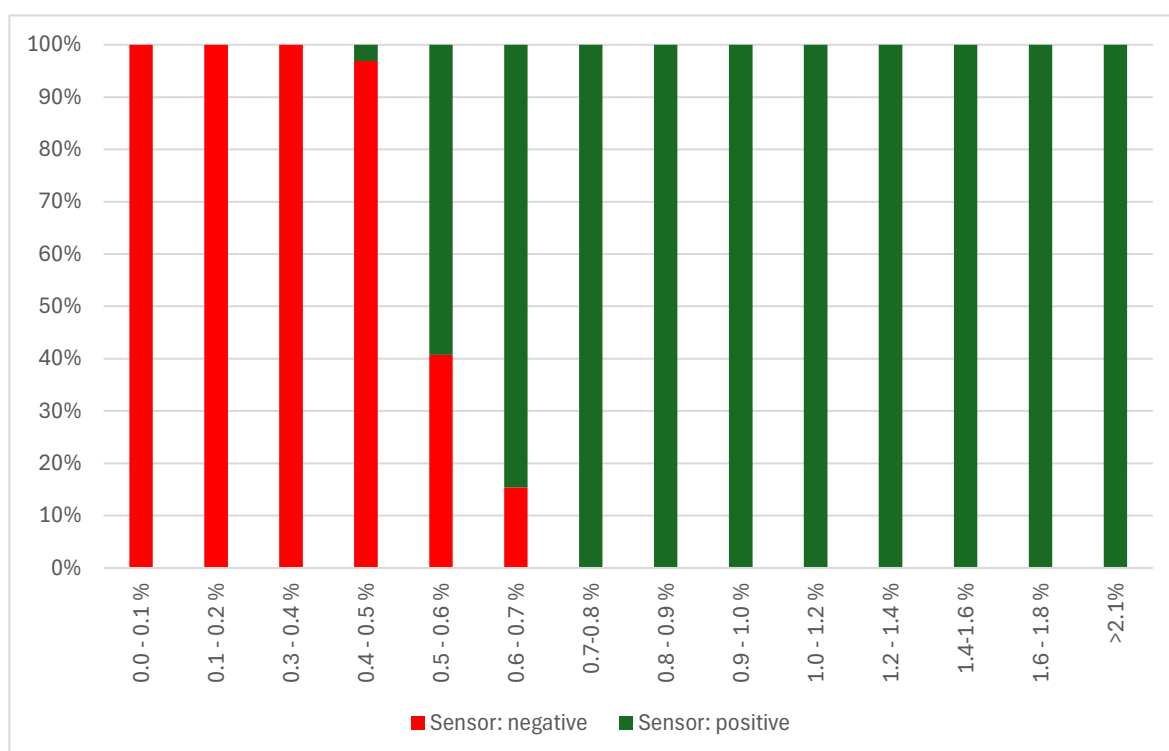


Abb. 12 Detektion der Kohlenstoffdioxidkonzentration. Alle Messdaten der Kohlenstoffdioxidkonzentration in hermetischen Säcke mit unbehandeltem Mais wurden in Konzentrationsbereiche eingeteilt. Für jeden Konzentrationsbereich wurde der Prozentsatz der negativen Sensormessungen (rot) und positiven Sensormessungen (grün) dargestellt.

1. Es liegt eine erhöhte Kohlenstoffdioxidkonzentration vor, die unter 0.7% liegt. Eine korrekte hermetische Lagerung wurde nicht erkannt (false negatives).
2. Es liegt keine erhöhte Kohlenstoffdioxidkonzentration vor, obwohl das Getreide korrekt hermetisch gelagert wurde, aber Insekten, Getreideatmung oder Schimmelaktivität waren zu gering, besonders bei Getreide aus dem Norden. Alternativ war das Getreide nicht lange genug verpackt (false negatives).
3. Es lag keine hermetische Lagerung vor (true negatives).

Für Getreide aus dem Middle Belt ergibt sich damit eine nahezu perfekte Detektion. Schon nach 24 Stunden im hermetischen Sack lagen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im markttypischen Mais aus allen 3 Dörfern signifikant über 0.7% (Abb. 13) und unterschritten diese Konzentration nicht mehr innerhalb von 100 Tagen.

Bei Getreide aus dem Norden Ghanas zeigten nach einer Woche Lagerung nur 3 von 9 Säcken eine Kohlenstoffdioxidkonzentration oberhalb des sicheren Detektionslimits. Die anderen 6 von 9 Säcken lagen zwischen 0.4 und 0.7%. Über 100 Tage ergab sich keine sicherere Detektion.

Die Detektion der Getreidefeuchte wurde mit Getreide aus dem Middle Belt und dem Norden unter normalen Feldbedingungen gemessen und mit Getreide aus dem Middle Belt, dessen Feuchte künstlich erhöht wurde (zwischen 14.5-17.5%). Der Sensor wurde ein paar Stunden nach Befüllen der hermetischen Säcke und an den anschließenden Tagen ausgelesen. Zu hohe Getreidefeuchten wurden

ab 13.8% für alle Säcke und jeden Tag erfolgreich detektiert (0% false negatives, Abb. 14). Sichere Getreidefeuchten wurden erfolgreich bei Getreidefeuchten bis 13% detektiert (0% false positives). Bei Getreide mit 13.3 und 13.4% Getreidefeuchte gab es eine 50% Detektion bis zum dritten Tag, anschließend wurde keine erhöhte Getreidefeuchte durch den Sensor angezeigt.

Wenn der Sensor eine zu hohe Getreidefeuchte anzeigt, kann

zuverlässig darauf geschlossen werden, dass die Getreidefeuchte oberhalb von 13% liegt (true positives). Zeigt der Sensor eine sichere Getreidefeuchte an, kann mit Sicherheit darauf geschlossen werden, dass die Getreidefeuchte unterhalb von 13.5% liegt.

Für Mais variieren Empfehlungen für das sichere Lagern bei Getreidefeuchten von maximal 13% - 13.5%. Unsere Experimente zeigen, dass keine Fermentation oder andere negative Qualitätsmerkmale bei Getreidefeuchten bis 13.8% auftreten. Viele verlässliche Erfahrungsberichte sind damit konsistent. Daraus ergibt sich, dass der Sensor zuverlässig sichere Getreidefeuchte anzeigt.

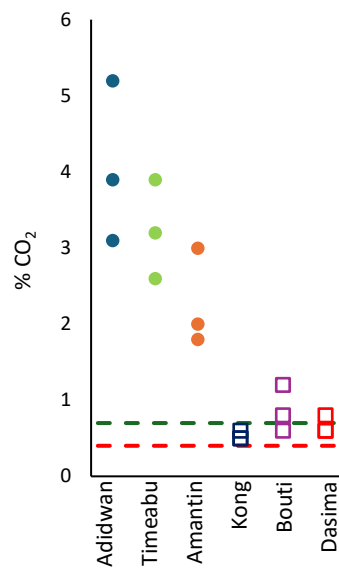


Abb. 13 Kohlenstoffdioxidkonzentration für unbehandelten Mais in hermetischen Säcken. Getreide aus dem Middle Belt (gefüllte Kreise) war nach einem Tag deutlich über dem Detektionslimit des Sensors (0.7%, gestrichelte graue Linie). Die Kohlenstoffdioxidkonzentration für Getreide aus dem Norden (offene Quadrate) lag nach einer Woche im hermetischen Sack häufig über der sicheren negativen Detektionsgrenze (gestrichelte rote Linie) aber unter der sicheren positiven Detektionsgrenze.

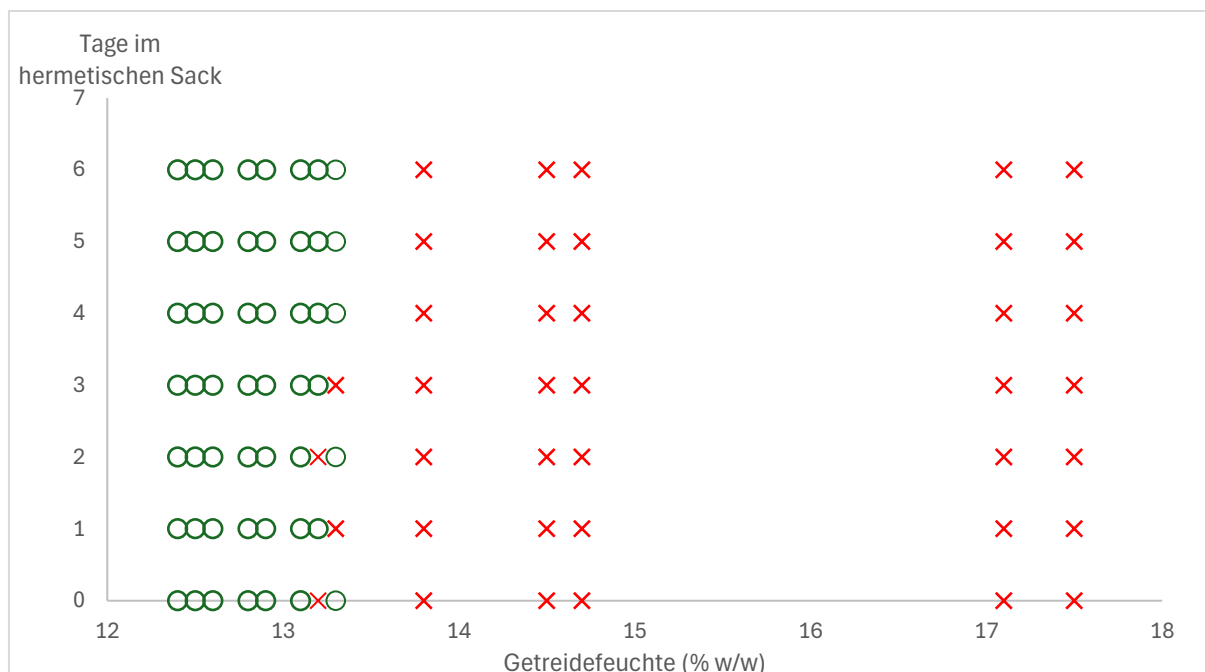


Abb. 14 Detektion der Getreidefeuchte. Unbehandeltes Getreide aus dem Middle Belt und Getreide mit künstlich erhöhter Getreidefeuchte wurden in hermetischen Säcken verpackt. An jedem Tag nach dem Verpacken wurden die Feuchtesensoren ausgelesen und positive Messungen (sichere Getreidefeuchte, grüne Kreise) und negative Messungen (Getreidefeuchte zu hoch für sichere hermetische Lagerung, rote Kreuze) wurden aufgetragen.

MARKTTEST

Wir haben durch unsere Geschäftstätigkeiten Trainings mit tausenden von Kleinbauern durchgeführt. Nach einem Training von ca. 1 Stunde können Kleinbauern und Aggregatoren hermetische Säcke fachgerecht benutzen. In einer Saison haben wir hermetisch gelagertes Getreide von 248 Bauern getestet. In lediglich zwei Fällen gab es Fehler bei der Handhabung (zu feuchtes Getreide, falsch verschlossen). Seitens der Farmer sehen wir keine Schwierigkeiten für die Einführung einer hermetischen Wertschöpfungskette.

Wir haben mit drei Getreideprozessoren in Ghana über die Herausforderungen in den Lieferketten gesprochen, besonders Qualität und Rückverfolgbarkeit wurden thematisiert. Die von uns erwarteten Herausforderungen wurden bestätigt:

1. Qualität, besonders Aflatoxin und Getreidefeuchte
2. Unsicherheit bei der Versorgung, besonders Unsicherheit bei Preis und Menge
3. Notwendigkeit von Getreidereserven, entweder als kurzfristiger Puffer oder längerfristiger Speicher

Basierend auf den Angaben haben wir unser System vorgestellt. In Ghana liegt das Hauptinteresse auf günstigem Einkauf. Prozesse und Strategie sind sehr kurzfristig ausgerichtet. Dies liegt zum Großteil daran, dass die Produkte (grobes Maismehl für Brauereien, Mehl für die Lebensmittelindustrie, Futtermittelmischungen, „Super Cereals“ für Ernährungsprogramme) feste Verkaufspreise haben



Abb. 15 Trainings mit Kleinbauern zeigen Interesse an hermetischen Säcken und ein klares Verständnis für Nachernteverluste während der Lagerung. Kleinbauern sind in der Lage nach einem kurzen Training hermetische Säcke korrekt zu nutzen.

(Preisfestschreibung auf ein Jahr oder länger). Da die Hauptkosten der Einkauf von Getreide und Hülsenfrüchte sind, lassen sich höhere Margen nur durch günstigeren Einkauf erreichen. Andere Strategien (Steigerung des Volumens, Diversifizierung der Produktpalette, Positionierung im Markt), besonders solche die Investitionen benötigen, stehen nicht im Fokus. Preissensitivität war damit das wichtigste Thema. Großes Interesse bestand am Zugang zu vielen Zulieferern von hochqualitativem Getreide, wohingegen es kaum Interesse an Rückverfolgbarkeit gab.

Zwei der drei industriellen Abnehmer nutzen keine professionelle Softwarelösung für den Einkauf. Daten werden manuell aufgenommen und später an die Buchhaltung übergeben. Eine der drei abnehmenden Mühlen nutzt die Software Quickbooks für einen Teil der Einkaufsprozesse. Keine der drei Mühlen nutzt eine professionelle Softwarelösung für das Qualitätsmanagement. Daten werden manuell aufgenommen und verwahrt, jedoch nicht digital gespeichert. Damit gab es kaum Integrationsanforderungen. Da Quickbooks immer mehr Marktanteile in Ghana gewinnt, nutzen wir die Schnittstellenanforderungen für Quickbooks sowie für manuelle Exporte.

Wir haben mit Großabnehmer *AgriCare* einen Piloten gestartet. Wir haben zwei Lieferungen von jeweils 500 hermetischen Säcken genutzt, um die typischen Qualitätsmanagement- und Produktionsprozesse zu begleiten. Getreideproben von 10% der Säcke stellte sich mit hermetischen Säcken als schwieriger heraus als in herkömmlichen Säcken. Normalerweise werden Säcke nicht vom Lkw abgeladen. Proben werden durch ein Rohr entnommen, mit das durch den Sack durchgestochen wird. Die Qualitätskontrolle war aufwendiger mit hermetischen Säcken, da die Säcke zufällig ausgewählt wurden und damit auch Säcke aus den unteren Schichten abgeladen und nach dem Öffnen geprüft werden mussten. Um den Erfolg des Systems sicher zu stellen, und möglichst wenige Industrieprozesse zu ändern, können auch hermetische Säcke in Zukunft für die Qualitätskontrolle durchstochen werden. Diese sind danach zwar nicht wiederverwendbar, aber ein Verlust von 10% ist preislich nicht signifikant.

Das gelieferte Getreide stammte aus Adidwan, aus dem Middle Belt und war seit 9 Monaten gelagert. Trotzdem war die Getreidequalität hoch. Der ghanaische Maisstandard schreibt einen Maximalwert



Abb. 16 Pilotierung mit AgriCare. Links Diskussion mit dem Direktor für Einkauf (Mr. Collins, ganz links), dem technischen Direktor (Mr Tintam, Mitte), Lagerhaltungsexperten und Saving Grains. Mitte: Lagerung von hermetisch verpackten Mais im AgriCare Warenlager. Rechts: Lieferung von hermetischen Säcken an AgriCare.



von 15 ppm vor (12) während Abnehmer oft kleinere Grenzwerte von bis zu 5 ppb angeben. Aflatoxinwerte lagen in allen Proben unterhalb dieser Grenzen (3.9 ± 1.7 ppb, $n = 10$). Der höchste Messwert betrug 7 ppb. Mit einem Messfehler von 5 ppb und einem Grenzwert von 5 ppb war dies jedoch im Rahmen. Es gab keine lebenden Insekten und keinen feststellbaren Insektenschaden. Die Getreidefeuchte lag bei $<13\%$ ($12.7\% \pm 0.2\%$).

Für Produktionsprozesse gab es keine signifikanten Probleme. Der Umgang mit hermetischen Säcken ist schwieriger als der Umgang mit herkömmlichen Säcken, wirkt sich allerdings nicht in höheren Kosten aus. Das Öffnen der Säcke dauert länger, aber auch dies hat sich kostenseitig als nicht signifikant herausgestellt. Das Lagern und die Rückführung von leeren hermetischen Säcken konnte nicht getestet werden, ist aber nach Einschätzung des Produktionsteams von *AgriCare* unproblematisch.

Obwohl *AgriCare* „GMP ready“ ist (Good Manufacturing Practices) wird der Materialfluss zurzeit nicht von Einkauf bis zur Produktion erfasst. Chargen werden erst beim Verpacken für den Warenausgang erfasst. Das liegt zum einen daran, dass systemseitig die Erfassung vom Wareneingang nur für die Buchhaltung, aber nicht für die Produktion erfolgt. Es gibt kein formalisiertes System den Rohmaterialeingang, die Rohmateriallagerung und den Rohmaterialbedarf zu erfassen. Für die Buchhaltung wird wieder die Produktmenge erfasst. Es gibt gegenwärtig kaum Druck vom Markt oder den Regierungsbehörden, dies zu ändern. Das heißt, dass die Transparenz, die durch unsere Lösung geschaffen wird, ausschließlich für interne Qualitätssysteme relevant ist, aber noch keine Vorteile bei Compliance oder Kundenanforderungen bietet.

INTERPRETATION

Wir haben hier gezeigt, dass ein kostengünstiges Qualitätssystem Fortschritte in der ghanaischen Getreidewertschöpfungskette erzielen kann weil dies den Handel mit geschlossenen hermetischen Säcken ermöglicht. Dabei profitieren alle Teilnehmer der Wertschöpfungskette. Kleinbauern können ihr Getreide ohne Qualitäts- oder Ernteverluste lagern. Aggregatoren und Händler können Getreide in verschlossenen hermetischen Säcken kaufen, da die optische Qualitätsmerkmale durch den Sack hindurch sichtbar sind und Fermentation durch zu hohe Getreidefeuchte oder fehlerhafte hermetische Lagerung durch das Auslesen der Sensoren ausgeschlossen werden kann. Die Lebensmittelindustrie profitiert zurzeit primär von der besseren Getreidequalität, besonders spät nach der Ernte wenn die durchschnittliche Getreidequalität abnimmt. Darüber hinaus sind die Daten die beim Auslesen der Sensoren gesammelt werden prinzipiell wertvoll. In der Wertschöpfungskette werden hermetische Säcke an von Bauern über eine Kette von Händlern an die Industrie verkauft, und bei jedem dieser Käufe werden Daten generiert, die von industriellen Käufern genutzt werden können, um gezielt Händler zu kontaktieren die eine relevante Menge an Getreide mit guter Qualität haben. Zusammen mit einem Preisfindungsmodell wie bei einem virtuellen Marktplatz, würde dies einen großen Beitrag zur Strukturierung der Wertschöpfungskette leisten und die Versorgungssicherheit der Industrie erhöhen.

Damit haben wir in diesem Projekt die Grundlage für eine hermetische Lieferkette vom Kleinbauern bis zur Industrie geschaffen.

GETREIDEEIGENSCHAFTEN & LAGERUNG IN HERMETISCHEN SÄCKEN

In vielen Studien wurde belegt, dass hermetische Säcke Nachernteverluste und Qualitätsverluste während der Lagerung eliminieren. Das Hauptrisiko ist, dass feuchtes Getreide (bei Mais ab ca. 13.7%) unter Luftabschluss fermentiert. In diesem Fall führt das zu einem Totalverlust des Getreides. In unserem Ansatz messen die Sensoren die Luftfeuchte in den äußeren Schichten des hermetischen Sacks. Wir haben die Beziehung zwischen der Luftfeuchte und der Getreidefeuchte für verschiedene in Ghana vorkommenden Sorten gemessen. Wir konnten Unterschiede zwischen den verschiedenen in Ghana gängigen Maissorten feststellen. Die Unterschiede in den Sorptionseigenschaften korrelierten mit dem Stärkegehalt des Mais. Trotz der Sortenunterschiede und der Temperaturabhängigkeit zeigen wir, dass eine Gleichgewichtsluftfeuchte von <70% auf eine sichere Getreidefeuchte schließen lässt.

Die Messung der Luftfeuchte innerhalb des Sacks findet nahe der Oberfläche statt. Bei sinkender Temperatur kühlt die Luft in den äußeren Schichten der hermetischen Säcke schneller ab als der Mais.

Dann ist die Luftfeuchte nicht im Gleichgewicht mit dem Getreide und die Luftfeuchte steigt. Wir konnten zeigen, dass dieser Effekt nicht zu Messfehlern führt und vernachlässigbar ist. Wir folgern daraus, dass eine Messung der relativen Luftfeuchtigkeit <70% in der äußersten Schicht von hermetischen Säcken, unter in Ghana typischen Bedingungen, auf eine sichere Getreidefeuchte für die hermetische Lagerung von Mais hinweist.

DIE KOHLENSTOFFDIOXIDKONZENTRATION IN HERMETISCHEN SÄCKEN

Wir haben die Kohlenstoffdioxidkonzentration nach Befüllen von hermetischen Säcken mit Mais aus den zwei agrarökologischen Regionen Ghanas, dem Middle Belt und dem Norden, unter typischen Lagerungsbedingungen gemessen. Wir haben ein sehr unerwartetes Ergebnis erhalten. Während Mais aus dem Middle Belt einen schnellen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration zeigt, ist dies nicht der Fall für Mais aus dem Norden. Dort zeigt nur ein Drittel der Säcke einen Anstieg. Dies ließ sich nicht auf die Abwesenheit von Insekten im Mais aus dem Norden zurückzuführen. Denn sterilisierter Mais aus dem Norden, dem wir künstlich Insekten hinzugefügt haben, zeigte auch keinen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration. Dies stand im Kontrast zu Mais aus dem Middle Belt, wo unter gleicher Behandlung die Kohlenstoffdioxidkonzentration anstieg. Interessanterweise stieg bei sterilisiertem Mais aus dem Middle Belt die Kohlenstoffdioxidkonzentration leicht an, sogar ohne Zusatz von Insekten. Dies deutet darauf hin, dass das Kohlenstoffdioxid aus dem Getreidestoffwechsel oder von der Aktivität von Schimmelpilzen stammt.

Der Grund für den ausbleibenden Kohlenstoffdioxidanstieg auch nach dem Zusatz von Insekten für den Mais aus dem Norden kann nicht durch eine zu geringe Getreidefeuchte erklärt werden. Die Getreidefeuchte lag zwischen 12.0 – 13.3% ($\bar{\varnothing}$ 12.6 \pm 0.4%) und ist damit nicht zu trocken für einen typischen Insektenbefall. Pestizide können als Erklärung auch ausgeschlossen werden, da nach der Ernte der Mais nicht mit Pestiziden behandelt wurde. Vor der Ernte wurden auch keine Pestizide verwendet, wobei in einem Fall dies nicht ganz ausgeschlossen werden konnte. Eine mögliche Erklärung ist eine hohe Insektenresistenz des Maiskultivars. In allen drei Fällen handelte es sich um gelben Mais aus hybriden Saatgut von Pioneer. Dies war nicht der Fall für den Mais der den erwarteten Kohlenstoffdioxidanstieg zeigte. Hybrides Pioneer Saatgut hat nur einen Marktanteil von ca. 20% und auch im Norden Ghanas ist der Marktanteil klein. Damit ist der Mais aus dem Norden nicht repräsentativ. Weitere Experimente sind notwendig, um zu beweisen, dass der ausbleibende Anstieg der Kohlenstoffdioxid auf die Resistenz des Maiskultivars zurückzuführen ist, wie weit resistente Sorten verbreitet sind und ob die bessere Lagerungsfähigkeit etwaige Vorteile von weniger resistenten Maissorten kompensiert. Für uns bedeutet ein ausbleibender Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration, dass Säcke fälschlicherweise als nicht-hermetisch betrachtet werden.

ZUVERLÄSSIGKEIT DES QUALITÄTSMESSSYSTEMS UND MARKTEINFÜHRUNG

Unser Messsystem zeigt zuverlässig, wenn auch leicht konservativ, die sichere Getreidefeuchte für hermetische Lagerung an. Auch die Kohlenstoffdioxidkonzentration wird sehr zuverlässig angezeigt. Das System würde 2/3 von Getreide aus dem Norden als nicht hermetisch bewerten. Dies wäre kein



Problem für *AgriCare* und mehrere Futtermittelhersteller aus dem Middle Belt, da diese hauptsächlich Getreide aus dem Middle Belt beziehen. Weitere Experimente sind notwendig, um zu etablieren, ob es noch weitere Maissorten oder sonstige Umstände gibt unter denen Mais in hermetischen Säcken kein Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration zeigt. Erste Messungen für Mais aus den Getreideregionen in Kenia (Western Kenia, Nyanza, Rift, nicht gezeigt) zeigen keine solchen Fällen bei dem ein Anstieg auf über 0.7% innerhalb von einer Woche ausblieb.

AgriCare hat Interesse an weiteren Lieferungen von hermetisch verpacktem Mais geäußert. Es gibt zudem Interesse von einer weiteren Getreidemühle. Wir haben mehrere Tausend Farmer zur Nutzung hermetischer Säcken trainiert. Allerdings streben wir noch keine größere Markteinführung an, da wir zunächst Erfahrung mit dem System im kleineren Maßstab sammeln wollen und die vermutete Insektenresistenz von Pioneer Mais aus dem Norden besser verstehen möchten.

AUSBLICK

Wir planen die Insektenresistenz von dem gängigen Maissaatgut in Ghana systematisch zu untersuchen. Außerdem werden wir in Kenia weiter Proben nehmen, um Insektenresistenz auszuschließen.

Wir haben für Ghana und Kenia jeweils 65 000 hermetische Säcke bezogen. Wir planen in den Gegenden, wo wir arbeiten, Kleinbauern zu hermetischer Lagerung zu trainieren, hermetische Säcke für die Eigenlagerung zur Verfügung zu stellen. Dies erlaubt es uns, große Mengen an industrielle Abnehmer über unser System zu liefern.

In Ghana werden wir weiterhin Erfahrung mit *AgriCare* sammeln. Für das nächste Jahr suchen wir in Ghana und Kenia nach zwei bis drei industrielle Kunden, die bereit sind, für das System zu zahlen. Die Kosten sind mit 1.0-1.5% des Getreidewertes moderat.

Wir planen, das Qualitätsmesssystem auch auf andere landwirtschaftliche Erzeugnisse auszuweiten. Der Maissektor ist sehr preissensitiv. Rückverfolgbarkeit und Qualität sind für höherpreisigen landwirtschaftlichen Erzeugnisse wichtiger, die prozentualen Kosten geringer und die Zahlungsbereitschaft höher. Allerdings sind die Anbauflächen, die Ausweitung der Anbauflächen und die Ausmaße der Nachernteverluste für diese Erzeugnisse auch geringer. Wir planen die Wertschöpfungsketten für Hülsenfrüchte und Tee in Kenia, Erdnüsse und Sheanuskerne in Ghana zu analysieren, und erste Versuche für das kommende Jahr zu starten.

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

WISSENSCHAFTLICHE PUBLIKATIONEN

Ein Manuskript zu den gemessenen Getreideeigenschaften wurde bei dem Journal ‚Frontiers in Plant Science‘ eingereicht. Es trägt den Arbeitstitel:

‚The cultivar dependency of maize sorption isotherms is explained by inner quality traits of the grains‘

Ein zweites Manuskript zu Getreidefeuchte, Quellen von Kohlenstoffdioxid und der Kohlenstoffdioxidkonzentration in hermetischen Säcken ist in Vorbereitung.

Ein drittes Manuskript zu Getreidefeuchte, Insektenbefall und Aflatoxinkonzentration ist geplant.

KONFERENZEN

Vorläufige Daten und Analysen zur Kohlenstoffdioxidkonzentration in hermetischen Säcken wurde auf der „All Africa Post Harvest Congress And Exhibition“ in Addis Abeba vorgestellt.

WORKSHOPS

Die Ergebnisse und Potentiale des Messsystems und einer hermetischen Lieferkette wurden auf zwei Workshops diskutiert. Zu diesen Workshops wurden Vertreter von den relevanten Stakeholdergruppen eingeladen und in gemischten Gruppen diskutiert. Vertreter der folgenden Gruppen haben teilgenommen:

- Bauern & Kooperativen
- Aggregatoren & Händler
- Getreidemühlen & Futtermittelhersteller
- Banken
- Agrodealers (Geschäfte für landwirtschaftliche Produktionsmittel),
- Akademie
- GIZ
- Landwirtschaftsministerium

Die Workshops haben in Tamale, Ghana am 13.10.2024 und in Bungoma, Kenya am 23.10.2024 stattgefunden.

LITERATURVERZEICHNIS

1. World Bank. "Missing Food : The Case of Postharvest Grain Losses in Sub-Saharan Africa." Text/HTML, January 26, 2021. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/358461468194348132/Missing-food-the-case-of-postharvest-grain-losses-in-Sub-Saharan-Africa>.
2. Kumar, Deepak, and Prasanta Kalita. "Reducing Postharvest Losses during Storage of Grain Crops to Strengthen Food Security in Developing Countries." *Foods* 6, no. 1 (January 2017): 8. <https://doi.org/10.3390/foods6010008>.
3. Tefera, Tadele. "Post-Harvest Losses in African Maize in the Face of Increasing Food Shortage." *Food Security* 4, no. 2 (June 1, 2012): 267–77. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0182-3>.
4. Lombard, Martani J. "Mycotoxin Exposure and Infant and Young Child Growth in Africa: What Do We Know?" *Annals of Nutrition and Metabolism* 64, no. Suppl. 2 (October 22, 2014): 42–52. <https://doi.org/10.1159/000365126>.
5. Nadia Scialabba. *Food Wastage Footprint & Climate Change*. Rome, Italy: FAO, 2015. <http://www.fao.org/documents/card/en/c/7338e109-45e8-42da-92f3-ceb8d92002b0/>.
6. Akudugu, Mamudu, Chris Garforth, and Peter Dorward. "Improvement in Crop Production in Ghana: Is It Due to Area Expansion or Increased Productivity?" *Developing Country Studies* 3 (01 2013): 176–86. https://www.researchgate.net/publication/235751737_Improvement_in_Crop_Production_in_Ghana_Is_it_due_to_Area_Expansion_or_Increased_Productivity.
7. Abadia, Bernadette, and Ricardo Bartosik. "Determination of Safe Storage Moisture Content of Commercial Maize (*Zea Mays*) Seeds during Hermetic Storage." *Proceedings of the 12th International Working Conference on Stored Product Protection (IWCSPP) : In Berlin, Germany, October 7-11, 2018 ; Volume 2, 2018*, 611–18. <https://doi.org/10.5073/jka.2018.463.132>.
8. ISO. "ISO 712-1:2024." Accessed June 18, 2025. <https://www.iso.org/standard/85395.html>.
9. Wolf, W., W. E. L. Spiess, and G. Jung. "Standardization of Isotherm Measurements (Cost-Project 90 and 90 BIS)." In *Properties of Water in Foods: In Relation to Quality and Stability*, edited by D. Simatos and J. L. Multon, 661–79. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5103-7_40.
10. Mutambuki, Kimondo, Hippolyte Affognon, Paddy Likhayo, and Dieudonne Baributsa. "Evaluation of Purdue Improved Crop Storage Triple Layer Hermetic Storage Bag against *Prostephanus Truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) and *Sitophilus Zeamais* (Motsch.) (Coleoptera: Curculionidae)." *Insects* 10, no. 7 (July 2019): 204. <https://doi.org/10.3390/insects10070204>.
11. Chigoverah, A A, and B M Mvumi. "Comparative Efficacy of Four Hermetic Bag Brands Against *Prostephanus Truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae) in Stored Maize Grain." *Journal of Economic Entomology* 111, no. 5 (September 26, 2018): 2467–75. <https://doi.org/10.1093/jee/toy217>.
12. Ghana Standards Authority. "2021 Catalogues of Ghana Standards," August 6, 2018. <http://services.gsa.gov.gh/SC>.